



ACTAS DEL SIMPOSIO DE ROBÓTICA, BIOINGENIERÍA Y VISIÓN POR COMPUTADOR



**Universidad de Extremadura.
Escuela de Ingenierías industriales
Badajoz, 29 a 31 de mayo de 2024**



SIMPOSIO DE ROBÓTICA, BIOINGENIERÍA Y VISIÓN POR COMPUTADOR

Actas

Badajoz, 29-31 de Mayo de 2024



Cáceres, 2024

Actas de Simposio de Robótica, Bioingeniería y Visión por Computador
Badajoz, 29-31 de Mayo de 2024

Editores: Santiago Salamanca Miño
Emiliano Pérez Hernández
Patricia Arroyo Muñoz
Antonio J. Calderón Godoy
Isaías González Pérez
Jesús Lozano Rogado
Pilar Merchán García
José Ignacio Suárez Marcelo
Inés Tejado Balsera
Blas M. Vinagre Jara



1ª edición, 2024

Edita:
Universidad de Extremadura. Servicio de Publicaciones
Plaza de Caldereros, 2. 10003 Cáceres (España)
Tel. 927 257 041; Fax 927 257 046
publicac@unex.es
<http://publicauex.unex.es/>

E- ISBN.: 978-84-9127- 262-5 (edición digital)

Imagen de la portada generada con DALL-E de OpenAI

Acceso abierto en el [Repositorio Institucional de la Universidad de Extremadura](#)

Dehesa Repositorio
Institucional



Comité Organizador

Patricia Arroyo Muñoz
Antonio J. Calderón Godoy
Isaías González Pérez
Jesús Lozano Rogado
Pilar Merchán García
Emiliano Pérez Hernández
Santiago Salamanca Miño
José Ignacio Suárez Marcelo
Inés Tejado Balsera
Blas M. Vinagre Jara

Comité Científico

Óscar Reinoso García	(UMH)	Robótica
Eduardo Rocon de Lima	(CSIC)	Bioingeniería
Luis Payá Castelló	(UMH)	Visión por Computador

Prefacio

Este simposio representará un punto de encuentro único para la presentación y discusión de los trabajos más recientes de los grupos temáticos de Robótica, Bioingeniería y Visión por Computador del Comité Español de Automática (CEA). Investigadores, académicos y profesionales convergerán en este espacio propicio para el intercambio de conocimientos y la exploración de colaboraciones futuras.

El escenario elegido para este evento es la Escuela de Ingenierías Industriales de la Universidad de Extremadura. Con Badajoz como telón de fondo, esta ciudad impregnada de historia y cultura, los participantes podrán disfrutar no solo de la riqueza científica-tecnológica del evento, sino también de la belleza y hospitalidad que ofrece la región de Extremadura.

El programa abarca una amplia gama de temas de los 3 grupos, sesiones paralelas, charlas plenarias, mesas redondas, presentaciones de empresas y un reconfortante programa social, proporcionando un ambiente propicio para el networking y el establecimiento de conexiones duraderas entre los participantes.

Los trabajos aceptados por los revisores de los distintos grupos temáticos han sido 25 de robótica, 16 de bioingeniería y 5 de visión por computador. Todos estos artículos son los que se encuentran recogidos en estas actas publicadas por el Servicio de Publicaciones de la UEx.

Óscar Reinoso García
Coordinador Grupo Robótica CEA

Eduardo Rocon de Lima
Coordinador Grupo Bioingeniería CEA

Luis Payá Castelló
Coordinador Grupo Visión por Computador CEA

ÍNDICE

1	Robótica	1
1.1	<i>Juan Rodríguez Huelves, Sara Carrasco Martínez, Sofía Álvarez Arias, Marcos Maroto Gómez, Fernando Alonso Martín, Álvaro Castro-González, Miguel Ángel Salichs.</i> Diseño y aplicación de dispositivos de interacción multimodal para robots sociales	1
1.2	<i>Sergio Merino Fidalgo, Celia Sánchez-Girón Coca, Eduardo Zalama, Jaime Gómez-García-Bermejo, Jaime Duque Domingo.</i> Cuidado de personas mayores mediante un robot social	7
1.3	<i>Álvaro Correa Rosón, Eduardo Zalama, Jaime Gómez-García-Bermejo, Jaime Duque Domingo.</i> Desarrollo de un sistema de diálogo para robótica social mediante ChatGPT	13
1.4	<i>Juliana Manrique Cordoba, Veronica Fuentes, Juan David Romero Ante, Jose Maria Sabater-Navarro.</i> Simulación de la cinemática inversa basada en la fórmula de producto de exponenciales: Aplicación al control articular del robot UR3e	19
1.5	<i>Manuel Jesus Reyes Capelo, Fernando Gómez Bravo, Raúl Jiménes Naharro, Rafael López de Ahumada Gutierrez.</i> Una propuesta para el análisis emocional del movimiento del robot Pepper	25
1.6	<i>Javier Monroy, P. Ojeda, J. Gonzáles Jiménez.</i> Localización de Emisiones de Metano al Aire Libre con Robótica Móvil	31
1.7	<i>Francisco José Naranjo Campos, Ainhoa De Matías Martínez, Juan G. Victores, Jose Antonio Gutierrez Dueñas, Almudena Alcaide, Carlos Balaguer.</i> Detección y manipulación de botellas con el robot móvil manipulador TIAGo	37
1.8	<i>Johnny J. Yopez-Figueroa, Juan G. Victores, Alberto Jardón, Carlos Balaguer.</i> Diseño Mecatrónico y Construcción de un Robot Móvil Omni-direccional de Tres Ruedas para Transporte de Carga en Ambientes Industriales	43
1.9	<i>Alberto Rodríguez Sanz, Santiago Martínez, Bartek Łukawski, Elisabeth Menendez, Carlos Balaguer.</i> Estereolitografía: una alternativa para la fabricación de las articulaciones de un robot	49
1.10	<i>Miriam Maximo Gutierrez, M. Ballesta, D. Valiente, E. Heredia-Aguado, O. Reinoso.</i> Localización topológica Monte Carlo basada en descripción de nubes de puntos LiDAR 3D	55
1.11	<i>Celia Redondo Verdu, Álvaro Belmonte-Baeza, José Luis Ramón, Jorge Pomares.</i> Trajectory optimization of multipod robots with docking devices	61
1.12	<i>Miguel García Gómez, Jaime Duque Domingo, Jaime Gómez-García-Bermejo, Eduardo Zalama.</i> Optimización de la teleoperación del robot Kinova Gen3 mediante realidad mixta	67
1.13	<i>Ángel Rodríguez Castaño, José Ángel Acosta Rodríguez.</i> Algoritmo de optimización híbrido para la distribución del empuje en propulsores de barcos autónomos	73
1.14	<i>Bartek Łukawski, Alberto Rodríguez Sanz, Juan G. Victores, Carlos Balaguer.</i> An open-source implementation of a force-torque sensor data acquisition device for the humanoid robot TEO	79
1.15	<i>Alberto del Cerro Sánchez, Luis Mérida-Calvo, Vicente Feliu-Batlle.</i> Control por rechazo activo de las perturbaciones de los motores de un robot móvil que presentan retardo inducido por hardware	85
1.16	<i>Claudia Sánchez Hernández, Daniel Rodríguez del Rosario, Lisbeth Karina Mena López, Concepción Alicia Monje Micharet, Susana Otero Belmar.</i> Evaluación de un sensor de deformación basado en una matriz polimérica de poliuretano termoplástico (TPU) aditivado con partículas de base carbono	91
1.17	<i>Luis Mérida-Calvo, María Isabel Haro-Olmo, Salma Benftima, Saddam Gharab, Vicente Feliu-Batlle.</i> Protocolo de navegación y reconocimiento de un sistema háptico móvil basado en antenas flexibles	97
1.18	<i>Enara Saratxaga, R. Alonso, A. Mancisidor, I. Leizea, I. Cabanes.</i> Integración de técnicas inteligentes de aprendizaje en un sistema de visión para aplicaciones de pick&place con un robot paralelo Delta	103

1.19	<i>Jesús Lozano Rogado, Ángel López Luna, Félix Meléndez Velasco, Víctor Fernández Barrena, Nohely Santamaría Miranda, Patricia Arroyo Muñoz, Fernando Díaz García, Víctor González Blanco, José Ignacio Suárez Marcelo.</i> Combinación de un brazo robótico de 6-DOF con una nariz electrónica para la discriminación automática de muestras de corcho	109
1.20	<i>Jesús de la Morena Duque, Jesús Antonio Pérez Santos, Francisco Ramos de la Flor, Andrés S. Vázquez Fernández-Pacheco.</i> Actuadores neumáticos blandos basados en hidrogeles inteligentes: avances hacia rigidez variable	115
1.21	<i>Sofía Álvarez Arias, Marcos Maroto Gómez, Sara Carrasco Martínez, José Carlos Castillo Montoya, María Malfaz, Miguel Ángel Salichs.</i> Selección automática de comportamientos mediante estrategias de Deep Reinforcement Learning en el robot social Mini	121
1.22	<i>Elisabeth Menendez, Santiago Martínez, Carlos Balaguer.</i> Selección y agarre robótico de objetos basada en el seguimiento de la mirada	127
1.23	<i>Ana Calzada García, Bartek Łukawski, Juan G. Victores, Carlos Balaguer.</i> Teleoperation of the robot TIAGo with a 3D mouse controller	133
1.24	<i>Jesús García Martínez, Javier Sevilla-Salcedo, José Carlos Castillo Montoya, Álvaro Castro-González, Miguel Ángel Salichs.</i> Estimando la región de atención mediante atención compartida en robots sociales	139
1.25	<i>Enrique Mancha Sánchez, Andrés Joaquín Serrano Balbontín, Inés Tejado Balseira, Blas M Vinagre Jara.</i> Diseño y fabricación de microrrobot propulsado por campos magnéticos y plataforma experimental	145

2 Bioingeniería 151

2.1	<i>Blas M Vinagre Jara, Inés Tejado Balseira, Andrés Joaquín Serrano Balbontín, Enrique Mancha Sánchez.</i> El advenimiento de la robótica a escalas nano y micro	151
2.2	<i>Andres Chavarrias Sanchez, David Rodriguez-Cianca, Pablo Lanillos.</i> RL-based control methodologies for exoskeletons: a summary	156
2.3	<i>Adriana Torres Pardo, C. Mummolo, D. Rodriguez-Cianca, J.A. Gómez-García, J.C. Moreno, D. Torricelli.</i> Estabilidad de la marcha: estado del arte de las métricas actuales	163
2.4	<i>Luc van Noort, Nikko Van Crey, Elliott Rouse, Ignacio Martínez-Caballero, Edwin van Asseldonk, Cristina Bayón.</i> Estudio de usabilidad de inGAIT-VSO: una órtesis de tobillo con modulación intrínseca de la rigidez para personalización de la asistencia	169
2.5	<i>Ashwin Jayakumar, J. Bermejo-García, F. Romero-Sánchez, R. Agujetas Ortiz, F.J. Alonso-Sánchez.</i> Control de un exosuit de asistencia a la marcha basado en sinergias cinemáticas mediante FIS IA	175
2.6	<i>Luis Daniel Lledo Perez, Raul Martín Batanero, Yolanda Vales Gómez, Andrea Blanco Ivorra, José María Catalán Orts, Nicolás García Aracil.</i> ROAD: Plataforma de telerehabilitación para pacientes con daño cerebral y personas mayores .	179
2.7	<i>José García Villalón, Mario Ortiz García, Paula Soriano Segura, Eduardo Iáñez, José M. Azorín Poveda.</i> Análisis de la influencia de EEGNET en una BMI basada en máquina de estados para el control de un exoesqueleto de miembro inferior	185
2.8	<i>Cristina Romero Mirete, Martín Durán Santos, Lluís Bernat Iborra, Carlos Alberto Jara Bravo, Andrés Úbeda Castellanos.</i> Estimación de fatiga muscular usando regresión lineal y HD-EMG	191
2.9	<i>Paloma Mansilla Navarro, V. Muñoz, D. Copaci, D. Blanco Rojas.</i> Desarrollo y validación de modelos para la estimación de posiciones angulares en un exotraje a partir de sensores inerciales	197

2.10	<i>Marta González García, Pablo Romero Sorozábal, Gabriel Delgado Oleas, Eduardo Rocon de Lima.</i>	
	Sistema de visión por computador para análisis de la marcha	203
2.11	<i>Jaime Duque Domingo, Raúl Gómez-Ramos, Eduardo Zalama, Jaime Gómez-García-Bermejo.</i>	
	Comportamiento de un modelo recurrente-transformador para la detección de actividades humanas mediante sensores desplegados en una vivienda	209
2.12	<i>Yolanda Vales Gómez, José María Catalán Orts, Andrea Blanco Ivorra, Raul Martín Batanero, Luis Daniel Lledo Perez, Nicolás García Aracil.</i>	
	Validación de un nuevo sistema para la evaluación de la función motora del miembro superior de pacientes con hemiparesia	215
2.13	<i>Edwin Daniel Oña Simbaña, Christian Martín Liebana, Carlos Balaguer, Alberto Jardón.</i>	
	Uso de serious games para evaluación funcional automatizada de la extremidad superior basada en escalas clínicas	223
2.14	<i>Alfonso Rafael Gordon Cabello de los Cobos, María Lorenzo Pérez, Gabriel Delgado Oleas, Pablo Romero Sorozábal, Manuel Cebrian Ramos, Eduardo Rocon de Lima.</i>	
	Integración de Inteligencia Artificial Generativa en Entornos de Realidad Virtual para la Robótica de Rehabilitación	229
2.15	<i>Lluís Bernat Iborra, Joan Francesc Alonso Lopez, Andrés Úbeda Castellanos, Mónica Marlene Martínez-Rojas.</i>	
	Framework en ROS para Decodificación Mioeléctrica mediante Aprendizaje por Demostración	233
2.16	<i>Natalia Sempere Maciá, Koralie Porcel, Vicente Morell Gimenez, Andrés Úbeda Castellanos, Carlos Alberto Jara Bravo.</i>	
	Framework para rehabilitación gamificada con robots de efector final	239
3	Visión por Computador	245
3.1	<i>Celia Sánchez-Girón Coca, Miguel García Gómez, Jaime Duque Domingo, Jaime Gómez-García-Bermejo, Eduardo Zalama.</i>	
	Detección de caídas con un robot social aplicando Visión Artificial	245
3.2	<i>Francisco-Angel Moreno, Nicolás Álvarez Romero, Javier González-Jiménez.</i>	
	Estudio de localización de una cámara sin necesidad de crear mapas 3D	251
3.3	<i>Eva Lancho Rivero, Andrea Dordio Ideas, María José Merchán García, Pilar Merchán García.</i>	
	Realidad extendida y discapacidad: Revisión bibliográfica sobre el uso de las tecnologías emergentes para el alumnado con necesidades educativas especiales	257
3.4	<i>Enrique Heredia Aguado, David Valiente García, Arturo Gil Aparicio, Miriam Máximo, Luis Paya Castello.</i>	
	Fusión estática de imágenes del espectro visible y térmico para una mejor detección de personas mediante Redes Neuronales Convolucionales: un análisis del rendimiento	263
3.5	<i>Diego Benavides, Ana Císnal, Eusebio de la Fuente, Javier Pérez Turiel.</i>	
	Modelo automático e integrable en tiempo real para la localización de herramientas de cirugía laparoscópica	269



Simposio de Robótica, Bioingeniería y Visión por Computador 2024



Sesion: <Robótica>

Diseño y aplicación de dispositivos de interacción multimodal para robots sociales

Juan Rodríguez-Huelves, Sara Carrasco-Martínez , Sofía Álvarez-Arias , Marcos Maroto-Gómez , Fernando Alonso-Martín , Álvaro Castro-González , Miguel Ángel Salichs 

Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad Carlos III de Madrid. Avenida de la Universidad, 30. Leganés, 28911. Madrid, España.

To cite this article: Rodríguez-Huelves, J., Carrasco-Martínez, S., Álvarez-Arias, S., Maroto-Gómez, M., and Salichs-Sánchez-Caballero, M.A. 2024. Design and application of multimodal interaction devices for social robots. Simposio de Robótica, Bioingeniería y Visión por Computador, 2024, 1-5. <https://doi.org/>

Resumen

La robótica social requiere de herramientas complementarias que faciliten y mejoren la interacción humano-robot. En ocasiones, una interacción directa no es posible debido a las limitaciones del usuario o de la propia situación, por lo que el desarrollo de dispositivos complementarios resulta fundamental para tratar de mejorar la experiencia de usuario. Este artículo presenta el diseño y aplicación de dispositivos de interacción multimodal para el robot Mini. Estos dispositivos, que hemos denominado *Botonera arcade* y *Colgante de interacción*, tienen el objetivo de fomentar la estimulación cognitiva y física de los usuarios haciéndoles más participes de las distintas actividades del robot, mejorando la interacción entre ambos. Por un lado, la *Botonera arcade* pretende facilitar la realización de distintos juegos incluyendo estrategias de enganche como estímulos supernormales para facilitar la interacción. Desde otro enfoque, el *Colgante de interacción* pretende actuar como un dispositivo portátil con gran ergonomía para interactuar a distancia con el robot. Las pruebas de concepto realizadas con ambos dispositivos implementados en diferentes actividades destacan la importancia del diseño tanto del hardware del dispositivo como de la usabilidad del mismo durante la realización de las actividades. En base a estos resultados, concluimos que los dispositivos de interacción multimodal tienen un gran potencial para mejorar la interacción humano-robot. Por ello, es necesario continuar la investigación en este campo expandiendo las posibilidades de interacción de los robots sociales.

Palabras clave: Robótica social, interacción multimodal, sistemas multisensor, interacción human-robot, Co-diseño hardware/software

Design and application of multimodal interaction devices for social robots.

Abstract

Social robotics requires complementary tools to facilitate and improve human-robot interaction. Sometimes, a direct interaction is not possible due to the limitations of the user or the situation itself, so developing complementary devices is essential to try to improve the user experience. This paper presents the design and implementation of multimodal interaction devices for the Mini robot. These devices, which we have named Arcade Button Panel and Pendant, aim to promote the users' cognitive and physical stimulation, making them more involved in the different activities of the robot, improving the interaction between both. On the one hand, the Arcade Button Panel aims to facilitate the realization of different games by including engagement strategies such as supernormal stimuli to enable interaction. On the other hand, the Pendant is intended to act as a portable device with great ergonomics to interact remotely with the robot. The proofs of concept performed with both devices implemented in different activities highlight the importance of the design of both the device's hardware and the device's usability during the activities' performance. Based on these results, we conclude that multimodal interaction devices have great potential to improve human-robot interaction. Therefore, it is necessary to continue research in this field by expanding the interaction possibilities of social robots.

Keywords: Social Robotics, Multimodal Interaction, Multisensor Systems, Human-robot Interaction, Hardware/Software Co-design

1. Introducción

La robótica social ha supuesto un gran impacto para asistirnos en nuestro día a día (Breazeal et al., 2016). Sin embargo, el uso de robots aún se encuentra limitado, ya que en la mayoría de aplicaciones, las capacidades de los propios robots todavía no alcanzan las expectativas de los usuarios al operar en entornos dinámicos con gran dificultad.

Para lograr este propósito, una estrategia que ha tomado gran importancia es la interacción multimodal (Su et al., 2023a). Al igual que ocurren en las interacciones entre personas, dotar a los robots con la capacidad de interactuar con los usuarios por audio (por ejemplo, voz o sonidos), tacto (por ejemplo caricias) o visión (gestos) (De Santis et al., 2008) incrementa las vías de comunicación, mejorando notablemente la interacción humano-robot y la realización de tareas conjuntas (Collins, 2020; Keyes et al., 2010; Kompatsiari et al., 2018). Además, la interacción multimodal gana relevancia cuando el usuario presenta limitaciones para realizar dichas tareas (Su et al., 2023b), como por ejemplo, dificultad de movimiento, audición o visión. Debido a esto, la investigación orientada a mejorar las estrategias de interacción humano-robot requiere de nuevos mecanismos de interacción que faciliten el uso de robots por parte de los usuarios.

Este artículo presenta el diseño y aplicación de dos dispositivos de interacción multimodal para el robot social Mini, el cual está dedicado principalmente a proporcionar asistencia a personas mayores (Salichs et al., 2020). Estos dispositivos, denominados *Botonera arcade* y *Colgante de interacción* han sido diseñados con el objetivo de facilitar la realización de actividades de las personas mayores con el robot Mini. Por un lado, la *Botonera arcade* incorpora botones de grandes dimensiones y luces para facilitar la realización de juegos con el robot, así como sonidos para informar de logros en esos objetivos. Por otro, el *Colgante de interacción* pretende servir como dispositivo portátil de tamaño reducido con alta capacidad de uso para mostrar información al usuario y obtener sus respuestas/peticiones sin la necesidad de estar junto al robot. Los resultados del artículo muestran una prueba de concepto de como se integran ambos dispositivos para la realización de actividades con el robot por parte de los usuarios.

La sección 2 enumera la metodología seguida para lograr una interacción multimodal en robots sociales. La sección 3 describe a Mini, el robot social para el que se han diseñado los dispositivos de interacción multimodal. La sección 4 describe como se han implementado dichas estrategias en la *Botonera arcade* y el *Colgante de interacción* teniendo en cuenta las capacidades de Mini. La sección 5 describe su integración en el robot y como se aplican ambos elementos para la realización de distintas actividades. La sección 6 presenta los resultados del trabajo tras probar los dispositivos en interacciones con mayores y obtener sus impresiones. Por último, la sección 7 presenta las principales conclusiones de este trabajo.

2. Metodología para una interacción humano-robot multimodal

Los robots sociales que están diseñados para interactuar con personas comparten una característica esencial: *la necesidad de comunicarse con el usuario a través de diversos métodos o canales, como la voz, los gestos o el contacto físico* (Yan et al., 2014). Como veremos más adelante, Mini tiene la capacidad de comunicarse con el usuario mediante la audio (voz y sonidos), tacto y visión. A esta forma de interacción a través de múltiples canales se le conoce como *interacción multimodal*. Para que sea efectiva, es fundamental que sea bidireccional, es decir, que tanto el usuario como el robot sean capaces de interactuar entre sí (Papanastasiou et al., 2019). Numerosas investigaciones en el campo de la interacción humano-robot (Salem et al., 2011; Turk, 2014) han demostrado que los métodos de interacción que han obtenido resultados más destacados en trabajos similares son:

- **Interacción física/táctil:** Este tipo de interacción se basa en el contacto físico con el robot. Para implementarlo, se requieren diversos tipos de sensores, como sensores de contacto o proximidad, y actuadores físicos como motores. Otras formas de interacción física pueden incluir la percepción de estímulos a través de otros elementos, como la vibración que se siente en los controles remotos de algunos dispositivos.
- **Interacción auditiva:** A través del lenguaje y gracias a tecnologías que permiten el reconocimiento de voz, se desarrolla un método muy efectivo y sencillo para que el usuario se comunique con el robot, y viceversa. Esto permite una interacción auditiva bidireccional entre el usuario y el robot. Además, los sonidos no verbales o reproducción multimedia juegan un papel fundamental en este tipo de interacción.
- **Interacción visual:** Utilizando cámaras y sistemas de procesamiento de imágenes, el robot puede identificar y detectar elementos en su entorno, como los gestos corporales del usuario. Además, la interacción visual también implica la presentación de estímulos visuales, como fotos o vídeos, para entretener al usuario y ayudarlo a comprender lo que se espera de él.
- **Interacción a través de elementos externos:** Este método requiere el uso de objetos que el robot pueda identificar y comunicarse con ellos, desarrollando un comportamiento basado en la detección de estos objetos. Para la detección, se pueden utilizar sensores, cámaras y otros métodos. Algunos ejemplos de estos métodos pueden incluir tarjetas de identificación, mandos a distancia, entre otros.

*Autor para correspondencia: sacarras@ing.uc3m.es

Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)

Correos electrónicos: 100428685@alumnos.uc3m.es (Juan Rodríguez-Huelves), sacarras@ing.uc3m.es (Sara Carrasco-Martínez ) , sofalvar@pa.uc3m.es (Sofía Álvarez-Arias ) , marmarot@ing.uc3m.es (Marcos Maroto-Gómez ) , famartin@ing.uc3m.es (Fernando Alonso-Martín ) , acgonzal@ing.uc3m.es (Álvaro Castro-González ) , salichs@ing.uc3m.es (Miguel Ángel Salichs )



Figura 1: El robot social Mini

3. El robot social Mini

Mini (Salichs et al., 2020) es un robot social de escritorio desarrollado por la Universidad Carlos III de Madrid para asistir a personas mayores que presentan un leve deterioro cognitivo. Mini se concibió como una herramienta versátil capaz de brindar ayuda, entretenimiento y compañía a sus usuarios.

Mini fue diseñada con una apariencia amigable y simpática, evolucionando a lo largo de sus versiones hasta su versión actual, como se muestra en la Figura 1. Mini tiene la capacidad de entablar conversaciones, contar chistes y jugar con los usuarios. Está equipado con una amplia variedad de sensores y actuadores que le permiten interactuar con las personas, lo que facilita una interacción más dinámica y natural.

Entre sus capacidades sensoriales, el robot es capaz de obtener información verbal del usuario utilizando un micrófono y un sistema de reconocimiento de voz. Para captar información táctil, cuenta con tres sensores de tacto capacitivos situados en ambos hombros y la tripa. Utilizando una cámara, es capaz de percibir a sus usuarios y realizar detecciones de algunos de sus parámetros como la posición y la atención que presta al robot.

Para comunicarse con el usuario, el robot tiene 5 motores colocados en la cadera, brazos, cuello y cabeza para realizar distintos movimientos. Además, el robot tiene actuadores LED en las mejillas, boca y corazón para expresar como se siente. El robot tiene un altavoz para comunicarse con el usuario y realizar sonidos no verbales. Por último, Mini tiene una tableta que posibilita diversas formas de interacción (audio, táctil y visual).

Todas estas capacidades permiten a Mini realizar actividades destinadas al entretenimiento, compañía, supervisión y estimulación física y cognitiva de sus usuarios mediante interacción multimodal principalmente utilizando comunicación verbal y la tableta. Tomando como referencia la metodología propuesta en la sección 2, Mini presenta interacción física, auditiva y visual, pero no dispone de dispositivos externos que faciliten el uso del robot a los usuarios que encuentran dificultades en los otros métodos. Por ello, proponemos el uso de dos dispositivos externos para mejorar la experiencia del usuario con interacción multimodal.

4. Dispositivos propuestos

El objetivo principal de los dispositivos de interacción multimodal propuestos es promover la interacción con el robot social Mini al fomentar la participación activa del usuario y facilitar su uso mejorando su experiencia. Para lograr un desarrollo adecuado de estos dispositivos, es importante seguir una serie de pasos que siguen empresas como *IT Robotics* para el desarrollo de dispositivos, en los que existen 6 pasos (Robotics, 2023). Además de estas 6 fases, se ha realizado una fase final (fase 7), típica de los proyectos de investigación y altamente escalables, que permite analizar cada versión del dispositivo y proveer una mejora constante del mismo.

1. **Fase 1: Estudio inicial y definición de objetivos del proyecto.** Consiste en investigar como obtener y proporcionar una interacción multimodal y humano-robot adecuada en el robot social Mini.
2. **Fase 2: Simulación, layout y propuesta de soluciones.** Identificar el tipo de dispositivo que se desea desarrollar. Para ello nos basamos en estudios similares para interacción con ancianos (Zhou and Shen, 2016), eligiendo los componentes electrónicos que deben introducirse en el dispositivo para cumplir la finalidad de interacción multimodal, explicados anteriormente en la sección 2.
3. **Fase 3: Diseño mecánico y electrónico.** Se diseña y construyen los elementos mecánicos y electrónicos con el fin de elaborar la siguiente fase.
4. **Fase 4: Fabricación, integración y montaje.** En esta etapa se procede con la construcción y montaje de todas las estructuras y sistemas electrónicos que forman parte de la solución propuesta.
5. **Fase 5: Programación del robot.** Se implementan las en el dispositivo multimodal y en el robot las instrucciones específicas para su comunicación. Además se desarrollan aplicaciones que permitan la gestión, control y análisis de datos en caso de ser necesario.
6. **Fase 6: Pruebas de funcionamiento.** Se realizan pruebas para comprobar el correcto funcionamiento de la solución propuesta y tras comprobarlo se valora si cumple los requisitos y los objetivos propuestos en la primera fase.
7. **Fase 7: Análisis de los resultados, mejora y optimización.** En esta fase se analizan los problemas del proyecto, se observan rasgos a mejorar y posibles optimizaciones que pueden favorecer al robot, tanto de hardware como de software, por lo que se van desarrollando cantidad de prototipos hasta obtener una solución altamente optimizada y funcional, que sea capaz de resolver el problema definido correctamente.

Siguiendo este proceso, se han creado dos dispositivos de interacción multimodal denominados *Botonera arcade* para realizar juegos y *Colgante de interacción* portátil.



Figura 2: Botonera Arcade

4.1. Botonera arcade

Este dispositivo, representado en la figura 2, fue uno de los primeros grandes pasos para implementar la interacción multimodal mediante dispositivo externo con el robot social Mini. Cuenta con un microcontrolador Arduino MEGA 2560 que se encarga de leer el estado de los 5 botones y activar los LEDs en función de las necesidades de la actividad. Además, incluye un zumbador para realizar diferentes sonidos. Este dispositivo se concibió con el fin de promover la estimulación cognitiva y física por parte del usuario mediante la realización de juegos y ejercicios de memoria y asociación. Los métodos multimodales de este dispositivo incluyen:

- Botones grandes con LEDs que ofrecen y facilitan una interacción tanto física como visual.
- Zumbador como mecanismo de señalización o alerta auditiva que informa de los progresos del usuario en la actividad.
- La transmisión de información al robot se realiza mediante una conexión cableada a Mini.

4.2. Colgante de interacción

El *Colgante de interacción*, como se muestra en la figura 3, es una versión más pequeña que la *Botonera arcade*. Como se puede observar, se conservan los cinco botones para enviar información al robot mediante una interacción táctil con el dispositivo. Asimismo, cuenta con una pantalla capaz de mostrar diferentes imágenes, con un RFID para poder reconocer las interacciones a partir de tarjetas y con un vibrador para realizar diferentes notificaciones. Este dispositivo es controlado a partir de un microcontrolador ESP32 que permite la conexión WI-FI para realizar la comunicación bidireccional con el robot, es decir, la lectura de los sensores y comanda los actuadores. Las mejoras implementadas en este dispositivo y diferenciadas de la *Botonera arcade* son las siguientes:



Figura 3: Colgante para interacción multimodal

- Reducción del tamaño del dispositivo facilitando su portabilidad y ergonomía.
- Transmisión de información entre el Colgante y el robot de forma inalámbrica en lugar de por cable. Esto permite que la portabilidad del dispositivo sea mayor a la *Botonera arcade*.
- Desarrollo de un diseño atractivo para su utilización, manteniendo una estética acorde con Mini. Para ello, se ha utilizado la impresión 3D para dar la forma y apariencia deseada, combinada con las pegatinas colocadas sobre el robot.
- Incorporación de una pantalla para posibilitar una interacción visual con el usuario, como mostrar imágenes.
- Integración de la tecnología RFID, que, con un diseño adecuado del dispositivo, facilita la interacción a partir de diferentes tarjetas u objetos que contengan un lector RFID.
- Inclusión de un motor vibrador capaz de transmitir información táctil al usuario. Esta información pueden ser notificaciones, el progreso de algún juego o la notificación de estados del robot.

Estos añadidos electrónicos hacen que el *Colgante de interacción* tenga más métodos de interacción multimodal, haciendo que sea más interactivo que la *Botonera arcade* porque permite que se puedan ver distintas imágenes, reconocer objetos a través del rfid, realizar interacción táctil a través de los botones o recibir diferentes notificaciones con el motor vibrador sin pausar los juegos. Sin embargo, encontramos limitaciones en el tamaño de los botones comparado con los botones de la *Botonera arcade* y en la iluminación de ellos, ya que no disponen de LEDs. La información en el *Colgante de interacción* se presenta utilizando la pantalla, elemento que ofrece más versatilidad en la realización de actividades.

5. Aplicación de los dispositivos

Para implementar ambos dispositivos, fue necesario adaptarlos a la arquitectura software de Mini. Esta arquitectura se basa en diferentes módulos de ROS que permiten interactuar a los módulos que conforman el robot. Como se observa en la figura 4, existen tres módulos principales, el *Perception Manager* (PM), que contiene diferentes traductores cuyo objetivo es interpretar los datos de entrada de los sensores. El *Human-Robot Interaction* (HRI), que es el encargado de realizar la interacción humano robot, es decir, se encarga de cuando activar cada uno de los subsistemas que el robot utiliza para comunicarse con el usuario, como puede ser, la voz, los altavoces, la capacidad de realizar expresiones o la comunicación con el *Colgante de interacción* y el *Decision Making System* (DMS) que es el encargado de tomar las decisiones que se van a realizar en un momento determinado. Estos tres módulos se comunican entre sí a través de ROS (Blubaugh et al., 2022).

En este artículo se implementan dos traductores, traductor colgante y traductor botonera, cuya funcionalidad es permitir que el robot reconozca los dispositivos y poder utilizarlos en

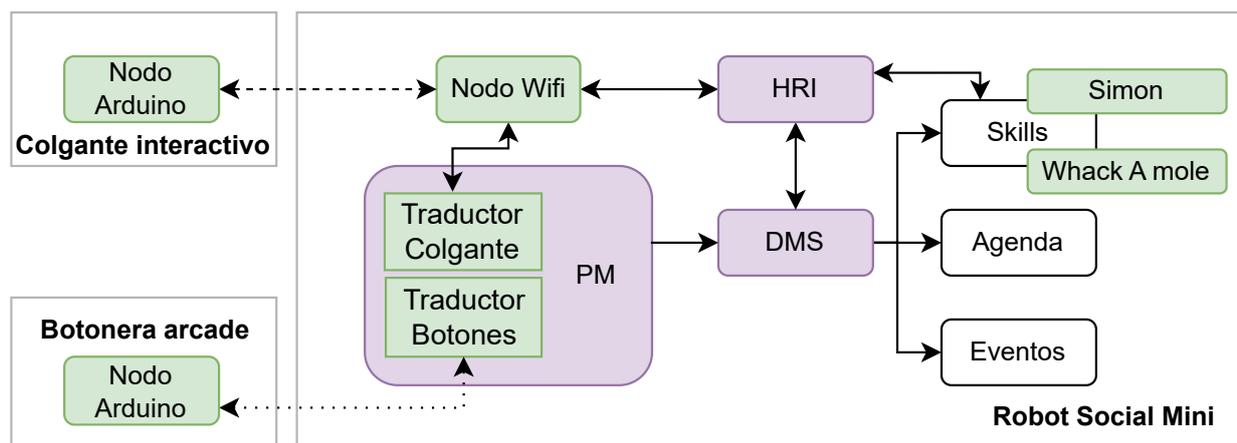


Figura 4: Diagrama software de Mini con los dispositivos. Los bloques morados corresponden a los módulos generales del robot y los bloques verdes corresponden a los nuevos desarrollos para poder incorporar ambos dispositivos.

diferentes situaciones, explicadas más adelante. Además, se implementan para cada uno de los dispositivos un nodo de comunicación para el Arduino que proporciona al robot la información relevante sobre sus sensores y que interpreta las señales que el robot envía a los actuadores de cada uno de los dispositivos. Se implementa un nodo de comunicación WiFi, que nos permite conectarnos con el *Colgante de interacción* para realizar la lectura de los sensores y la comanda de los actuadores. En cambio, la conexión con la botonera se realiza mediante cable y conexión serial implementada dentro del traductor botonera. Por último, se utilizan dos juegos, Simon y Whack a Mole, para poder probar ambas plataformas.

La *Botonera arcade* nos sirve para realizar diferentes juegos de estimulación y para aplicar distintas estrategias de alta vinculación con el usuario (Carrasco Martínez et al., 2023). Por lo tanto, se integra dentro de los juegos. Actualmente está integrada en las actividades Simon y *Whack a Mole*. Cuando el usuario o el robot deciden que es hora de jugar y eligen alguno de estos dos juegos, el sistema de toma de decisiones activa el juego y este a su vez se comunica con la botonera. El juego de Simon consiste en repetir una secuencia de botones que el robot propone. Para ello, el robot modifica la velocidad en la que muestra la secuencia y el tiempo que el usuario tiene para completarla, variando la dificultad del ejercicio. De esta forma, el usuario ejercita capacidades como la memoria, asociación, percepción o motricidad. El juego *Whack a Mole* consiste en tocar el botón del color que el robot ilumina lo más rápido posible dentro de un tiempo predeterminado que se va reduciendo a medida que la dificultad aumenta. Mediante este juego, pretendemos que el usuario ejercite su percepción, asociación y capacidad de reacción.

La información gestionada por la *Botonera arcade* se envía a la actividad a través del traductor botonera del PM para saber si el usuario ha sido capaz de completar cada ronda del juego o no. Cuando los juegos acaban, el robot lo comunica, felicita y agradece el tiempo invertido, y el control vuelve al sistema de toma de decisiones, que se encarga de decidir la próxima actividad que se va a realizar. El robot obtiene las métricas de los juegos para su posterior evaluación y contribución en la estimulación cognitiva y física del usuario. Se recogen los datos referidos a la interacción con el usuario como número máximo

de toques o reflejos, tiempo de interacción jugando, o el error cometido.

El *Colgante de interacción* permite realizar los mismos juegos que la *Botonera arcade*, pero extiende sus funcionalidades al contar con una pantalla, un motor vibrador y ser portátil. Una de las aplicaciones principales de este dispositivo es informar al usuario de eventos que tiene que realizar con el robot o para su situación particular. Estos recordatorios del dispositivo están conectados con la aplicación de la agenda del robot donde el usuario, terapeuta o familiar puede agregar la cita correspondiente con un formato legible. El colgante se encargará de mostrar la información por la pantalla, mientras que Mini realizará el recordatorio. Por ejemplo, si el usuario debe realizar algún ejercicio de estimulación física o cognitiva a una hora determinada debido a un tratamiento preestablecido, el *Colgante de interacción* vibra e informa de este evento a través de la pantalla, mostrando una imagen representativa. Por ejemplo, si el usuario tiene agendada una cita médica, la pantalla representará una imagen de un doctor actuando como recordatorio. Por último, el *Colgante de interacción* nos permite mostrar al usuario la necesidad que el robot demanda en un momento determinado. El robot social Mini se comporta como una mascota (Carrasco Martínez et al., 2023), al igual que sucede en el juego *tamagotchi*, a la que hay que cuidar realizando diferentes actividades como alimentarlo, hidratarlo, o limpiarlo. En situaciones donde el usuario se encuentra alejado del robot pero dentro de su rango de acción, como por ejemplo dentro de la vivienda, el *Colgante de interacción* actúa como elemento informador de cuando el robot necesita algo, mostrándoles por pantalla que necesidad tiene que reducir utilizando objetos que contienen etiquetas electrónicas que el robot es capaz de percibir.

6. Resultados

Para la evaluación cualitativa del experimento se realizó una serie de preguntas orales que capturaron la opinión de 10 usuarios mayores sobre el uso de ambos dispositivos. Estas preguntas se realizaron después de que los participantes jugaran una partida al juego Simon utilizando ambos dispositivos y recibiesen notificaciones ocasionales en el *Colgante de interacción* sobre como cuidar del robot o simulaciones de citas.



Figura 5: Usuario utilizando la *Botonera arcade*

Durante las evaluaciones no se obtuvo información personal de los participantes, únicamente se buscó obtener su impresión personal sobre la actividad y la experiencia con los dispositivos.

La mayoría de los participantes encontraron la *Botonera arcade* (como se observa en la Figura 5) más fácil de usar e intuitiva para la realización del juego, principalmente debido a que los botones son más grandes y más accesibles a la hora de pulsarlos. Asimismo, los LEDs y sonidos permiten identificar de forma más clara las acciones a realizar dentro de un juego.

Por otro lado, los participantes encontraron el *Colgante de interacción* atractivo como elemento para informar sobre los eventos que el robot desea que el usuario lleve a cabo, así como para recordarles citas personales. El diseño discreto y portátil del colgante lo convierte en una opción conveniente para brindar recordatorios y alertas sin interrumpir la actividad principal del usuario. Además, su capacidad para personalizar los mensajes y adaptarse a las preferencias individuales lo hace especialmente útil como asistente personalizado en la gestión de tareas y horarios.

7. Conclusiones

Este artículo describe el desarrollo y aplicación de dispositivos de interacción multimodal fijos y portátiles para el robot social Mini. A través de la implementación de dispositivos como la *Botonera arcade* y el *Colgante de interacción*, se busca fomentar y mejorar la interacción humano-robot mediante dispositivos externos que mejoren la experiencia de usuario con interacción multimodal.

Los resultados obtenidos de nuestros experimentos muestran que la interacción multimodal, combinada con un buen diseño de los dispositivos y una programación adecuada, puede mejorar significativamente la experiencia del usuario con los robots sociales. En particular, hemos observado que la inclusión de elementos visuales, auditivos y táctiles en los dispositivos permite una comunicación más efectiva. Sin embargo, los resultados obtenidos también sugieren que ambos dispositivos son complementarios, ya que los usuarios prefirieron la plataforma fija para los juegos por ser más grande e intuitiva pero calificaron la información proporcionada por el *Colgante de interacción* como útil para fomentar la interacción con el robot y para recordarles eventos que tengan que realizar.

En conclusión, los dispositivos de interacción multimodal muestran un potencial enorme en la mejora de la interacción humano-robot en entornos sociales. A través de una combinación de diseño cuidadoso, desarrollo de software y experimen-

tación empírica, podemos avanzar hacia sistemas robóticos más efectivos y satisfactorios para los usuarios en una variedad de contextos sociales y aplicaciones.

Agradecimientos

Estos resultados han sido financiados por los proyectos PID2021-123941OA-I00, financiada por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y por ERDF A way of making Europe; TED2021-132079B-I00 financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y por la Unión Europea Next-GenerationEU/PRTR; Mejora del nivel de madurez tecnológica del robot Mini (MeNiR) financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033. 13039/501100011033 y por la Unión Europea NextGenerationEU/PRTR; Robot social portable con alto grado de vinculación (PoSoRo) PID2022-140345OB-I00 financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y ERDF A way of making Europe.

Referencias

- Blubaugh, D. A., Harbour, S. D., Sears, B., Findler, M. J., 2022. Noetic ros further examined and explained. In: Intelligent Autonomous Drones with Cognitive Deep Learning: Build AI-Enabled Land Drones with the Raspberry Pi 4. Springer, pp. 417–436.
- Breazeal, C., Dautenhahn, K., Kanda, T., 2016. Social robotics. Springer handbook of robotics, 1935–1972.
- Carrasco Martínez, S., Gamboa Montero, J. J., Maroto Gómez, M., Alonso Martín, F., Salichs, M. Á., feb. 2023. Aplicación de estrategias psicológicas y sociales para incrementar el vínculo en interacción humano-robot. Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial 20 (2), 199–212.
- Collins, G. R., 2020. Improving human–robot interactions in hospitality settings. International Hospitality Review 34 (1), 61–79.
- De Santis, A., Siciliano, B., De Luca, A., Biechi, A., 2008. An atlas of physical human–robot interaction. Mechanism and Machine Theory 43 (3), 253–270.
- Keyes, B., Micire, M., Drury, J. L., Yanco, H. A., Chugo, D., 2010. Improving human-robot interaction through interface evolution. In: Human-robot interaction. InTech, pp. 183–202.
- Kompatsiari, K., Pérez-Osorio, J., De Tommaso, D., Metta, G., Wykowska, A., 2018. Neuroscientifically-grounded research for improved human-robot interaction. In: 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, pp. 3403–3408.
- Papanastasiou, S., Kousi, N., Karagiannis, P., Gkourmelos, C., Papavasileiou, A., Dimoulas, K., Baris, K., Koukas, S., Michalos, G., Makris, S., 2019. Towards seamless human robot collaboration: integrating multimodal interaction. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 105, 3881–3897.
- Robotics, I., 2023. Método de trabajo - it robotics.
- Salem, M., Rohlfing, K., Kopp, S., Joubin, F., 2011. A friendly gesture: Investigating the effect of multimodal robot behavior in human-robot interaction. In: 2011 ro-man. IEEE, pp. 247–252.
- Salichs, M. A., Castro-González, Á., Salichs, E., Fernández-Rodicio, E., Maroto-Gómez, M., Gamboa-Montero, J. J., Marques-Villarroya, S., Castillo, J. C., Alonso-Martín, F., Malfaz, M., 2020. Mini: a new social robot for the elderly. International Journal of Social Robotics 12, 1231–1249.
- Su, H., Qi, W., Chen, J., Yang, C., Sandoval, J., Laribi, M. A., 2023a. Recent advancements in multimodal human–robot interaction. Frontiers in Neuro-robotics 17, 1084000.
- Su, H., Qi, W., Chen, J., Yang, C., Sandoval, J., Laribi, M. A., 2023b. Recent advancements in multimodal human–robot interaction. Frontiers in Neuro-robotics 17, 1084000.
- Turk, M., 2014. Multimodal interaction: A review. Pattern recognition letters 36, 189–195.
- Yan, H., Ang, M. H., Poo, A. N., 2014. A survey on perception methods for human–robot interaction in social robots. International Journal of Social Robotics 6, 85–119.
- Zhou, X., Shen, W., 2016. Research on interactive device ergonomics designed for elderly users in the human-computer interaction. International Journal of Smart Home 10 (2), 49–62.



Simposio de Robótica, Bioingeniería y Visión por Computador 2024



Sesión: Robótica

Cuidado de personas mayores mediante un robot social

Merino-Fidalgo, S.^{a,*}, Sánchez-Girón, C.^a, Zalama, E.^{a,b}, Gómez-García-Bermejo, J.^{a,b}, Duque-Domingo, J.^a

^aITAP-DISA, Universidad de Valladolid, C/Doctor Mergelina, 47011, Valladolid, España.

^bCARTIF Centro Tecnológico, 47151, Valladolid, España.

Resumen

Las máquinas de estados finitos han sido el método de control de robots más utilizado en las últimas décadas, especialmente en aplicaciones industriales para la realización de tareas sencillas y repetitivas. Sin embargo, con la aparición de los robots sociales, se abre un nuevo horizonte a la hora de controlar estos dispositivos y su adaptación al interactuar con humanos. En este artículo se presenta una arquitectura compuesta por un ejecutor de acciones basadas en máquinas de estados finitos para el control de un robot social desplegado en la vivienda de una persona mayor, con el fin de que interactúe con ella mediante juegos y ejercicios, realice videollamadas con familiares y su cuidador y para que este último obtenga información a tiempo real del residente y efectúe acciones de control y de emergencia. Finalmente, se presentan dos ejemplos de estas acciones, describiendo su funcionamiento y analizando los resultados obtenidos tras la realización de múltiples pruebas.

Palabras clave: Sistemas de control embebidos y aplicaciones, Internet de las Cosas, entorno de vida inteligente, robots móviles, toma de decisiones y procesos cognitivos.

Paper Title in English, Bold Style

Abstract

Finite state machines have been the most widely used method of robot control in recent decades, especially in industrial applications for performing simple and repetitive tasks. However, with the emergence of social robots, a new horizon opens up when it comes to controlling these devices and their adaptation when interacting with humans. This paper presents an architecture composed of an action executor based on finite state machines for the control of a social robot deployed in the home of an elderly person to interact with him/her through games and exercises, to make video calls with family members and his/her caregiver, and for the latter to obtain real-time information from the resident and to perform control and emergency actions. Finally, two examples of these actions are presented, describing how they work and analyzing the results obtained after multiple tests.

Keywords: Embedded computer control systems and applications, Internet of Things, ambient intelligence living, mobile robots, decision making and cognitive processes.

1. Introducción

Controlar un sistema o un robot es uno de los temas de discusión más relevantes de las últimas décadas. En el caso de la robótica, los primeros años de desarrollo se centraron en autómatas controlados por humanos para facilitar la realización de tareas complejas o peligrosas como las intervenciones quirúrgicas, donde los primitivos modelos iniciales han dado paso a robots mucho más completos como el da Vinci (Tran et al., 2020), (Gharagozloo et al., 2021).

Sin embargo, el control de un elemento autónomo resulta

de mayor complejidad, motivo por el cual los primeros modelos presentaban un diseño y posibilidades muy reducidos, orientados a realizar una única tarea. La necesidad de llevar a cabo acciones más completas y complejas derivó en la búsqueda de nuevos métodos que permitiesen manejar todas estas dificultades añadidas.

Las máquinas de estados finitos (FSM) son un conjunto de estados y transiciones entre esos estados. Estas transiciones tienen una condición o *guard expression* que, cuando se cumple, ejecuta la acción asociada a dicha transición (Ben-Ari et al., 2018). Se representan con un diagrama de estados unidos por

*Autor para correspondencia: sergio.merino.fidalgo@uva.es
Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)

las transiciones representadas como flechas, como se muestra en la Figura 1, que indica de manera simple el funcionamiento de una tostadora.

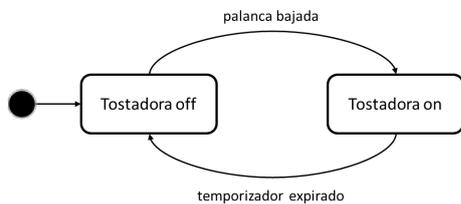


Figura 1: Diagrama de estados de una tostadora.

El concepto surgió en la década de 1950 como una teoría de autómatas y para la comprobación de circuitos secuenciales. Posteriormente, se convirtió en un método de gran popularidad gracias al manejo de protocolos de comunicación y sus aplicaciones en robótica (Lee and Yannakakis, 1996). Su programación metódica y buenos resultados de ejecución la convirtieron en la arquitectura más utilizada en el control de autómatas. Sin embargo, a la hora de realizar tareas sumamente complejas con un número considerable de estados y transiciones, las máquinas de estados finitos presentan un problema de legibilidad y mantenimiento, ya que su estructura acaba siendo compleja y difícil de seguir, así como la adición o supresión de estados constituye una difícil tarea (Balogh and Obdrzalek, 2018), (Colledanchise and Ögren, 2017).

Con el fin de solucionar algunos de estos problemas, se comenzaron a utilizar las máquinas de estados finitos jerárquicas (HFMSM), que se caracterizan por permitir que un estado pueda ejecutar una máquina de estados, de tal forma que ese *superestado* contiene subestados (Girault et al., 1999). Este nuevo método mejora la reutilización de código, ya que permite crear máquinas de estados que realicen una acción simple que pueden ser utilizadas como partes de acciones más complejas.

Revisando la literatura de sus aplicaciones en robótica, Fue et al. (2020) emplearon máquinas de estados finitos a través de ROS (Kacprzyk, 2017) en un rover de recogida de algodón para la realización de tareas como desplazarse por el campo o recolectar las bolas de algodón. En cuanto a robótica social e interacción robot-humano, Malviya et al. (2020) presentaron un sistema de navegación para robots basado en una máquina social de estados finitos conductual, operando como guía y adaptándose al comportamiento de los visitantes. El Makrini et al. (2022) desarrollaron un marco de tareas de colaboración entre humanos y robots basado en máquinas de estados finitos jerárquicas, donde las acciones se descomponían en subtareas modeladas como máquinas de estados.

El presente artículo se centra en el control de un robot social dentro de la vivienda de una persona mayor para que interactúe con él (Sección 2) realizando planes mediante la ejecución de máquinas de estados finitos jerárquicos (Sección 3). Se exponen dos ejemplos de planes: dar los buenos días y recordar la medicación (Sección 4), y se presentan los resultados de estos y las líneas futuras en la Sección 5. Finalmente, las conclusiones se resumen en la Sección 6.

2. Marco de la investigación

En los últimos años, se ha producido un notable incremento en el número de personas mayores viviendo solas en sus hogares, una tendencia que se prevé que continúe creciendo en España, particularmente en la región de Castilla y León. Datos recientes indican que el 26,48 % de la población en esta comunidad autónoma tiene más de 65 años (Instituto Nacional de Estadística, 2023), y uno de cada cuatro de ellos vive solo, aproximadamente 161.500 personas (Junta de Castilla y León, 2023). Además, la falta de contacto con otras personas genera un profundo sentimiento de soledad, el cual puede desembocar en graves problemas para la salud, especialmente en personas de avanzada edad (Hoppmann et al., 2021).

2.1. Descripción del proyecto

La investigación presentada en este artículo se enmarca dentro del proyecto EIAROB (Ecosistema de Inteligencia Ambiental para el apoyo a los cuidados de larga duración en el hogar mediante uso de robots sociales), cuyo objetivo principal es fomentar la autonomía y mejorar la calidad de vida de las personas mayores y dependientes. Este proyecto se centra en tres áreas principales: Desarrollo de un sistema de inteligencia ambiental para respaldar la vida independiente, que supervisará y monitorizará las actividades diarias; Creación de soluciones mecatrónicas y robóticas para la atención a las personas mayores; Establecimiento de un observatorio experimental de robótica para la vida independiente en Castilla y León (EIAROB, 2023). El proyecto abarca diversos campos de investigación, desde aspectos innovadores como la robótica social y el uso de inteligencia artificial para la detección de personas y el reconocimiento de actividades, hasta cuestiones importantes como el respeto a la privacidad de las personas mayores mediante el uso de tecnología domótica no invasiva y la gestión de situaciones de emergencia.

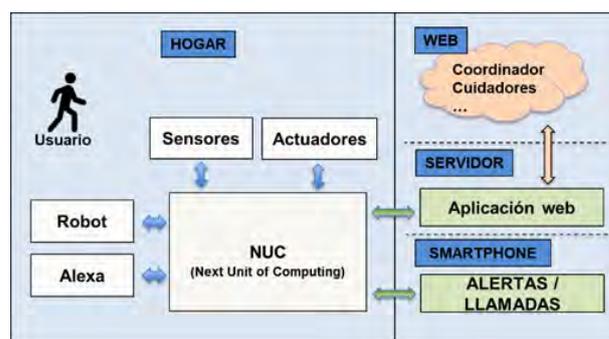


Figura 2: Esquema general del proyecto Eiarob.

En la Figura 2 se muestra un esquema simplificado del proyecto Eiarob, con cada una de las partes que lo conforman. La instalación del interior de la vivienda consta de un sistema domótico compuesto por un conjunto de sensores de reducido tamaño que se distribuyen por la casa para captar información acerca de la vivienda y de las condiciones y actividades del residente. Los datos los recibe un pequeño ordenador Intel NUC (Next Unit of Computing) instalado en la vivienda, el cual gestiona los actuadores y un asistente de voz (Alexa), y controla el funcionamiento de un robot social. El NUC a su vez se encarga

de realizar las notificaciones y llamadas al móvil del cuidador responsable del residente y se comunica con la aplicación web de un servidor. En este servidor se guarda toda la información de la vivienda, a la que acceden el coordinador y los cuidadores a través de una página web que permite visualizar información en tiempo real de la vivienda y el anciano, y programar actividades y acciones para que sean llevadas a cabo por el residente y el robot social, respectivamente (Merino-Fidalgo et al., 2023).

3. Método propuesto

En la sección anterior se ha descrito la captación de información de los sensores del interior de la vivienda, recogiendo datos de las condiciones de la casa y del residente. A partir de esos datos el sistema intenta deducir la actividad que el usuario está realizando en la casa con el objetivo de cerciorarse de que cumple las actividades propuestas por el cuidador, hacer recomendaciones para llevar un estilo de vida saludable y, sobre todo, detectar situaciones de riesgo, como falta de comida y medicación, deambulación nocturna o falta de actividad durante un periodo de tiempo prolongado. Se han utilizado dos métodos para detectar actividades. En el primero de ellos, se emplearon tres modelos de Aprendizaje Profundo basados en una red neuronal, una red LSTM (Long Short-Term Memory) y un modelo GRU (Gate Recurrent Unit). Para las pruebas, se sensorizó una casa con dos residentes y se instalaron 33 sensores, recopilando información durante dos meses. Los resultados muestran una precisión de reconocimiento similar para los tres modelos de red: 89.59 %, 89.63 % y 90.01 % respectivamente para el primer residente, y 86.26 %, 88.29 % y 86.21 % respectivamente para el segundo residente. Una descripción más detallada de los dos métodos se puede encontrar en Ramos et al. (2021) y Ramos et al. (2022).

3.1. Ejecución de acciones

La detección de situaciones peligrosas y la programación de actividades por parte del cuidador como tomarse las medicinas a una hora concreta que precisan llevar a cabo una contramedida generan un mensaje MQTT (Mishra and Kertesz, 2020) con el topic y el payload de la acción correspondiente para corregir ese estado de emergencia o para procurar que el residente realice la actividad propuesta por el cuidador, como recordarle que se tome las medicinas si no lo ha hecho. La ejecución de esas acciones se gestiona desde un ejecutor de acciones corriendo en el NUC, que cuando recibe un mensaje MQTT, analiza su contenido y genera un plan para ejecutar la acción requerida, añadiendo este plan a una cola de ejecución y reordenándola en función de la prioridad de los planes, asignada en función del tipo de acción y del usuario que la solicita (cuidador, administrador, residente, etc.). Si la cola de ejecución está vacía o la acción es de máxima prioridad, el ejecutor de tareas inicia el plan.

Estos planes pueden ser acciones simples (apagar una luz o encender la calefacción) o acciones más complejas que requieren que se llevan a cabo mediante máquinas de estados finitos creadas con Python-Statemachine, una librería de Python diseñada para crear y administrar máquinas de estados. En este caso, el ejecutor de acciones inicia la máquina de estados accediendo al estado inicial, y periódicamente se encarga de

hacer avanzar la máquina mediante un comando genérico que ejecuta las acciones del estado actual y comprueba las posibles transiciones. En el caso de que la condición de alguna de las transiciones del estado actual se cumpla, la máquina cambia de estado. Cuando la máquina de estados finaliza, el ejecutor de tareas comprueba su estado final y envía un mensaje indicando si la acción se ha llevado a cabo correctamente o no, para posteriormente guardar esa información en la base de datos del servidor. A continuación, el plan se elimina de la cola de ejecución e inicia el siguiente plan de la cola, quedando en reposo hasta recibir un nuevo plan si esta se encuentra vacía.

Como se indicó en la Sección 2, los dispositivos que efectuarán las acciones son pequeños actuadores como interruptores o termostatos y principalmente un robot social, como se muestra en la Figura 3.



Figura 3: Robot Temi V3.

El robot Temi (Temi V3, 2024) se ha incorporado como un robot móvil que interactúe con el residente para reducir la sensación de soledad, ejercitar su físico y su mente y mantener el contacto con sus familiares y el cuidador, ejecutando a su vez las acciones programadas por este. El robot cuenta con capacidades de navegación sobresalientes en entornos cambiantes donde puede encontrar obstáculos o pasillos estrechos, típicos de un hogar real. Se ha desarrollado una aplicación para el robot que ofrece una variedad de servicios, incluyendo juegos de memoria y acertijos, ejercicios mentales y físicos, videoconferencias con cuidadores o familiares, e incluso una interacción con ChatGPT (Kohnke et al., 2023) que proporciona información adicional sobre cualquier tema que el usuario solicite. Esta aplicación presenta una interfaz extremadamente sencilla con caracteres grandes para las personas mayores, así como un avatar amigable que interactúa con ellos diciendo "Hola Temi", el cual puede ser personalizado para cada usuario. Por lo tanto, los residentes pueden interactuar con el robot tanto tocando la pantalla como mediante comandos de voz. El control del robot también se puede realizar mediante comandos enviados utilizando mensajes MQTT que se envían a través del bróker Mosquitto (Koziolek et al., 2020) instalado en el NUC de la vivienda, método que utiliza el ejecutor de acciones para mandar el robot a una localización o que reproduzca un mensaje.

4. Ejemplos de acciones

A continuación, se presentan dos ejemplos de planes que llevan a cabo acciones complejas para explicar el funcionamiento interno de cada uno, así como los estados y acciones simples seleccionados para cada uno, teniendo en cuenta los contratiempos que pueden surgir durante la ejecución o las múltiples respuestas e interacciones que el usuario puede realizar. Destacar también que los estados cuentan con un tiempo de ejecución máximo, por lo que, en caso de fallo, ni el plan ni el ejecutor de acciones se quedaría bloqueado.

4.1. Recordar medicinas

En primer lugar, el plan de recordar medicinas, como su propio nombre indica, lleva a cabo la acción de avisar al residente de que debe tomarse la medicación correspondiente. Este plan se ejecuta en el caso de que, teniendo una toma de medicinas programada por el cuidador, el algoritmo de reconocimiento de actividades no detecte que el residente la haya realizado.

En la Figura 4 se muestra un diagrama de estados de la ejecución del plan, con cada uno de sus estados y transiciones. La primera acción del plan consiste en mandar al robot a la ubicación más cercana de la posición en la que se encuentra el residente, dato proporcionado por una métrica que devuelve en todo momento la posición de la persona en el interior de la casa. Para enviar el robot a la ubicación destino se emplea un superestado, que ejecuta una máquina de estados finitos llamada "Módulo_move_dest". El módulo envía al robot a la localización destino. Si llega, continua con la acción de la máquina que lo ha llamado, o si se llama a este módulo individualmente, finaliza la acción. Si el usuario interactúa con el robot (toca pantalla o pulsa el botón de la parte superior), el robot entra en un estado de pausa y aparece una nueva pantalla con 3 botones: sí para quedarse donde está como destino final y que siga la acción; no para ir al destino original y finalizar para acabar con el plan, tanto si es solo el módulo como el plan principal que lo llama. Si no puede llegar al destino por algún otro motivo (obstáculo en destino, todas las posibles rutas cortadas o excede tiempo máximo), se manda al robot a base de carga y finaliza cuando llega. Si no puede llegar por algún motivo, lo vuelve a intentar otra vez y, sino, accede a un fichero con localizaciones seguras, extrae aquella de la habitación en la que se encuentra y se desplaza hasta ella. Este último paso se realiza para no dejar el robot en mitad de una habitación o zona de paso que puede llevar al residente a tropezarse con él, evitando posibles incidentes. Por último, el robot cuenta con una orden interna para regresar a la base de carga cuando su batería baja por debajo de un umbral, evitando descargarse por completo.

Si el robot alcanza su destino, realiza una pregunta al residente para comprobar si se ha tomado las medicinas y se pone en modo escucha para recibir la respuesta del usuario. Si no se detecta respuesta, se repite la pregunta otra vez, como sucede con las preguntas de todos los planes, finalizando el plan si sigue sin responder. Si responde que sí se las ha tomado, se dicen unas palabras de agradecimiento y finaliza la acción. En caso de que no lo haya hecho, se le recuerda la medicación concreta que debe tomar dos veces hasta que se las toma o supera el tiempo máximo asociado a ese estado, finalizando la acción. El estado final llamado "Acción finalizada" es un estado genérico

para todos los planes, para simplificar la programación y gestión de planes por parte del ejecutor de acciones y en el que se reproduce un recordatorio o mensaje de interés para el residente como, por ejemplo, qué tiene que decir si quiere jugar a un juego.

4.2. Buenos días

El plan de buenos días es un plan recursivo que previsiblemente se ejecutará cada día a una hora determinada por la mañana como un control rutinario de que el residente se encuentra bien y para proponerle información variada de interés. El desencadenante del plan se produce al alcanzar la hora estipulada por el cuidador a la que, como tarde, debe despertarse el residente, siempre y cuando se detecte que este sigue durmiendo en su cama. Si se cumplen esas condiciones se inicia el plan.

Al igual que en el plan de recordar medicinas (Figura 5), la primera acción es mandar el robot a la habitación del usuario mediante el Módulo_move_dest. A continuación, el robot pregunta si ha dormido bien, y espera su respuesta. Si el residente responde que sí, le propone escuchar las noticias, el tiempo o un dato interesante. Las dos primeras opciones se gestionan desde la aplicación del robot, mientras que la curiosidad se genera mediante ChatGPT. Cuando finaliza la opción seleccionada ya sea porque el robot a reproducido el mensaje o porque el usuario ha dejado de interactuar, la acción finaliza, con el recordatorio mencionado en el plan anterior. Si por el contrario el usuario dice que no ha dormido bien, el robot pregunta si quiere hacer una llamada a su contacto de emergencia (al número de su cuidador) en caso de que se encuentre mal, realizando la videollamada si el usuario acepta y finalizando el plan en caso contrario.

Por último, se contempla que, tras dos intentos, si el usuario no responde a la primera pregunta se llega a otro superestado que ejecuta una máquina de estados llamada "Modulo_detecta_persona", el cual abre la cámara del robot y toma fotografías en busca de la persona. Para el análisis de las imágenes se utiliza Mediapipe (Singh et al., 2022) para reconocer el esqueleto y ubicar al residente. Si no se detecta a nadie en la habitación, el robot vuelve a base de carga y finaliza el plan. En caso contrario, pregunta al residente si se encuentra bien, donde se contemplan dos escenarios: si dice que sí, se retoma el plan principal y le propone las actividades anteriormente mencionadas; si dice que se encuentra mal o no obtiene respuesta le pregunta si quiere hacer una videollamada a su contacto de emergencia, efectuándola si accede o si no se obtiene respuesta. Se obra de esta manera cuando el residente no responde por la posibilidad de que se encuentre en una situación de emergencia por la que no pueda contestar, para así que al iniciar la videollamada sea el cuidador el que juzgue si la persona se encuentra bien.

5. Resultados

Para validar el sistema propuesto se ha acondicionado el espacio de trabajo para asemejarse a una vivienda típica de una persona mayor, colocando obstáculos como sillas y cajas, creando pasillos estrechos propios de una vivienda típica de pueblo y dividiendo el laboratorio en estancias como salón, cocina y dormitorio, para así poder reproducir los planes de la

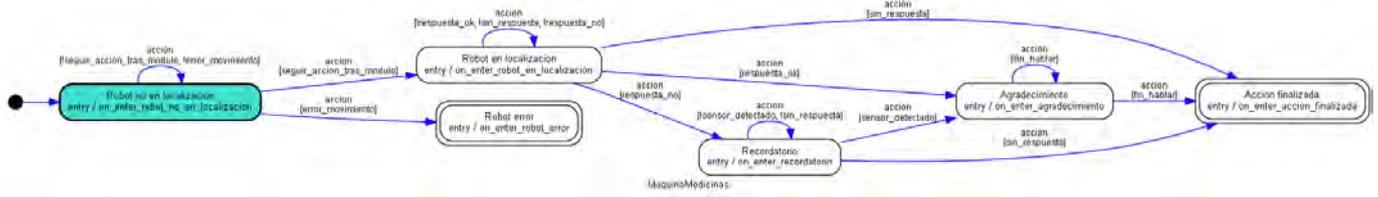


Figura 4: Diagrama de estados de la acción *Recordar medicinas*.

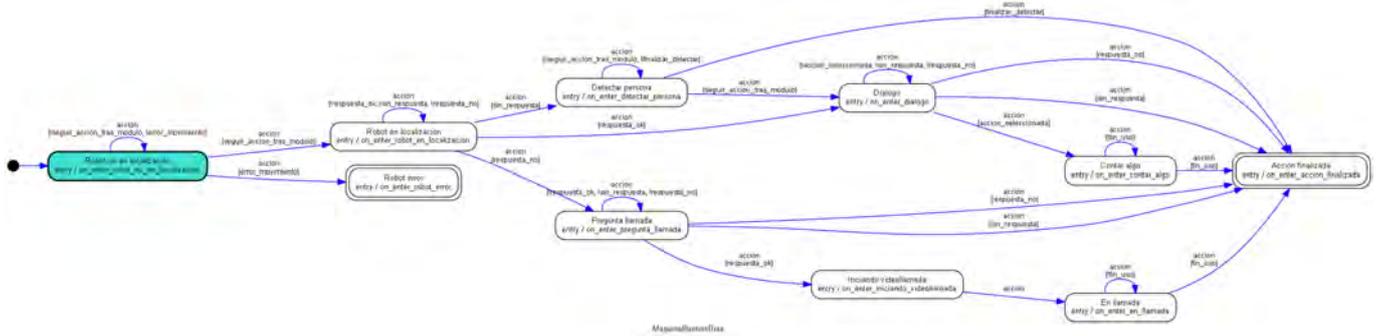


Figura 5: Diagrama de estados de la acción *Buenos días*.

forma más realista posible. La forma de evaluar el desempeño del ejecutor de acciones y de los planes mencionados fue la de instalarlos en el NUC del laboratorio y ejecutarlos múltiples veces probando cada una de las posibilidades y variaciones que ofrecen, así como con la introducción de factores extraños, obstáculos o situaciones no contempladas directamente durante la programación. En total, se realizaron 130 pruebas, 50 para el plan de recordar la medicación y 80 para el de los buenos días, donde se anotaron las ejecuciones satisfactorias y los tipos de fallos producidos, tanto de los planes principales como de los módulos empleados en ellos.

Tabla 1: Preferencias para el diseño de un controlador

	Bien	Mal	Total	Porcentaje de éxito
<i>Medicinas</i>	48	2	50	96 %
<i>Buenos días</i>	75	5	80	93.75 %
Total	123	7	130	94.62 %

La tabla 1 muestra los resultados obtenidos de las pruebas realizadas, obteniendo un porcentaje de éxito conjunto muy positivo, cerca del 95 %. En cuanto a cada uno de los planes, el de recordar medicinas fue aquel que mejor resultados obtuvo, alcanzando el 96 % de porcentaje de éxito, fallando una vez porque el sistema no detectó la actividad de tomarse las medicinas y una segunda porque el robot no reprodujo el mensaje de recordatorio al finalizar la acción, a pesar de que se sí envió el mensaje MQTT desde el programa ejecutado en el NUC.

El plan de buenos días obtuvo un porcentaje de éxito inferior debido a la mayor complejidad de estados y transiciones y su amplia variedad de opciones y respuestas, con dos fallos al reproducir el mensaje de recordatorio al igual que en el plan anterior, dos fallos por reconocimiento erróneo de la respuesta del usuario debido al ruido de fondo (al analizar el texto escuchado por el robot se encontraron palabras de una conversación a escasos metros del robot) y otro error en la ejecución debido

a una identificación incorrecta de una persona durante la ejecución del módulo de buscar persona, confundiendo un abrigo con un ser humano (Figura 6).

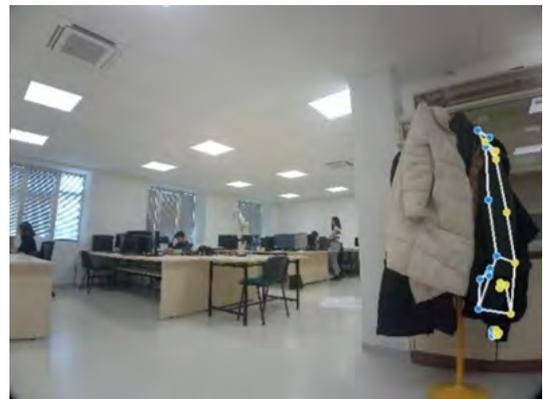


Figura 6: Fotografía del robot analizada por Mediapipe identificando un abrigo como una persona.

Al analizar los fallos de ambos planes, la no reproducción del mensaje de recordatorio se produjo por un error en la conexión de la aplicación instalada en el robot con el bróker Mosquitto, suceso que ocurre durante algunos segundos al reiniciar la aplicación o de forma muy eventual. Los otros dos tipos de fallos ya han sido brevemente analizados anteriormente y corresponden a errores de Mediapipe identificando un abrigo como una persona y al reconocimiento de voz, cuyo alcance permite escuchar personas a varios metros de distancia que no se dirigen directamente al robot. De esta forma, se puede confirmar la robustez de ejecución de los planes al emplear máquinas de estados finitos, ya que los fallos acontecidos no están directamente relacionados con ellas. Las líneas de investigación futuras pasan por solucionar los errores anteriormente mencionado, la puesta en marcha del sistema en una vivienda real y la posibilidad de mejorar estos planes empleando, por ejemplo,

behaviour trees (Colledanchise and Ögren, 2017), un método muy utilizado en el mundo de los videojuegos que comienza a introducirse en la robótica.

6. Conclusiones

En este artículo se ha presentado un sistema de control de un robot social para ser desplegado en la vivienda de una persona mayor con el fin de mejorar su calidad de vida, así como permitir a su cuidador comunicarse con él y programar planes que sean llevados a cabo por el robot. Se ha descrito un plan de recordatorio de medicinas y uno para saludar al residente por la mañana y comprobar que se encuentra bien, planes de gran utilidad para el cuidador para garantizar que el residente realiza las actividades propuestas y comprobar con su estado de forma diaria. La programación de los planes se ha realizado empleando máquinas de estados finitos, una arquitectura ampliamente estudiada y probada que, tras realizar múltiples pruebas, se confirma que se trata de un método robusto y funcional para la ejecución de acciones de un robot social que interactúa con personas.

El trabajo futuro se centra en mejorar y ampliar el sistema con el fin de mejorar la interacción del robot social con el usuario y ser desplegado en decenas de hogares de Castilla y León para mejorar las condiciones de muchas personas mayores o dependientes, especialmente para las que viven solas.

Agradecimientos

La investigación que se presenta en este trabajo ha recibido financiación del proyecto ROSOGAR PID2021-123020OB-I00 financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033/FEDER, UE, y del proyecto EIAROB Financiado por Consejería de Familia de la Junta de Castilla y León - Next Generation EU.

Referencias

- Balogh, R., Obdrzalek, D., Sep. 2018. Using Finite State Machines in Introductory Robotics. Springer International Publishing, pp. 85–91.
DOI: 10.1007/978-3-319-97085-1_9
- Ben-Ari, M., Mondada, F., Ben-Ari, M., Mondada, F., 2018. Finite state machines. Elements of Robotics, 55–61.
DOI: 10.1007/978-3-319-62533-1_4
- Colledanchise, M., Ögren, P., 8 2017. Behavior trees in robotics and ai: An introduction. Behavior Trees in Robotics and AI.
DOI: 10.1201/9780429489105
- EIAROB, 2023. Eiarob. <https://www.cartif.es/eiarob/>.
- El Makrini, I., Omid, M., Fusaro, F., Lamon, E., Ajoudani, A., Vandcrborgh, B., 2022. A hierarchical finite-state machine-based task allocation framework for human-robot collaborative assembly tasks. In: 2022 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). pp. 10238–10244.
DOI: 10.1109/IROS47612.2022.9981618
- Fue, K., Porter, W., Barnes, E., Li, C., Rains, G., 2020. Center-articulated hydrostatic cotton harvesting rover using visual-servoing control and a finite state machine. Electronics 9 (8).
DOI: 10.3390/electronics9081226
- Gharagozloo, F., Tempesta, B., Meyer, M., Nguyen, D., Gruessner, S., Redan, J., 2021. History of Robotic Surgery. Springer International Publishing, pp. 21–29.
DOI: 10.1007/978-3-030-53594-0_3
- Girault, A., Lee, B., Lee, E., 1999. Hierarchical finite state machines with multiple concurrency models. IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems 18 (6), 742–760.
DOI: 10.1109/43.766725
- Hoppmann, C. A., Lay, J. C., Pauly, T., Zambrano, E., 4 2021. Social isolation, loneliness, and solitude in older adulthood. The Handbook of Solitude, 178–189.
DOI: 10.1002/9781119576457.CH13
- Instituto Nacional de Estadística, 2023. Proporción de personas mayores de cierta edad por comunidad autónoma(1451). <https://www.ine.es/jaxiT3/Datos.htm?t=1451#!tabs-tabla>.
- Junta de Castilla y León, 2023. La junta activa un teléfono gratuito para detectar, atender y combatir el aislamiento social de los mayores. <https://comunicacion.jcyl.es/web/jcyl/Comunicacion/es/Plantilla100Detalle/1284721258421/NotaPrensa/1285343829939/Comunicacion>.
- Kacprzyk, J., 2017. Robot operating system (ros).
DOI: 10.1007/978-3-319-26054-9
- Kohnke, L., Moorhouse, B. L., Zou, D., 2023. Chatgpt for language teaching and learning. RELC Journal 54 (2), 537–550.
DOI: 10.1177/00336882231162868
- Koziolok, H., Grüner, S., Rückert, J., 2020. A comparison of mqtt brokers for distributed iot edge computing. Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics) 12292 LNCS, 352–368.
DOI: 10.1007/978-3-030-58923-3_23
- Lee, D., Yannakakis, M., 1996. Principles and methods of testing finite state machines-a survey. Proceedings of the IEEE 84 (8), 1090–1123.
DOI: 10.1109/5.533956
- Malviya, V., Reddy, A. K., Kala, R., 2020. Autonomous social robot navigation using a behavioral finite state social machine. Robotica 38 (12), 2266–2289.
DOI: 10.1017/S0263574720000259
- Merino-Fidalgo, S., Zalama, E., Gómez-García-Bermejo, J. and Duque-Domingo, J., Gómez, R., Viñas, P., García, D., Urueña, H., 7 2023. Sistema de monitorización no intrusiva para vivienda de personas mayores. Jornadas Nacionales de Robótica y Bioingeniería 2023: Libro de actas, 115–121.
DOI: 10.20868/UPM.BOOK.74896
- Mishra, B., Kertesz, A., 2020. The use of mqtt in m2m and iot systems: A survey. IEEE Access 8, 201071–201086.
DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3035849
- Ramos, R. G., Domingo, J. D., Zalama, E., Gómez-García-Bermejo, J., 2021. Daily human activity recognition using non-intrusive sensors. Sensors 21 (16).
DOI: 10.3390/s21165270
- Ramos, R. G., Domingo, J. D., Zalama, E., Gómez-García-Bermejo, J., López, J., 2022. Sdhar-home: A sensor dataset for human activity recognition at home. Sensors 22 (21).
DOI: 10.3390/s22218109
- Singh, A. K., Kumbhare, V. A., Arthi, K., 2022. Real-time human pose detection and recognition using mediapipe, 145–154.
DOI: 10.1007/978-981-16-7088-6_12
- Temi V3, 2024. Temi v3. <https://www.robotemi.com/product/temi/>.
- Tran, N., Wu, J. Y., Deguet, A., Kazanzides, P., 2020. A deep learning approach to intrinsic force sensing on the da vinci surgical robot. In: 2020 Fourth IEEE International Conference on Robotic Computing (IRC). pp. 25–32.
DOI: 10.1109/IRC.2020.00011



Simposio de Robótica, Bioingeniería y Visión por Computador 2024



Sesión: Robótica

Desarrollo de un sistema de diálogo para robótica social mediante ChatGPT

Correa, A.^a, Zalama, E.^{a,b}, Gómez, J.^{a,b}, Duque, J.^a

^a ITAP-DISA, Universidad de Valladolid, 47002 Valladolid, España.

^b Centro Tecnológico CARTIF, Boecillo, 47151 Valladolid, España.

Resumen

Con el paso de los años, la automatización cada vez aparece en más áreas de la vida cotidiana. En el ámbito social, ya se utilizan robots para interactuar con las personas. Por ello, es imprescindible que esta interacción sea lo más natural y amena posible. En este artículo se presenta un sistema de diálogo orientado a la robótica social e integrado a través del modelo generativo ChatGPT en un robot Temi, que servirá como asistente personal para los usuarios. Este procedimiento permite no sólo acceder a la gran fuente de conocimiento que posee dicho modelo, sino que además habilita la ejecución de diversas acciones programables dentro del robot. Este proyecto se centra en trabajar con personas de avanzada edad que suelen vivir en soledad y necesitan ciertos cuidados. La implementación de ChatGPT dentro del robot asistente abrirá un amplio abanico de posibilidades que complementará las necesidades de estos ciudadanos.

Palabras clave: Robótica social, modelo generativo, lenguaje natural, sistema de diálogo, acciones, aprendizaje autosupervisado, prompt, transformers.

Development of a dialogue system for social robotics using ChatGPT

Abstract

Over the years, automation has increasingly permeated various aspects of daily life. In the social sphere, robots are already employed for human interaction, necessitating natural and enjoyable engagement. This article presents a dialogue system tailored for social robotics, integrated using the generative model ChatGPT into a Temi robot, serving as a personal assistant for users. This approach not only grants access to the model's vast knowledge base but also enables the execution of various programmable actions within the robot. Focused on elderly individuals often living in solitude and requiring specific care, this project aims to address their needs comprehensively. Implementing ChatGPT within the assistant robot promises a wide range of possibilities to enhance the lives of these citizens.

Keywords: Social robotics, generative model, natural language, dialogue system, actions, self-supervised learning, prompt, transformers.

1. Introducción

En la historia reciente, la trayectoria de los sistemas de diálogo en los robots ha evolucionado de manera vertiginosa. Desde la introducción de los robots sociales en ambientes domésticos y públicos, se ha creado una necesidad de mejorar y hacer más humana la interacción entre el robot y el usuario. Para lograr este objetivo, se necesitaba un sistema que fuera más natural. Fue entonces cuando apareció el procesamiento de lenguajes naturales (NLP o Natural Language Processing en inglés). Se trata de una ciencia de la computación que trata la interacción entre el humano y el robot y persigue hacerla más natural a través de la exploración de diferentes áreas como el

análisis del sentimiento, la extracción de palabras clave, la detección del idioma, etc.

Este campo de la computación se exploró por primera vez a principios de los años 70 (Winograd, 1971). Desde entonces, esta tecnología se ha utilizado en campos como la navegación (Tellex et al., 2011), (Shimizu & Haas, n.d.), (Macmahon et al., n.d.). Más adelante, se implementó esta tecnología para tratar de conseguir que los robots sociales fueran más inteligentes mediante la extracción de datos personales del usuario (Hameed, n.d.). Parte de esta recreación de la personalidad del robot conlleva incorporarle un sistema de reconocimiento de voz que sea capaz de hablar con el usuario. En (Alonso-Martín & Salichs, 2011) se valoran todas las

*Autor para correspondencia: alvaro.correa@uva.es

posibilidades y se escoge la más adecuada según el robot utilizado. Se ha estudiado el uso de esta tecnología en el campo de la robótica social (Mazzei et al., 2021) que es el que se trata también en este artículo. Esto ha ido evolucionando hasta la actualidad, donde se combina esta tecnología para crear modelos GPT (Generative Pre-trained Transformer). Estos modelos funcionan en base a los principios de los transformers, que son una arquitectura de modelo diseñada para procesar datos secuenciales, específicamente para tareas de procesamiento de lenguaje natural (NLP). En (Graterol et al., 2021) se puede observar un ejemplo de cómo se utiliza esta arquitectura para detectar emociones en el campo de la robótica social. Por otra parte, esta arquitectura dispone de un mecanismo de atención que le permite al modelo centrarse en las partes más relevantes de la entrada cuando está generando una respuesta. Además, estos modelos están preentrenados con datos masivos, lo cual les permite aprender contextos y situaciones para generar respuestas que sean más humanas.

Los modelos GPT funcionan a base de tokens, que son básicamente trozos de texto. A veces estos trozos pueden ser una letra, a veces es la mitad de una palabra o una entera. La idea es que cada token contenga la máxima cantidad de información posible para poder codificar texto con el menor número de tokens necesario. No se codificará el mismo texto con 15 tokens de una letra cada uno que con 15 tokens de varios caracteres cada uno. Los modelos de lenguaje GPT actuales tienen un límite de caracteres por cada token que generan, por lo que no se pueden empaquetar todas las palabras en un único token. Por otro lado, estos modelos no son deterministas. Es decir, no siempre generan la misma respuesta ante la misma entrada (aunque se les pueda programar para que sí lo sean). Esto se debe a que en realidad el modelo no genera un token predefinido para cada entrada, sino que devuelve una distribución de probabilidad sobre todos los posibles tokens.

Más concretamente, la compañía que está dominando este sector actualmente es OpenAI con su modelo generativo ChatGPT. Se trata de un modelo de lenguaje de gran tamaño (LLM) cuya versión más actualizada abarca una base de datos con información hasta abril de 2023. Poco después de su aparición, ya se intentó integrar en robots como sistema de interacción humano-robot y planificación de tareas (Xie et al., 2023). El modelo se hizo tan popular que se crearon otros LLM híbridos como por ejemplo HuggingGPT: el cual combina el potencial de ChatGPT con Hugging Face (Shen et al., 2023), que son herramientas para crear aplicaciones usando el aprendizaje automático. De esta manera, el modelo actuaría como un cerebro humano al tratar por un lado las tareas basadas en las solicitudes de humanos, y por otro asignar modelos a dichas tareas según su descripción, creando así una entidad autónoma e independiente que puede resolver tareas complejas. Otro ejemplo de creación de un modelo híbrido se encuentra en Visual ChatGPT (Wu et al., 2023), donde se combinan los modelos fundacionales visuales (VFM) con ChatGPT. Esto permite interactuar con estos VFM directamente a través de ChatGPT, pudiendo así procesar y automatizar entradas más complejas que resultarían en la generación de imágenes más precisas de acuerdo con lo que necesita el usuario. Estos modelos fundacionales han sido entrenados con gran cantidad de datos sin etiquetar generalmente mediante aprendizaje autosupervisado. ChatGPT se ha llegado incluso a probar en el ámbito de la

medicina (Shojaei, 2024), lo cual puede ser peligroso y arriesgado si alguna acción clave se deja en manos de la respuesta que pueda generar el modelo.

En (Bertacchini et al., 2023) presentan una aplicación de robótica social utilizando un robot Pepper conectado al sistema OpenAI (ChatGPT) para la iniciación de diálogos en tiempo real con el robot. Ese artículo se centra en personas con trastorno del espectro autista y se realizan experimentos en un entorno simulado. Otro ejemplo de integración de ChatGPT se puede ver en (Hireche et al., 2023) donde combinan este modelo con otro robot Pepper para crear un reportero de noticias llamado NewsGPT. En nuestra investigación trabajamos con personas de avanzada edad y también con personas dependientes. Además, nuestro trabajo se lleva a cabo

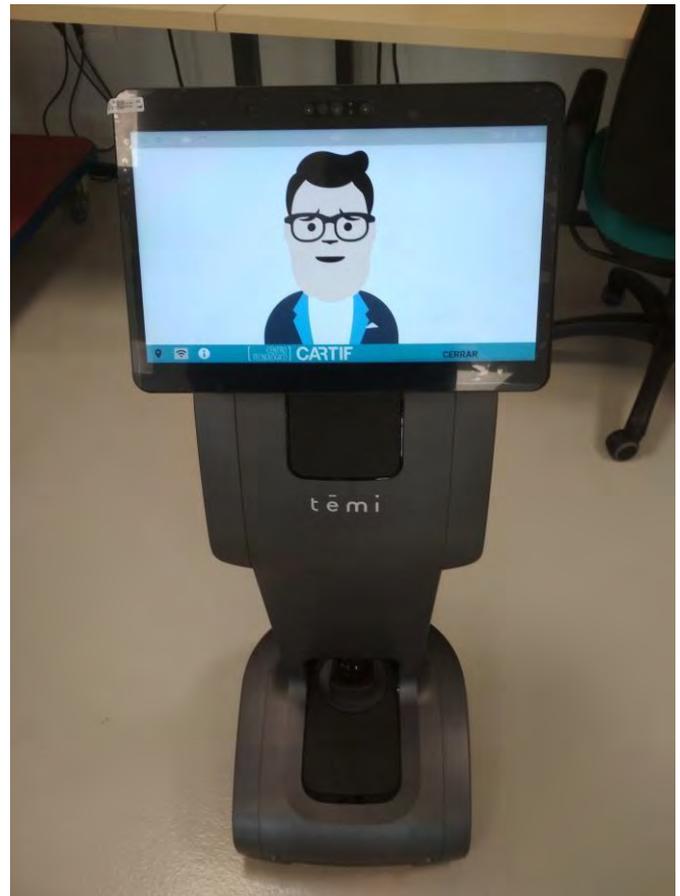


Figura 1: Fotografía del robot Temi mostrando el avatar que interactuará con el usuario.

con experimentación real, se trata del proyecto EIAROB. La intención es domotizar las viviendas en las que residan estas personas mediante sensores, internet y un robot asistente que acompañará a los usuarios.

En el siguiente apartado hablaremos del desarrollo de nuestro sistema de diálogo utilizando las herramientas más actualizadas de las que dispone OpenAI. En concreto nos referimos a la API de los asistentes de OpenAI. Esta tecnología nos sirve de puente para la comunicación entre el robot y los servidores de la compañía. Se trata de una herramienta lanzada hace unos meses, la cual dispone de más funcionalidades que su predecesora: la API de los “chat completions”. Entre otros aspectos permite facilitar el contexto de la conversación, ya

que su funcionamiento se basa en la creación de diferentes objetos para los hilos y los mensajes. Además, en cada interacción se realiza una ejecución que añade el mensaje actual al hilo en el que se encuentra el resto de los mensajes anteriores. Esto permite mantener el contexto de la conversación sin necesidad de enviarla en su totalidad por cada ejecución como se hacía con la API anterior.

2. Desarrollo del sistema

Ahora hablaremos sobre como integrar nuestro sistema de diálogo por ChatGPT en nuestro robot. En concreto, el robot que utilizaremos es el Temi fabricado por INTEC ROBOTS (*Temi - Robots as a Service - AI in Motion*, n.d.). Este robot utiliza una Tablet Android para comunicarse con el usuario. Colaboramos con la fundación CARTIF en este proyecto para realizar la aplicación que ejecuta el robot internamente. Nuestro programa de tratamiento de mensajes está realizado con código en lenguaje Python. Por lo tanto, necesitaremos una manera remota de comunicarnos con el robot.

2.1. Protocolo MQTT

Para ello hemos elegido el sistema de mensajes MQTT, que se caracteriza por ser un protocolo de red ligero basado en una estructura de publicación y suscripción a topics. Esto hace que sea sencillo de usar y tenga una corta duración en el envío de los mensajes. Además, el robot dispone de otras funciones definidas a nivel local como seguir al usuario, abrir aplicaciones de juegos y ejercicios o realizar videollamadas. Nuestro sistema entra en juego cuando el robot no reconoce la orden como alguna de las que están programadas a nivel local. Una vez que el robot detecta la entrada del usuario y no es reconocida a nivel local, se envía el contenido de esta mediante un mensaje MQTT a través de un topic al cual está suscrito el programa en Python de tratamiento de mensajes. Este programa se encarga de hacer una solicitud a ChatGPT con el contenido que ha llegado del usuario. Para ello, se crea primero el objeto que contiene al asistente y sus argumentos. Entre ellos, se encuentra el del modelo GPT a utilizar. En nuestro caso estamos usando el GPT 4 Turbo, que es el más reciente y el más actualizado. Esto significa que también está mejor entrenado y como consecuencia, puede tardar un poco más en proporcionar una respuesta. Luego se crean los objetos del hilo y los mensajes. Cada mensaje lleva un identificador para saber a qué hilo pertenece. Una vez definido el contenido del mensaje, se ejecuta un arranque con las instrucciones proporcionadas por el usuario y se espera a la respuesta. Cuando ChatGPT responde, se envía dicha contestación de nuevo al robot mediante MQTT a través de otro topic que está definido en el interior del robot y programado para pronunciar la respuesta utilizando el text-to-speech del robot. También lleva incorporado un avatar en la aplicación que mueve la boca cada vez que el TTS pronuncia alguna palabra. En la Figura 1 se puede observar el robot Temi con la aplicación de CARTIF abierta mostrando el avatar.

2.2. Funciones

En las instrucciones del asistente, lo que popularmente se conoce como “prompt”, se puede añadir no sólo su comportamiento de cara al usuario sino también la realización

de diferentes acciones. Estas acciones son llevadas a cabo a través de funciones que han de estar definidas en el propio programa de tratamiento de mensajes. A mayores hay que especificar al asistente que dispone de dichas funciones con sus respectivos parámetros en uno de sus argumentos llamado “tools”. Cuando el asistente detecta en la entrada del usuario un indicio de poder usar alguna de sus funciones disponibles, activa una bandera (flag) que indica que se ha de llamar a la función en cuestión. Tras esta llamada la función se ejecuta y devuelve un valor que determinará si se ha ejecutado o no con éxito. En cualquier caso, el asistente nos informará de ello generando una respuesta automática.

En la Figura 2 se puede observar el funcionamiento de este sistema mediante un diagrama de flujo. Cuando existen múltiples funciones definidas y se activa el flag para su utilización, ChatGPT decidirá cuál de ellas ejecutar en función de la entrada que haya dado el usuario. Este subproceso se detalla en el diagrama de la Figura 3. Según las pruebas realizadas, no es posible ejecutar múltiples funciones en un mismo arranque.

En nuestro caso, hemos implementado una función que permite guardar en el robot las instrucciones dictadas por el usuario. Actuando como un sistema de memoria a largo plazo, el prompt se mantiene siempre actualizado, aunque se produjera un reinicio en el sistema del robot. También es posible la eliminación de ciertas instrucciones previamente añadidas por el usuario. ChatGPT buscará dicha información dentro del prompt y ejecutará otra función que realiza el borrado de memoria.

3. Experimentación

Tras realizar varias pruebas, los resultados obtenidos figuran en la Tabla 1. Como se puede observar, la mayoría de los resultados son favorables, habiendo ciertos errores debidos en parte al mal funcionamiento de la infraestructura de OpenAI. Esto tiende a ocurrir cuando los servidores están saturados, o no se puede establecer la conexión por algún motivo.

Tabla 1: Comparativa entre los dos modelos GPT actuales

Modelo	Respuesta favorable	Respuesta errónea	Tiempo de respuesta
GPT 3.5	17	3	5 seg.
GPT 4	18	2	8 seg.

Por otra parte, en ciertas ocasiones el propio ChatGPT no siempre otorga la respuesta deseada. Por ello, es recomendable no depender de modelos generativos para tareas importantes especialmente si requieren de acciones. Un ejemplo de esto puede ser contactar con una API externa para realizar un pago en línea.

Además, cuando se le solicita al ChatGPT una respuesta larga o se requiere de la ejecución de una función, éste suele tardar mucho más tiempo de lo normal, haciendo que la espera se torne algo incómoda para el usuario y el resto de los espectadores si los hubiera.

Se puede comprobar que, de las 20 pruebas realizadas, el modelo GPT 4 ha tenido algo más de precisión en sus respuestas. Como contrapartida, este modelo es más lento que

su predecesor debido a la mayor cantidad de procesamiento que ha de realizar para cada respuesta.

En la Figura 4 puede verse una representación esquemática del proceso completo desde la entrada dada por el usuario hasta la salida generada por el modelo. Según las pruebas realizadas, el modelo GPT 4 tiende a respetar más el número de posibles palabras indicadas que el GPT 3.5. En una prueba realizada con GPT 4, la entrada fue: “cuéntame el Quijote en 25 palabras” y la salida: “Don Quijote es un noble apasionado con la caballería, quien, acompañado por Sancho Panza, enfrenta aventuras creyéndose caballero errante en una España de siglos pasados”.

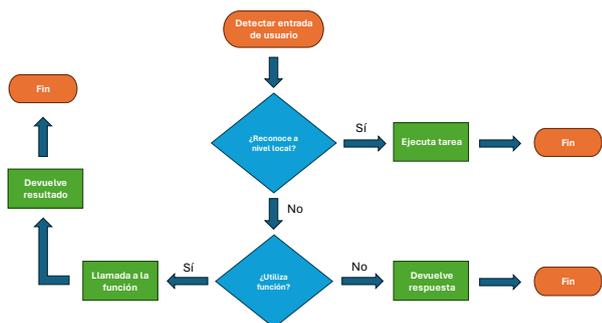


Figura 2: Diagrama de flujo del funcionamiento del sistema de diálogo.

jugar a un juego, ChatGPT manda un mensaje MQTT por el topic relacionado con el objeto JSON correspondiente que permite abrir el juego seleccionado. Este topic y objeto JSON están definidos dentro del SDK del robot. Además, si se quiere añadir nuevos juegos a la lista, el usuario sólo tiene que mencionarlo añadiendo el nombre del juego en cuestión.

Por otro lado, se encuentran las órdenes de movimiento del robot. Se ha implementado otra estructura que contiene diferentes secciones las cuales cada una se corresponde con una orden. Para cada orden existe también una ubicación. Actualmente se ha implantado en el robot tres destinos: cocina, baño y dormitorio. Las dos órdenes diferentes que se

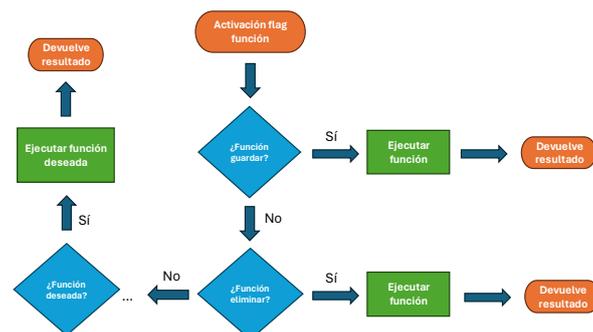


Figura 3: Diagrama del subproceso de tratamiento de funciones

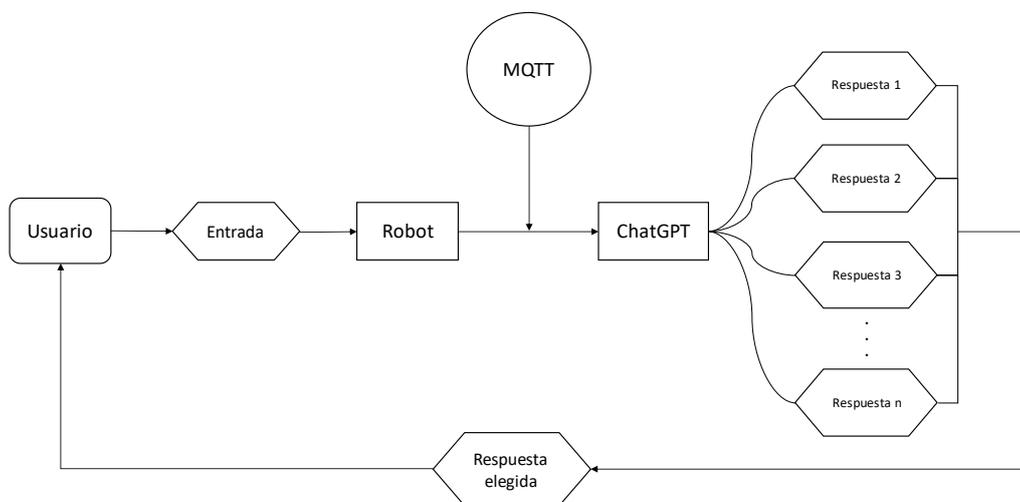


Figura 4: Esquema de respuesta del modelo ante la entrada del usuario.

Por otra parte, en las instrucciones del asistente (prompt) se han escrito múltiples casos de uso atendiendo a las diferentes situaciones en las que puede encontrarse el usuario en su casa. Por ejemplo, si el usuario expresa un estado de malestar mediante diferentes expresiones como: “estoy mareado”, “me encuentro mal”, “me duele la cabeza” ... ChatGPT interpreta esta información y sabe que el usuario no se encuentra bien. En este caso, en el prompt se ha escrito que se le pregunte al usuario si quiere llamar a alguien de sus contactos. Si la respuesta es afirmativa, ejecuta una función que activa la videollamada en el robot con la persona en cuestión. Si la respuesta es negativa le responde: “De acuerdo, si necesitas algo aquí estoy”.

Otro caso de uso tiene que ver con las aplicaciones de juegos que tiene instalado el robot. Se ha implementado un sistema en el prompt que permite tener una lista de diferentes juegos disponibles. De manera que cuando el usuario quiera

encuentran dentro del robot son: seguimiento y movimiento. De esta manera, cuando al robot le decimos: “sígueme a la cocina”, la orden va a ser de seguimiento y la ubicación será la cocina. Mientras que si le decimos: “vete a la cocina” la orden sería de movimiento con la ubicación cocina. En la orden de seguimiento no es necesario especificar la ubicación, en ese caso el robot seguirá a la persona hasta que ésta lo haga parar. Para ello existe otra orden específica también. Si la ubicación indicada no existe el robot manda un estado de error indicando que el destino no existe.

Por último, se definen las diferentes funciones que puede realizar el robot. Como mencionamos anteriormente, mediante la función “guardar” el robot puede almacenar cualquier información proporcionada por el usuario. Así, si le decimos: “hoy tengo cita con el dentista a las cinco, guarda esta información” el robot almacenará esta información en el prompt y se mantendrá actualizado. Para ello ChatGPT llama a

la función “guardar”, que simplemente coge la información dictada por el usuario, abre el archivo de texto donde se encuentra almacenado el prompt y luego lo guarda. La función “eliminar” realiza la misma tarea, pero eliminando el contenido dicho por el usuario. A mayores, hay alguna otra función definida que cumple un papel de proporcionar un valor añadido como por ejemplo enviar un e-mail a alguien o generar una imagen. Por desgracia, esta primera función no es práctica a la hora de usarse puesto que contiene demasiados argumentos para ser dichos por voz. La segunda sólo funciona actualmente generando la imagen a través del modelo DALL-E 3 y guardándola en el ordenador. Para sacarle su máximo partido se debería implementar el muestreo de la imagen en la aplicación integrada del robot.

Cabe mencionar que actualmente la mayoría de estas funciones se encuentran sin utilizar puesto que muchas de ellas se gestionan a nivel local, como el movimiento o los juegos. Esto hace que el robot reciba las órdenes más rápido, pero tiene el inconveniente de que se tiene que especificar en el código cada caso.

4. Conclusiones y líneas futuras

Este sistema de diálogo basado en un modelo generativo de inteligencia artificial dispone de múltiples ventajas a la hora de obtener respuestas ante diferentes preguntas sobre cualquier ámbito. Entre ellas cabe destacar la gran variedad de respuestas que el modelo puede ofrecer ante diferentes temas. También es útil cuando se trata de almacenar información importante de manera que el robot la recuerde en futuras conversaciones.

Sin embargo, no es recomendable depender de estos modelos para tareas de mayor importancia que involucren acciones, como ya se ha visto en los experimentos realizados. Por otra parte, el tiempo de espera se incrementa a medida que se alarga la respuesta de ChatGPT. Una manera de subsanar este inconveniente podría ser utilizando la función “stream” que tiene disponible actualmente la API de los asistentes. Esta función consiste en devolver la respuesta por tokens, en vez de esperar a que se genere por completo y luego enviarla. Por lo tanto, se podría enviar parte de la salida mientras se procesa el resto de manera que no se haga esperar al usuario en la respuesta del modelo. No obstante, el tiempo de procesado a la hora de ejecutar una función no se vería reducido puesto que no se trata de generar una respuesta que pueda ser entregada en trozos. La llamada a dicha función se ejecutará aproximadamente con el mismo tiempo de retardo independientemente de si el modo “stream” está activado o no. Esta demora dependerá tanto del equipo utilizado como de los servidores de OpenAI a la hora de procesar la llamada.

A mayores, como línea futura se podría implementar un mayor número de funciones dentro del programa Python que se encarga del tratamiento de éstas. De esta manera, el robot podría realizar un mayor abanico de acciones que fueran útiles de cara a la vida cotidiana. Otra opción posible es crear conversaciones guiadas a través de “intents” definidos en el prompt. Estos “intents” son las entradas que, si son pronunciadas para el usuario, harán que el robot guíe la conversación y, por ejemplo, tome la iniciativa formulando diferentes preguntas. Esta estructura seguiría la misma idea que comparte la plataforma de comprensión de lenguaje natural Dialogflow, que utiliza Inteligencia Artificial de Google.

En general, este sistema de diálogo incrementa considerablemente la calidad de vida del usuario, ofreciendo tanto una gran cantidad de información proporcionada por ChatGPT como la realización de diversas acciones a través de funciones predefinidas.

Agradecimientos

La investigación que se presenta en este trabajo ha recibido financiación del proyecto ROSOGAR (PID2021-123020OBI00) financiado por MCIN/ AEI / 10.13039/501100011033 / FEDER, UE, y del proyecto EIAROB Financiado por Consejería de Familia of the Junta de Castilla y León - Next Generation EU.

Referencias

- Alonso-Martín, F., & Salichs, M. A. (2011). Integration of a voice recognition system in a social robot. *Cybernetics and Systems*, 42(4), 215–245. <https://doi.org/10.1080/01969722.2011.583593>
- Bertacchini, F., Demarco, F., Scuro, C., Pantano, P., & Bilotta, E. (2023). A social robot connected with chatGPT to improve cognitive functioning in ASD subjects. *Frontiers in Psychology*, 14, 1232177. <https://doi.org/10.3389/FPSYG.2023.1232177/BIBTEX>
- Graterol, W., Diaz-Amado, J., Cardinale, Y., Dongo, I., Lopes-Silva, E., & Santos-Libarino, C. (2021). Emotion Detection for Social Robots Based on NLP Transformers and an Emotion Ontology. *Sensors 2021, Vol. 21, Page 1322*, 21(4), 1322. <https://doi.org/10.3390/S21041322>
- Hameed, I. A. (n.d.). *USING NATURAL LANGUAGE PROCESSING (NLP) FOR DESIGNING SOCIALLY INTELLIGENT ROBOTS*.
- Hireche, A., Belkacem, A. N., Jamil, S., & Chen, C. (2023). *NewsGPT: ChatGPT Integration for Robot-Reporter*. <https://arxiv.org/abs/2311.06640v1>
- Macmahon, M., Stankiewicz, B., & Kuipers, B. (n.d.). *Walk the Talk: Connecting Language, Knowledge, and Action in Route Instructions **. Retrieved March 20, 2024, from www.aaai.org
- Mazzei, D., Chiarello, F., & Fantoni, G. (2021). Analyzing Social Robotics Research with Natural Language Processing Techniques. *Cognitive Computation*, 13(2), 308–321. <https://doi.org/10.1007/S12559-020-09799-1/FIGURES/6>
- Shen, Y., Song, K., Tan, X., Li, D., Lu, W., Zhuang, Y., University, Z., & Research Asia, M. (2023). HuggingGPT: Solving AI Tasks with ChatGPT and its Friends in Hugging Face. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 36, 38154–38180. <https://github.com/microsoft/JARVIS>
- Shimizu, N., & Haas, A. (n.d.). *Learning to Follow Navigational Route Instructions*.
- Shojaei, M. (2024). CHAT-GPT and artificial intelligence in Medical Endocrine System and interventions. *Eurasian Journal of Chemical, Medicinal and Petroleum Research*, 3(1), 197–209. <https://doi.org/ejcmpr/20240216>
- Tellex, S., Kollar, T., Dickerson, S., Walter, M. R., Banerjee, A. G., Teller, S., & Roy, N. (2011). Understanding Natural Language Commands for Robotic Navigation and Mobile Manipulation. *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 25(1), 1507–1514. <https://doi.org/10.1609/AAAI.V25I1.7979>
- temi - Robots as a Service - AI in Motion. (n.d.). Retrieved March 20, 2024, from <https://www.robotemi.com/>
- Winograd, T. (1971). *Procedures as a Representation for Data in a Computer Program for Understanding Natural Language*. <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/7095>
- Wu, C., Yin, S., Qi, W., Wang, X., Tang, Z., & Duan, N. (2023). *Visual ChatGPT: Talking, Drawing and Editing with Visual Foundation Models*. <https://arxiv.org/abs/2303.04671v1>
- Xie, B., Xi, X., Zhao, X., Wang, Y., Song, W., Gu, J., & Zhu, S. (2023). ChatGPT for Robotics: A New Approach to Human-Robot Interaction and Task Planning. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 14271 LNAI, 365–376. https://doi.org/10.1007/978-981-99-6495-6_31/FIGURES



Simposio de Robótica, Bioingeniería y Visión por Computador 2024



Simulación de la cinemática inversa basada en la fórmula de producto de exponenciales: Aplicación al control articular del robot UR3e

Manrique Cordoba, J.^{a,*}, Fuentes, V.^a, Romero Ante, J.D.^a, Sabater Navarro, J.M.^a

^a Instituto de Bioingeniería. Universidad Miguel Hernández de Elche, C/ Avda. de la Universidad s/n. 03202. Elche, España.

Resumen

Se han desarrollado diversas metodologías para abordar el desafío del cálculo eficiente de la cinemática inversa de robots manipuladores. En este artículo, se propone una metodología basada en el producto de exponenciales para resolver la cinemática inversa para el caso del robot UR3e. La metodología planteada, derivada de la teoría de screws, produce una matriz que contiene las 8 soluciones del problema. Destacando la reducción en el tiempo de cálculo gracias a su enfoque geométrico. La matemática propuesta para la resolución de la cinemática inversa se implementa en el control de las posiciones articulares en un sistema de lazo abierto utilizando un controlador en Matlab-Simulink y el simulador URSim, dentro de un esquema ROS.

Palabras clave: Cinemática Inversa, Producto de Exponenciales, Control cinemático, Control articular.

Paper Simulation of inverse kinematics based on the product of exponentials formula: Application to the joint control of the UR3e robot

Abstract

Various methodologies have been developed to address the challenge of efficiently calculating the inverse kinematics of manipulator robots. In this paper, a methodology based on the product of exponentials is proposed to solve the inverse kinematics for the UR3e robot. The proposed methodology, derived from screws theory, produces a matrix that contains the 8 solutions to the problem. Highlighting the reduction in calculation time thanks to its geometric approach. The proposed mathematics for the resolution of inverse kinematics is implemented in the control of joint positions in an open loop system using a Matlab-Simulink controller and the URSim simulator, within a ROS scheme.

Keywords: Inverse Kinematics, Product of Exponentials, kinematic control, Joint Control.

1. Introducción

La cinemática se enfoca en el estudio del movimiento de sistemas mecánicos, sin considerar las fuerzas que lo causan. Este campo se subdivide en dos ramas principales: la cinemática directa y la cinemática inversa. En el caso de robots, la cinemática directa se centra en determinar la posición y orientación del extremo final de un robot en relación con un sistema de coordenadas de referencia, dados los valores de las articulaciones y los parámetros geométricos del robot. Por otro lado, la cinemática inversa, de mayor complejidad en el ámbito de la robótica, se ocupa de determinar la configuración necesaria del robot, incluyendo las articulaciones y los parámetros geométricos, a partir de una

ubicación específica del extremo del robot en relación con el sistema de coordenadas de referencia.

Roger Ware Brockett (Brockett, 2005) presentó el formalismo de Producto de Exponenciales (POE por sus siglas en inglés), para representar la cinemática de un manipulador de cadena cinemática abierta. Entre otras ventajas, la ausencia de las restricciones impuestas por el uso de los sistemas de referencia y parámetros clásicos de Denavit-Hartenberg (DH) hace del POE una alternativa a considerar frente al uso de los parámetros DH.

La teoría de los screws proporciona una perspectiva geométrica para describir la cinemática de manipuladores de cadena abierta con múltiples grados de libertad, permitiendo la representación del movimiento general de una articulación junto con su torsión. En esta formulación, es crucial seleccionar una configuración de referencia para el robot, ya

*Autor para correspondencia: jmanrique@umh.es

que el Producto de Exponenciales es un mapeo relativo de una pose a otra. La elección de esta configuración de referencia facilita el cálculo de las transformaciones cinemáticas y la planificación de movimientos en sistemas robóticos de alta complejidad, optimizando así su rendimiento y eficiencia en diversas aplicaciones industriales y de investigación.

El principal desafío en el cálculo de la cinemática inversa radica en su naturaleza altamente variable en cuanto a la existencia y cantidad de soluciones viables. La complejidad del problema de la cinemática inversa se intensifica de manera considerable conforme aumenta el número de articulaciones en el robot. Por ejemplo, para un manipulador con seis grados de libertad, el análisis debe considerar la posibilidad de múltiples soluciones, que pueden alcanzar hasta un conjunto máximo teórico de 16 posibles respuestas. Este fenómeno subraya la necesidad de enfoques sofisticados y métodos computacionales avanzados para abordar de manera efectiva la cinemática inversa en sistemas robóticos de alta complejidad.

El presente estudio busca adaptar la metodología planteada por Pardos-Gotor (Pardos-Gotor, 2021) en la resolución de la cinemática inversa de un UR16 con la formulación del producto de exponenciales al caso particular de un robot UR3e. Pardos-Gotor emplea los subproblemas definidos por Paden-Kahan (PK) para resolver la cinemática inversa, y además propone sus propios subproblemas (PG), los cuales han sido implementados en este trabajo.

La expresión de los subproblemas PK en términos de la teoría de screws es un producto de exponenciales aplicado a un punto. Basándose en un trabajo no publicado de Kahan (Kahan, 1983), Paden presentó este método por primera vez en 1985 (Paden, 1985). Los subproblemas PK son un conjunto de problemas geométricos resueltos arquetípicos que ocurren con frecuencia en la cinemática inversa de mecanismos robóticos comunes (Murray, Li, & Sastry, 2017).

2. Cinemática inversa basada en POE

El método implementado se basa en la propuesta de (Pardos-Gotor, 2021) que simplifica la complejidad de la cinemática inversa mediante la descomposición del problema en subproblemas canónicos más manejables, los cuales ofrecen soluciones geométricas exactas. Para obtener una solución geométrica, se abordan diversos subproblemas de manera secuencial. Estos subproblemas son aplicables en diferentes aspectos de la cinemática inversa, como la intersección de ejes de articulaciones o la determinación de las magnitudes de movimiento de las articulaciones, es decir, sus ángulos.

El objetivo es obtener las ecuaciones que relacionan el movimiento de las articulaciones con la posición de la herramienta, utilizando la teoría de screws. El problema se define conforme a la Figura 1, que ilustra un robot UR3e con todas sus articulaciones situadas en el origen, y donde se visualiza el sistema de referencia de la base del robot.

Se definen los ejes de cada articulación:

$$\omega_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad \omega_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \omega_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\omega_4 = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \omega_5 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} \quad \omega_6 = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

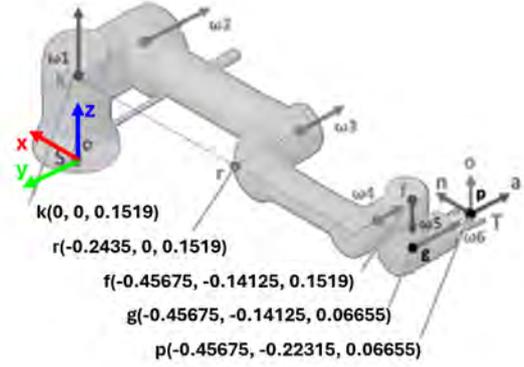


Figura 1: Parámetros de la cinemática inversa basada en producto de exponenciales tomada de (Pardos-Gotor, 2021), modificado a la configuración del UR3e (dimensiones y sistema de referencia).

Se obtienen los valores de Twists conociendo cada eje y las coordenadas de un punto sobre dicho eje con respecto al sistema de referencia de la base del robot.

$$\xi_1 = \begin{bmatrix} -\omega_1 \times o \\ \omega_1 \end{bmatrix} \quad \xi_2 = \begin{bmatrix} -\omega_2 \times k \\ \omega_2 \end{bmatrix} \quad \xi_3 = \begin{bmatrix} -\omega_3 \times r \\ \omega_3 \end{bmatrix}$$

$$\xi_4 = \begin{bmatrix} -\omega_4 \times f \\ \omega_4 \end{bmatrix} \quad \xi_5 = \begin{bmatrix} -\omega_5 \times g \\ \omega_5 \end{bmatrix} \quad \xi_6 = \begin{bmatrix} -\omega_6 \times p \\ \omega_6 \end{bmatrix}$$

Se obtiene la matriz de transformación con respecto a la posición de referencia del robot $H_{ST}(0)$, cuando las magnitudes de los twists son nulas.

$$H_{ST}(0) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & p_x \\ 0 & 0 & -1 & p_y \\ 0 & 1 & 0 & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Finalmente, se formula el problema en términos de POE:

$$H_{ST}(\theta) = e^{\xi_1 \theta_1} e^{\xi_2 \theta_2} e^{\xi_3 \theta_3} e^{\xi_4 \theta_4} e^{\xi_5 \theta_5} e^{\xi_6 \theta_6} H_{ST}(0) \quad (2)$$

$$= \begin{bmatrix} n & o & a & p \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Donde el operador (\wedge) es la transformación exponencial que permite escribir el twist (ξ) en forma matricial.

A continuación, se listan brevemente los subproblemas elegidos para resolver la cinemática inversa del UR3e.

2.1. Solución para θ_1 con el subproblema PG5

Tal y como lo describe (Pardos-Gotor, 2021), se parte de la premisa de que las magnitudes de las articulaciones 2, 3 y 4 no inciden en el plano Π_g en el que se desplaza el punto g . Este último se orienta alrededor del eje Z y se ve afectado exclusivamente por la magnitud de la primera articulación. Por consiguiente, las variaciones en los valores de θ_2 , θ_3 y θ_4 no influyen en el cálculo de θ_1 . Se aplica g a ambos lados de la ecuación (2) para obtener la siguiente ecuación:

$$e^{\xi_1 \theta_1} e^{\xi_2 \theta_2} e^{\xi_3 \theta_3} e^{\xi_4 \theta_4} e^{\xi_5 \theta_5} e^{\xi_6 \theta_6} g = H_{ST}(\theta) H_{ST}(0)^{-1} g \quad (3)$$

El lado derecho de la ecuación corresponde con el valor conocido de k_1 en el plano Π_{k_1} . El resultado es equivalente al subproblema PG5, la rotación de θ_1 se aplica sobre el plano Π_g , el cual contiene los puntos o y g y el eje ω_1 , que corresponde con el plano Π_{k_1} que incluye los puntos o y g y el eje ω_1 .

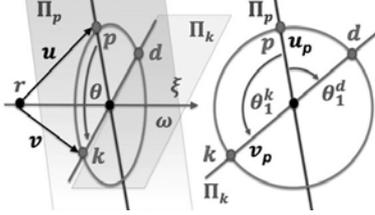


Figura 2: Definición gráfica del subproblema Pados-Gotor 5 (PG5) aplicado a un plano. (Pardos-Gotor, 2021)

$$e^{\xi_1 \theta_1} \Pi_g = \Pi_{k_1} \begin{Bmatrix} \theta_1^1 \\ \theta_1^2 \end{Bmatrix} \quad (4)$$

Es de notar que el punto g no cae dentro del plano de movimiento del manipulador (definido por los puntos o y r), por lo cual se introducen correcciones geométricas, de donde se obtienen las magnitudes viables de θ_1 .

$$u = g - o; \|u_p\| = \|u - \omega_1 \omega_1^T u\| \quad (5)$$

$$v = k_1 - o; \|v_p\| = \|v - \omega_1 \omega_1^T v\| \quad (6)$$

Adicionalmente, dado que el punto g se encuentra en una posición negativa en el eje Y del sistema de referencia de la base, de acuerdo a la configuración del UR3e, se debe mantener el signo negativo de la corrección geométrica.

$$\theta_1^{01} = \theta_1^1 - \sin^{-1} \left(\frac{-g_y}{\|v_p\|} \right) + \sin^{-1} \left(\frac{-g_y}{\|u_p\|} \right) \quad (7)$$

$$\theta_1^{02} = \theta_1^1 - \sin^{-1} \left(\frac{-g_y}{\|v_p\|} \right) + \sin^{-1} \left(\frac{-g_y}{\|u_p\|} \right) \quad (8)$$

2.2. Solución para θ_5 con el subproblema PG3 y PK1

La resolución de θ_5 coincide con la solución del UR16, propuesta por Pados-Gotor, como se explica a continuación. Se parte de la misma ecuación de la definición del problema, se aplica p a ambos lados de la ecuación, a la izquierda se cancela θ_6 dada la simplificación de PK1. En el lado derecho de la ecuación el producto de las tres exponenciales paralelas (segunda, tercera y cuarta) trasladan el punto k_{2p} sobre el eje X.

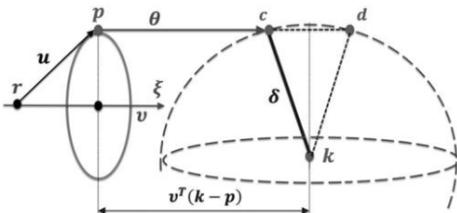


Figura 3: Definición gráfica del subproblema Pados-Gotor 3 (PG3) (Pardos-Gotor, 2021)

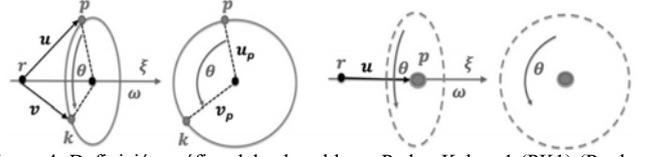


Figura 4: Definición gráfica del subproblema Paden-Kahan 1 (PK1) (Pardos-Gotor, 2021)

Para evaluar la magnitud, se emplea el subproblema PG3, donde se calcula la traslación dada una distancia dada, donde k_{2p} se traslada sobre el eje X a un punto determinado, cuya magnitud está determinada por la rotación de θ_5 , hasta el centro de rotación θ_5 . Se define esta traslación como θ_7 .

$$e^{\xi_5 \theta_5} e^{\xi_6 \theta_6} p = e^{\xi_2 \theta_2} e^{\xi_3 \theta_3} e^{\xi_4 \theta_4} e^{\xi_1 \theta_1} H_{ST}(\theta) H_{ST}(0)^{-1} p \quad (9)$$

$$e^{\xi_1 \theta_1} H_{ST}(\theta) H_{ST}(0)^{-1} p = k_{2p} \quad (10)$$

$$\|e^{\xi_7 \theta_7} k_{2p} - g\| = \|p - g\| \quad (11)$$

Se evalúa la magnitud de θ_7 mediante PG3 con la anterior ecuación. El lado derecho de la ecuación queda entonces completamente definido y equivalente a un cierto punto k_2 :

$$k_2 = k_{2p} + \omega_7^T \theta_7 \quad (12)$$

Con el valor de θ_1 , resolvemos el movimiento para la quinta articulación del robot, obteniendo dos posibles soluciones con esa magnitud y su valor en negativo.

$$e^{\xi_5 \theta_5} p = k_2 \begin{cases} \theta_1^{01} \Rightarrow [\theta_5^{01} & ; & \theta_5^{02} = -\theta_5^{01}] \\ \theta_1^{02} \Rightarrow [\theta_5^{03} & ; & \theta_5^{03} = -\theta_5^{03}] \end{cases} \quad (13)$$

2.3. Solución para θ_6 con enfoque algebraico

A partir de la formulación del problema en términos de POE, es posible encontrar el valor de la sexta articulación desde el punto de vista geométrico, la magnitud de la articulación dependerá únicamente de la primera y la quinta articulación del robot, las cuales forman una expresión de coordenadas esféricas. Puede haber una o ninguna solución para θ_6 en cada set de $\theta_1 - \theta_5$:

$$\theta_6 = \text{atan2} \left(\frac{o_x(\sin \theta_1 - \pi) - o_y(\cos \theta_1 - \pi)}{\sin \theta_5}, \frac{n_y(\cos \theta_1 - \pi) - n_x(\sin \theta_1 - \pi)}{\sin \theta_5} \right) \quad (14)$$

$$\theta_6 = \begin{cases} [\theta_1^{01} & \theta_5^{01}] \Rightarrow [\theta_6^{01}] \\ [\theta_1^{01} & \theta_5^{02}] \Rightarrow [\theta_6^{02}] \\ [\theta_1^{02} & \theta_5^{03}] \Rightarrow [\theta_6^{03}] \\ [\theta_1^{02} & \theta_5^{04}] \Rightarrow [\theta_6^{04}] \end{cases} \quad (15)$$

2.4. Soluciones para θ_2 , θ_3 y θ_4 con PG8

Finalmente, dado que el subproblema PG8 aborda tres rotaciones paralelas, se puede implementar la resolución válida para cualquier robot UR en sus articulaciones θ_2 , θ_3 y θ_4 . A partir de la expresión cinemática POE de la ecuación del problema, se traslada el primer exponencial al lado derecho de la ecuación, así, se obtiene una matriz de transformación homogénea H_k . Por otro lado, se conoce el valor de θ_5 y θ_6 , por lo que se tiene el producto de los exponentiales quinto y sexto por la matriz $H_{ST}(0)$, se denomina H_p .

$$e^{\xi_2\theta_2}e^{\xi_3\theta_3}e^{\xi_4\theta_4}e^{\xi_5\theta_5}e^{\xi_6\theta_6}H_{ST}(0) = e^{-\xi_1\theta_1}H_{ST}(\theta) \quad (16)$$

La ecuación resultante corresponde con la definición del subproblema Pardos-Gotor 8 (PG8), para tres rotaciones paralelas consecutivas (articulaciones 2, 3 y 4) aplicadas a un marco de coordenadas.

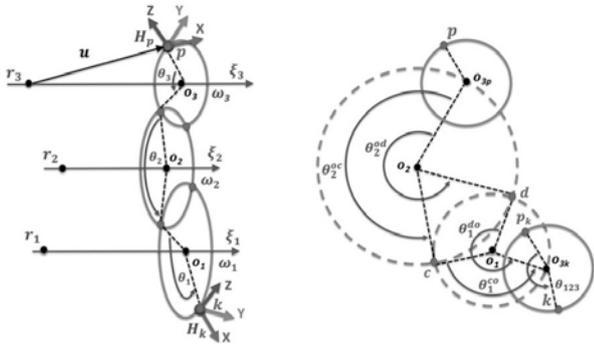


Figura 5: Definición gráfica del subproblema Pardos-Gotor 8 (PG8) (Pardos-Gotor, 2021)

Se conoce que las geométricas para PG8 pueden ser ninguna, una o dos soluciones triples para el conjunto θ_2 , θ_3 y θ_4 . Por lo cual, se debe resolver PG8 para cada conjunto de soluciones θ_1 - θ_5 - θ_6 .

$$e^{\xi_2\theta_2}e^{\xi_3\theta_3}e^{\xi_4\theta_4}H_p = \quad (17)$$

$$H_k \begin{cases} [\theta_1^{01} & \theta_5^{01} & \theta_6^{01}] \Rightarrow [\theta_2^{01} & \theta_3^{01} & \theta_4^{01}] [\theta_2^{02} & \theta_3^{02} & \theta_4^{02}] \\ [\theta_1^{01} & \theta_5^{02} & \theta_6^{02}] \Rightarrow [\theta_2^{03} & \theta_3^{03} & \theta_4^{03}] [\theta_2^{04} & \theta_3^{04} & \theta_4^{04}] \\ [\theta_1^{02} & \theta_5^{03} & \theta_6^{03}] \Rightarrow [\theta_2^{05} & \theta_3^{05} & \theta_4^{05}] [\theta_2^{06} & \theta_3^{06} & \theta_4^{06}] \\ [\theta_1^{02} & \theta_5^{04} & \theta_6^{04}] \Rightarrow [\theta_2^{07} & \theta_3^{07} & \theta_4^{07}] [\theta_2^{08} & \theta_3^{08} & \theta_4^{08}] \end{cases}$$

3. Aplicación a UR3e en ROS-Matlab

El análisis matemático descrito anteriormente se ha llevado a cabo para el caso de un robot UR3e (e-Series) y se ha implementado en una simulación utilizando el simulador URSim en el entorno Linux, que a su vez se alimenta con las posiciones articulares desde Matlab-Simulink. La Figura 6 ilustra el esquema de comunicaciones ROS-Matlab para el control articular del robot. En esta representación, los óvalos naranjanos simbolizan los nodos en ROS, donde los nodos de color naranjo indican aquellos que se ejecutan en Matlab-Simulink, en color azul los nodos que se ejecutan en Ubuntu (Python) y

los enlaces en color verde representan los topics de ROS que establecen la comunicación entre nodos.

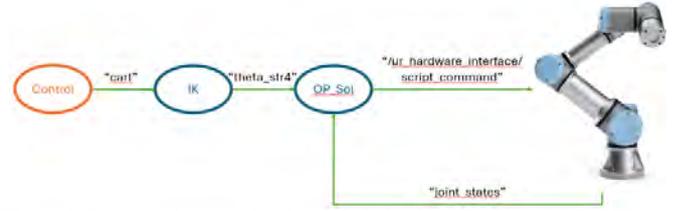


Figura 6: Esquema de comunicaciones de la implementación ROS-MATLAB

El nodo "control" transmite las coordenadas cartesianas a las que el robot debe dirigirse a través del topic "cart", al cual se suscribe el nodo "IK". Este último, determina las múltiples soluciones articulares posibles en relación con las posiciones recibidas y publica la información relativa a una matriz de ocho soluciones al siguiente nodo a través del topic "theta_str4". Finalmente, el nodo "OP_Sol" determina la solución articular más cercana a la posición actual, con el objetivo de minimizar el esfuerzo del robot para alcanzar la solución.

La Figura 7 presenta el diagrama de bloques implementado en Simulink, específicamente del nodo "control". En este diagrama, se configura un mensaje del tipo "twist" con unas coordenadas cartesianas fijas, para ser publicado mediante el tópico "cart".

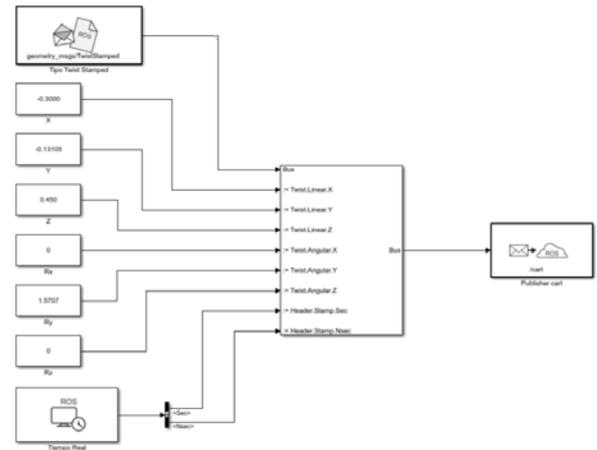


Figura 7: Diagrama de bloques en Matlab-Simulink

Por otra parte, la Figura 8 expone la representación gráfica de los componentes en ejecución en ROS, donde se aprecia en el nodo ejecutando en Simulink en lateral izquierdo, la comunicación del mismo a través del topic "cart", para posteriormente ser enviado al nodo de cinemática inversa, el cual publica los resultados en el topic "theta_str4". Adicionalmente, se puede apreciar los nodos correspondientes al controlador del UR3e, desde el nodo "ur_hardware_interface" que actúa como puente facilitador de envío de datos.

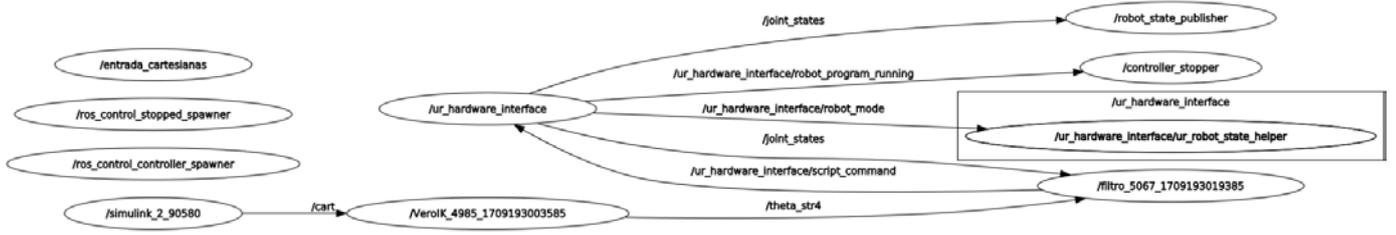


Figura 8: Representación gráfica de los componentes en ejecución en ROS

A continuación, se expone la implementación en Python para la solución de la cinemática inversa. Por simplificación del artículo, se considera que los subproblemas geométricos generales, Pardos-Gotor (PG) y Paden-Kahan (PK), se encuentran implementados en las funciones correspondientes.

3.1. Solución para θ_1 con el subproblema PG5

Para el cálculo de θ_1 se implementa el siguiente fragmento.

```

tg = np.append(pg,1)
Hst0_ = np.linalg.inv(Hst0)
aux = np.dot(Hst0_,tg.T)
noapHst0ig = np.dot(noap,aux)
pk1 = noapHst0ig[0:3]
t1 = PardosGotorFive(twist1,pg,pk1)
v1 = twist1[0:3]
w1 = twist1[3:6]
aux1 = np.cross(w1,v1)
aux2 = np.linalg.norm(w1)
r1 = aux1 / (pow(aux2,2))
v = pk1 - r1
vw1 = w1 * w1.T * v
vp1 = v - vw1
nvp = np.linalg.norm(vp1)
u = pg - r1
uw1 = w1 * w1.T * u
up1 = u - uw1
nup = np.linalg.norm(up1)
t11 = t1[0] - asin(-pg[1]/nvp) + asin(-pg[1]/nup)
t12 = t1[1] + asin(-pg[1]/nvp) + asin(-pg[1]/nup)
Theta_STR4[0:4,0] = np.real(t11)
Theta_STR4[4:8,0] = np.real(t12)

```

Al final las soluciones se almacenan correspondientemente en la variable “Theta_STR4”, la cual se va conformando como una matriz de 8 filas (soluciones) por 6 columnas (articulaciones).

3.2. Solución para θ_5 con el subproblema PG3 y PK1

Para el cálculo de θ_5 se consideran dos funciones para cada uno de los subproblemas aplicados, el cálculo se realiza recorriendo con un ciclo “for” los valores obtenidos en el paso anterior, así:

```

tp = np.append(pp,1)
Hst0_ = np.linalg.inv(Hst0)
aux = np.dot(Hst0_,tp.T)
noapHst0ip = np.dot(noap,aux)
for i in range(1,6,4):
    aux8 = np.append(twist1,[Theta_STR4[i-1,0]],axis=0)
    aux9 = expScrew(aux8)
    aux10 = np.linalg.inv(aux9)
    pk2ph = np.dot(aux10,noapHst0ip)
    pk2p = pk2ph[0:3]

```

```

w7 = [1,0]
w7 = np.append(w7,0)
x7 = np.append(w7,[0,0,0],axis=0)
aux11 = pk2p[0:2]
aux12 = np.append(aux11,0)
aux13 = pg[0:2]
aux14 = np.append(aux13,0)
aux15 = np.subtract(pp,pg)
aux16 = np.linalg.norm(aux15)
t7 =
PardosGotorThree(x7,aux12,aux14,aux16)
aux17 = np.dot(w7.T,t7[1])
pk2 = pk2p + aux17
if i == 1:
    t51 = PardosKahanOne(twist5,pp,pk2)
    Theta_STR4[0,4] = np.real(t51)
    Theta_STR4[1,4] = np.real(t51)
    Theta_STR4[2,4] = np.real(-t51)
    Theta_STR4[3,4] = np.real(-t51)
if i == 5:
    t51 = PardosKahanOne(twist5,pp,pk2)
    Theta_STR4[4,4] = np.real(t51)
    Theta_STR4[5,4] = np.real(t51)
    Theta_STR4[6,4] = np.real(-t51)
    Theta_STR4[7,4] = np.real(-t51)

```

3.3. Solución para θ_6 con enfoque algebraico

En el cálculo de θ_6 no es necesario incluir ningún subproblema, sin embargo, se resalta el cambio sobre las ecuaciones originales propuestas por Pardos-Gotor, para poder ser aplicadas a la configuración del robot a trabajar; a continuación, expone la implementación de dichas ecuaciones en Python.

```

ox = noap[0,1]; oy = noap[1,1]; nx = noap[0,0]
ny = noap[1,0]

for i in range(1,8,2):
    s1 = np.sin(Theta_STR4[i-1,0]-math.pi)
    c1 = np.cos(Theta_STR4[i-1,0]-math.pi)
    s5 = np.sin(Theta_STR4[i-1,4])
    aux3 = np.subtract(np.dot(ox,s1),np.dot(oy,c1))
    aux6 = np.subtract(np.dot(ny,c1),np.dot(nx,s1))
    if i == 1:
        t61 = math.atan2(aux3/s5,aux6/s5)
        Theta_STR4[0,5] = np.real(t61)
        Theta_STR4[1,5] = np.real(t61)
    if i == 3:
        t61 = math.atan2(aux3/s5,aux6/s5)
        Theta_STR4[2,5] = np.real(t61)
        Theta_STR4[3,5] = np.real(t61)
    if i == 5:
        t61 = math.atan2(aux3/s5,aux6/s5)
        Theta_STR4[4,5] = np.real(t61)
        Theta_STR4[5,5] = np.real(t61)
    if i == 7:
        t61 = math.atan2(aux3/s5,aux6/s5)
        Theta_STR4[6,5] = np.real(t61)
        Theta_STR4[7,5] = np.real(t61)

```

3.4. Soluciones para θ_2 , θ_3 y θ_4 con PG8

Dado que el cálculo de los valores de las últimas tres articulaciones depende de los valores obtenidos anteriormente, la implementación se basa en un ciclo “for” que recorre los valores almacenados en la matriz Theta_STR4 y a partir de ellos aplica la función correspondiente al subproblema PG8:

```

for i in range (1,8,2):
    aux1 = np.append(twist6,[Theta_STR4[i-
1,5]],axis=0)
    aux2 = expScrew(aux1)
    Hp = np.dot(aux2,Hst0)
    aux3 = np.append(twist5,[Theta_STR4[i-
1,4]],axis=0)
    aux4 = expScrew(aux3)
    Hp = np.dot(aux4,Hp)
    aux5 = np.append(twist1,[Theta_STR4[i-
1,0]],axis=0)
    aux6 = expScrew(aux5)
    aux7 = np.linalg.inv(aux6)
    Hk = np.dot(aux7,noap)
    t234 =
PardosGotorEight(twist2,twist3,twist4,Hp,Hk)

    if i == 1:
        t234 =
PardosGotorEight(twist2,twist3,twist4,Hp,Hk)
        Theta_STR4 [0,1] = t234[0,0]
        Theta_STR4 [0,2] = t234[0,1]
        Theta_STR4 [0,3] = t234[0,2]
        Theta_STR4 [1,1] = t234[1,0]
        Theta_STR4 [1,2] = t234[1,1]
        Theta_STR4 [1,3] = t234[1,2]
    if i == 3:
        t234 =
PardosGotorEight(twist2,twist3,twist4,Hp,Hk)
        Theta_STR4 [2,1] = t234[0,0]
        Theta_STR4 [2,2] = t234[0,1]
        Theta_STR4 [2,3] = t234[0,2]
        Theta_STR4 [3,1] = t234[1,0]
        Theta_STR4 [3,2] = t234[1,1]
        Theta_STR4 [3,3] = t234[1,2]
    if i == 5:
        t234 =
PardosGotorEight(twist2,twist3,twist4,Hp,Hk)
        Theta_STR4 [4,1] = t234[0,0]
        Theta_STR4 [4,2] = t234[0,1]
        Theta_STR4 [4,3] = t234[0,2]
        Theta_STR4 [5,1] = t234[1,0]
        Theta_STR4 [5,2] = t234[1,1]
        Theta_STR4 [5,3] = t234[1,2]
    if i == 7:
        t234 =
PardosGotorEight(twist2,twist3,twist4,Hp,Hk)
        Theta_STR4 [6,1] = t234[0,0]
        Theta_STR4 [6,2] = t234[0,1]
        Theta_STR4 [6,3] = t234[0,2]
        Theta_STR4 [7,1] = t234[1,0]
        Theta_STR4 [7,2] = t234[1,1]
        Theta_STR4 [7,3] = t234[1,2]

```

4. Conclusiones

El presente estudio expone la implementación de la cinemática inversa fundamentada en el producto de exponenciales, adaptada con las adecuaciones requeridas para su aplicación en el caso de un robot UR3e. Estas adaptaciones involucran ajustes tanto en las dimensiones como en la disposición de los sistemas de referencia espaciales definidos para el robot, como se ilustra en la Figura 1.

Los principales aportes presentados en este artículo se centran en la adaptación de las ecuaciones propuestas por Pardos-Gotor para resolver la cinemática inversa de un robot UR16 a la configuración específica de un UR3e. Entre estos ajustes se incluye el cambio en la orientación del sistema de

referencia, lo que afecta la matriz de transformación $H_{ST}(0)$, como se indica en la Ecuación 1. Además, se actualizan las ecuaciones geométricas utilizadas para calcular θ_1 (ecuaciones 7 y 8) después de resolver el subproblema PG5, y antes de llevar a cabo la resolución para θ_6 en la ecuación 14.

En la Figura 9 se puede observar por una parte el diagrama de bloques en simulink que transmite los mensajes a la red ROS en el lateral izquierdo, mientras que, en el lateral derecho, se puede ver en ejecución el simulador URsim correspondiente al robot UR3e en una máquina virtual con Linux. De esta forma se puede realizar un seguimiento a los movimientos del control articular del robot.

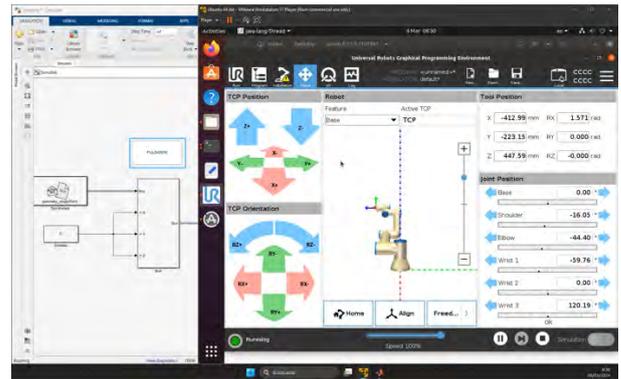


Figura 9: Representación gráfica de los componentes en ejecución en ROS

La metodología propuesta constituye una contribución significativa como una herramienta para llevar a cabo el control articular de un robot UR3e a través de ROS. Esta metodología ofrece una ventaja sobre los enfoques numéricos e iterativos, dado que la resolución con enfoque geométrico reduce el tiempo de cálculo y garantiza una solución sin necesidad de alimentar una primera estimación de solución.

El alcance de este trabajo se limita en la resolución de la cinemática inversa y su aplicación en un sistema de control de posición en lazo abierto, dejando para un próximo trabajo llevar a cabo el control articular en un sistema de lazo cerrado, así como implementar el control articular en velocidad.

Agradecimientos

La publicación es parte del proyecto PID2022-138206OB-C32, financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033/FEDER, UE y por la Generalitat Valenciana a través del proyecto CIPROM/2022/16.

Referencias

- Brockett, R. W., 2005. Robotic manipulators and the product of exponentials formula. *Mathematical Theory of Networks and Systems: Proceedings of the MTNS-83 International Symposium* (pp. 120--129). Beersbea: Springer.
- Kahan, W., 1983. *Lectures on computational aspects of geometry*. Unpublished manuscripts.
- Murray, R. M., Li, Z., & Sastry, S. S., 2017. *A mathematical introduction to robotic manipulation*. CRC Press.
- Paden, B. E., 1985. *Kinematics and control of robot manipulators*. Ph. D. Thesis.
- Pardos-Gotor, J., 2021. *Screw theory in robotics: an illustrated and practicable introduction to modern mechanics*. CRC Press.



Simposio de Robótica, Bioingeniería y Visión por Computador 2024



Una propuesta para el análisis emocional del movimiento del robot Pepper

Reyes-Capelo, M.J.^a, Gómez-Bravo, F.^{a,*}, Jiménez-Naharro, R.^a, López de Ahumada, R.^a

^aDepartamento de Ingeniería Electrónica, de Sistemas Informáticos y Automática. Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Campus de «El Carmen» Avda. de las Fuerzas Armadas, s/n. 21007, Huelva, España

Resumen

Este artículo introduce un método para evaluar las componentes emocionales del movimiento de un robot social mediante el sistema de notación de Laban. Esta sistemática permite describir características físicas del movimiento humano que se relacionan con las emociones transmitidas. El trabajo explora diversas estrategias para determinar la carga emocional asociada al movimiento de un robot, centrándose especialmente en el robot antropomorfo Pepper. Se presenta una implementación experimental del método, aplicándolo a la caracterización emocional de movimientos realizados por el robot con uno de sus brazos

Palabras clave: Robot social, Componentes emocionales, Notación de Laban, Evaluación de movimiento, Robot antropomorfo.

A novel approach for the emotional analysis of Pepper robot movement

Abstract

This article introduces an approach for evaluating the emotional components of the movement of a social robot using the Laban notation system. This methodology describes physical characteristics of human movement that are related to conveyed emotions. The work explores various strategies for determining the emotional component associated with robot movement, with a particular focus on the anthropomorphic robot Pepper. An experimental implementation of the method is presented, applying it to the emotional characterization of movements performed by the robot with one of its arms.

Keywords: Social robot, Emotional components, Laban notation, Movement evaluation, Anthropomorphic robot).

1. Introducción

Desde la creación del primer robot programable en 1954, la robótica ha encontrado aplicaciones en una amplia gama de campos, que van desde el entorno doméstico hasta el industrial. A lo largo de los años, se han desarrollado diversos prototipos con distintas tipologías y morfologías para satisfacer las necesidades específicas de cada sector. Sin embargo, todavía están por cubrir ciertas necesidades vinculadas con el desarrollo de la Robótica en el ámbito social. En efecto, ya desde su origen, el concepto y la palabra robot (Čapek, 1921) están asociados a un sueño centenario que desde la antigüedad ha tenido el hombre: desarrollar máquinas autónomas a su imagen y semejanza, con las que interactuar a diferentes niveles, incluyendo los aspectos emocionales que depare dicha relación. En este sentido, si bien el estudio de la robótica humanoide lleva desarrollándose durante décadas, el conocimiento de la interacción emocional entre el robot y su usuario todavía está en sus primeros pasos

(Beck et al., 2013); (Stock-Homburg, 2022); (Chuah and Yu, 2021).

En los últimos años ha surgido una nueva vertiente de estudio que relaciona el movimiento corporal con la expresión de emociones. Aunque esta relación ya estaba inicialmente establecida desde que Rudolf von Laban acuñó la notación de Laban en 1928 (Bradley, 2008), diversos estudios han investigado su aplicación en robots humanoides (Ahmed et al. (2019); Burton et al. (2016); La Viola et al. (2022)).

El fundamento de estos estudios se basa en el desarrollo del conocimiento sobre aspectos emocionales de la conducta humana, que involucra campos científicos relativos a la psicología y la sociología. En relación a este aspecto, no existe un consenso sobre la definición de emoción. Se trata de un tema de debate abierto en la actualidad, para el que se han propuesto enfoques alternativos (Cabanac, 2002) planteando la descripción de las emociones mediante un mapeado en un espacio de continuo de representación, o como una colección discreta de

*Autor para correspondencia: fernando.gomez@diesia.uhu.es
Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)

emociones básicas cuya combinación permite aproximar cualquier estado emocional de los humanos (Plutchik, 1991). En el presente artículo, se ha decidido utilizar una aproximación discreta de las emociones tal y como se ilustra en (Ekman et al., 1999).

Este trabajo se enmarca en un proyecto global cuyo objetivo es ampliar las capacidades de interacción de un robot social dotándolo de competencias para transmitir emociones vinculadas a los mensajes gestuales con los que interactúa con los humanos. En este sentido, se han explorado las capacidades del robot humanoide Pepper con el fin de implementar acciones que se sientan cercanas al ser humano. Con este propósito, se ha propuesto el uso de la notación de Laban en la caracterización emocional de movimientos desarrollados para uno de los brazos del robot Pepper. Más específicamente, el estudio ha considerado la generación manual de un conjunto de movimientos con un contenido semántico específico, tratando de incorporar en ellos, mediante una consideración subjetiva de los autores, características que los pudieran asociar *a priori* con determinados sentimientos. Posteriormente, se han evaluado numéricamente las componentes de Laban y a partir de ellas se ha asociado a cada movimiento, utilizando la metodología presentada en los trabajos referenciados, un contenido emocional *a posteriori*. El objetivo final ha sido, por una parte establecer una metodología que permite clasificar numéricamente la componente emocional de un movimiento del robot Pepper a partir la medida de sus variables articulares, y por otro, verificar si la clasificación obtenida mediante esta metodología se acercaba a la clasificación *a priori* establecida por los autores.

2. Análisis emocional del movimiento: Notación de Laban

En esta sección, se presentan los principios de la metodología de Laban para describir las componentes fundamentales del movimiento corporal humano. Posteriormente, se aborda el fundamento utilizado para asociar dichas componentes con el conjunto de emociones básicas utilizadas en este trabajo.

2.1. Análisis de Movimiento de Laban

El Análisis de Movimiento de Laban (Laban Movement Analysis, LMA), es un método y un lenguaje pensado para describir, visualizar, interpretar y documentar el movimiento humano con el objetivo de mejorar la conciencia y eficiencia del movimiento, así como la comunicación y la expresión en el día a día. Fue originado en Alemania a inicios del siglo XX por Rudolf Laban (1879-1958), considerado pionero en la danza europea moderna y teórico de la educación del movimiento.

Tradicionalmente se divide el LMA en cuatro componentes: Cuerpo, Esfuerzo, Forma y Espacio. A pesar de la necesidad definida según Laban de estudiar todos las componentes en su totalidad para entender plenamente el movimiento, diversos autores defienden el uso del Esfuerzo y de la Forma como medios para estudiar los movimientos desde una perspectiva conductual y expresiva. Diversos estudios demuestran que es posible hacer un análisis de la carga emocional de un movimiento solamente a partir de los factores que definen el Esfuerzo.

En el análisis del Esfuerzo se utilizan conceptos como la calidad del movimiento, o la actitud interna de un movimiento. El esfuerzo puede ser descrito como el uso dinámico y cualitativo

de la energía, centrándose en la actitud del actor con respecto al movimiento. Laban divide la caracterización del Esfuerzo en cuatro factores: Peso, Tiempo, Espacio y Flujo. Cada una de estos factores se encuentra en un espectro continuo entre dos polaridades conocidas como Elementos del Esfuerzo. En un polo se sitúan los elementos conciliadores, nombrados así porque la actitud de la persona es de aceptar las condiciones físicas que influyen el movimiento. En el otro polo los elementos son combativos, llamados así porque la actitud de la persona es de resistir y de luchar contra esas condiciones.

- El **Peso** mide de manera cualitativa la sensación de impacto del movimiento, expresada por el actor a través del uso dado al peso corporal dentro del movimiento, variando si va a favor o en contra de la gravedad. Sus elementos son Fuerte (Combativo) y Ligero (Conciliador).
- El **Tiempo** refleja la actitud del actor hacia la duración del movimiento. Se expresa a través de una aceleración o desaceleración en el movimiento, así como en el ritmo en el que se realiza. Sus elementos son Repentino (Combativo) y Sostenido (Conciliador).
- El **Espacio** muestra la atención interior del actuador hacia los alrededores. Este determina si el movimiento busca la trayectoria más corta o si pasa por su periferia. Sus elementos son Directo (Combativo) e Indirecto/Flexible (Conciliador).
- El **Flujo** es responsable la continuidad del movimiento. En esta componente, el actor refleja el control corporal. Sus elementos son Condensado (Combativo) y Libre (Conciliador).

Esta información se sintetiza en la tabla 1

Tabla 1: Factores del esfuerzo

	Descripción	E.Conciliador	E.Combativo
Peso	Imp. Movimiento	Ligero	Fuerte
Tiempo	Act. duración	Sostenido	Repentino
Espacio	At. hacia entorno	Directo	Indirecto
Flujo	At. a la precisión	Libre	Condensado

2.2. Caracterización de las Componentes Laban y asociación del contenido emocional

2.2.1. Espacio de descripción de las emociones

Existen diferentes perspectivas científicas que permiten enmarcar el estudio de las emociones a partir de definiciones más menos precisas. Por ejemplo, C. Lange describe las emociones como el resultado de las interpretaciones cognitivas de los cambios fisiológicos que ocurren en respuesta a estímulos (Lange and James, 1922). Más recientemente, A. Damasio argumenta que las emociones son respuestas automáticas del cuerpo a estímulos externos o internos que se basan en la evaluación subconsciente de la situación en relación con las experiencias pasadas y los objetivos personales (Damasio, 2004).

En cualquier caso, el desarrollo de este trabajo requiere de una metodología para representar y describir las emociones. En este sentido se pueden encontrar diversos planteamientos para abordar esta cuestión. Por una parte, D. Goleman (Goleman, 2001) propuso la teoría de la inteligencia emocional. Esta teoría sugiere que la inteligencia emocional se compone de

cinco componentes principales: autoconciencia emocional, autorregulación emocional, motivación, empatía y habilidades sociales. Anteriormente, Robert Plutchik (Plutchik, 1991) propuso un modelo de rueda de emociones que describe ocho emociones primarias: alegría, tristeza, confianza, aversión, miedo, sorpresa, ira y anticipación. Estas emociones primarias se organizan en pares opuestos, como la alegría y la tristeza, y se pueden combinar para formar emociones secundarias, como el amor (alegría + confianza) o el remordimiento (tristeza + aversión). En esta misma línea, Paul Ekman (Ekman et al., 1999) identificó seis emociones universales que son reconocibles independientemente de la cultura o el contexto: alegría, enfado, tristeza, miedo, asco y sorpresa, otros autores caracterizan estas seis emociones como: felicidad, tristeza, miedo, sorpresa, disgusto e ira. Este trabajo utiliza la clasificación propuesta por Ekman, siguiendo la línea desarrollada en (Lourens et al., 2010) y (Burton et al., 2016) para identificación de emociones vinculadas al movimiento del cuerpo.

2.2.2. Emociones y componentes de Laban

Existen diversos estudios que relacionan la caracterización de un movimiento mediante las Componentes de Laban (principalmente el Esfuerzo y la Forma), con las emociones que éste transmite. Para abordar este problema se han propuesto varios enfoques, que van desde el uso del aprendizaje automático (Ahmed et al., 2019) hasta la aplicación de métodos estadísticos (Lourens et al. (2010); Burton et al. (2016)). En este trabajo se ha decidido establecer la relación entre emociones y descriptores de Laban a partir de los estudios estadísticos planteados en: (Lourens et al., 2010), (Burton et al., 2016), (La Viola et al., 2022) y (Nakata et al., 2002).

Particularmente, el enfoque utilizado está en la línea del propuesto en (Burton et al., 2016). En dicho trabajo, diversos actores realizaron un conjunto de movimientos con el objetivo de transmitir cada una de las siguientes emociones: Enfado, Tristeza, Miedo, Asco, Sorpresa, Felicidad (Alegría). Todos estos movimientos fueron analizados usando la metodología de Laban por parte de Analistas del Movimiento de Laban (CMA), que además evaluaron empíricamente la componente emocional asociada a cada movimiento. Debido a que los factores Espacio y de Flujo obtuvieron bajos valores de correlación con las emociones evaluadas (por debajo de un 70 %), éstos no fueron considerados para proporcionar la clasificación emocional de los movimientos. El estudio determinó que existe una correlación entre dos de los factores del Esfuerzo (Peso y Tiempo), y cada una de las emociones, tal y como muestra la tabla 2.

Tabla 2: Caracterización de emociones según el Peso y el Tiempo del Esfuerzo

Emoción	Peso	Tiempo
Enfado	90 % ± 10	85 % ± 05
Tristeza	08 % ± 05	15 % ± 08
Miedo	40 % ± 15	37 % ± 15
Asco	25 % ± 10	37 % ± 18
Sorpresa	45 % ± 01	52 % ± 01
Alegría	32 % ± 08	35 % ± 12

En esta tabla las polaridades de cada factor se han cuantificado utilizando un intervalo continuo que asigna un 100 % al

máximo valor Combativo de una polaridad (Fuerte para el caso del Peso y Repentino para el caso del tiempo) y un 0 % al máximo valor conciliador de la polaridad contraria (Ligero para el caso del Peso y Sostenido para el caso del Tiempo).

En los trabajos (Lourens et al., 2010) y (La Viola et al., 2022), se observa que la influencia del Flujo en la caracterización de la emoción es ambigua, mientras que en (Nakata et al., 2002) la caracterización de la emoción asignada al movimiento incluye todos los factores menos el Flujo. Es por este motivo que la experimentación realizada en este trabajo ha considerado caracterizar la relación Esfuerzo/Emoción mediante los factores Peso y Tiempo.

3. Componentes del Esfuerzo de Laban en el movimiento de un robot

En esta sección se describe el procedimiento usado para calcular las Componentes de Laban a partir de magnitudes físicas que se pueden registrar en un robot. Dada la complejidad inicial del problema abordado, y atendiendo a las características de Pepper (el robot utilizado para la experimentación) el estudio se ha reducido al movimiento del brazo izquierdo, con el fin de simplificar el procedimiento de cómputo. Los cálculos que a continuación de detallan están basados en los estudios presentados en Ahmed et al. (2019) y Burton et al. (2016).

3.1. Cálculo de los factores de Esfuerzo de Laban

La metodología de cálculos que se presentan aquí puede aplicarse a cualquier robot cuyo movimiento se modele mediante cadenas cinemáticas.

3.1.1. Peso del Esfuerzo

Los estudios anteriormente referenciados establecen la estimación cuantitativa del Peso del Esfuerzo a través de la Energía Cinética de cada uno de los elementos de la cadena cinemática que componen las partes móviles del robot. Para este factor, se ha propuesto el siguiente proceso de cálculo.

1. En cada instante t_i se obtiene la velocidad lineal $\vec{v}^k(t_i)$ de cada uno de los Centros de Masa (CM) de cada uno de los enlaces k de la cadena cinemática.
2. Posteriormente se calcula la Energía cinética utilizando la masa de los enlaces. La ecuación utilizada para cada enlace k es la definida por la mecánica clásica :

$$E_c^k(t_i) = \frac{m^k \|\vec{v}^k(t_i)\|^2}{2} \quad (1)$$

3. En cada instante de tiempo, se almacena la suma de la Energía Cinética de todos los enlaces:

$$E(t_i) = \sum_{k \in K} E_c^k(t_i) = \sum_{k \in K} \frac{m^k \|\vec{v}^k(t_i)\|^2}{2} \quad (2)$$

4. Se estima el Peso del Esfuerzo como la media de la energía cinética almacenada:

$$WeightEffort = \frac{\sum_{i=1}^N E(t_i)}{N} \quad (3)$$

Si bien es posible que el cálculo de la energía cinética involucre la energía correspondiente a la rotación del enlace, en este trabajo se ha pretendido seguir las pautas descritas en Burton et al. (2016) donde solo se considera el cálculo de la componente de la energía cinética debida a la velocidad lineal del CM.

3.1.2. Tiempo del Esfuerzo

Se caracteriza el Tiempo del Esfuerzo usando la aceleración lineal de los distintos enlaces de la cadena. A continuación se expresa como ha sido calculado.

1. Se obtienen las celeración lineal \vec{a}^k de cada enlace k .
2. El módulo de las aceleraciones lineales de los enlaces son sumadas ponderadamente en función de la masa m^k de cada enlace.

$$Ac(t_i) = \sum_{k \in K} \|\vec{a}^k(t_i)\| \frac{m^k}{M}, \quad M = \sum_{k=1}^K m^k \quad (4)$$

3. Se estima el Tiempo del Esfuerzo como la media de la aceleración lineal ponderada almacenada:

$$TimeEffort = \frac{\sum_{i=1}^N Ac(t_i)}{N} \quad (5)$$

3.2. Metodología de cálculo para caracterizar el Esfuerzo del movimiento de un robot

Para calcular los factores del esfuerzo anteriormente enunciados en una cadena cinemática, el primer paso ha sido la lectura a lo largo del tiempo de los valores angulares de las articulaciones que vinculan los enlaces .

Debido al intervalo de muestreo que mostraba nuestro robot, los datos disponibles eran pocos, por lo que fue necesario realizar una interpolación temporal para tener una descripción completa del movimiento. Se ha utilizado una técnica de interpolación basada en splines cúbicas para determinar la evolución temporal de cada una de las variables articulares. A partir de las posiciones articulares expresadas en funciones continuas en el tiempo, se obtiene la velocidad y aceleración articular derivando dichas funciones. A partir de estos valores y utilizando el Jacobiano de la cadena cinemática es posible obtener las velocidades y aceleraciones lineales de cada uno de los enlaces que componen la cadena.

Cuando además se trate, de calcular del Espacio del Esfuerzo será necesario también obtener la posición en el espacio cartesiano de último enlace. Este cálculo se efectúa gracias al Modelo Cinemático Directo de la cadena cinemática utilizando el Algoritmo Denavit-Hartenberg.

Por último, es necesario normalizar los resultados con el fin de obtener unos datos comparables y significativos. El desarrollo práctico de esta metodología se presenta en el apartado de resultados experimentales.

4. Categorías de movimiento: contenido semántico y contenido emocional

La metodología presentada en los apartados anteriores se ha aplicado a varios conjuntos de movimientos, cada uno de

los cuales se referirá como *categoría de movimiento*. Las categorías de movimiento propuestas han sido: “Movimiento de Saludo”, “Movimiento de Atención” y “Movimiento de Petición”. Todos los movimientos dentro de una categoría tienen en común su contenido semántico, es decir, el significado que se pretende expresar. Por ejemplo, todos los movimientos dentro de la categoría “Movimiento de Saludo” tratan de transmitir un mensaje de saludo, independientemente de la emoción que expresen. La categoría “Movimiento de Atención” pretende expresar un mensaje por el cual el robot pide que se le preste atención, mientras que la categoría “Movimiento de Petición” intenta transmitir un mensaje por el cual el robot pide que se le haga entrega de un objeto.

Dentro de cada categoría se han generado distintas variaciones de movimientos denominados *expresiones emocionales*. Todos los movimientos han sido generados manualmente, basados en una heurística subjetiva, tratando de conseguir que estos presenten características que permitan asociarlos *a priori* con las emociones básicas definidas por Ekman (Ekman et al., 1999): Enfado, Alegría, Tristeza, Sorpresa, Asco y Miedo (y emoción neutra).

Posteriormente, el análisis computacional descrito en las secciones anteriores, ha sido aplicado de manera independiente a cada una de las expresiones emocionales para cada una de las categorías de movimiento planteadas. A partir de esto, se ha podido calcular el valor de los factores del Esfuerzo de Laban (Peso y Tiempo) para todas las expresiones emocionales generadas.

Los valores obtenidos se han normalizados de manera independiente para cada categoría de movimiento, de manera que se obtuvo, para cada expresión emocional, un porcentaje correspondiente a cada uno de los factores del Esfuerzo. Considerando estos porcentajes y de acuerdo con la tabla 2 se asigna a cada expresión emocional una etiqueta de emoción *a posteriori*. Precisamente, uno de los objetivos de este trabajo es comprobar el grado de coincidencia entre la heurística inicial al desarrollar los movimientos y la clasificación posterior obtenida con medios computacionales.

5. Resultados experimentales

5.1. El robot Pepper

Pepper es un robot móvil autónomo antropomorfo diseñado por Aldebaran ((Aldebaran, 2014)), (Figura 1 a).

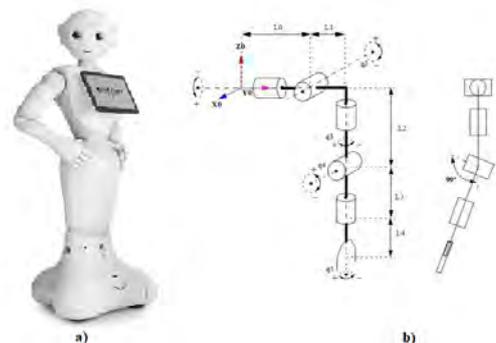


Figura 1: Robot Pepper: a) cuerpo del robot; b) diagrama articular del brazo izquierdo.

El robot presenta unas dimensiones y peso que pueden asimilarse a un humano. A parte de la movilidad de diversas partes del cuerpo, el sistema dispone de dos brazos articulados. Cada uno de ellos dispone de 2 grados de libertad en las articulaciones del hombro y el codo, y 1 grado de libertad en la muñeca y mano. Para la experimentación que se presenta en este artículo se ha utilizado el brazo izquierdo cuyo diagrama articular se observa en la Figura 1 b). Las dimensiones de los enlaces del brazo se muestran en la tabla 3. La tabla de parámetros de Denavit-Hartenberg del brazo, siguiendo la convención de Craig, se muestra en la tabla 4.

Tabla 3: Dimensiones del brazo de Pepper

L0 (m)	L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	L4 (m)
0.240	0.015	0.18120	0.150	0.0695

Tabla 4: Tabla de parámetros de Denavit- Hartenberg

	a_{i-1}	α_{i-1}	d_i	θ_i
1	0	$-\pi/2$	L_0	$q_1 + \pi/2$
2	0	$\pi/2$	0	$q_2 + \pi/2$
3	L_i	$\pi/2$	L_2	q_3
4	0	99°	0	q_4
5	0	$\pi/2$	L_3	q_5
6	0	0	L_4	0

5.2. Categorías de movimientos y expresiones emocionales

En esta sección se presentan varias imágenes que ilustran las categorías de movimiento y algunas de las expresiones emocionales que las componen. Por ejemplo, la Figura 2 ilustra a Pepper realizando la expresión emocional Alegre, correspondiente a la categoría Movimiento de Saludo.

En la Figura 3 se muestra la representación de la trayectoria del extremo del brazo para el resto de expresiones emocionales correspondientes a esta categoría. Hay que señalar que aunque en esta representación solo se muestra la trayectoria descrita por la mano, en el cómputo de los factores del Esfuerzo se considera también el movimiento del resto de eslabones de la cadena.

En las siguientes figuras se muestra sucesivamente unas secuencias con un ejemplo de la ejecución por parte de Pepper de la categoría de Movimiento de Atención con la expresión emocional Enfadado (Figura 4), y de la categoría Movimiento de Peticion con la expresión emocional Triste (Figura 5).

5.3. Evaluación emocional

En este apartado se ilustran los resultados obtenidos al aplicar la metodología propuesta a las tres categorías de movimiento consideradas. Concretamente dichos resultados se muestran en las tablas 5, 6 y 7. En particular, en la primera columna de todas ellas se presenta la clasificación emocional asignada a priori por los autores. En las dos siguientes columnas se muestran los valores porcentuales correspondientes a las componentes del Esfuerzo evaluadas, mientras que en la última columna se listan las clasificaciones emocionales obtenidas *a posteriori*.

Obsérvese que se ha marcado con un asterisco aquellas clasificaciones en las que coinciden la emoción predicha *a priori* con la clasificada *a posteriori*. Se ha comprobado que en todos

los casos, aquellos movimientos calificados *a priori* como tristes y de enfado, son siempre identificados con esa misma componente emocional por parte del método presentado. Es importante destacar que la no coincidencia entre ambas calificaciones no implica ningún fracaso de la sistemática propuesta, ya que la clasificación emocional *a priori* se ha generado en base a criterios subjetivos sujetos a caracterizaciones intuitivas que pueden llevar a error.

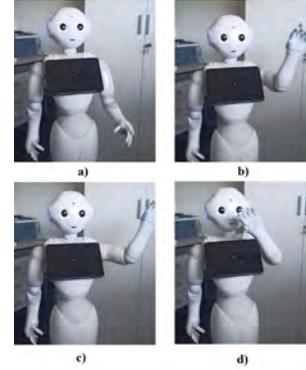


Figura 2: Categoría de movimiento: Movimiento de Saludo; expresión emocional: Alegre

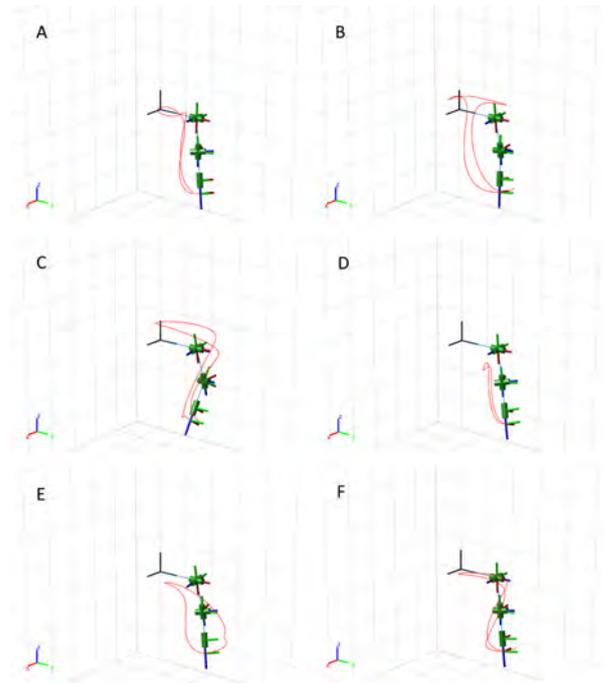


Figura 3: Expresiones emocionales del Movimiento de Saludo: A) neutro; B) alegría; C) enfado; D) miedo; E) asco; F) sorpresa

6. Conclusiones y futuros trabajos

Este artículo propone una metodología eficiente para evaluar la componente emocional de los movimientos de un robot social. El método propuesto ha sido aplicado a la caracterización emocional de ciertos movimientos realizados con el brazo izquierdo del robot antropomorfo Pepper. Específicamente, se han clasificado tres tipos de categorías de movimientos,

que agrupan un conjunto de maniobras articulares denominadas expresiones emocionales, las cuales comparten contenido semántico dentro de cada categoría. En futuros trabajos, se propone mejorar la caracterización de las emociones añadiendo al análisis más factores del Esfuerzo de Laban y considerando otros criterios de relación entre las componentes de Laban y el contenido emocional del movimiento.

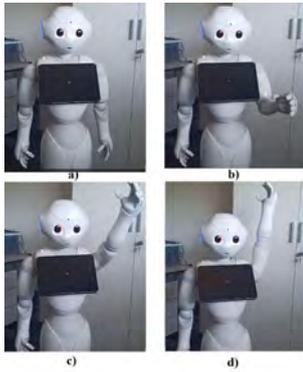


Figura 4: Categoría de movimiento: Movimiento de Atención; expresión emocional: Enfadado

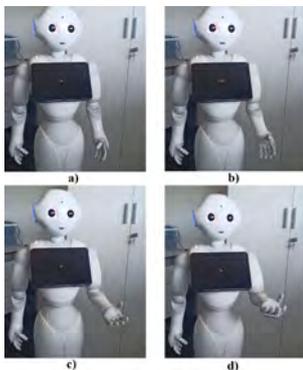


Figura 5: Categoría de movimiento: Movimiento de Petición; expresión emocional: Triste

Tabla 5: Clasificación de categoría “Movimiento de Saludo” según el estudio de Burton

Emoc. a priori	Peso	Tiempo	Emoc. a posteriori
Neutro	10.7 %	6.0 %	Tristeza
Alegría	38.8 %	23.3 %	Alegría/Miedo
Enfado	100 %	100 %	Enfado*
Miedo	0.0 %	0.0 %	Tristeza
Asco	46.3 %	46.9 %	Miedo
Sorpresa	43.1 %	42.9 %	Miedo
Tristeza	2.9 %	0 %	Tristeza*

Tabla 6: Clasificación de categoría “Movimiento de Atención” según el estudio de Burton

Emoc. a priori	Peso	Tiempo	Emoc. a posteriori
Neutro	12.9 %	7.8 %	Tristeza
Alegría	24.5 %	25.5 %	Resultado Ambiguo
Enfado	100 %	100 %	Enfado*
Miedo	54.3 %	42.1 %	Miedo*
Asco	0 %	0 %	Tristeza
Sorpresa	6.8 %	8.7 %	Tristeza
Tristeza	22.7 %	11.4 %	Tristeza*

Tabla 7: Clasificación de categoría “Movimiento de Petición” según el estudio de Burton

Emoc. a priori	Peso	Tiempo	Emoc. a posteriori
Neutro	1.4 %	4.8 %	Triste
Alegría	15.5 %	19.5 %	Asco
Enfado	100 %	100 %	Enfado*
Miedo	11.5 %	24.0 %	Tristeza
Asco	29.7 %	15.8 %	No clasificable
Sorpresa	0 %	12.5 %	Tristeza
Tristeza	2.1 %	0 %	Tristeza*

Referencias

- Ahmed, F., Bari, A. H., Gavrilova, M. L., 2019. Emotion recognition from body movement. *IEEE Access* 8, 11761–11781.
- Aldebaran, 2014. Página oficial de aldebaran. <https://www.aldebaran.com/es/pepper>, accedido en: 04/2024.
- Beck, A., Cañamero, L., Hille, A., Damiano, L., Cosi, P., Tesser, F., Sommavilla, G., 2013. Interpretation of emotional body language displayed by a humanoid robot: A case study with children. *International Journal of Social Robotics* 5, 325–334.
- Bradley, K. K., 2008. *Rudolf Laban*. Routledge.
- Burton, S. J., Samadani, A.-A., Gorbet, R., Kulić, D., 2016. Laban movement analysis and affective movement generation for robots and other near-living creatures. *Dance notations and robot motion*, 25–48.
- Cabanac, M., 2002. What is emotion? *Behavioural processes* 60 (2), 69–83.
- Čapek, K., 1921. *RUR*. Standard Ebooks.
- Chuah, S. H.-W., Yu, J., 2021. The future of service: The power of emotion in human-robot interaction. *Journal of Retailing and Consumer Services* 61, 102551.
- Damasio, A. R., 2004. *Emotions and feelings*. Vol. 5.
- Ekman, P., et al., 1999. Basic emotions. *Handbook of cognition and emotion* 98 (45-60), 16.
- Goleman, D., 2001. *Emotional intelligence: Issues in paradigm building*. The emotionally intelligent workplace 13, 26.
- La Viola, C., Fiorini, L., Mancioppi, G., Kim, J., Cavallo, F., 2022. Humans and robotic arm: Laban movement theory to create emotional connection. In: *2022 31st IEEE International Conference on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN)*. IEEE, pp. 566–571.
- Lange, C. G. E., James, W. E., 1922. *The emotions*, vol. 1.
- Lourens, T., Van Berkel, R., Barakova, E., 2010. Communicating emotions and mental states to robots in a real time parallel framework using laban movement analysis. *Robotics and Autonomous Systems* 58 (12), 1256–1265.
- Nakata, T., Mori, T., Sato, T., 2002. Analysis of impression of robot bodily expression. *J. Robotics Mechatronics* 14 (1), 27–36.
- Plutchik, R., 1991. *The emotions*. University Press of America.
- Stock-Homburg, R., 2022. Survey of emotions in human-robot interactions: Perspectives from robotic psychology on 20 years of research. *International Journal of Social Robotics* 14 (2), 389–411.



Simposio de Robótica, Bioingeniería y Visión por Computador 2024



Localización de Emisiones de Metano al Aire Libre con Robótica Móvil

Monroy, J.^{a,*}, Ojeda, P.^a, Gonzalez-Jimenez, J.^a

^aMachine Perception and Intelligent Robotics (MAPIR.UMA). Instituto Universitario de Investigación en Ingeniería Mecatrónica y Sistemas Ciberfísicos (IMECH.UMA). Universidad de Málaga, España.

Resumen

El presente trabajo aborda el problema de la detección y localización de emisiones de metano en espacios abiertos mediante el uso de robots móviles equipados con un detector de gas remoto basado en tecnología láser (TDLAS). En contraposición a los métodos convencionales que emplean detectores puntuales, o que empleando medidores de rango dependen del suelo como reflector natural (los cuales conllevan largos tiempos e ineficientes trayectorias de inspección), se propone un enfoque robótico cooperativo que permite tomar medidas sobre el plano horizontal, incrementando notablemente la eficiencia en la inspección. En este esquema, un robot *líder* transporta el detector de gas tomando medidas horizontales (paralelas al suelo), mientras que un segundo robot *seguidor* actúa como reflector artificial. Para la necesaria alineación entre el detector de metano y el reflector, se propone un sistema de seguimiento visual que estima la posición relativa de ambos robots, consiguiendo un alcance de medición de hasta 10 m. Los resultados obtenidos en un área experimental de 70 m² validan la efectividad de este enfoque para la rápida localización de fuentes de emisión de gas metano.

Palabras clave: Robótica y mecatrónica, Robots móviles autónomos, Gestión de recursos naturales, Aprendizaje automático para aplicaciones medioambientales, Integración y percepción de sensores.

Detection of Methane Emissions in Open Spaces: Application to Mobile Robotics

Abstract

This paper addresses the problem of detecting and localizing methane emissions in open spaces by using mobile robots equipped with a remote gas detector based on laser technology (TDLAS). In contrast to conventional methods using point detectors, or range finders that rely on the ground as the natural reflector (which entail long inspection times and inefficient inspection trajectories), a cooperative robotic approach is proposed that allows measurements to be taken on the horizontal plane, significantly increasing inspection efficiency. In this scheme, one robot, the *leader*, transports the gas detector by performing horizontal scans parallel to the ground, while a second robot, the *follower*, acts as an artificial reflector. For the necessary alignment between the methane detector and the reflector, a visual tracking system is proposed that estimates the relative position of both robots, achieving a measuring range of up to 10 m. The results obtained in an experimental area of 70 m² validate the effectiveness of this approach for the rapid localization of methane gas emission sources.

Keywords: Robotics and mechatronics, Autonomous Mobile Robots, Natural resources management, Machine learning for environmental applications, Sensor integration and perception.

1. Introducción

El metano (CH₄) es un potente gas de efecto invernadero que contribuye significativamente al calentamiento global y al cambio climático. En una escala temporal de 20 años, el metano tiene un potencial de calentamiento 84 veces mayor que el dióxido de carbono (CO₂) (Kupers et al., 2023). Es tal su

impacto que la Unión Europea ha comenzado a legislar para reducir las emisiones de metano del sector energético en Europa y en nuestras cadenas de suministro mundiales. Es cuestión de tiempo que esta legislación, que por ahora solo incumbe a las principales fuentes de emisión de metano (ver Figura 1), sea ampliada a otros sectores productivos como la agricultura o la gestión de residuos orgánicos (Themelis and Ulloa, 2007).

*Autor para correspondencia: jgmonroy@uma.es

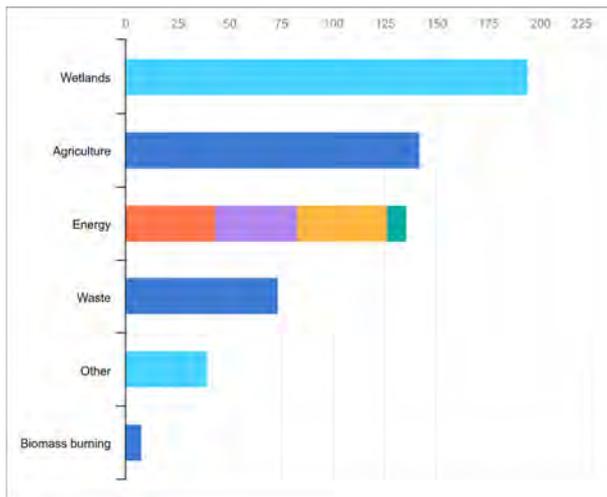


Figura 1: Estimación de emisiones globales de metano (10^9 Kg/año) de las cinco principales categorías para el periodo 2008-2017. Fuente (Saunois et al., 2019).

La detección y el control preciso de las emisiones de metano es, por tanto, un aspecto crucial para reducir el impacto ambiental y aprovechar su potencial energético para la generación de electricidad. Sin embargo, el metano es un compuesto gaseoso inodoro, incoloro y más ligero que el aire, lo que dificulta enormemente su detección. Esta dificultad es especialmente pronunciada en entornos al aire libre, en los que deben controlarse grandes áreas y donde el metano asciende de forma natural, disipándose en la atmósfera.

Existen diversas tecnologías para la detección de metano: sensores ópticos, sensores calorimétricos, sensores piroeléctricos, sensores de óxido metálico semiconductor o sensores electroquímicos (Aldhafeeri et al., 2020). Entre ellas, para mediciones continuas sobre el terreno, destacan las tecnologías ópticas como TDLAS (Espectroscopia de Absorción Láser de Diodo Sintonizable) por su alta sensibilidad, selectividad y su capacidad de proporcionar mediciones a lo largo de la trayectoria del rayo (medición de rango distribuido) (Kwaśny and Bombalska, 2023; Mønster et al., 2019). La tecnología TDLAS funciona según el principio de la espectroscopia de absorción láser, utilizando radiación electromagnética en el rango del infrarrojo cercano. La luz pulsada se emite en dos longitudes de onda: una que es fácilmente absorbida por CH_4 , y otra, en una longitud de onda cercana, que no se ve afectada por CH_4 y que es usada a modo de referencia. Esta tecnología encuentra aplicaciones en diversas industrias y entornos, como en gaseoductos e instalaciones de almacenamiento de gas natural (Corbett and Smith, 2022).

A pesar de sus ventajas, el principio de funcionamiento del TDLAS impone la necesidad de disponer de un fondo reflectante (como cualquier otro sistema láser). Además, dado que cada medición proporciona la concentración de gas acumulada a lo largo de la trayectoria del rayo (*densidad de columna*), se requieren múltiples lecturas desde diferentes posiciones y orientaciones para determinar la distribución espacial del gas, o para localizar las fuentes de emisión (Bennetts et al., 2014). Es por ello que esta tecnología se ha usado típicamente en interiores, donde las paredes, suelo o techo actúan como reflectores (Li et al., 2020), o en exteriores empleando el detector mirando hacia abajo (configuración top-down) para utilizar el terreno como reflector natural (Neumann et al., 2017; Gålfalk et al., 2021).

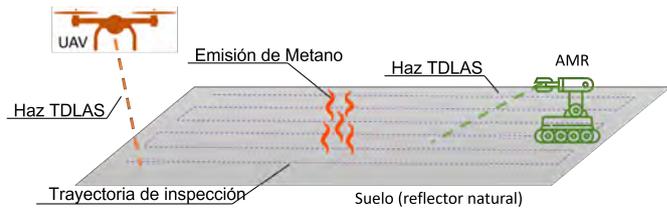


Figura 2: Enfoque convencional de inspección para la detección y localización de metano con detector TDLAS. Emplear el suelo como reflector natural conlleva tediosas trayectorias y largos tiempos de inspección.

Utilizar el suelo como reflector es el enfoque más convencional debido a la simplicidad de su configuración, siendo solo necesario un robot con el sensor TDLAS para realizar las medidas. No obstante, como se ilustra en la Figura 2, este enfoque requiere numerosas mediciones y tediosas trayectorias de inspección para cubrir el área de trabajo (Arain et al., 2021). Dada la limitada autonomía de los vehículos aéreos no tripulados (UAV) o de los robots móviles autónomos (AMR), este enfoque minimalista resulta ineficaz en la práctica, especialmente para inspeccionar grandes espacios abiertos.

En este artículo analizamos la colaboración entre dos plataformas robóticas móviles para realizar medidas a lo largo de planos horizontales (ver Figura 3). Un robot (*líder*) lleva el detector TDLAS, mientras que otro (*seguidor*) coloca un reflector artificial en la línea de visión del haz láser. Esta configuración permite tomar medidas en múltiples disposiciones, tanto 2D como 3D, permitiendo adaptarse a la estructura del entorno a inspeccionar y reduciendo notablemente el tiempo necesario para inspeccionar grandes áreas. Dada la naturaleza ascendente del metano (gas más ligero que el aire), esta configuración colaborativa permite una rápida detección y localización de emisiones de metano.

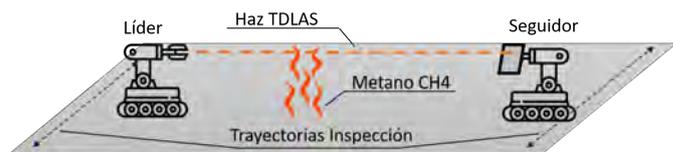


Figura 3: Enfoque de inspección horizontal para la detección y localización de metano con detector TDLAS mediante la colaboración de dos robots móviles.

El resto del documento está organizado de la siguiente manera. La sección 2 introduce el problema de alineación relativa entre el medidor TDLAS y el reflector artificial, mientras que la sección 3 describe el método de generación de mapas de distribución de gases empleado para estimar la presencia de metano en el entorno. El montaje experimental utilizado para validar el enfoque propuesto se detalla en la sección 4, seguido de los resultados y discusión en la sección 5. Por último, las conclusiones y el trabajo futuro se exponen en la sección 6.

2. Alineación Relativa entre Medidor TDLAS y Reflector

La idea central detrás de la detección de metano asistida por TDLAS sin emplear el suelo como reflector natural es asegurar, en el momento de la medición, que el haz emitido por el medidor TDLAS es interceptado correctamente por el reflector

artificial introducido. Suponiendo que cada elemento del sistema es capaz de localizarse con respecto a un marco común (*i.e.* el sistema de referencia del mapa, *GPS*, etc.), el enfoque más simple consiste en compartir sus poses absolutas para discernir si están correctamente posicionados en el entorno, o requieren de cierta corrección.

Para la configuración colaborativa, asumiendo que el robot que actúa como *líder* inspecciona el área de trabajo siguiendo una trayectoria predefinida, el robot *seguidor* deberá navegar reactivamente hasta una pose separada por una distancia fija D y perpendicular a la pose del *líder* con la intención de servir como reflector (véase Figura 4).

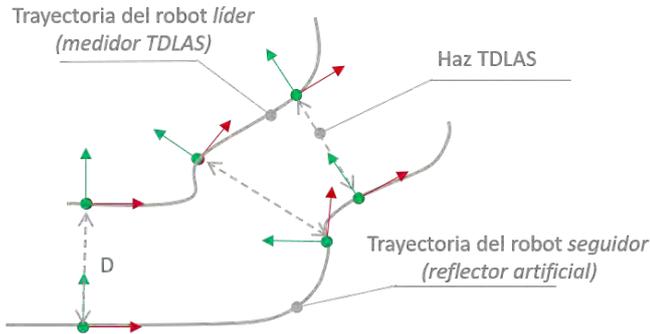


Figura 4: Ilustración de las trayectorias del medidor y del reflector artificial para la inspección de metano asistida por TDLAS en un área abierta sin reflectores naturales.

Los inevitables errores de localización (en particular los relativos a la orientación) hacen que este enfoque sea poco práctico, como se ilustra en la Figura 5. Los métodos actuales de localización para robots móviles en entornos exteriores se basan en sistemas visuales (Weiss et al., 2007), *GPS* (Madhavan et al., 2002), *LiDAR* 3D (Chen et al., 2021), o una mezcla de ellos. Independientemente del enfoque seleccionado, la incertidumbre en la localización debe tenerse en cuenta a la hora de alinear el medidor con el reflector, especialmente cuando la distancia entre ellos es grande (decenas de metros), ya que pequeños errores en la estimación de la orientación hacen que el rayo láser no alcance su objetivo, imposibilitando la medición de metano.

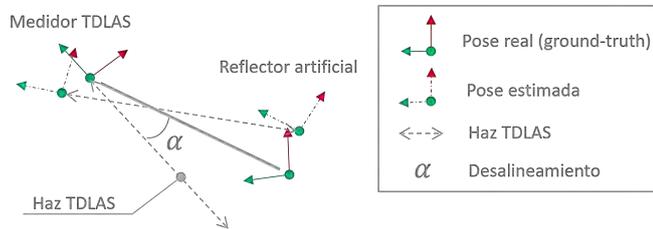


Figura 5: Ilustración 2D de los errores de alineación entre el medidor TDLAS y el reflector debido a las imprecisiones en su estimación de pose.

Para superar este problema, se monta el medidor de metano en una unidad de giro e inclinación (*PTU*), que integra además una cámara RGB. En el *seguidor*, añadimos un marcador visual de referencia (por ejemplo, *ArUco*, *AprilTag*, etc.), lo que permite una estimación precisa de la posición relativa entre ambos. Mediante un sencillo bucle de control, se minimizan los errores de alineación, asegurando que el TDLAS apunta al reflector en

el momento de la medición sensorial. La Figura 6 muestra una ilustración en 3D, que representa los ángulos *pan* y *tilt* necesarios para alinear el medidor y el reflector.

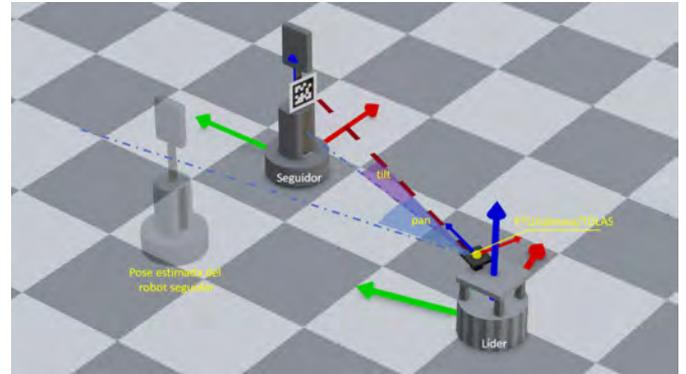


Figura 6: Reconstrucción 3D de la estimación de la pose relativa entre el líder (PTU/cámara/TDLAS) y el seguidor (marcador fiducial). Las correcciones de la PTU permiten alinear correctamente el medidor y el reflector del TDLAS.

3. Mapeo de la Distribución de Metano a partir de Mediciones Integrales

Como en la mayoría de los trabajos anteriores sobre mapeo de distribución de gases (*GDM*) (Gongora et al., 2020; Monroy et al., 2016) simplificamos el problema estimando un mapa discreto bidimensional, dividiendo el espacio en una rejilla rectangular de celdas $\mathbf{c} = \{c_i\}_{i=1}^N$. Cada variable escalar c_i representa la concentración de gas dentro de la celda i con coordenadas (x_i, y_i) . Nótese que este modelo se asemeja a los mapas de ocupación típicos en robótica, con la diferencia de no tener una distribución discreta (ocupado vs. libre) sino una magnitud continua, la concentración de gas.

Mientras se inspecciona la zona de trabajo, las medidas integrales recogidas por el detector de metano $\mathbf{y} = \{y_j\}_{j=1}^P$ se procesan para estimar el mapa de concentración 2D \mathbf{c} , que puede utilizarse posteriormente para localizar las fuentes de emisión presentes. Como el detector TDLAS aporta mediciones integrales sin información sobre la longitud del haz, localizamos el haz óptico utilizando las poses estimadas de ambos robots y el mapa de ocupación del entorno \mathbf{m} .

En general, el conjunto de celdas afectadas por el haz óptico de una medición integral y_j se obtiene mediante la proyección de rayos en el mapa de ocupación. El punto inicial de cada rayo corresponde a la pose 2D del sensor TDLAS (que tiene en cuenta la pose del robot *líder* y las correcciones de la PTU), mientras que el punto final corresponde a la pose del reflector portado por el robot *seguidor*, o un obstáculo caso de haber obstáculos presentes en el entorno. Una ilustración del procedimiento de proyección de rayos se presenta en la Figura 7. Para tener en cuenta el segmento de intersección entre el haz óptico y cada celda del mapa, definimos la matriz de distancia \mathbf{D} , donde D_{ji} representa la distancia recorrida por el haz óptico y_j en la celda c_i .

Siguiendo esta notación, una medición integral de metano puede expresarse como la suma ponderada de concentraciones

Mapa de ocupación

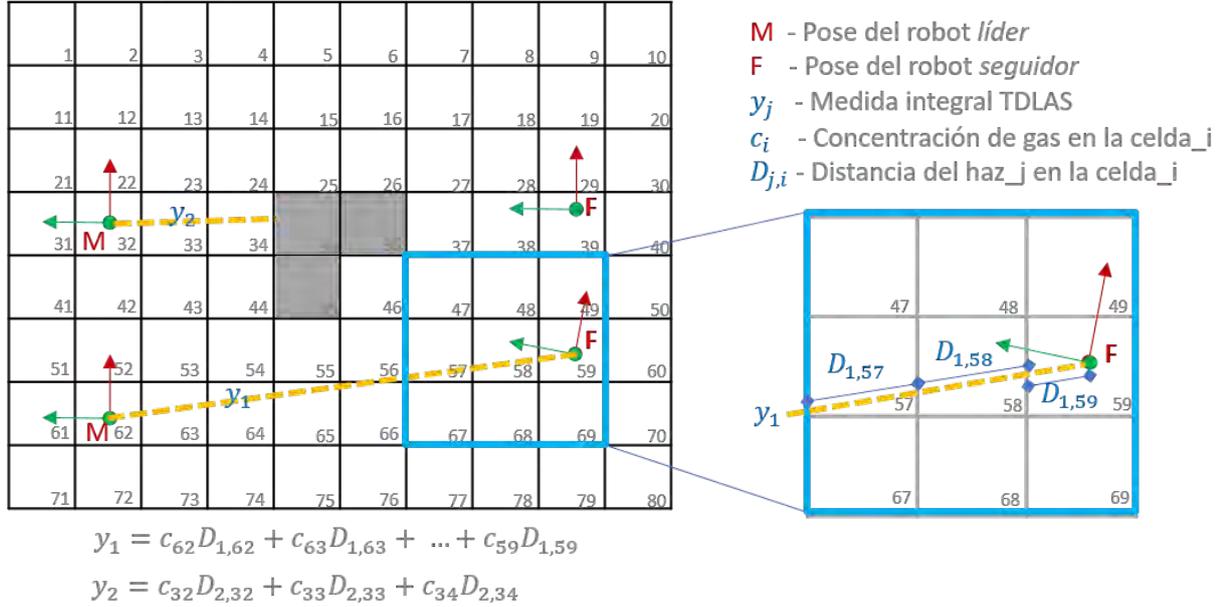


Figura 7: Ilustración del proceso de proyección de rayos para dos medidas integrales y_1 y y_2 . Cada medición se expresa como la suma ponderada de las concentraciones de gas en las celdas atravesadas (c_i), empleando como peso la distancia recorrida por el haz óptico dentro de cada celda ($D_{j,i}$).

sobre el conjunto de celdas que atraviesa:

$$y_j = \sum_{i=1}^N D_{ji}c_i + \epsilon, \quad (1)$$

que se puede generalizar para el conjunto de todas las medidas P como:

$$\mathbf{y}^T = \mathbf{D}\mathbf{c}^T + \epsilon, \quad (2)$$

donde ϵ representa el ruido del sensor.

Enmarcándolo como un problema de optimización convexa, utilizamos el enfoque de mínimos cuadrados presentado en (Bennetts et al., 2014) para estimar el vector de concentraciones de gas \mathbf{c} que maximiza la verosimilitud de las mediciones. La entrada al algoritmo es el conjunto de medidas integrales del detector TDLAS y debidamente localizadas, junto con la matriz de distancias de intersección \mathbf{D} , mientras que la salida es el vector de concentraciones de gas estimadas $\hat{\mathbf{c}}$. Específicamente:

$$\min_{\hat{\mathbf{c}}} \|\mathbf{D}\hat{\mathbf{c}} - \mathbf{y}\|_2^2 \text{ subject to } \hat{\mathbf{c}} \geq 0 \quad (3)$$

3.1. Planificación de Caminos para el Mapeo de la Distribución de Metano

Como se discute en (Arain et al., 2021), la tarea de modelar la distribución de un gas mediante la reconstrucción tomográfica de los conjuntos de mediciones integrales, requiere el muestreo de la zona de interés con una cobertura de detección superpuesta y con diferentes puntos de vista (Byer and Shepp, 1979). En la literatura se han propuesto diferentes métodos para minimizar el número de ubicaciones de muestreo y la distancia de desplazamiento para el caso de un único robot con un detector TDLAS orientado hacia el suelo Arain et al. (2021). Sin embargo, dado que con el enfoque propuesto en este trabajo podemos realizar mediciones integrales en el plano horizontal, pueden

diseñarse trayectorias de inspección mucho más sencillas garantizando múltiples puntos de vista.

En particular, sin ánimo de entrar en el tema de la optimalidad de trayectorias, en este trabajo proponemos una inspección colaborativa compuesta por dos trayectorias perpendiculares y rectas (*i.e.* describiendo el contorno de un rectángulo). Esta sencilla trayectoria de inspección garantiza que cada ubicación (celda) sea analizada por dos puntos de vista aproximadamente perpendiculares (dado que la PTU corrige la desalineación entre ambas plataformas móviles, no puede asumirse la perpendicularidad).

4. Configuración Experimental

Para validar el enfoque colaborativo entre los dos robots que toman parte en la detección y localización de metano, realizamos un conjunto de experimentos en un aparcamiento de $10,5 \times 14,75$ m de la Universidad de Málaga (ver Figura 8). Las paredes externas se utilizan para ayudar a los robots a localizarse en el área experimental, pero nunca son usadas como reflectores del detector TDLAS de metano.



Figura 8: Configuración experimental. (Izquierda) Mapa de ocupación con dimensiones. (Derecha) Imagen tomada durante uno de los experimentos donde se identifican los dos robots involucrados, Griaff-X a la izquierda, y Rhodon a la derecha.



Figura 9: Vista detallada de la unidad pan-tilt equipada por Rhodon (el robot líder), la webcam utilizada para detectar el marcador Aruco en la plataforma Giraff-X (el robot seguidor), y el detector de metano Falcon TDLAS.

El rol de robot líder se asignó a *Rhodon*, una plataforma móvil Pioneer Patrolbot equipada con una unidad pan-tilt Interbotix wxxmls, una webcam Owlotech (640x480 px), y un detector de metano Falcon TDLAS (ver Figura 9). El rol de robot seguidor lo desempeñó Giraff-X, equipado con un sencillo marcador Aruco (0,16 x 0,16 m) que hacía las veces de reflector. Para la localización y la navegación autónoma, ambos robots equipaban un láser 2D Hokuyo UTM-30LX, y los algoritmos de navegación autónoma proporcionados por ROS2. La fuente de gas era una botella cerrada, con cierto contenido de metano y situado aproximadamente a una altura de 0,9 m del suelo, correspondiente a la altura del detector TDLAS sobre el robot líder.

El experimento consistió en hacer que ambos robots inspeccionaran de forma autónoma un área de aproximadamente $70 m^2$, intentando mantener una separación entre ellos de unos 10 m (esta distancia corresponde al rango de detección de Aruco con el hardware disponible). Utilizando el mapa de ocupación mostrado en la Figura 8 como referencia, se ordenó a Rhodon que siguiera los lados superior e izquierdo del entorno, mientras que Giraff-X tomó los lados inferior y derecho, respectivamente. El mapa de ocupación se generó con una resolución de 0,05 m/celda, mientras que para el mapa de distribución de gas se seleccionó una resolución de 0,2 m/celda. Durante la inspección, los robots se movieron a una velocidad aproximada de 0,3 m/s, no siendo necesario parar los robots para obtener mediciones, algo que reduce considerablemente el tiempo de inspección.

5. Resultados y Discusión



Figura 10: Mapa de las observaciones integrales de metano obtenidas con el medidor TDLAS. Cada haz óptico registrado se traza sobre el mapa de ocupación, con un color relativo a la medición integral ($ppm \cdot m$).

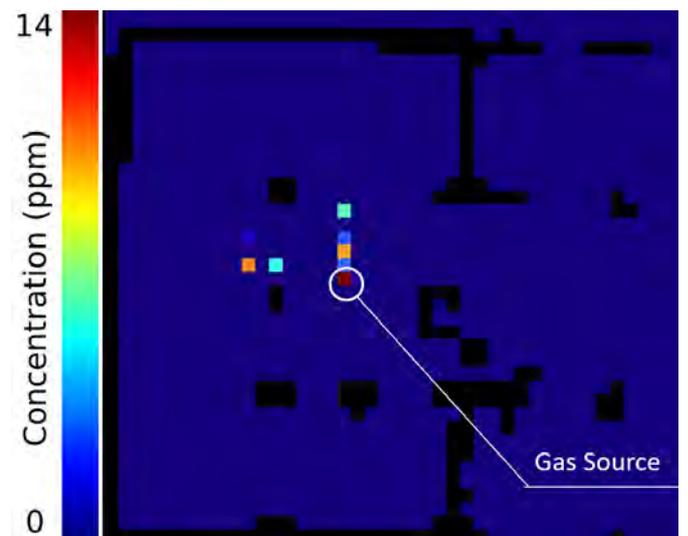


Figura 11: Mapa de concentración de gas estimado a partir del conjunto de muestras sensoriales. La concentración de gas estimada de cada celda se muestra en escala de colores.

La Figura 10 muestra los haces del láser TDLAS tomados durante la inspección del entorno de trabajo, coloreados según la medición integral ($ppm \cdot m$). Como puede observarse, los haces comienzan y terminan antes de alcanzar los límites del entorno, corroborando la correcta alineación entre el medidor y el reflector, además de señalar la zona donde se encuentra la fuente de gas, es decir, el punto de cruce de los dos haces con mayor concentración integral. Dado que la fuente de gas es una botella con metano, podemos ignorar en este experimento el problema relacionado con la dispersión del gas en ambientes no controlados, siendo factible indicar con precisión la ubicación de la fuente.

A partir de estos datos sensoriales, estimamos el mapa de distribución de metano tal y como se aprecia en la Figura 11,

que muestra el resultado de la fase de optimización por mínimos cuadrados y representa la concentración de gas estimada (ppm) para cada celda del mapa. Cabe destacar que la concentración más alta se estima cerca de la ubicación real de la fuente en este experimento, pero también se aprecia como otras celdas (alejadas de la fuente) muestran igualmente valores relativamente altos. Estas corresponden a celdas afectadas por la misma medición integral que incide sobre la fuente, siendo posiblemente un efecto secundario no deseado del proceso de minimización.

6. Conclusiones y Trabajo Futuro

En este trabajo hemos analizado el caso práctico de emplear dos plataformas móviles en formación líder-seguidor, para asistir en la detección y mapeo de fugas de metano con un detector de gases remoto (TDLAS). Se han estudiado las dificultades técnicas asociadas a este enfoque, siendo la correcta alineación de ambos robots el principal problema a la hora de ampliar el alcance de las mediciones. Se ha demostrado experimentalmente cómo un enfoque basado en marcadores Aruco, para la alineación relativa entre el medidor TDLAS y el reflector artificial es una opción viable para alcances de hasta 10m (limitados por la detección Aruco). Además, gracias a la unidad de giro e inclinación introducida, se consiguen inspecciones rápidas sin necesidad de detener a los robots para tomar medidas.

Como trabajo futuro se plantean algoritmos de visión por computador que permitan la detección del reflector artificial a mayores distancias. El enfoque presentado basado en marcadores fiduciales no puede extrapolarse al rango máximo de detección del medidor de metano TDLAS, que se sitúa en el rango de los 100 m.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por los proyectos de investigación *HOUNDBOT* (P20_01302) de la Junta de Andalucía, y (UMA20-FEDERJA-056), ambos financiados por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional *ERDF*, y por la beca para la formación de investigadores predoctorales en Andalucía (24653).

Referencias

- Aldhafeeri, T., Tran, M.-K., Vrolyk, R., Pope, M., Fowler, M., 2020. A review of methane gas detection sensors: Recent developments and future perspectives. *Inventions* 5 (3), 28.
- Arain, M. A., Hernandez Bennetts, V., Schaffernicht, E., Lilienthal, A. J., 2021. Sniffing out fugitive methane emissions: autonomous remote gas inspection with a mobile robot. *The International Journal of Robotics Research* 40 (4-5), 782–814. DOI: 10.1177/0278364920954907
- Bennetts, V. H., Schaffernicht, E., Stoyanov, T., Lilienthal, A. J., Trincavelli, M., 2014. Robot assisted gas tomography — localizing methane leaks in outdoor environments. In: *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. pp. 6362–6367. DOI: 10.1109/ICRA.2014.6907798
- Byer, R. L., Shepp, L. A., 1979. Two-dimensional remote air-pollution monitoring via tomography. *Optics Letters* 4 (3), 75–77. DOI: 10.1364/OL.4.000075
- Chen, X., Vizzo, I., Läbe, T., Behley, J., Stachniss, C., 2021. Range image-based lidar localization for autonomous vehicles. In: *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. pp. 5802–5808. DOI: 10.1109/ICRA48506.2021.9561335
- Corbett, A., Smith, B., 2022. A study of a miniature tdlas system onboard two unmanned aircraft to independently quantify methane emissions from oil and gas production assets and other industrial emitters. *Atmosphere* 13 (5). DOI: 10.3390/atmos13050804
- Gålfalk, M., Nilsson Pålédal, S., Bastviken, D., 2021. Sensitive drone mapping of methane emissions without the need for supplementary ground-based measurements. *ACS Earth and Space Chemistry* 5 (10), 2668–2676. DOI: 10.1021/acsearthspacechem.1c00106
- Gongora, A., Monroy, J., Gonzalez-Jimenez, J., 2020. Joint estimation of gas & wind maps for fast-response applications. *Applied Mathematical Modelling*. DOI: 10.1016/j.apm.2020.06.026
- Kupers, R., et al., 2023. United nations environment program. an eye on methane. Tech. rep., International Methane Emissions Observatory (IMEO). DOI: <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/44129>
- Kwaśny, M., Bombalska, A., 2023. Optical methods of methane detection. *Sensors* 23 (5). DOI: 10.3390/s23052834
- Li, F., Cai, H., Xu, J., Zhang, K., Feng, Q., Wang, H., 2020. Gas distribution mapping for indoor environments based on laser absorption spectroscopy: Development of an improved tomographic algorithm. *Building and Environment* 172, 106724. DOI: 10.1016/j.buildenv.2020.106724
- Madhavan, R., Fregene, K., Parker, L., 2002. Distributed heterogeneous outdoor multi-robot localization. In: *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. Vol. 1. pp. 374–381 vol.1. DOI: 10.1109/ROBOT.2002.1013389
- Monroy, J., Blanco, J.-L., Gonzalez-Jimenez, J., 2016. Time-variant gas distribution mapping with obstacle information. *Autonomous Robots* 40 (1), 1–16. DOI: 10.1007/s10514-015-9437-0
- Mønster, J., Kjeldsen, P., Scheutz, C., 2019. Methodologies for measuring fugitive methane emissions from landfills – a review. *Waste Management* 87, 835–859. DOI: 10.1016/j.wasman.2018.12.047
- Neumann, P. P., Kohlhoff, H., Hüllmann, D., Lilienthal, A. J., Kluge, M., 2017. Bringing mobile robot olfaction to the next dimension — uav-based remote sensing of gas clouds and source localization. In: *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. pp. 3910–3916. DOI: 10.1109/ICRA.2017.7989450
- Saunio, M., Stavert, A. R., Poulter, B., Bousquet, P., Canadell, J. G., Jackson, R. B., Raymond, P. A., Dlugokencky, E. J., Houweling, S., Patra, P. K., et al., 2019. The global methane budget 2000–2017. *Earth System Science Data Discussions* 2019, 1–136.
- Themelis, N. J., Ulloa, P. A., 2007. Methane generation in landfills. *Renewable energy* 32 (7), 1243–1257. DOI: 10.1016/j.renene.2006.04.020
- Weiss, C., Tamimi, H., Masselli, A., Zell, A., 2007. A hybrid approach for vision-based outdoor robot localization using global and local image features. In: *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. pp. 1047–1052. DOI: 10.1109/IR0S.2007.4398959



Simposio de Robótica, Bioingeniería y Visión por Computador 2024



Detección y manipulación de botellas con el robot móvil manipulador TIAGo

Naranjo-Campos, Francisco J.^{a,*}, De Matías-Martínez, Ainhoa^a, Vítores, Juan G.^a,
Gutierrez Dueñas, Jose Antonio^b, Alcaide, Almudena^b, Balaguer, Carlos^a

^aRobotics Lab, Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad Carlos III de Madrid, C/ Butarque, nº15, Leganés, 28911, Madrid, España.

^bDepartamento de Tecnología Accesible e I+D, Dirección de Accesibilidad Universal e Innovación, Inserta Innovación, Fundación Once, C/ de Sebastián Herrera, nº15, 28012, Madrid, España.

Resumen

La integración de la robótica en entornos sanitarios continua en avance, como herramientas y aplicaciones de asistencia a pacientes. Esta se conoce como robótica asistencial y es definida como el uso de robots para ayudar e interactuar con humanos de forma directa y adaptiva. Se desarrolla con el objetivo de mejorar la calidad de vida de las personas con movilidad reducida, desde aquellas con discapacidades físicas hasta personas envejecidas con limitación de movimiento. En este contexto surge el interés de este trabajo, en el que se busca asistir a personas con movilidad reducida en la manipulación de botellas empleando el robot TIAGo. Para ello se ha implementado con éxito la detección y localización en el espacio de botellas usando las cámaras del robot para posteriormente llevar el efector final a dicha posición y realizar su agarre. Se han estudiado las métricas de la detección de botellas, obteniendo buenos resultados. Además, se han realizado pruebas de la ejecución completándose adecuadamente.

Palabras clave: Sistema robótico autónomo, tecnología asistiva y ingeniería de rehabilitación, robot manipulador, robot móvil, percepción y sensorización.

Bottle detection and manipulation with the mobile manipulator robot TIAGo

Abstract

The integration of robotics in healthcare environments continues to advance as tools and assistance applications for patient care. This is known as assistive robotics and is defined as the use of robots to assist and interact with humans in a direct and adaptive way. It is developed with the aim of improving the quality of life of people with reduced mobility, from those with physical disabilities to elderly people with limited movement. In this context arises the interest of this work, which seeks to assist people with reduced mobility in the manipulation of bottles using the TIAGo robot. For this purpose, we have successfully implemented the detection and localization of bottles using the cameras of the robot and to subsequently bring the end effector to that position to perform a grip. The bottle detection metrics have been studied, obtaining good results, and tests of the execution of the routine have been carried out, with a proper success.

Keywords: Autonomous robotic systems, assistive technology and rehabilitation engineering, robot manipulator robot, mobile robot, perception and sensing.

1. Introducción

En los últimos años, la integración de la robótica como herramienta en entornos sanitarios es cada vez más común. Por ejemplo, la intervención quirúrgica de alta precisión se sirve de dispositivos robóticos como herramienta principal (Lane, 2018). Pero también se están desarrollando otras aplicaciones robóticas de utilidad, como la asistencia a pacientes. Así se con-

forma la disciplina de la robótica asistencial, definida como el uso de robots para ayudar e interactuar con humanos de forma directa y adaptiva (Bemelmans et al., 2012).

La robótica asistencial surge de la necesidad de acompañar y asistir a las personas que encuentran dificultades en ciertos entornos. Un ejemplo son las personas con movilidad reducida, quienes por definición son aquellas que tienen limitadas sus capacidades motrices, ya sea de forma temporal o permanen-

*Autor para correspondencia: fmaranj@ing.uc3m.es

te (Aznárez and Morante, 1997). Para ellos, la realización de algunas tareas diarias puede verse impedida y necesitan ayuda de asistentes. Este colectivo es amplio y diverso, formado por quienes tienen algún tipo de lesión o afección y por las personas de avanzada edad con enfermedades crónicas asociadas al envejecimiento. Además, en las próximas dos décadas se estima que la población envejecida se triplicará, lo que conllevará un aumento considerable de este colectivo de personas (Carretero, 2015).

Con el objetivo de incrementar la independencia y autosuficiencia de las personas con movilidad reducida, en el campo de la robótica asistencial han surgido varios enfoques. En el ámbito de la rehabilitación se han desarrollado prótesis y exoesqueletos (Ghadage et al., 2023; Huamanchahua et al., 2022; Aparna et al., 2023; Serrano et al., 2023) que refuerzan las capacidades de los pacientes para realizar ejercicios de movilidad que ayuden en su recuperación. También se han propuesto sistemas robóticos de ayuda, como brazos robóticos para asistir en la manipulación (Dragoi et al., 2021; Kyrarini et al., 2019; Jardón Huete et al., 2012), robots móviles que sirven como transporte autónomo o guía en desplazamiento por espacios (Garrote et al., 2018; Lin et al., 2019; Mohebbi, 2020), o aplicaciones mixtas con robots móviles manipuladores que realizan ambas tareas de manipulación y reparto (Garrote et al., 2018; Barber et al., 2022).

En este contexto de asistencia robótica, Naranjo-Campos et al. (2022) presenta una implementación de manipulación robótica orientada a la asistencia de personas con movilidad reducida con el robot TIAGo. Sin embargo, esta propuesta se encuentra limitada a la manipulación de contenedores con marcadores. Por otro lado, en el mismo proyecto de asistencia De Matías-Martínez et al. (2023) presenta una solución para navegar de forma segura con el robot TIAGo portando objetos con el brazo.

En este trabajo se propone una ampliación de las capacidades implementadas con el robot TIAGo, desarrollando la detección y manipulación de botellas sin necesidad de marcadores. El presente documento comienza con una introducción del marco en el que se desarrolla el proyecto, continuando con la descripción del robot TIAGo y los recursos de software empleados. Seguidamente, se explica la implementación de la percepción y manipulación de las botellas. Por último, se exponen los resultados de las pruebas realizadas y las conclusiones al respecto.

2. Materiales y métodos

En esta sección se describen los materiales y métodos que se han empleado en la implementación de la detección y manipulación de botellas con el robot TIAGo. Se comienza exponiendo las características del modelo de robot del que se ha dispuesto y seguidamente se describe la arquitectura software implementada previamente en el robot TIAGo. Se continúa con la presentación de *inference server*, el clasificador de imágenes utilizado, finalizando con la descripción de la librería *MoveIt* empleada en la manipulación del brazo.

2.1. TIAGo

Hemos trabajado con el robot móvil manipulador TIAGo, mostrado en la Figura 1. Se trata de un producto que la empresa española PAL Robotics lanzó en el año 2015. Es un robot

destinado a la investigación que combina percepción, manipulación, navegación e interacción por voz. Además, permite distintas combinaciones de efector final, base móvil y accesorios, adaptando así el robot a las necesidades de la aplicación.

En este caso, el robot TIAGo del que se dispone es un modelo con base móvil diferencial, un único brazo de 7 grados de libertad con una pinza como efector final, una cámara RGBD en la cabeza, una cámara RGB endoscópica en el efector final y un procesador gráfico auxiliar (GPU) modelo Nvidia Jetson TX2.



Figura 1: Robot móvil manipulador TIAGo

2.2. Arquitectura software

La implementación software se ha realizado dentro del ecosistema de ROS (*Robot Operating System*) en el lenguaje C++ y Python. Se organiza según su aspecto funcional siguiendo la estructura que se observa en la Figura 2, que consiste en tres nodos:

- **Navegación.** Nodo con un servicio para comandar órdenes de movimiento a los controladores de la base.
- **Visión.** Nodo para recibir las imágenes de las cámaras, analizarlas (detección de marcadores, clasificación de objetos u obtención de posición 3D) y publicar la información obtenida.
- **Manipulación.** Nodo que coordina el uso de manejadores de control del brazo, la pinza y la cabeza, junto con el servicio de navegación y la información de visión para realizar la tarea implementada de buscar un objeto (contenedor o botella) y manipularlo.

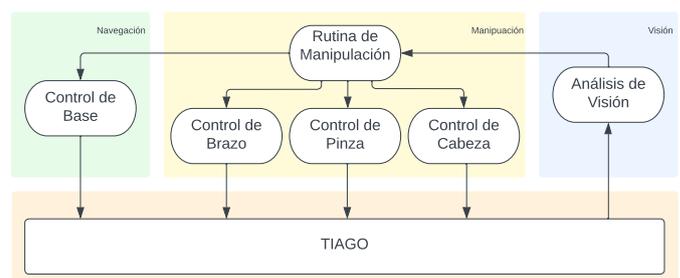


Figura 2: Estructura del software implementado.

2.3. Inference server

El clasificador de objetos en imágenes que se ha empleado es *inference server*¹. Consiste en una integración en ROS del detector de objetos de TensorFlow². Viene ya instalado en el robot por PAL Robotics, preparado para ejecutarse en la GPU auxiliar.

El clasificador es capaz de detectar 90 clases de objetos, entre ellos las botellas, proporcionando las coordenadas del recuadro que ocupa el objeto en imagen y el porcentaje de confianza de la clasificación, denominado *score*. En la Figura 3 se muestra un ejemplo de una imagen con botellas procesada por *inference server*.



Figura 3: Ejemplos de botellas de plástico detectadas con *inference server* desde la cámara RGBD de la cabeza

Existen otros clasificadores con mayor variedad de clases detectables y que proporcionan más información. Sin embargo, para esta aplicación es suficiente con conocer la posición del objeto en la imagen, puesto que con la información de profundidad de la cámara RGBD se obtiene la posición en el espacio. De esta forma, emplear este clasificador facilita su integración con el resto de módulos y se libera de carga de procesamiento la CPU al ser ejecutado en la GPU.

2.4. MoveIt

MoveIt (Chitta, 2016) es una librería de manipulación robótica de código abierto que permite desarrollar aplicaciones de manipulación complejas haciendo uso del entorno ROS. Permite planificar trayectorias del efector final evitando obstáculos virtuales añadidos en el entorno y con restricciones de movimiento preestablecidas.

3. Implementación

En esta sección presentamos la rutina de visión y manipulación implementada para la manipulación de botellas. Esta sigue el diagrama de flujo mostrado en la Figura 4, en la que el robot comienza posicionado frente a una mesa en la que se encuentra la botella, en un rango de distancia entre 0.8m y 1m. Primeramente, se comienza con la detección y localización de la botella usando la cámara RGBD de la cabeza. Luego, en caso de ser necesario, se ajusta la distancia del robot a la óptima para

manipulación. Seguidamente, se centra la pinza con la botella, haciendo uso de la cámara de la pinza, de modo que se obtiene una posición más precisa. Finalmente, se procede a coger la botella. Los procesos de búsqueda de botella y de corrección de la posición de la base pueden realizarse hasta un máximo de tres repeticiones, para evitar un bucle infinito.

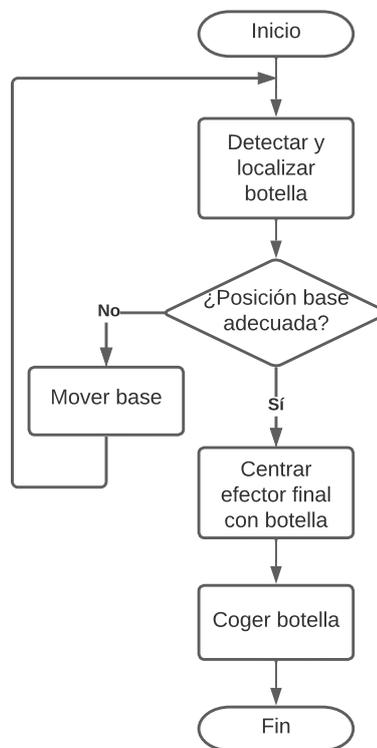


Figura 4: Diagrama de flujo de la rutina de detectar y coger botella

A continuación, se detallan los procesos mencionados: detección de la posición de la botella, ajuste de la posición con la pinza y la manipulación del brazo robótico.

3.1. Detección y localización con cámara RGBD

Primeramente, se ha estudiado el desempeño del detector en función de la distancia. La distancia óptima para coger un objeto con el robot es entre 0.85m y 0.9m (Naranjo-Campos et al., 2022), mientras que la posición inicial del robot es un rango cercano a este, entre 0.8m y 1m. Por lo tanto, el detector debe funcionar adecuadamente en estos rangos. En la Tabla 1 se muestra el resultado del estudio, en el que se observa que para estas distancias se obtienen *scores* confiables mayores al 75 %.

De esta forma, partiendo del robot frente a la botella, se realiza un barrido vertical con la cámara RGBD de la cabeza buscando la botella. Una vez detectada, con el recuadro y centroide en la imagen, se centra la cámara con la botella. En este punto se vuelve a detectar y obtener la posición del centroide de la botella en la imagen, tomando así la distancia a esta a partir de la imagen de profundidad de la cámara RGBD. Finalmente, se calcula la posición del centro de la botella respecto a la

¹Véase https://github.com/pal-robotics/inference_server, último acceso el 13 de abril de 2024.

²Véase https://github.com/tensorflow/models/tree/master/research/object_detection, último acceso el 14 de abril de 2024.

base del robot haciendo uso de los parámetros intrínsecos de la cámara y la distancia obtenida.

Tabla 1: *Score* según la distancia de la detección de la botella con la cámara del efector final

Distancia (m)	Score	
	Media (%)	Desviación típica (%)
1	62.68	5.55
0.9	75.39	9.41
0.8	82.91	7.6
0.7	83.4	7.1

En caso de que la botella no se encuentre dentro del rango de distancia óptima para la manipulación, se comandan a la base móvil movimientos lineales de avance o retroceso para situar al robot en el rango óptimo. Tras esto, se vuelve a obtener la posición de la botella respecto al robot, repitiendo este ciclo hasta encontrarse a la distancia deseada.

3.2. Centrado del efector final con la pinza

A continuación, se busca obtener una posición más precisa de la botella haciendo uso de la cámara instalada en el efector final. Para ello, se ha realizado un estudio de la distancia necesaria para encuadrar la botella en el plano de visión de la cámara de la pinza y pueda ser detectada con un *score* confiable. En la Tabla 2, se muestra el resultado, determinando que la distancia adecuada es entorno a 0.5m y 0.6m.

Tabla 2: *Score* según la distancia de la detección de la botella con la cámara del efector final

Distancia (m)	Score	
	Media (%)	Desviación típica (%)
0.4	58.6	10.67
0.5	66.7	7.45
0.6	67.4	7.75

De esta forma, se comienza retirando el robot 0.3m con la base móvil y se comanda la pinza a 0.5m de la posición de la botella. En este punto, se detecta y obtiene el centroide de la botella en la imagen de la pinza y se comandan al efector final movimientos sobre los ejes cartesianos proporcionales a la diferencia entre el centro de la imagen y del centroide. Una vez centrada la imagen, se calcula la posición de la botella a partir de la pose actual del efector final y los parámetros de la cámara. Finalmente se devuelve la base del robot a la posición original avanzando 0.3m.

3.3. Agarre de la botella

Por último, teniendo una posición más precisa de la botella respecto a la base del robot se procede al agarre o *pick*. Se aproxima la pinza a la posición y se procede al agarre. Una vez agarrada, se eleva el brazo y se retira. Finalmente, se mueve la base móvil 0.1m hacia atrás, quedando el robot retirado de la mesa.

4. Experimentos y resultados

En esta sección se explican los experimentos realizados y los resultados obtenidos. Por un lado, se ha estudiado el desempeño del detector *inference server* tanto con la cámara RGBD como con la cámara del efector final, y por otro lado se han realizado pruebas de ejecución de la rutina de manipulación de botellas.

4.1. Estudio del desempeño del detector de botellas

Se evaluado el detector *inference server* en la clasificación de botellas en imágenes tomadas con ambas cámaras RGBD de la cabeza y la RGB de la pinza. El conjunto de muestras se ha tomado a distintas distancias de la botella a detectar, dentro del rango de operación. En total se han tomado 500 muestras tanto con la cámara RGBD de la cabeza como con la cámara de la pinza. En la Tabla 3 se muestran las métricas de la detección de botellas.

Tabla 3: Métricas de la detección de botellas

Cámara	Sensibilidad (%)	Especificidad (%)	Precisión (%)	Exactitud (%)
RGBD cabeza	93.95	100	100	96.53
RGB Pinza	86.46	100	199	93.23

Respecto a la cámara de la cabeza, en la Tabla 3 se observa que la especificidad y precisión es del 100 %, lo que garantiza no tener ni falsos positivos ni falsos negativos. La exactitud y la sensibilidad son superiores al 94 %, valores aceptables para la detección de las botellas.

Por otro lado, en el caso de la cámara del efector final, de nuevo se obtienen un 100 % de especificidad y precisión, mientras que la exactitud es mayor al 90 %. Sin embargo, se tiene una menor sensibilidad con un 86 %.

4.2. Resultado de ejecución

Se han realizado pruebas de la rutina completa de visión y manipulación de botellas, iniciando el robot a distintas distancias de la botella dentro del rango de operación. En la Figura 5 se muestra la secuencia de ejecución de la rutina.

El porcentaje de éxito es del 85.7 % con un tiempo medio de 158 ± 27 segundos. Las causas de fallo en la ejecución han sido principalmente por no conseguir detectar la botella con la cámara de la pinza y en menor medida por singularidades en la planificación de trayectorias del efector final sobre los ejes cartesianos.

5. Conclusiones

En este artículo se ha implementado la tarea de detección y manipulación de botellas en el contexto de asistencia a personas con movilidad reducida empleando el robot TIAGo, ampliando las capacidades del sistema robótico asistencial implementado previamente.

Para la consecución de la tarea, se ha integrado el clasificador de imágenes *inference server* para detectar las botellas. De este modo, se detecta y localiza la botella en el espacio con la cámara de la cabeza y se ajusta esta posición centrando la cámara de la pinza con el centro de la botella detectada. Se termina realizando el agarre de la botella en dicha posición.



(a) Detección de botella.



(b) Centrado de la pinza.



(c) Agarre de botella.



(d) Robot retirado.

Figura 5: Secuencia de imágenes de la ejecución de la rutina de detectar y coger botellas

Se ha evaluado el desempeño del detector a distintas distancias y con ambas cámaras, determinando que la cámara de la cabeza es más efectiva para la detección. La implementación logró un éxito del 85 % en las ejecuciones. Sin embargo, se identificaron limitantes, como la detección con la cámara de la pinza y las singularidades en la planificación de trayectorias del efector final.

Agradecimientos

Esta investigación ha sido financiada por la Asociación Inserta Innovación (parte del Grupo Social Once), en el marco del proyecto ROBOASIST2; “ROBOASSET: Sistemas robóticos inteligentes de diagnóstico y rehabilitación de terapias de miembro superior”, PID2020-113508RB-I00, financiado/a por AEI/10.13039/501100011033; “RoboCity2030-DIH-CM, Madrid Robotics Digital Innovation Hub”, S2018/NMT-4331, financiado por “Programas de Actividades I+D en la Comunidad de Madrid”; “COMPANION-CM: Inteligencia artificial y modelos cognitivos para la interacción simétrica humano-robot en el ámbito de la robótica asistencial”, Y2020/NMT-666, financiado por “Proyectos Sinérgicos de I+D la Comunidad de Madrid”; “iREHAB: AI-powered Robotic Personalized Rehabilitation”, ISCIII-AES-2022/003041, financiado por ISCIII y UE; fondos estructurales de la EU; “IROPER: Robótica inteligente para necesidades personales”, PLEC2021-007819, financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y por “NextGenerationEU/PRTR” de la Unión Europea; y la Universidad Carlos III de Madrid (Escuela de Doctorado).

Referencias

Aparna, R. P., Iyer, V., Dhivya, J., 2023. Advancing exoskeleton research: A comprehensive review. 2nd International Conference on Advancements

in Electrical, Electronics, Communication, Computing and Automation, ICAECA 2023.

DOI: 10.1109/ICAECA56562.2023.10199244

Aznárez, F. G., Morante, G. L., 1997. Situación y perspectivas del transporte público de las personas con movilidad reducida en España. Escuela Libre, Madrid.

Barber, R., Ortiz, F. J., Garrido, S., Calatrava-Nicolás, F. M., Mora, A., Prados, A., Vera-Repullo, J. A., Roca-González, J., Méndez, I., Óscar Martínez Mozos, 10 2022. A multirobot system in an assisted home environment to support the elderly in their daily lives. *Sensors* 2022 22, 7983.

DOI: 10.3390/S22207983

Bemelmans, R., Gelderblom, G. J., Jonker, P., de Witte, L., 2 2012. Socially assistive robots in elderly care: A systematic review into effects and effectiveness. *Journal of the American Medical Directors Association* 13, 114–120.e1.

DOI: 10.1016/j.jamda.2010.10.002

Carretero, S., 2015. Mapping of effective technology-based services for independent living for older people at home. Seville: Joint Research Center, Institute for Prospective Technological Studies, JRC Scientific and Technical Reports Series. Zugriff am 15, 2021.

DOI: 10.2791/395556

Chitta, S., 2 2016. Moveit!: An introduction. *Studies in Computational Intelligence* 625, 3–27.

DOI: 10.1007/978-3-319-26054-9/COVER

De Matías-Martínez, A., Naranjo-Campos, F. J., Vicores, J. G., Balaguer, C., 2023. Planificador global en se(2) para la navegación de robots móviles manipuladores en ros. XIII Jornadas Nacionales de Robótica y el XIV Simposio CEA de Bioingeniería, 85–90.

DOI: 10.20868/UPM.book.74896

Dragoi, M., Mocanu, I., Cramariuc, O., 2021. Object manipulation for assistive robots. 2021 9th E-Health and Bioengineering Conference, EHB 2021.

DOI: 10.1109/EHB52898.2021.9657683

Garrote, L., Paulo, J., Perdiz, J., Peixoto, P., Nunes, U. J., 11 2018. Robot-assisted navigation for a robotic walker with aided user intent. *RO-MAN 2018 - 27th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication*, 348–355.

DOI: 10.1109/ROMAN.2018.8525674

Ghadage, D., Bagde, R., Jha, S., Dhadi, M., Barhate, C., 2023. A review on current technological advancements in prosthetic arms. *ACCESS 2023 - 2023 3rd International Conference on Advances in Computing, Communication, Embedded and Secure Systems*, 328–333.

DOI: 10.1109/ACCESS57397.2023.10200952

Huamanchahua, D., Toledo-Garcia, P., Aguirre, J., Huacre, S., 2022. Hand exoskeletons for rehabilitation: A systematic review. *2022 IEEE International IOT, Electronics and Mechatronics Conference, IEMTRONICS 2022*.

DOI: 10.1109/IEMTRONICS55184.2022.9795786

Jardón Huete, A., Vicores, J. G., Martínez, S., Giménez, A., Balaguer, C., 7 2012. Personal autonomy rehabilitation in home environments by a portable assistive robot. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics Part C: Applications and Reviews* 42, 561–570.

DOI: 10.1109/TSMCC.2011.2159201

Kyranini, M., Zheng, Q., Haseeb, M. A., Graser, A., 6 2019. Robot learning of assistive manipulation tasks by demonstration via head gesture-based interface. *IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics 2019-June*, 1139–1146.

DOI: 10.1109/ICORR.2019.8779379

Lane, T., 5 2018. A short history of robotic surgery. *Annals of The Royal College of Surgeons of England* 100, 5.

DOI: 10.1308/RCSANN.SUPP1.5

Lin, Z., Luo, J., Yang, C., 9 2019. A teleoperated shared control approach with haptic feedback for mobile assistive robot. *ICAC 2019 - 2019 25th IEEE International Conference on Automation and Computing*.

DOI: 10.23919/ICAC.2019.8895096

Mohebbi, A., 8 2020. Human-robot interaction in rehabilitation and assistance: a review. *Current Robotics Reports* 2020 1:3 1, 131–144.

DOI: 10.1007/S43154-020-00015-4

Naranjo-Campos, F. J., De Matías-Martínez, A., Vicores, J. G., Álvarez, N., Alcaide, A., Balaguer, C., 2022. Manipulación de objetos dirigida a la asistencia de personas con movilidad reducida. *XLIII Jornadas de Automática*, 798–803.

DOI: 10.17979/spudc.9788497498418.0798

Serrano, D., Copaci, D., Arias, J., Moreno, L. E., Blanco, D., 9 2023. Sma-based soft exo-glove. *IEEE Robotics and Automation Letters* 8, 5448–5455.

DOI: 10.1109/LRA.2023.3295994



Simposio de Robótica, Bioingeniería y Visión por Computador 2024



Diseño Mecatrónico y Construcción de un Robot Móvil Omni-direccional de Tres Ruedas para Transporte de Carga en Ambientes Industriales

Yepez-Figueroa, Johnny J.^{a,*}, Victores, Juan G.^a, Jardon, Alberto^a, Balaguer, Carlos^a

^a Robotics Lab, Dpto de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad Carlos III de Madrid, Avda. de la Universidad, 30, 28911, Leganés, España.

Resumen

El desarrollo del presente proyecto se basa en el diseño de un prototipo de robot móvil omni-direccional. El propósito de dicha plataforma es transportar cargas, con sus tres grados de libertad en una superficie industrial plana. El diseño mecatrónico aplicado identifica mejoras al diseño. A partir de entonces, la cinemática del robot se analiza y un diseño de control de movimiento se desarrolla. Mediante la aplicación de la ingeniería mecatrónica, se diseña la estructura de la plataforma, se acoplan un sistema de reducción de velocidad para aumentar la aportación de torque a las ruedas, adicionalmente se implementa un algoritmo de control y se utiliza un dispositivo de mando para comandar dicho control. Para finalizar, se determinan posibles optimizaciones futuras.

Palabras clave: Robot Móvil Omni-direccional, Diseño Mecatrónico, FEM, Control de motores a pasos.

Abstract

The development of this project is based on the design of a prototype of an omni-directional mobile robot. The purpose of this platform is to carry loads, with three degrees of freedom in an industrial flat surface. The Mechatronic Design applied to identify design improvements. Then, the kinematics of the robot is analyzed and a motion control design is developed. By applying the Mechatronic Engineering the structure of the platform is designed and built, a system speed reduction is coupled to increase an input torque to the wheels, additionally a control algorithm is implemented and a control device used to command such control. Finally, possible future optimizations are determined.

Keywords: Omni-directional Mobile Robot, Mechatronic Design, FEM, Stepper Motor Control.

1. Introducción

Una de las áreas más influyentes de la robótica es su aplicación en el diseño de equipos industriales, por lo que se propone la elaboración de un prototipo de plataforma móvil omni-direccional, mediante la implementación de la mecatrónica de tercer nivel en donde se realiza la integración de todas las ramas de ingeniería (Bolton 2001) logrando excelentes resultados en el prototipo que en primer instancia es alcanzar total libertad de movimiento sobre superficie plana y sin pendiente, capaz de generar cualquier trayectoria de desplazamiento para trasladar una carga máxima de 500 kgf, cumpliendo así las funciones que posee una plataforma de carga industrial, lo cual es: Sustituir la actividad física del hombre en las tareas repetitivas, monótonas o peligrosas que requieran de gran precisión y operaciones con varios grados de libertad.

El proyecto pretende servir como camino para el desarrollo en la industria donde se requiera la movilización de grandes cargas en espacios reducidos.

1.1 Descripción del Proyecto

El proyecto básicamente se trata de un vehículo de cuerpo en forma de triángulo equilátero (Figura 1), en cada lado de este cuerpo estará ubicada una rueda omni-direccional, un motor en conjunto con un reductor aportará el torque necesario a cada rueda.

Los tres motores estarán comandados mediante controladores y drives de potencia. Se tiene previsto que la alimentación de energía sea otorgada por fuentes cableadas y enchufadas a una toma de corriente eléctrica de 110-220 VAC. Por otro lado, al ser un vehículo de carga, todos los elementos como ruedas, ejes, estructura y partes constitutivas estarán diseñados en base a aquella consideración.

*Autor para correspondencia: johnnyjavier.yepez@uc3m.es

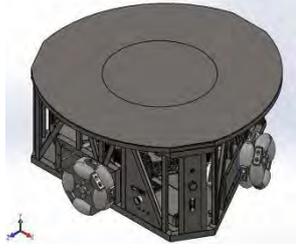


Figura 1: Plataforma omni-direccional.

El control del prototipo tendrá función en base a un algoritmo, donde se le asignará trayectorias a seguir, similar a los comandos ptp, lin o circ utilizados en los robots KR de la compañía KUKA.

2. Modelado Matemático

Esta sección recoge los aspectos más relevantes presentados al modelado de robots móviles con ruedas, para lo cual se ha elegido una configuración de un robot móvil holonómico (comprende el mismo número de grados de libertad que de coordenadas independientes) de tres grados de libertad.

Guiándose en las ecuaciones desarrolladas en los artículos (Muñoz Martínez, Gil Gómez y García Cerezo 2003) y (Leica, y otros 2014), se realiza dos análisis el cinemático obteniendo la matriz tanto de los desplazamientos como velocidades angulares de las ruedas y en el análisis dinámico, como principal factor; el torque, en base a nuestro sistema de referencia (Figura 2).

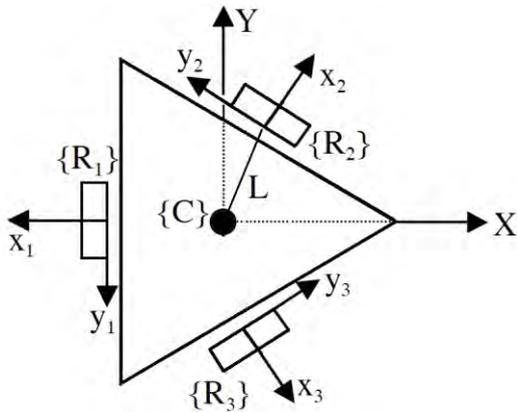


Figura 2: Esquema cinemático del Robot Móvil Omni-direccional.

Para el modelo cinemático, se expresan las velocidades del cuerpo en función a las de la rueda.

$$\begin{pmatrix} \omega_{1x} \\ \omega_{2x} \\ \omega_{3x} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{1}{R} & 0 & -\frac{L}{R} \\ \frac{1}{2R} & \frac{\sqrt{3}}{2R} & -\frac{L}{R} \\ \frac{1}{2R} & -\frac{\sqrt{3}}{2R} & -\frac{L}{R} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} v_{Cx} \\ v_{Cy} \\ \omega_C \end{pmatrix} \quad (1)$$

Para el modelo dinámico, se obtiene los torques de cada rueda.

$$\begin{aligned} \tau_{1x} &= \frac{4}{9}MR^2 \alpha_{1x} + \frac{I_c R^2}{9L^2} \alpha_{1x} + I_R \alpha_{1x} \\ \tau_{2x} &= \frac{4}{9}MR^2 \alpha_{2x} + \frac{I_c R^2}{9L^2} \alpha_{2x} + I_R \alpha_{2x} \\ \tau_{3x} &= \frac{4}{9}MR^2 \alpha_{3x} + \frac{I_c R^2}{9L^2} \alpha_{3x} + I_R \alpha_{3x} \end{aligned} \quad (2)$$

Siendo α_{ix} la aceleración angular de la respectiva rueda.

3. Diseño Mecatrónico

Para el diseño de la plataforma omni-direccional se empezará con la parte mecánica para determinar parámetros físicos como geometría y peso, con los valores de estos parámetros junto con las ecuaciones cinemáticas y dinámicas; se determina el algoritmo para la obtención de torque y el control automático del movimiento omni-direccional. Por último, se finaliza con la selección de los componentes electrónicos.

Para una facilidad de explicación y mejor entendimiento la siguiente documentación detalla los diseños separadamente.

3.1. Sistema Mecánico

En el presente apartado se plantea el diseño de las ruedas tomando en consideración las especificaciones que debe cumplir dicho elemento, seguido de su sistema de transmisión, luego se realiza propuestas sobre la forma principal del cuerpo de la plataforma que alojarán motores, reductores y fuentes, finalmente se realiza un análisis estructural del cuerpo de la plataforma y de las partes constitutivas tomando en consideración que una meta a alcanzar es reducir el peso de la plataforma.

3.1.1. Diseño de la rueda omni-direccional:

El diseño consta de los análisis estáticos y dinámicos, como también el cálculo de los esfuerzos de cada componente. La carga para soportar es de 500 kgf como lo establece el objetivo requerido por el auspiciante, pero también se deberá adicionar un valor estimado de 100 kgf que representa la carga muerta de la estructura, por ende, el valor total a soportar es de 600 kgf y estará dividido entre las tres ruedas.

Para el diseño de la rueda se debe estimar un diámetro total, para ello se basa en diseño ya creado como lo es la rueda omni-direccional de fabricación china. Dicha rueda posee doce rodillos de poliuretano con un cuerpo de aluminio. Adicionalmente posee una capacidad de carga de 160 kgf, el diámetro de la rueda que utiliza la compañía HANFA es de 203.2 mm, por lo cual el diseño empieza con un diámetro de 200 mm.

En primer lugar, es conocer el diámetro del eje de los rodillos, para lo cual se estima una longitud a partir de un diseño sólo por geometría, para ello se va a utilizar el software AutoCad y manipular las dimensiones hasta obtener una geometría de la rueda perfectamente simétrica, como se muestra en el plano siguiente.

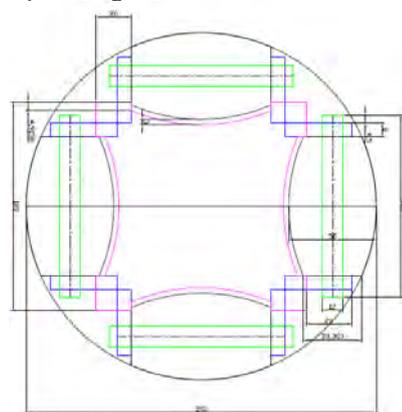


Figura 3: Geometría de la rueda omni-direccional.

Se realiza un estudio estático mediante elementos finitos con el software SolidWorks para determinar el esfuerzo máximo de Von Mises, en la siguiente figura se muestra dicho valor.

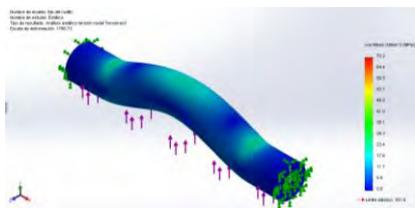


Figura 4: Eje del rodillo – Esfuerzo Von Mises.

Como se puede apreciar los resultados el esfuerzo máximo es de 70.2 MPa, sin que supere el esfuerzo admisible de 351.57 MPa, dando un factor de seguridad confiable.

Continuando con el diseño de la rueda, un componente importante es el rodillo debido a que adición un tercer grado de libertad, convirtiendo una rueda convencional en una omni-direccional. El rodillo tiene una forma especial de cilindro elipsoidal, se analizarán los esfuerzos ejercidos en un elipsoide presionado de duralón en un plano de concreto. La dimensión de los semiejes del elipsoide son 25 mm y 40 mm.



Figura 5: Dimensiones del rodillo.

Evidentemente la forma geométrica que más se aproxima es el elipsoide. Mediante el programa “Mesys Hertzian Stress” (Figura 6) se obtiene el esfuerzo máximo de -133.55 MPa, por su signo trabaja a compresión, el duralón tiene una resistencia a la compresión de 55 MPa.

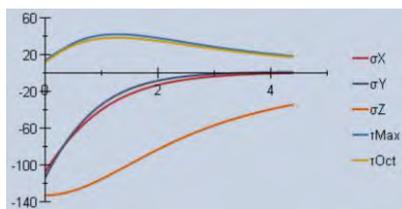


Figura 6: Gráfica de la evolución de esfuerzos y cortantes.

Por último, se tiene la base de la rueda omni-direccional, la cual tendrá diferentes medidas de espesor con la finalidad de reducir el peso total de la rueda, la base estará bajo el efecto de flexión en los soportes, mediante el análisis de elementos finitos se determina el factor de seguridad.

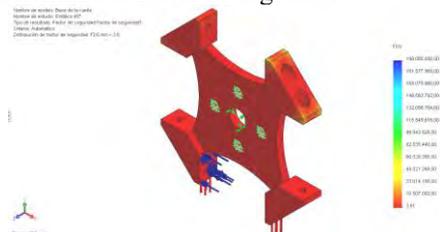


Figura 7: Factor de seguridad de la placa – base.

Se tiene un factor confiable de 3.6, se decide fabricar en dos partes, conocidas como soporte con espesor de 22 mm y placa para las bases con espesor de 8 mm, para luego ser soldadas.

3.1.2. Sistema de transmisión:

Un elemento esencial para la generación de movimiento es el sistema de transmisión, este sistema está constituido de dos poleas solidarias cada una a un eje y ajustadas por medio de una banda, como tal es un sistema muy silencioso, no necesita lubricación, resulta económico de construir, además presenta la característica de que puede ser utilizado como un fusible mecánico.

En el presenta caso es necesario utilizar bandas sincrónicas para garantizar el no deslizamiento entre la banda y la polea (Budynas y Nisbett 2008). En la Tabla 1 se muestra los resultados que se obtuvo al analizar en un software llamado “Cálculos de Transmisión SKF 3.0”.

Tabla 1: Propiedades de los componentes de transmisión.

CORREA:	
Designación	PHG 160-XL-037
Ancho de la correa (mm)	9.525
Factor de servicio actual	0.55
Potencia de la correa (kW)	0.02
Masa de correa (kgf)	0.01
POLEA MOTRIZ:	
Designación	PHP 14-XL-37 RSB
Diámetro referencial (mm)	22.64
Número de dientes	14
Paso (in)	0.2
POLEA CONDUCCIDA:	
Designación	PHP 56-XL-37.5 RTB
Diámetro referencial (mm)	90.55
Número de dientes	56
Paso (in)	0.2

Con respecto al eje central de la rueda se determinó un esfuerzo máximo de 96.53 MPa y factor de fatiga 1.94 siendo aceptable para un diámetro de 30 mm y con un hombro de 35 mm.

Los rodamientos de bolas con las siguientes características: Diámetro interno 30 mm y externo 72 mm con un ancho de 19 mm dan una confiabilidad del 0.987.

3.1.3. Estructura de la plataforma:

El cuerpo está conformado por perfiles estructurales, tales como: Tubos cuadrados, perfiles T, perfiles angulares y platinas; permitiendo optimizar el peso de la plataforma sin disminuir su factor de seguridad con respecto a la deformación de pandeo provocada por la carga.

El área para aplicar la máxima carga debe tener un diámetro de 20 cm desde el centro de gravedad de la plataforma, para evitar que supere la inercia de la estructura (evitar que se vuelque).

Para el análisis FEM se utilizará el software ANSYS, a continuación, se muestran las gráficas de esfuerzos, deformación y factor de seguridad.

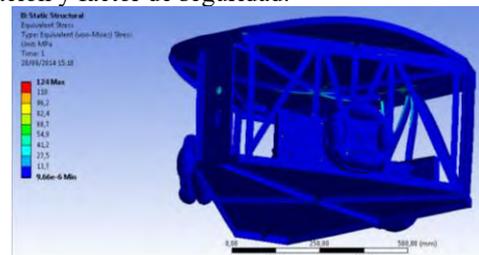


Figura 8: Esfuerzo equivalente Von Mises de la plataforma.

El esfuerzo máximo que soporta la estructura es de 124 MPa, en la Figura 8 nos muestra que la zona afectada donde se concentra este esfuerzo son los perfiles T de la tapa.

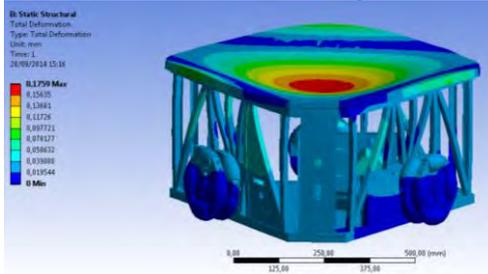


Figura 9: Deformación total de la plataforma.

La mayor deformación equivale a decimas de milímetros; a penas 0.18 mm, como se aprecia en la Figura 9 esta deflexión radica en la tapa de la estructura.

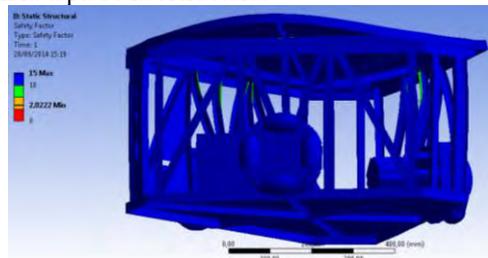


Figura 10: Factor de seguridad de la plataforma.

El factor de seguridad es muy seguro alcanzando un valor de 2, la mayor parte crítica de la estructura se sitúa en las columnas (perfiles T verticales).

3.2. Sistema de Control

3.2.1. Algoritmo de cinemática y dinámica:

Mediante el siguiente diagrama se quiere sintetizar el procedimiento a seguir por la programación en cuanto respecta a esta primera parte.

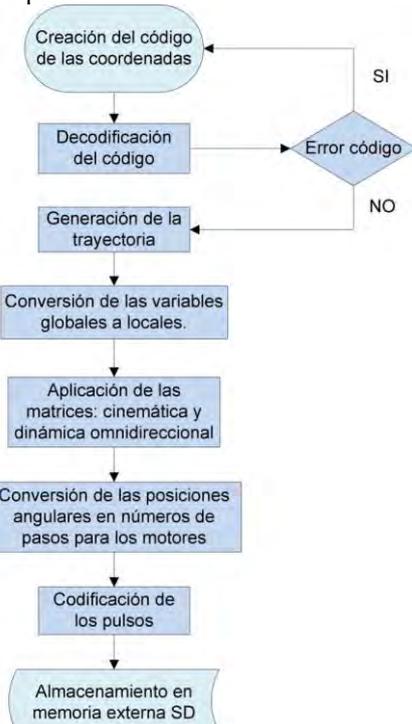


Figura 11: Diagrama del Algoritmo.

Utilizando un código para detallar las coordenadas a seguir por la plataforma, se genera la siguiente trayectoria cerrada.

```

line 2 0,0.2 0.04
circ 3 1 1 +,0.1 0.05
rotate 45,0.2 0.4
line 3 2,0.2 0.04
circ 2 3 1 +,0.15 0.04
rotate 90,0.2 0.4
line 1 3,0.2 0.04
circ 0 2 1 +,0.15 0.04
rotate 180,0.3 0.4
line 0 0,0.2 0.04
wait 2
rotate 0,0.3 0.4
    
```

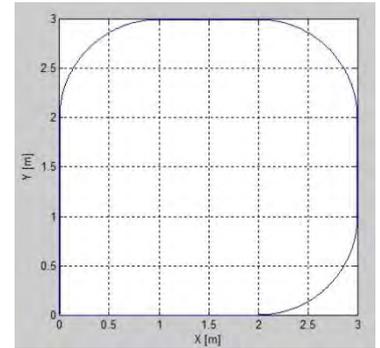


Figura 12: Trayectoria de la plataforma.

Con respecto a la cinemática:

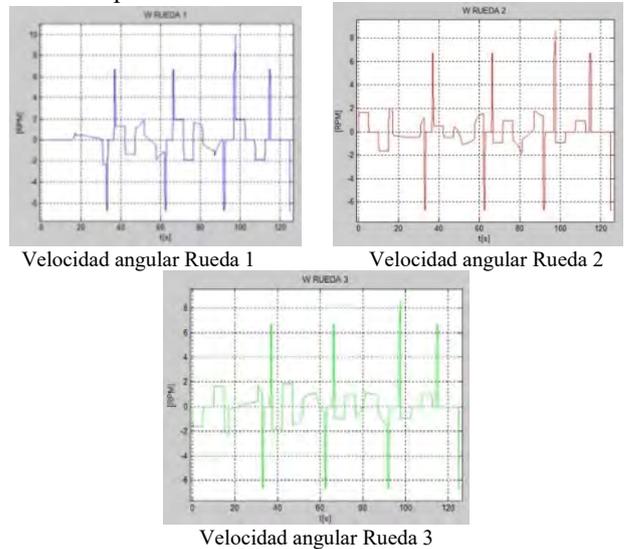


Figura 13: Gráfica de la velocidad angular $\omega(t)$ de cada rueda

Se observa que la rueda 1 tiene una velocidad máxima de 10 rpm, 9 rpm en la rueda 2 y rueda 3.

A continuación, se muestran los torques calculados.

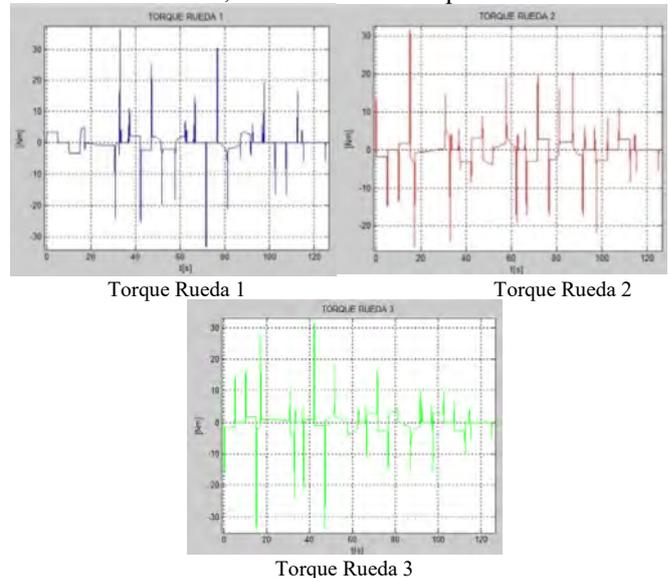


Figura 14: Gráfica del torque de cada rueda

En esta gráfica se muestra un valor máximo de 37 Nm aproximadamente que genera el motor de la rueda 1, 32 Nm en la rueda 2 y un torque de 34 Nm en la rueda 3.

Finalmente, se gráfica las potencias de cada motor según la trayectoria establecida.

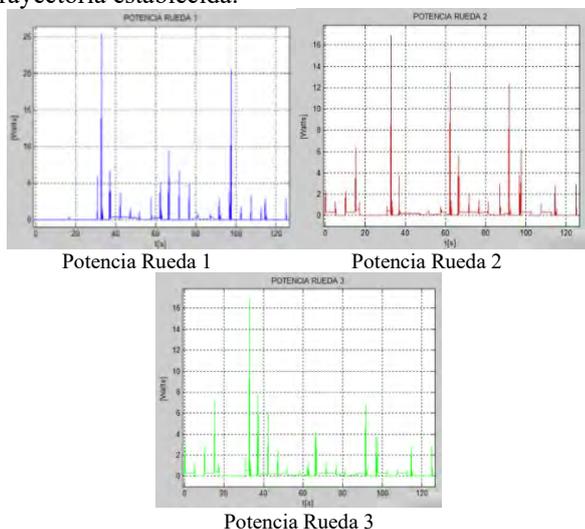


Figura 15: Grafica de potencia de cada rueda

El motor de la rueda 1 genera una potencia máxima de 26 W aproximadamente, la potencia máxima del motor 2 es de 17 W aproximadamente y por último el motor de la rueda 3 genera una potencia de 17 W aproximadamente.

Como conclusión, en esta trayectoria se obtuvo los siguientes valores en general: Una potencia de 26 W capaz de girar a 10 rpm para ejercer un torque de 37 Nm.

3.2.1. Algoritmo para el microcontrolador:

Primeramente, el usuario genera un archivo .txt con el comando respectivo de la trayectoria, para ser ejecutado en el programa de Matlab y posteriormente crea un nuevo archivo .txt que contiene un grupo de caracteres que interpretará el microcontrolador.

El siguiente paso es insertar la SD en la ranura y posteriormente presionar el botón “2” que representa el inicio de ciclo. Cuando se está ejecutando el ciclo se encenderá un indicador de “Ciclo en Proceso” y viceversa cuando finalice el ciclo. Si presenta el caso donde la SD no está insertada se encenderá un indicador de “Lectura SD Fallida”.

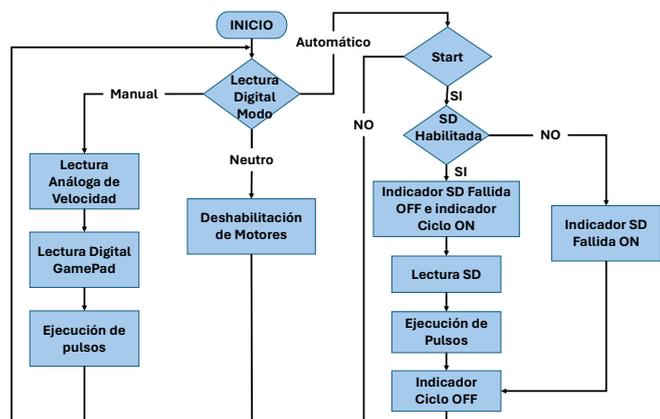


Figura 16: Diagrama del Algoritmo del Microcontrolador.

3.3. Sistema Eléctrico y Electrónico

Para este aparatado es necesario conocer tres parámetros importantes: torque, potencia y velocidad, para ello, en la sección anterior se determinó sus valores, pero al tener una reducción de 4: 1, el valor mínimo de torque que debe tener los motores de pasos es de 9.25 Nm, con respecto a la velocidad, mediante la programación del microcontrolador se determinó que con 200 pulsos el motor puede alcanzar un valor máximo de 300 rpm.

3.3.1. Motores:

En la Tabla 2 se observa una comparación entre el motor a pasos y servomotor.

Tabla 2: Comparación Motor PAP con Servomotor

Motor a pasos	Servomotores
No necesita realimentación (control en lazo abierto).	Es esencial la realimentación (potenciómetro, codificadores, etc).
Pobre relación potencia-volumen, por eso son más grandes.	Buena relación potencia-volumen.
Robustos, envejecen muy lentamente.	Presentan envejecimiento de las escobillas.
Buenas características de bloque.	Para el bloque necesita frenos extra (dispositivos mecánicos).
Propenso a resonancia - ruido	Movimiento suave.
No posee sistema de ventilación, propenso a sobrecalentamiento.	El sistema de ventilación se contamina fácilmente.

Se seleccionó el motor a pasos NEMA 34 85BYGH450D-008 de marca china Wantai, básicamente por la facilidad de control que presenta. Dicha facilidad es necesaria puesto que se realiza el control del posicionamiento de tres motores de forma paralela. La implementación de dichos motores en nuestra aplicación se lo hizo mediante el trabajo conjunto con el sistema de reducción de velocidad (3.1.2).

3.3.2. Driver:

Al comandar cualquier motor Paso a Paso es necesario generar una secuencia de pulsos determinada, el presente controlador realiza aquella secuencia por medio de dos entradas Pulso y Dirección de donde cada flanco ascendente en el pin “Pulso” significa una variación angular según una configuración de pulsos dada en el Drive.

DQ860MA es un controlador para motor a pasos híbrido de dos fases, el voltaje que comanda el drive va de 24 VDC a 80 VDC. El circuito que adopta es similar al circuito de servo control que permite que el motor funcione sin problemas, casi sin ruido y la vibración.

Características:

- Alto rendimiento, bajo precio.
- Opto-aislamiento señal de E/S.
- Protección contra sobretensión, bajo voltaje, sobre intensidad y cortocircuitos.
- El par del motor se relaciona con la velocidad, pero no están relacionadas con el paso/revolución.
- Alta velocidad de inicio.
- Alto par de retención a alta velocidad.

3.3.3. Microcontrolador:

Una ventaja fundamental que posee Arduino es la facilidad de programación que presta, por otro lado, a lo largo del desarrollo del prototipo se vio la necesidad de comandar varias entradas y salidas, de donde el Arduino Mega satisface esta necesidad. El Arduino Mega es una placa electrónica basada en el microprocesador Atmega1280. Cuenta con 54 pines digitales de entrada/salida (de los cuales 14 pueden ser utilizados como salidas PWM), 16 entradas analógicas y un resonador cerámico 16 MHz.

4. Resultados

4.1. Control Automático:

Para esta primera prueba se procede a utilizar una carga de 150 kgf, se obtiene las siguientes observaciones.

Tabla 3: Prueba con Carga de 150 kgf

Carga	150 kgf
Divergencia en Y	2 cm
Divergencia en X	2.5 cm
Tiempo de operación	125 s
Observaciones	Ninguna
Divergencia en Y	2 cm
Divergencia en X	2.5 cm

Para la segunda prueba se procede a utilizar una carga de 200 kgf, se obtiene las siguientes observaciones.

Tabla 4: Prueba con 200kgf de carga.

Carga	200 kgf
Divergencia en Y	----
Divergencia en X	----
Tiempo de operación	----
Observaciones	No cumple con la trayectoria.



Figura 17: Robot Móvil Omni-direccional con 200kgf de carga.

En esta última prueba queda determinada que la máxima capacidad a mover por la plataforma en modo automático es una carga de 150 kgf. En el capítulo de conclusiones se otorga la solución.

Cabe señalar que para todas las pruebas se configuró el driver a 400 pulsos/rev, a intensidad máxima (SW4 ON) y a la máxima corriente de salida como se observa en la Tabla 5.

Tabla 5: Configuración del Driver

SW1	SW2	SW3	PEAK (A)	RMS (A)
OFF	OFF	OFF	7.80	5.60

Para las pruebas en modo automático, la plataforma alcanzó una velocidad y torque máximo en sus ruedas de 10 rpm y 36 Nm, tal como lo ilustra la simulación.

4.2. Control Teleoperado:

A diferencia de la forma automática, este modo tiene la ventaja de tener regulación en la velocidad, es decir, a necesitar torque el usuario disminuía la velocidad mediante el potenciómetro ubicado en el dispositivo de mando, logrando mover una capacidad mayor de carga. En la siguiente Tabla 7 se tiene las siguientes pruebas.

Tabla 6: Pruebas en Modo Manual

Carga [kgf]	Regulación de velocidad [%]	Observación
100	80	Cumple
200	60	Cumple
300	20	Cumple
350	----	No se puede mover



Figura 18: Plataforma con 300kgf de carga.

5. Conclusiones

La velocidad de los motores es de 300 rpm y un torque de 9 Nm, con la reducción de 4:1 otorgada por el sistema de bandas, las ruedas logran valores máximos de 75 rpm y 36 Nm.

El prototipo es capaz de trasladar una carga máxima de 150 kgf en forma automática y unos 300 kgf en modo manual, por lo tanto, no cumple con el objetivo planteado, es necesario cambiar la transmisión de bandas por un sistema de tornillo sin fin-piñón.

Un sistema de transmisión tornillo sin fin - piñón, logra aumentar la reducción 20: 1, alcanzando un torque de 180 Nm pero disminuyendo la velocidad hasta 15 rpm.

El material del rodillo debe poseer alta resistencia mecánica, alto poder amortiguador (elasticidad), repelencia al agua (no ser absorbente de humedad), un material similar al caucho o poliuretano.

Referencias

- Muñoz Martínez, G. Gil-Gómez y A. García Cerezo, 2003, Modelado cinemático y dinámico de un robot móvil omni-direccional, XXIV Jornadas de Automática: León, Málaga. ISBN: 84-931846-7-5
- Leica P., Chavez D., Rosales A., Robert F., Tuibero J., Carelli R., 2014, Strategy based on multiple objectives and null space for the formation of mobile robots and dynamic obstacle avoidance, Revista Politécnica, Vol. 33 No 1. Enero 2014.
- Budynas R. G. y Nisbett J. K., 2008, Elementos mecánicos flexibles. In Diseño en ingeniería mecánica de Shigley, McGraw-Hill interamericana, México, Ch. 17, pp. 860 - 874
- Bolton, 2001, Mecatrónica, Sistema de control electrónico en ingeniería mecánica y electrónica, 2nd ed. Ed. Alfaomega.



Simposio de Robótica, Bioingeniería y Visión por Computador 2024



Estereolitografía: una alternativa para la fabricación de las articulaciones de un robot

Rodríguez Sanz, A.*, Martínez, S., Łukawski, B., Menendez, E., Balaguer, C.

RoboticsLab, Dpto. de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad Carlos III de Madrid, Av. De la Universidad 30, 28911 Leganés, España.

Resumen

El principal objetivo de este proyecto consiste en la renovación de las articulaciones del robot humanoide TEO que mayor desgaste sufren y, en consecuencia, mayores labores de mantenimiento requieren. Para ello, se ha propuesto un nuevo modelo de una articulación embebida que se pueda fabricar en las propias instalaciones por medio de un tipo de fabricación aditiva, el cual ofrece resultados precisos. Para validar el proyecto de renovación, se ha analizado por medio de simulaciones la rigidez estructural del cuello del robot con los materiales más empleados de las dos técnicas de impresión 3D más populares.

Palabras clave: Modelado, Metodología de diseño, Sistemas mecatrónicos.

Stereolithography: an alternative for the manufacturing of robot joints

Abstract

The main goal of this project is the renovation of the humanoid robot TEO's joints which suffer the most wear and, consequently, require more maintenance. To achieve this, a new model of an embedded joint has been proposed, which can be manufactured in-house using a type of additive manufacturing that offers precise results. To validate the renovation project, the structural rigidity of the robot's neck was analyzed through simulations using materials from the two most popular 3D printing techniques.

Keywords: Modeling, Design Methodologies, Mechatronic Systems.

1. Introducción

Task Environment Operator (TEO) es el nombre del robot humanoide de 28 grados de libertad (DoF) desarrollado por el grupo RoboticsLab de la Universidad Carlos III de Madrid, como una plataforma de investigación para el desarrollo de tareas de asistencia doméstica (Martínez et al., 2012). TEO es la tercera versión del robot, siendo el sucesor de los robots bípedos RH-0 y RH-1, y su desarrollo comenzó en el año 2011. A lo largo de los últimos años, la frecuencia de las tareas de mantenimiento ha incrementado debido a problemas mecánicos en el diseño original de las articulaciones y al desgaste sufrido en el cableado de la electrónica generado por los movimientos del robot. El proyecto COMPANION-CM se enfoca en el desarrollo de un banco de entrenamiento integrado en el robot humanoide TEO para el desarrollo de aplicaciones en el ámbito de la robótica social mediante la interacción humano-robot (COMPANION-CM, 2024). Con la finalidad de poder progresar en dicho proyecto, se estableció como objetivo el desarrollo de nuevas articulaciones empezando por la cabeza del robot, la

cual ha estado inoperativa durante los últimos años (Figura 1). Previamente, las articulaciones se han fabricado en aleaciones de acero e incluso fibra de carbono, las cuales presentan las mejores características mecánicas para la estructura de un robot de 1.6 m de altura y un peso estimado de 60 kg. El mayor inconveniente de la fabricación con estos materiales proviene de la necesidad de exportar la fabricación a terceros, lo que incrementa el coste y el tiempo de espera, limitando considerablemente el proceso de prototipado y postprocesado de las piezas.

En este trabajo se valoran las principales ramas de la fabricación aditiva, una alternativa de uso rampante en los últimos años, para la fabricación del prototipo de una nueva articulación robótica embebida. El modelo presentado y los materiales seleccionados se validan posteriormente mediante estudios de fuerzas estáticas en simulación. Por último, se demuestra el correcto funcionamiento de la articulación fabricada mediante un ensayo de control a través del software propietario de los controladores de Technosoft.

*Autor para correspondencia: albertro@pa.uc3m.es

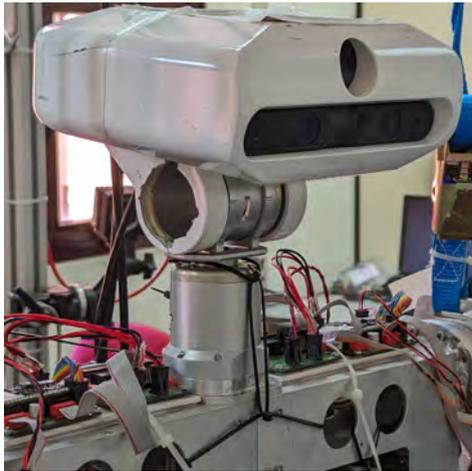


Figura 1: Estado actual de la cabeza del robot TEO.

1.1. La fabricación aditiva

Tradicionalmente, la fabricación de las articulaciones del robot se ha realizado mediante procesos por moldeo de inyección o de fabricación sustractiva, por el cual se elimina material de una pieza base a través de un mecanizado por control numérico por ordenador (CNC). A partir de la década de los 80, se empezó a desarrollar una técnica de fabricación alternativa: la fabricación por adición o impresión 3D. Esta se fundamenta en el principio opuesto, por el que mediante diversas técnicas se construyen piezas añadiendo múltiples capas de material. De cara a la fabricación de prototipos, la manufacturación sustractiva por CNC genera unos acabados con una precisión muy superior, con tolerancias de ± 0.001 mm, mientras que con la fabricación aditiva las piezas presentan tolerancias de ± 0.1 mm con carácter general. Las mayores virtudes de esta última son, a su vez, las principales desventajas de la fabricación sustractiva, y es que emplea menos material, no se requiere de maquinaria industrial ni personal especializado para su uso, y es un proceso mucho más rápido, lo cual ha convertido la impresión 3D en una tecnología de gran interés en el ámbito de la investigación robótica. En el campo de la fabricación aditiva se encuentran las siguientes principales ramas (Formlabs, 2023).

1.1.1. Fabricación por Deposición Fundida (FDM)

La fabricación por deposición fundida, también conocida como fabricación por filamento fundido (FFF), se basa en la extrusión de filamento de un material termoplástico a través de una boquilla calentada, construyendo una pieza capa por capa. Se trata del tipo de impresión 3D más popular en la actualidad, mayoritariamente por el gran rango de precios de las impresoras y el bajo coste general de los materiales. Los termoplásticos más empleados en esta impresión son el acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), el ácido poliláctico (PLA), el nylon o el poliuretano termoplástico (TPU) entre otros, los cuales ofrecen una gran variedad de propiedades estructurales tanto en piezas rígidas como flexibles. La principal desventaja de estas tecnologías es el resultado de tolerancias significativas debido a la baja precisión y resolución, siendo estas principalmente empleadas para pruebas de concepto de bajo coste y modelados básicos.

1.1.2. Estereolitografía (SLA)

La estereolitografía es una técnica de impresión en la que se emplea un láser ultravioleta para curar las secciones transversales de resinas fotosensibles capa por capa. Esta técnica de fotopolimerización presenta como principal ventaja la mayor precisión de estas técnicas, logrando la impresión de geometrías complejas con unos acabados suaves, que pueden ser posteriormente mecanizados, eliminando posibles problemas de tolerancias. Estas impresoras son capaces de utilizar una gran variedad de resinas estándar y resinas para ingeniería, las cuales cuentan con propiedades físicas, térmicas y ópticas que igualan aquellas encontradas en los termoplásticos empleados en FDM.

Por el contrario, la mayor desventaja de este tipo de impresión es que, una vez impresas las piezas, estas requieren de un lavado y un postcurado para eliminar las marcas de los soportes, procesos que se pueden automatizar con máquinas que suponen una inversión mayor. Es por estas características que este tipo de fabricación por adición se usa mayoritariamente para prototipos funcionales, fabricación de moldes, y aplicaciones en el sector médico y dental con materiales biocompatibles.

1.1.3. Sinterizado selectivo por láser (SLS)

Es una técnica de fabricación aditiva similar al SLA en la que se emplea un láser de alta potencia para sinterizar pequeñas partículas de polímero en polvo, generalmente nylon, y convertirlo en una estructura sólida. Las piezas impresas mediante esta técnica tienen unos acabados ligeramente rugosos, sin líneas de capa visibles. Las principales ventajas de esta técnica son la fabricación de piezas con características mecánicas similares a las piezas moldeadas por inyección y el bajo coste por pieza, permitiendo reducir la densidad del interior del material hasta un 20 % de su valor inicial. Su principal uso, al igual que el SLA, es el de crear prototipos funcionales de manera rápida.

Tabla 1: Comparación de precios mínimos entre los equipos profesionales y los materiales de las principales técnicas de impresión aditiva (Formlabs, 2023).

Coste	FDM	SLA	SLS
Impresora de sobremesa (€)	500	2399	23899
Impresora industrial (€)	2500	8999	100000
Materiales (€/kg)	50	150	100

Una comparativa entre los precios del equipo y materiales para los tres tipos de impresión aditiva se recoge en la Tabla 1. De estas, para la fabricación de la articulación propuesta se ha elegido la fabricación SLA, ya que ofrece los mejores resultados con un presupuesto intermedio, además de contar con la posibilidad de realizar un postprocesado de las piezas para conseguir las tolerancias necesarias entre los componentes. Para ello se ha empleado la impresora Form 3+, junto con las unidades de lavado y poscurado, Form Wash y Form Cure, de la marca Formlabs. Como material de impresión se ha empleado la resina Tough 2000, de la misma marca, la cual se presenta como una resina ideal para prototipos funcionales, sometidos a altos esfuerzos y con unas características mecánicas similares al ABS, material empleado en la fabricación FDM. La comparación entre estos materiales se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2: Comparación de las características mecánicas entre los materiales Tough 2000 Resin (Formlabs, 2022) y el plástico ABS (Raise3D, 2023).

Características	Tough 2000	ABS
Densidad (kg/m ³)	1172	1120
Módulo elástico (MPa)	2210	2174
Límite elástico (MPa)	41	33
Límite de tracción (MPa)	46	59
Coefficiente de Poisson	0.47	0.40
Módulo cortante (MPa)	432	318

2. Nuevo diseño de las articulaciones

Las articulaciones del robot humanoide comparten una arquitectura común en cuanto a los componentes que conforman el bucle de control. Como actuador del sistema, en el cuello actual, se emplea un motor de la marca Maxon 45 EC flat modelo 400527, complementado por un mecanismo de reducción Harmonic Drive CSD-14-100-2A-R, el cual incrementa el par ejercido con un ratio de 100. La realimentación del sistema se realiza por medio de dos sensores de posición capacitivos CUI AMT 203-V de 12 bits de resolución, de los cuales uno actúa como un codificador relativo ubicado a la salida del motor, mientras que el otro actúa como un codificador absoluto ubicado a la salida del sistema. Un ejemplo de esta arquitectura se puede observar en la Figura 2, la cual muestra el sistema electromecánico de una de las componentes de la muñeca del robot. Otro elemento presente en las articulaciones es la electrónica de potencia y control, la cual actualmente está expuesta en la superficie del robot.

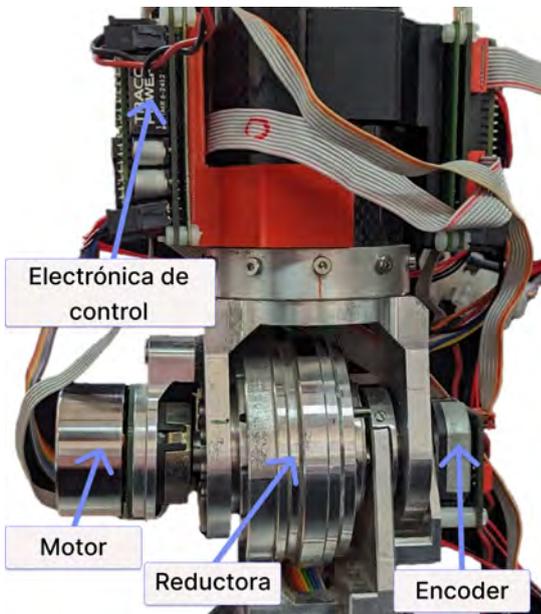


Figura 2: Sistema electromecánico genérico de las articulaciones del robot.

Uno de los objetivos del rediseño de las articulaciones ha sido actualizar los componentes por unos de mayores prestaciones o de menor tamaño. El primero de los cambios es a nivel de actuador, sustituyendo el motor antiguo por un motor Maxon EC frameless 45 modelo 574404, capaz de dar un par mayor empleando la misma tensión de 36V. Una comparación

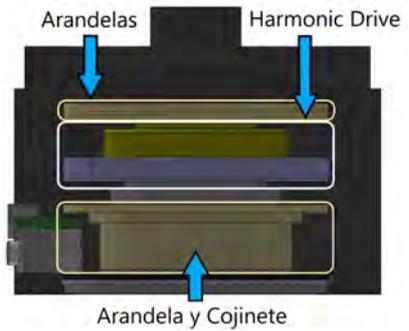
entre las características más significativas de ambos motores se muestra en la Tabla 3. El segundo de los cambios se ha realizado en el sistema sensorial, reemplazando los dos sensores de posición capacitivos por los sensores de posición magnéticos RLM y AksIM-2 de la marca RLS, que actúan como codificadores rotatorios relativo y absoluto. El primero de estos cuenta con una resolución de 12 bits, equivalente al codificador anterior pero con un tamaño más reducido, mientras que el codificador absoluto cuenta con una resolución de 17 bits. Por último, se han añadido unos sensores reed de final de carrera para delimitar los ángulos de giro de cada articulación, que en el caso del cuello son 120° para la componente frontal (Figura 6) y 180° para la componente axial, valores ligeramente superiores a los que puede realizar un cuello humano (Arockia Doss et al., 2023). Estos sensores, junto con el codificador relativo, realimentan directamente el bucle de control de la articulación.

Tabla 3: Comparación de las características entre el motor antiguo (Maxon Group, 2017) y el motor nuevo (Maxon Group, 2021).

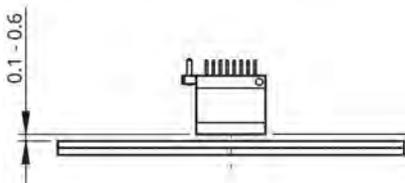
Características	400527	574404
Potencia (W)	30	50
Tensión nominal (V)	36	36
Velocidad en vacío (rpm)	4750	3360
Velocidad nominal (rpm)	3290	2360
Par nominal (mNm)	66	90.5
Corriente nominal (A)	0.847	0.828
Par de bloqueo (mNm)	380	484
Corriente de bloqueo (A)	5.38	4.81
Eficiencia máxima (%)	80	82.4
Peso (g)	80	110

La filosofía adoptada durante el rediseño de las articulaciones ha sido la de crear una nueva articulación genérica, fácilmente adaptable para cualquier extremidad del robot. Se propone un diseño embebido, en el que todos los componentes queden integrados en el interior, otorgando mayor protección contra colisiones. Las dimensiones y líneas generales de diseño vienen definidas por los componentes de mayor tamaño como el motor y la reductora. Los cuales deben ir a su vez acompañados por una serie de rodamientos para permitir una rotación relativa con respecto a la carcasa. Con el objetivo de reducir la fricción entre las piezas impresas en resina, se optó por instalar una combinación de arandelas y cojinetes de plástico iglidur W300 de la marca Iguu (Figura 3(a)).

Sin embargo, las mayores restricciones del diseño vienen impuestas por las tolerancias de instalación de los encoders relativos y absolutos magnéticos. Estas indican la distancia requerida entre el disco magnético axial y el lector del codificador, la cual debe estar en un rango de 0.1-0.6 mm como se muestra en la Figura 3(b) para el encoder relativo. Esta ha sido la mayor problemática durante la fabricación de las piezas al requerir de unas tolerancias muy precisas en piezas difíciles de mecanizar. Una vista general y la sección del prototipo propuesto de la articulación se muestran en la Figura 2.

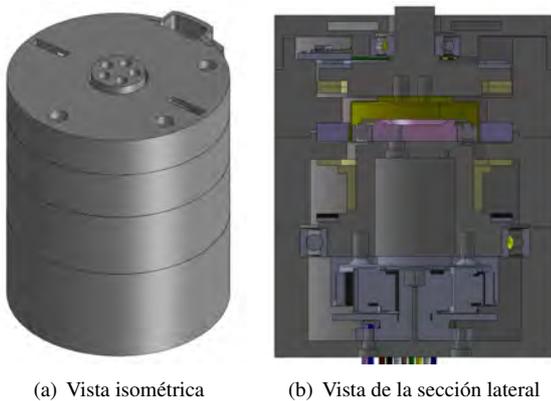


(a) Ubicación de los elementos de baja fricción



(b) Montaje del encoder RLM (RLS, 2022)

Figura 3: Ajuste y tolerancias de los nuevos componentes.



(a) Vista isométrica

(b) Vista de la sección lateral

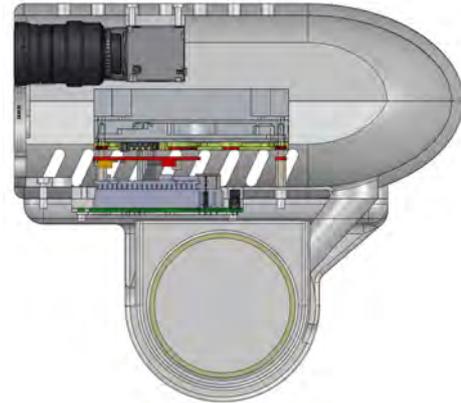
Figura 4: Modelo 3D de la nueva articulación para el robot humanoide TEO.

2.1. Nuevo diseño de la cabeza

En conjunto con las articulaciones del cuello, se ha realizado un nuevo modelo y configuración para la cabeza del robot humanoide. Previamente, esta contaba con un sistema sensorial conformado por una cámara principal RGB XtionPROLive de la marca ASUS, para la medición de profundidad, y una cámara de alta resolución Flea3 USB3 de la marca Flir (Figura 1), para detecciones de mayor precisión. Para el nuevo diseño, se ha propuesto reemplazar la cámara principal por dos cámaras Intel Realsense D435if, las cuales cuentan con una mayor resolución e incorporan unidades de medición inercial (IMU), para medir la velocidad angular y la aceleración de la cabeza. Para poder utilizar todos los nuevos componentes de la extremidad del cuello, se diseñó y fabricó una placa de circuito integrado que contiene las etapas de alimentación, comunicación y control de las dos articulaciones (Figura 5(a)). Esta se decidió ubicar en el interior de la cabeza, debajo de una nueva unidad de procesamiento Jetson AGX Xavier, ubicada en el centro de masa de la cabeza (Figura 5(b)), que se empleará exclusivamente para el desarrollo de tareas de visión mediante inteligencia artificial.



(a) PCB compartida para las dos componentes del cuello



(b) Vista de la sección lateral de la nueva cabeza

Figura 5: Componentes ubicados en la nueva cabeza de TEO.

3. Resultados

Para la validación del modelo propuesto, se ha realizado un análisis estático del componente en la salida de las articulaciones, el cual se considera la pieza estructuralmente crítica para soportar las cargas de torsión. En el marco de este estudio, se ha considerado comparar la rigidez de la pieza usando la resina Tough 2000, y su equivalente en impresión por filamento, el plástico ABS. Las simulaciones se han realizado en el mismo programa CAD con el que se han diseñado las piezas, SolidWorks 2022. Cabe destacar que la simulación de una pieza impresa en filamento nunca va a ser exacta con la pieza fabricada, puesto que estas se imprimen con un porcentaje de relleno menor para aligerar peso, y un patrón de relleno distinto en cada impresora FDM.



Figura 6: Rango de movimiento completo de la articulación frontal del cuello.

La Figura 6 muestra el rango completo de rotación de la componente frontal del cuello. Para el estudio de los esfuerzos, se ha considerado el caso de máximo momento radial para cada una de las articulaciones, esto es, en el estado de máxima inclinación frontal. La capacidad de la pieza para soportar estas tensiones viene determinada por la tensión de Von Mises (σ_{VM}) y el desplazamiento normal generado por la deformación (ϵ) de la pieza bajo la carga. El primero de estos es un indicador del fallo elástico de un material dúctil, de modo que cuando el valor de esta tensión supere el del límite elástico (σ_e) del material, la deformación resultante en la pieza será permanente (Barsanescu and Comanici, 2017). Las siguientes figuras muestran una deformación extremada resultado del ensayo de fuerzas estáticas considerando exclusivamente el propio peso de la cabeza. La Figura 7 muestra el valor de la tensión en una pieza con la resina Tough 2000 y el plástico ABS, siendo en ambos casos inferior a sus límites elásticos. La resina muestra mejores propiedades mecánicas para la pieza que el plástico ABS con un porcentaje de relleno del 100 %, valor que se incrementaría proporcionalmente con el porcentaje de vaciado interno de la pieza. Esta mejora mecánica se transfiere a la deformación resultante de la carga, la cual se muestra en la Figura 8.

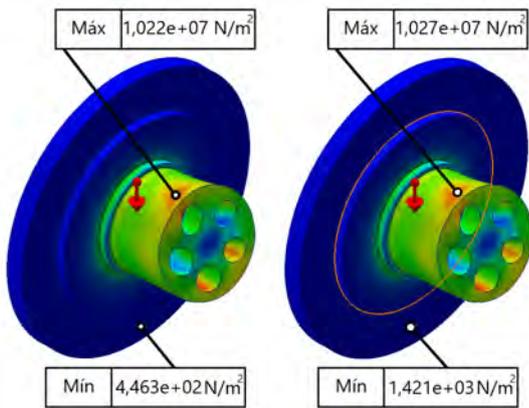


Figura 7: Tensión de Von Mises (N/m^2) del adaptador de salida horizontal. (Izq.) Resina Tough 2000, (Dcha.) plástico ABS.

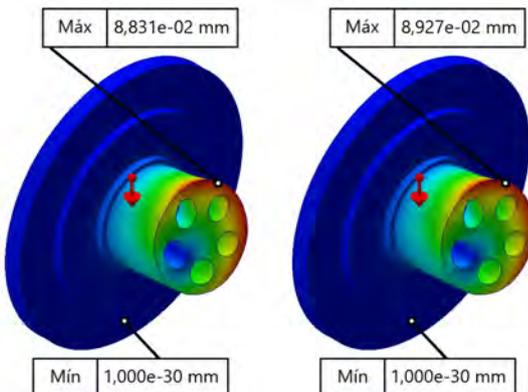


Figura 8: Desplazamiento resultante (mm) del adaptador de salida horizontal. (Izq.) Resina Tough 2000, (Dcha.) plástico ABS.

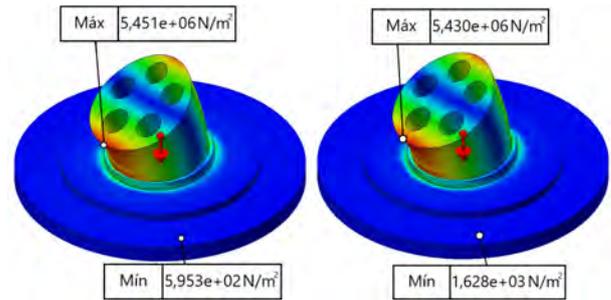


Figura 9: Tensión de Von Mises (N/m^2) del adaptador de salida vertical. (Izq.) Resina Tough 2000, (Dcha.) plástico ABS.

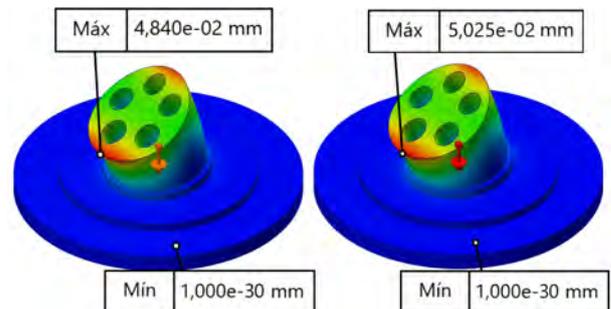


Figura 10: Desplazamiento resultante (mm) del adaptador de salida vertical. (Izq.) Resina Tough 2000, (Dcha.) plástico ABS.

Al realizar el mismo ensayo con la componente vertical (v) del cuello, cuya masa total esta compuesta por la masa de la cabeza y la de la componente horizontal (h), se obtienen resultados muy similares (Figuras 9 y 10). La Tabla 4 recopila los resultados obtenidos de estos ensayos junto con el factor de seguridad ($F_s = \sigma_e / \sigma_{VM}$), validando el uso del material Tough 2000 al contar con un factor de seguridad de 4.01:1 en el peor de los casos de estudio.

Tabla 4: Comparación de los resultados obtenidos de los ensayos de ambas articulaciones con los dos materiales.

Material	σ_e (MPa)	σ_{VM} (MPa)	ϵ (μm)	F_s
Tough 2000 (h)	41	10.22	88.3	4.01
ABS (h)	33	10.27	89.27	3.21
Tough 2000 (v)	41	5.451	48.4	7.52
ABS(v)	33	5.43	50.25	6.07

A la hora de fabricar las piezas, es importante considerar dos factores de cara al posterior mecanizado: la orientación en la que se imprime la pieza y sus dimensiones. En cuanto a la primera, la definición del sentido de impresión indica cuales serán las superficies, que se encuentren de cara a la base de la pieza, en las que se van a generar rebabas (Figura 11(a)). Otro problema es que en aquellas piezas de mayor tamaño que requieren de soportes, los restos de estos no se eliminan de forma tan sencilla como en piezas impresas en FDM, por lo que es necesario usar herramientas de mecanizado manual para dejar las superficies lisas (Figura 11(b)). En cuanto a las dimensiones de la pieza, se ha observado que las piezas presentan unas tolerancias de aproximadamente ± 0.2 mm, por lo que en todas las piezas cilíndricas se han aumentado las todas las superficies 0.2 mm, para poder mecanizar posteriormente las piezas

a las medidas exactas. Por el contrario, las piezas restantes de geometrías irregulares de gran o diminuto tamaño no se pueden mecanizar por dificultades a la hora de fijar la pieza a la máquina CNC, por lo que se han engrosado las superficies 0.1 mm para ser luego limadas a mano (Figura 11(c)). El ensamblaje completo del prototipo de la articulación embebida se muestra en la Figura 11(d).

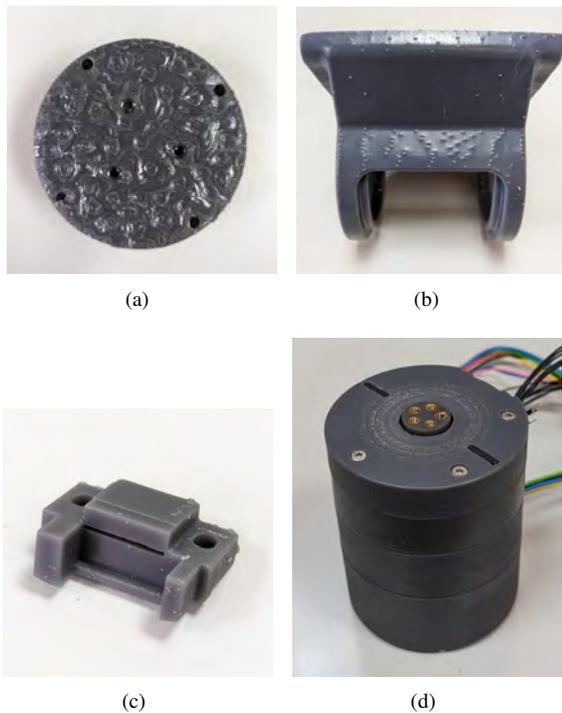


Figura 11: Acabados de las piezas impresas con SLA. (a) Rebabas generadas en la cara base de la impresión. (b) restos de los soportes generados en piezas grandes, (c) pieza de geometría irregular para cumplir la distancia radial del codificador RLM, (d) ensamblaje del prototipo de la articulación.

Finalmente, se ha hecho uso de la placa de circuito impreso fabricada para realizar una serie de pruebas de movimiento con el software propio de los controladores EasySetup, a través del bus CAN. Una vez definidas las características técnicas del motor y del codificador relativo, se calibró un controlador PID ajustado a un caso sin carga externa para comprobar el correcto funcionamiento del sistema electromecánico. La posición angular del motor durante los ensayos se muestra en la Figura 12, demostrando que el motor es capaz de alcanzar la posición de referencia en los intervalos de tiempo definidos.

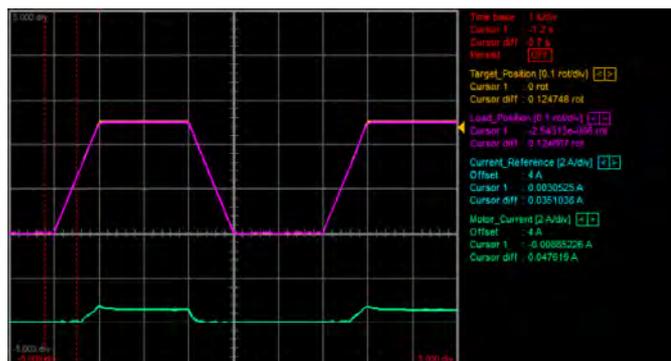


Figura 12: Medida de la posición angular del motor tras una rotación de 120°.

4. Conclusiones

Se ha propuesto un nuevo diseño de una articulación embebida cuya estructura se ha fabricado localmente mediante la esteoreolitografía, lo que permite la manufacturación de múltiples variaciones rápidamente con unos resultados precisos. La rigidez estructural crítica de la articulación se ha evaluado mediante una simulación en un ensamblaje del cuello con un prototipo de una nueva cabeza, obteniendo unos resultados positivos para continuar el proceso de fabricación. A raíz de estos estudios y tras varias iteraciones, se ha impreso y ensamblado el prototipo, cumpliendo con las tolerancias más restrictivas del diseño. Finalmente, se ha validado el correcto funcionamiento de todos los componentes a través de una serie de ensayos de movimiento, constatando la viabilidad del diseño propuesto como posible reemplazo de las articulaciones inoperativas del tren superior del robot.

Agradecimientos

La investigación que ha conducido a estos resultados ha recibido financiación del proyecto COMPANION-CM: Inteligencia artificial y modelos cognitivos para la interacción simétrica humano-robot en el ámbito de la robótica asistencial, con referencia Y2020/NMT-6660, financiado por Proyectos Sinérgicos de I+D la Comunidad de Madrid.

Referencias

- Arockia Doss, A. S., Lingampally, P. K., Nguyen, G. M. T., Schilberg, D., 2023. A comprehensive review of wearable assistive robotic devices used for head and neck rehabilitation. *Results in Engineering* 19, 101306. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101306>
- Barsanescu, P. D., Comanici, A. M., Feb 2017. von mises hypothesis revised. *Acta Mechanica* 228 (2), 433–446. DOI: 10.1007/s00707-016-1706-2
- COMPANION-CM, 2024. COMPANION-CM: Inteligencia artificial y modelos cognitivos para la interacción simétrica humano-robot en el ámbito de la robótica asistencial. <https://companion-cm.webs.tsc.uc3m.es>, Último acceso: 15/04/2024.
- Formlabs, 2022. Uso de la Tough 2000 Resin. <https://support.formlabs.com/s/article/Using-Tough-Resin?language=escomparision>, Último acceso: 12/04/2024.
- Formlabs, 2023. Comparación de tecnologías de impresión 3D: FDM, SLA o SLS. <https://formlabs.com/es/blog/fdm-sla-sls-como-elegir-tecnologia-impresion-3d-adeuada/>, Último acceso: 12/04/2024.
- Martínez, S., Monje, C. A., Jardón, A., Pierro, P., Balaguer, C., Muñoz, D., 2012. TEO: Full-size humanoid robot design powered by a fuel cell system. *Cybernetics and Systems* 43 (3), 163–180. DOI: 10.1080/01969722.2012.659977
- Maxon Group, 2017. 400527 - EC 45 flat, 30 W. <https://www.maxongroup.com/maxon/view/product/400527>, Último acceso: 15/04/2024.
- Maxon Group, 2021. 411815 - EC frameless 45 flat, brushless, 50 W. <https://www.maxongroup.com/maxon/view/product/574404>, Último acceso: 13/04/2024.
- Raise3D, 2023. Datasheet - ABS Extrafill. https://s1.raise3d.com/2023/06/Raise3D_Premium_ABS_TDS_V4.0.pdf, Último acceso: 12/04/2024.
- RLS, 2022. RLM, Miniature Incremental Magnetic Encoder. <https://www.rls.si/eng/rolin-linear-and-rotary-incremental-magnetic-encoder-system#downloads\data-sheet>, Último acceso: 12/04/2024.



Simposio de Robótica, Bioingeniería y Visión por Computador 2024



Sesion: <Robótica>

Localización topológica Monte Carlo basada en descripción de nubes de puntos LiDAR 3D

Máximo, M.^{a,*}, Ballesta, M.^a, Valiente, D.^a, Heredia-Aguado, E.^a, Reinoso, O.^a

^aInstituto de Investigación en Ingeniería de Elche (I3E), Universidad Miguel Hernández de Elche, Avda. de la Universidad s/n, 03202 Elche (Alicante), España.

To cite this article: Máximo, M., Ballesta, M., Valiente, D., Heredia-Aguado, E., Reinoso, O. 2024. Monte Carlo topological localization based on 3D LiDAR point cloud description. Simposio de Robótica, Bioingeniería y Visión por Computador, 2024, 1-5. <https://doi.org/>

Resumen

La búsqueda de la ubicación de un robot es un aspecto clave dentro del campo de la robótica móvil. Un método que utiliza información de los sensores para determinar la pose del robot en entornos conocidos previamente es el método de localización Monte Carlo. En este estudio se ha utilizado una variante topológica del mismo, en el cual el objetivo es encontrar la posición del robot en el instante actual dentro de los nodos del mapa topológico. La información utilizada para la localización se obtiene de un sensor LiDAR, el cual realiza capturas de nubes de puntos que proporcionan información 3D del entorno. La información más característica de estas nubes de puntos es extraída y convertida a un descriptor obtenido mediante técnicas de aprendizaje profundo. Se han usado dos bases de datos diferentes para analizar cómo se comporta el algoritmo en entornos con características diferentes. Los resultados obtenidos, incluyendo error y tiempo de computación, demuestran la robustez del método.

Palabras clave: localización Monte Carlo, robótica móvil, LiDAR, nubes de puntos, mapa topológico.

Monte Carlo topological localization based on 3D LiDAR point cloud description

Abstract

Finding the location of a robot is a key aspect in the field of mobile robotics. One method that uses sensor information to determine the robot's pose in previously known environments is the Monte Carlo localization method. In this study, a topological variant of this method has been used, in which the objective is to find the position of the robot at the current instant within the nodes of the topological map. The information used for localization is obtained from a LiDAR sensor, which captures point clouds that provide 3D information about the environment. The most characteristic information of these point clouds is extracted and converted to a descriptor obtained by deep learning techniques. Two different databases have been used to analyse how the algorithm behaves in environments with different characteristics. The results obtained, including the error and computation time, demonstrate the robustness of the method.

Keywords: Monte Carlo localization, mobile robot, LiDAR, point clouds, topological map.

1. Introducción

Uno de los problemas fundamentales a los que se enfrenta la robótica móvil es la localización de un robot, es decir, conocer su posición y orientación en cada instante de tiempo. Para conseguirlo se recurre al uso de sensores, como pueden ser sensores de odometría (Ganganath and Leung, 2012) o sensores GPS. Estos tienen ciertas limitaciones como en el caso de sen-

sores de odometría, cuyo error aumenta conforme el robot se va desplazando por posible fricción o resbalamiento de las ruedas. En el caso del GPS, no puede ser utilizado en entornos de interior, además para que su error no sea demasiado elevado se ha de recurrir a sensores GPS RTK (Lygouras and Gasteratos, 2021), los cuales utilizan una base fija en una posición conocida para corregir el error del sensor GPS ubicado en el robot

*Autor para correspondencia: mmaximo@umh.es

móvil. Debido a estas limitaciones, es necesario recurrir a otros métodos de localización.

Algunos de estos métodos hacen uso de sensores que permiten captar información del entorno como cámaras, con las cuales se obtienen imágenes del ambiente (Humenberger et al., 2022). O sensores LiDAR (Zou et al., 2022) los cuales permiten obtener nubes de puntos con información 3D del entorno.

Para contrastar la información obtenida con los sensores se recurre a la extracción de características con el fin de sintetizar la información más relevante dentro de un único descriptor global (Cabrera et al., 2022).

En cuanto a la búsqueda de la pose del robot a partir de la información de estos sensores, se recurre en numerosos casos a métodos probabilísticos para aproximar la posición y orientación del robot. Uno de estos algoritmos es el método de localización Monte Carlo (MCL) (Dellaert et al., 1999), al cual se le consdiera como un método de filtro de partículas (Javierre et al., 2019). Estos son utilizados para determinar el estado de un sistema que se ve modificado con el trascurso del tiempo. La información utilizada para la localización en algunos casos se corresponde con el uso de características de imágenes (Gil et al., 2005), (Fernandez et al., 2010), otros utilizan LiDAR u otros sensores, y en otras aplicaciones se recurre a la fusión de datos (Carrasco et al., 2021), (Perez-Grau et al., 2017), (Alejo et al., 2019).

En este trabajo, se ha realizado una adaptación del método MCL para su uso de manera topológica, en el que la posición del robot se estima en base a los nodos del mapa topológico construido previamente. Los mapas topológicos, a diferencia de los mapas métricos, no ofrecen una representación del espacio euclídeo, si no un modelo gráfico. Este modelo gráfico está compuesto por nodos los cuales representan una posición en el espacio e incluyen información sobre esta región. La información utilizada para la construcción de estos mapas proviene de sensores GPS y LiDAR, y la información de este último es contrastada para la estimación de la localización. Los resultados obtenidos de la estimación de la posición del robot se corresponden con una localización global. De esta manera el método nos permite aproximar la posición actual dentro de un mapa.

2. Localización Monte Carlo

2.1. Descripción del método

El algoritmo MCL tiene como objetivo estimar la posición y orientación del robot, es decir, su estado $x_t = (x, y, \theta)$ en el instante de tiempo t , utilizando una serie de medidas $Z^k = \{z_{k,i} = 1...k\}$ del entorno y los movimientos del robot $u_{1:t} = \{u_1, u_2, \dots, u_t\}$. La función de densidad de probabilidad $p(x_t|z_{1:t}, u_{1:t})$ está representada mediante M muestras aleatorias llamadas partículas $S_k = \{s_k^i; i = 1...M\}$.

En la inicialización de este método en el instante de tiempo $t = t_0$, se genera un conjunto aleatorio de partículas $S_0 = \{s_0^i\}$. Una vez definido el conjunto inicial de partículas, se realiza el siguiente proceso de manera iterativa:

- Fase de predicción: en esta fase se genera un nuevo conjunto de partículas S_t respectivas al instante t , a partir del conjunto S_{t-1} y una señal de control u_t . Este nuevo conjunto nace como resultado de desplazar cada una de

las partículas del conjunto en el instante anterior según el movimiento de la señal de control. S_t representa la densidad $p(x_t|z_{1:t}, u_{1:t})$.

- Fase de actualización: en esta fase se utiliza la observación z_t tomada por el robot, para calcular cada uno de los pesos w_t^i de las partículas del conjunto S_t . El proceso de esta asignación de pesos se describe en el siguiente apartado. De este proceso se obtiene para cada una de las partículas, $s_t^i = \{x_t^i, w_t^i\}$, con el que se realizará el muestreo con reposición. Este proceso se realiza de forma que cada partícula tenga una probabilidad determinada en función del peso de la misma.

En este trabajo, el método MCL se ha abordado con un enfoque topológico con el fin de realizar una localización global. En la Figura 1 se muestra un ejemplo de los datos que intervienen en este proceso. Por una parte, se muestra en azul las nubes de puntos capturadas en los nodos del mapa, marcados con equis. Por otra parte, se observa en rojo las nubes de puntos tomadas en las posiciones de la trayectoria, marcadas con equis. Esta trayectoria corresponde a las observaciones que realiza el robot en cada posición durante su recorrido.

En la aplicación del método topológico las partículas se inicializan en las posiciones de los nodos del mapa. En el proceso de iteración las partículas se desplazan entre nodos contiguos en el mapa. De esta manera, en cada nodo se tienen varias partículas a las que se les asigna una dirección, para que en iteraciones sucesivas se dirijan al nodo contiguo anterior o posterior. La medida z_k para el cálculo de los pesos se realiza a partir de las observaciones de la trayectoria del robot. El siguiente paso es el muestreo con reposición de las partículas, el cual se realiza de manera aleatoria con la probabilidad de selección dada por los valores de los pesos de las partículas. De esta manera el conjunto de partículas resultante tendrá la misma extensión que el conjunto de entrada, y estará compuesto por las partículas que hayan obtenido mayores pesos. Posteriormente, el proceso se continúa de manera iterativa.

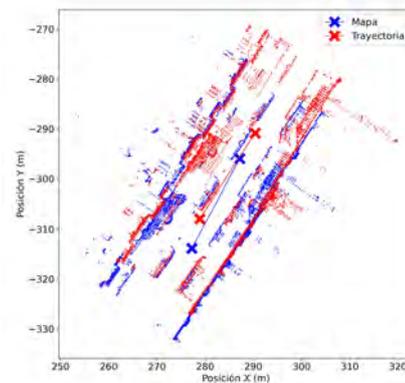


Figura 1: datos utilizados en el método topológico, diferenciando entre nodos del mapa y posiciones de la trayectoria del robot.

2.2. Descriptores de nubes de puntos

La extracción de características de cada una de las nubes de puntos se realiza mediante una red de aprendizaje profundo (Cabrera et al., 2024) entrenada previamente con la base de

datos Oxford RobotCar (Maddern et al., 2017). Esta red permite embeber la nube en un descriptor de tamaño 1x512, el cual codifica las características más relevantes del entorno. De esta manera es posible distinguir una posición específica de un mapa basándose en la apariencia del entorno.

2.3. Métodos de pesado

El método MCL evalúa la probabilidad de cada una de las partículas generadas, es por ello que necesita de métodos que permitan realizar esta evaluación con el objetivo de estimar cuál es la posición correcta en base a las características del estado actual y de los anteriores.

Para dotar de un peso a cada una de las partículas se comparan las características del entorno observadas por el robot con las del mapa. El mapa está formado por N nodos bidimensionales, cada uno conteniendo una nube de puntos capturada en la posición $(n_{j,x}, n_{j,y})$ donde se encuentra el nodo, y, a partir de esta nube de puntos, se obtiene su descriptor asociado d_j .

Por otra parte, considerando que el robot se va a localizar, este captura una nube de puntos en el instante de tiempo t , y de esta se obtiene su descriptor d_t , el cual compararemos con los descriptores del mapa. Basándonos en la distancia euclídea entre el descriptor actual d_t y los descriptores de los nodos del mapa $\{d_1, d_2, \dots, d_N\}$, seleccionaremos los B descriptores del mapa más cercanos al descriptor actual.

Una vez se ha obtenido d_t y los B descriptores más cercanos se procede al pesado de las partículas según los siguientes métodos:

- Método 1 (M1): el peso de cada partícula considera la distancia métrica entre la posición actual de la partícula y la posición del nodo en el mapa asociada a cada uno de los B descriptores más cercanos, siendo $v_j = (n_{j,x}, n_{j,y}) - (x^i, y^i)$, donde (x^i, y^i) es la posición de la partícula i . También interviene la matriz $\Sigma_i = \text{diag}(\sigma^2, \sigma^2)$ para modelar el ajuste de los pesos. El peso total de cada partícula se calcula según (1).

$$\omega_i^i = \sum_{j=1}^B \exp(-v_j \Sigma_i^{-1} v_j^T) \quad (1)$$

- Método 2 (M2): este método además de tener en cuenta la distancia métrica entre la posición de la partícula y las posiciones del mapa, también tiene en cuenta la distancia en el espacio del descriptor, es decir, la distancia entre el descriptor actual, d_t , y los B descriptores más cercanos, siendo $h_j = |d_j - d_t|$. Posteriormente, se normalizan estas distancias para que la suma de las mismas sea 1. En este caso, también interviene la variable $\Sigma_m = 1/\sigma^2$. La expresión utilizada se muestra en (2).

$$\omega_i^i = \sum_{j=1}^B \exp(-v_j \Sigma_i^{-1} v_j^T) \exp(-h_j \Sigma_m^{-1} h_j^T) \quad (2)$$

- Método 3 (M3): en este caso se tienen en cuenta los mismos parámetros descritos en el método anterior, pero en lugar de realizar el sumatorio de las distancias, se realiza el producto. El cálculo de ω_i^i se describe en (3).

$$\omega_i^i = \prod_{j=1}^B \exp(-v_j \Sigma_i^{-1} v_j^T) \exp(-h_j \Sigma_m^{-1} h_j^T) \quad (3)$$

3. Bases de datos

Con el fin de evaluar el método propuesto, se han realizado experimentos haciendo uso de dos bases de datos diferentes: la primera es Oxford RobotCar, y la segunda ha sido adquirida en el campus de la Universidad Miguel Hernández (UMH).

Estos datos han sido fraccionados para crear el mapa y una trayectoria. Tanto mapa como trayectoria, contienen información relativa al GPS, y capturas de nubes de puntos tomadas con LiDAR. En las trayectorias, el GPS es tomado únicamente como *ground truth* para evaluar la localización obtenida con MCL.

Puesto que, como se ha descrito en el apartado 2.2, el entorno se codificará mediante un descriptor de apariencia de nubes de puntos, se va a evaluar la estimación de la localización en zonas con entornos de similar apariencia. Para ello se ha realizado una clusterización de los descriptores en 40 *clusters*, mediante el uso del algoritmo *k-means*. En la Figura 2 puede observarse cómo la agrupación de los *clusters* se realiza de manera que un mismo *cluster* está compuesto por nodos del mapa

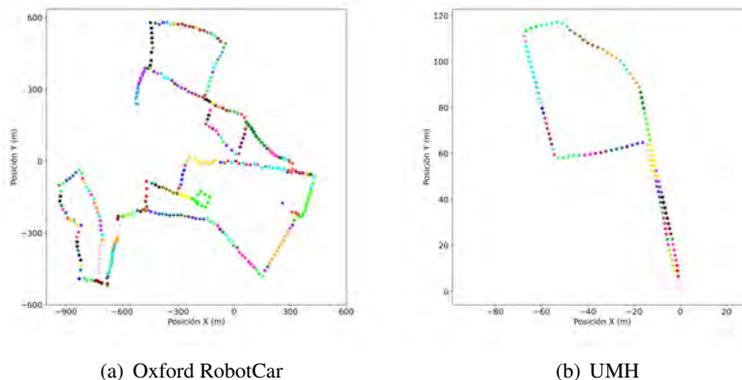


Figura 2: clusterización de los descriptores de cada uno de los mapas de las bases de datos utilizadas, empleando el método *k-means* con 40 *clusters*. (a) Oxford RobotCar; (b) UMH.

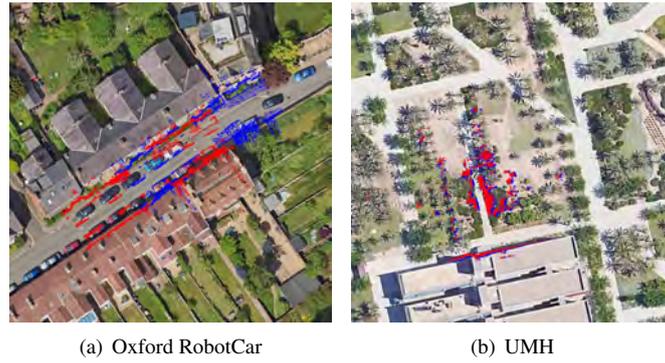


Figura 3: apariencia en vista satelital con nubes de puntos pertenecientes al mapa y a la trayectoria del robot marcadas en azul y rojo, respectivamente, para cada una de las bases de datos utilizadas en este trabajo: (a) Oxford RobotCar; (b) UMH.

correspondientes a un entorno con poca variación en su apariencia.

Cabe señalar que la base de datos Oxford RobotCar está compuesta por varias capturas en distintos días de una misma ruta. Se ha seleccionado la captura de un mismo día para segregar el mapa y la trayectoria del robot.

De esta manera, se obtiene un mapa con 397 nodos, con una separación media entre contiguos de 21.43 ± 3.19 metros, y una trayectoria con 397 posiciones separadas una distancia media de 21.45 ± 3.90 metros. Además, la distancia entre cada una de las posiciones de la trayectoria y su nodo del mapa más cercano es 10.09 ± 5.25 metros.

La segunda base de datos consta de información relativa a una ruta capturada en el campus de la UMH. El mapa contiene 136 nodos cada uno con una nube de puntos adquirida en una posición específica, y separados una distancia de 2.32 ± 0.05 metros. De manera similar, la distancia entre las posiciones de la trayectoria es de 2.32 ± 0.04 metros. Y las distancias entre una posición de la trayectoria y su nodo del mapa más cercano son de 0.39 ± 0.02 metros.

Respecto a las diferencias entre ambas bases de datos, se ha de destacar que la apariencia de los mapas de las nubes de puntos es distinta, pues en la base de datos de Oxford RobotCar las capturas han sido tomadas en las calles de una ciudad y en la base de datos de la UMH, el robot se encuentra mayormente en-

tre vegetación, tal y como se observa en las imágenes satelitales de la Figura 3.

4. Resultados

En este apartado se muestran los resultados obtenidos para las dos bases de datos detalladas en el apartado anterior. Cabe destacar que para todos los experimentos se han realizado 10 simulaciones y se ha obtenido una media de los mismos, ya que el algoritmo evaluado se trata de un método probabilístico, por lo que se ha tenido en cuenta una posible variabilidad.

En estos resultados se ha evaluado el grado en el que difiere la posición real y la estimación realizada por el método MCL. La posición real es conocida ya que disponemos de su *ground truth* gracias a los datos del GPS. Por otra parte la estimación de MCL es obtenida según la Ecuación 4 como la posición media del conjunto de partículas de esa iteración.

$$\hat{s}_t = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M s_t^{[i]} \quad (4)$$

4.1. Evaluación de los métodos de pesado

Se han evaluado los tres métodos de pesado propuestos para el algoritmo MCL topológico. Para ello la métrica utilizada ha sido la dispersión entre las partículas, mediante el cálculo de la

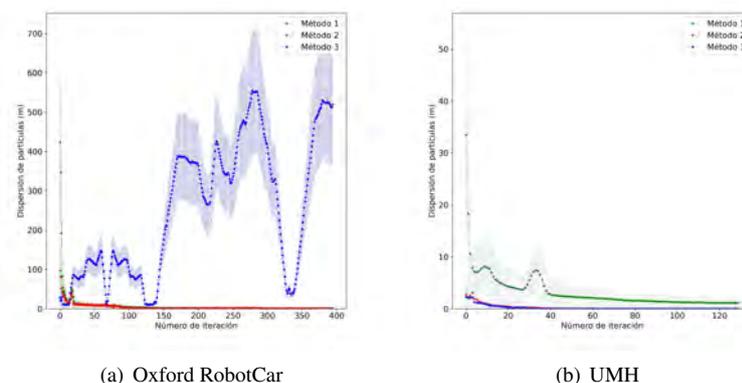


Figura 4: evolución en la dispersión de las partículas, entendida como la media entre las distancias de cada una de las partículas con la estimación realizada con el método MCL topológico en cada base de datos: (a) Oxford RobotCar; (b) UMH. Se compara dicha dispersión para cada uno de los métodos de pesado propuestos.

Oxford			UMH		
Error M1 (m)	Error M2 (m)	Error M3 (m)	Error M1 (m)	Error M2 (m)	Error M3 (m)
11.54±0.38	9.61±0.26	205.79±38.88	1.72±0.38	0.40±0.01	0.44±0.01

Tabla 1: error medio y desviación para cada uno de los métodos de pesado propuestos.

Oxford			UMH		
Nº partículas	Tiempo/nodo (s)	Error medio (m)	Nº partículas	Tiempo/nodo (s)	Error medio (m)
794	0.26	9.62±1.09	272	0.09	0.40±0.03
1588	0.36	9.73±0.32	544	0.12	0.42±0.02
2382	0.46	9.73±0.31	816	0.15	0.42±0.03
3176	0.58	9.25±0.45	1088	0.18	0.41±0.01

Tabla 2: coste computacional por nodo y error medio obtenido para en función del número de partículas definido en la aplicación del método MCL topológico.

distancia entre la posición de cada una de las partículas y la estimación realizada con MCL. En la Figura 4 puede observarse cómo influye la selección de un método a nivel de dispersión de las partículas. En la Tabla 1 se muestran los resultados obtenidos de error medio para cada método; este error se corresponde con la distancia entre la estimación realizada con MCL y la posición GPS conocida en ese punto de la trayectoria.

Como se observa, el error mínimo es el obtenido con el método de pesado M2, es por ello que, para los resultados del siguiente apartado, se ha seleccionado este método. En los resultados obtenidos con el método M2, se puede observar que los errores obtenidos con ambas bases de datos se corresponden con valores similares a las distancias reales entre los puntos de la trayectoria y los nodos del mapa. De esta manera, la localización global se realiza con éxito, ya que este método aproxima la posición al nodo más cercano.

4.2. Evaluación del método topológico

En el método MCL topológico intervienen diferentes parámetros, entre ellos está el número de partículas. Se han realizado simulaciones modificando este parámetro, con el fin de evaluar cómo afecta al error final y al tiempo de cómputo. Estos resultados se muestran en la Tabla 2. En esta tabla podemos comprobar cómo a un mayor número de partículas el tiempo de computación aumenta. Además, los tiempos de computación son mayores para la base de datos de Oxford RobotCar puesto que el número de nodos en el mapa es mayor, y esto hace que se

tenga que realizar comparaciones con un mayor número de observaciones. Los resultados de error muestran un valor similar independientemente del número de partículas, por esta razón, y, por suponer un mayor coste computacional, la mejor solución del método vendrá dada mediante la definición de un número intermedio de partículas.

Para el vehículo utilizado en la trayectoria de Oxford RobotCar, el tiempo de adquisición entre capturas ha sido de 2.56 segundos aproximadamente. Atendiendo nuevamente a la Tabla 2, se comprueba que el tiempo de cómputo de la estimación MCL es mucho menor y por tanto viable su aplicación en tiempo real.

Este método funciona de tal manera que, una vez se han descartado ciertas partículas, estas nunca vuelven a representar una posible hipótesis. Por ello, se han evaluado los resultados desde distintas posiciones iniciales del robot, con el fin de analizar el comportamiento del método al probar diferentes entornos como punto de inicio. Estos resultados se muestran en la Figura 5. Se puede comprobar cómo el método es robusto ante estos cambios, pues el error no varía sustancialmente entre experimentos. En el caso concreto de la base de datos de la UMH los errores medios son los siguientes: $0.41±0.29$, $0.42±0.22$ y $0.58±0.71$ metros, por lo que los cambios entre uno y otro son mínimos.

Por último, la Figura 6 representa, con algunas iteraciones, la evolución del algoritmo de localización. Como se muestra, las partículas tienden a converger a la posición correcta.

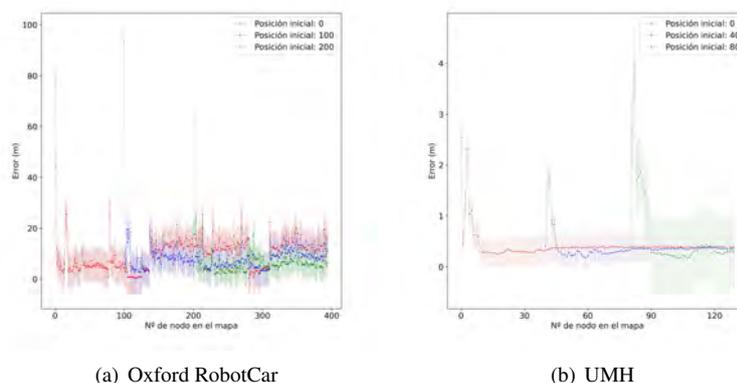


Figura 5: error obtenido con el método MCL topológico en cada uno de las posiciones de la trayectoria, cuando el robot comienza su recorrido en diferentes nodos del mapa para cada una de las bases de datos analizadas: (a) Oxford RobotCar; (b) UMH.

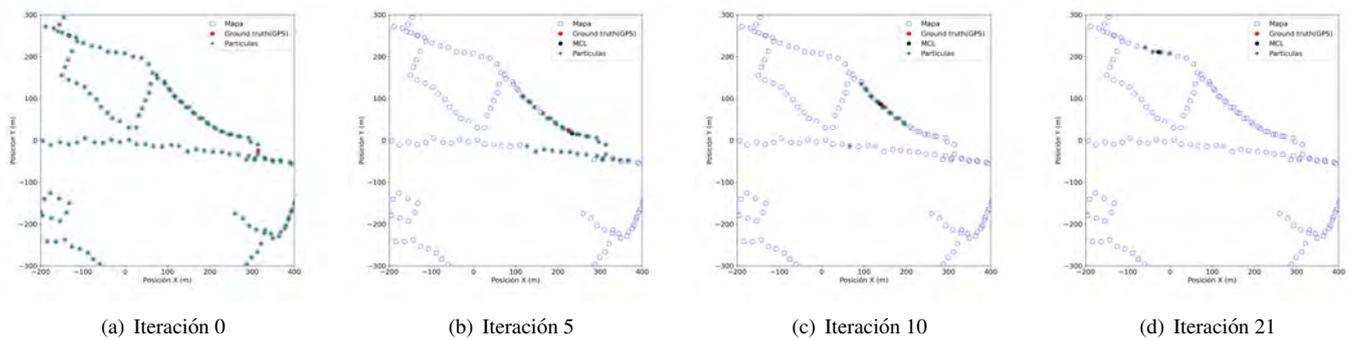


Figura 6: posición de las partículas con respecto de los nodos del mapa, en diferentes iteraciones durante la ejecución del método MCL topológico.

5. Conclusiones y trabajos futuros

En este trabajo se ha evaluado el método MCL para la localización de robots mediante la información de nubes de puntos 3D capturadas por sensores LiDAR. La información de estas nubes de puntos ha sido procesada para obtener una versión codificada del entorno, mediante un descriptor de apariencia global. Este descriptor se ha obtenido a partir de redes neuronales de aprendizaje profundo cuyos datos de entrenamiento proceden de la base de datos Oxford RobotCar, utilizada en este trabajo. Además, se han evaluado los resultados del MCL propuesto con otra base de datos adquirida en un entorno muy distinto al del conjunto entrenado.

Los resultados de error obtenidos demuestran que el método MCL topológico consigue realizar una localización global del robot en ambos entornos, ya que los errores son similares a las distancias reales entre las posiciones de las trayectorias y del mapa. Además, es viable su uso en tiempo real ya que el coste de computación entre posiciones de la trayectoria es inferior al tiempo de desplazamiento del robot en una distancia similar a la existente entre nodos.

Por último, se propone como trabajo futuro, realizar una localización local a partir de la localización global obtenida, con el fin de obtener una mayor precisión en la estimación de la posición del robot.

Agradecimientos

Esta publicación forma parte del proyecto PROMETEO/2021/075 financiado por la Generalitat Valenciana. También ha sido posible gracias al proyecto TED2021-130901B-I00, financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y por la Unión Europea “NextGenerationEU”/PRTR.

Referencias

Alejo, D., Caballero, F., Merino, L., 2019. A Robust Localization System for Inspection Robots in Sewer Networks. *Sensors* 19, 4946. DOI: 10.3390/s19224946

Cabrera, J. J., Cebollada, S., Flores, M., Reinoso, O., Payá, L., 2022. Training, Optimization and Validation of a CNN for Room Retrieval and Description of Omnidirectional Images. *SN Computer Science* 3 (4), 271. DOI: 10.1007/s42979-022-01127-8

Cabrera, J. J., Santo, A., Gil, A., Viegas, C., Payá, L., 2024. Minkunext: Point cloud-based Large-scale Place Recognition using 3D Sparse Convolutions. DOI: 10.48550/arXiv.2403.07593

Carrasco, P., Cuesta, F., Caballero, R., Pérez-Grau, F. J., Viguria, A., 2021. Monte-Carlo Localization for Aerial Robots using 3D LiDAR and UWB sensing. 2021 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), 354–360. DOI: 10.1109/ICUAS51884.2021.9476732

Dellaert, F., Fox, D., Burgard, W., Thrun, S., 1999. Monte Carlo Localization for Mobile Robots. *Proceedings 1999 IEEE international conference on robotics and automation 2*, 1322–1328. DOI: 10.1109/ROBOT.1999.772544

Fernandez, L., Gil, A., Paya, L., Reinoso, O., 2010. An Evaluation of Weighting Methods for Appearance-based Monte Carlo Localization using Omnidirectional Images. *Proc. of the 2nd Workshop on Omnidirectional Robot Vision. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 13–18.

Ganganath, N., Leung, H., 2012. Mobile robot localization using odometry and kinect sensor. 2012 IEEE International Conference on Emerging Signal Processing Applications, 91–94. DOI: 10.1109/ESPA.2012.6152453

Gil, A., Reinoso, O., Vicente, A., Fernández, C., Payá, L., 2005. Monte Carlo Localization Using SIFT Features. *Pattern Recognition and Image Analysis: Second Iberian Conference, IbPRIA 2005, Estoril, Portugal*, 623–630. DOI: 10.1109/ICMTMA.2009.576

Humenberger, M., Cabon, Y., Pion, N., Weinzaepfel, P., Lee, D., Guérin, N., Sattler, T., Csurka, G., 2022. Investigating the Role of Image Retrieval for Visual Localization: An Exhaustive Benchmark. *International Journal of Computer Vision* 130 (7), 1811–1836. DOI: 10.1007/s11263-022-01615-7

Javierre, P., Alvarado, B. P., de la Puente, P., 2019. Particle Filter Localization Using Visual Markers Based Omnidirectional Vision and a Laser Sensor. *Third IEEE International Conference on Robotic Computing (IRC)*, 246–249. DOI: 10.1109/IRC.2019.00045

Lygouras, E., Gasteratos, A., 2021. A novel moving-base RTK-GPS-Based wearable apparatus for precise localization of humans in peril. *Microprocessors and Microsystems*, 82, 103833. DOI: 10.1016/j.micpro.2021.103833

Maddern, W., Pascoe, G., Linegar, C., Newman, P., 2017. 1 year, 1000 km: The Oxford RobotCar Dataset. *The International Journal of Robotics Research* 36(1), 3–15. DOI: 10.1177/0278364916679498

Perez-Grau, F. J., Caballero, F., Viguria, A., Ollero, A., 2017. Multi-sensor three-dimensional Monte Carlo localization for long-term aerial robot navigation. *International Journal of Advanced Robotic Systems* 14, 1–15. DOI: 10.1177/1729881417732757

Zou, Q., Sun, Q., Chen, L., Nie, B., Li, Q., Jul. 2022. A Comparative Analysis of LiDAR SLAM-Based Indoor Navigation for Autonomous Vehicles. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 23 (7), 6907–6921. DOI: 10.1109/TITS.2021.3063477



Simposio de Robótica, Bioingeniería y Visión por Computador 2024



Sesión: Robótica

Optimización de trayectorias de robots múltipodos orbitales con dispositivos de docking

Redondo-Verdu, C.^{a,*}, Belmonte-Baeza, A.^a, Ramón, J. L.^a, Pomares, J.^a

^aGrupo Human Robotics, Universidad de Alicante, Crta. de San Vicente del Raspeig s/n, 03690, Alicante, España.

To cite this article: Redondo-Verdu, C., Belmonte-Baeza, A., Ramón, J. L., Pomares, J. 2024. Trajectory optimization of multipod robots with docking devices. Simposio de Robótica, Bioingeniería y Visión por Computador, 2024, 1-6. <https://doi.org/>

Resumen

Este artículo propone un método de optimización de trayectorias para la planificación de movimiento de un robot múltipodo en escenarios de robótica de servicios en órbita. El robot múltipodo propuesto se describe genéricamente como un cuerpo con un conjunto de patas con n grados de libertad cada una. Las patas del robot tienen un sistema de acoplamiento (docking) en sus efectores finales. El método de optimización de trayectorias propuesto genera la planificación de la trayectoria del cuerpo y las patas del robot, teniendo en cuenta tanto la cinemática, la dinámica como las condiciones orbitales en las que se encuentra el robot. Los resultados muestran un escenario en órbita con una nave espacial objetivo que presenta varios dispositivos de docking ubicados arbitrariamente en la superficie de la nave. El método de planificación propuesto genera las trayectorias de las patas, las fuerzas de contacto y las trayectorias del cuerpo necesarias para alcanzar una ubicación determinada en la superficie de la nave espacial objetivo en la duración deseada para la maniobra.

Palabras clave: Planificación de trayectorias, Guía, navegación y control, Manipuladores robóticos, Sistemas autónomos, Exploración y transporte espacial, Sistemas robóticos autónomos, Toma de decisiones y autonomía.

Trajectory optimization of multipod robots with docking devices

Abstract

This paper proposes a trajectory optimization method for the path planning of a multipod robot in on-orbit servicing scenarios. The proposed multipod robot is generically described as a robot body with a set of legs with n degrees of freedom each. The robot legs have a docking system at their end-effectors. The proposed trajectory optimization method generates the robot body and legs path planning considering both the system kinematics, dynamics and orbital conditions. The results show an on-orbit scenario with a target spacecraft with several docking devices arbitrary located on the spacecraft's surface. The path planning generates the required legs trajectories, contact forces and body trajectories to achieve a given location on the target spacecraft's surface during a desired maneuver duration.

Keywords: Trajectory and Path Planning, Guidance navigation and control, Robots manipulators, Autonomous systems, Space exploration and transportation, Autonomous robotic systems, Decision making and autonomy.

1. Introducción

Las naves de servicio en órbita han de ser capaces de abarcar una amplia variedad de tareas, incluyendo operaciones complejas que requieran de altos niveles de autonomía, confiabilidad, eficiencia y seguridad. En distintas misiones espaciales se ha propuesto el uso de varios brazos robóticos, como ocu-

re con On-orbit Servicing, Assembly and Manufacturing - 1 (OSAM-1) de la NASA (Shoemaker et al., 2020) y DARPA's Robotic Servicing of Geosynchronous Satellites (RSGS) (Sullivan et al., 2018). Los robots serán una parte vital en tareas como la construcción de hábitats humanos en Marte o la superficie lunar (Thangavelautham et al., 2020), así como la construcción de telescopios y estructuras espaciales de gran escala

*Autor para correspondencia: celia.redondo@ua.es

(Mishra et al., 2022). Las operaciones de robótica espacial, tal como la manipulación en órbita, la utilización de recursos in-situ o los servicios en órbita, requerirán de sistemas de manipulación complejos compuestos de múltiples brazos. Este artículo presenta un método de optimización de trayectorias para guiar a robots múltipodos en actividades extravehiculares. En el artículo se presenta un robot múltipodo formulado de forma genérica como un cuerpo con ζ patas con n grados de libertad cada una. Este múltipodo opera en las proximidades de la nave objetivo, permitiendo que los efectores finales de las patas alcancen la superficie de dicha nave. La conexión con la misma se puede establecer por las patas mediante unos sistemas de anclaje específicos (elementos o dispositivos de docking). El método de optimización de trayectorias propuesto calcula automáticamente el movimiento del cuerpo y las trayectorias de las patas así como las fuerzas de interacción que se requieren para guiar al robot a una posición objetivo empleando los elementos de docking.

Los robots espaciales operan en entornos inherentemente impredecibles y sujetos a diversas perturbaciones. Por lo general, estos robots cuentan con grados de libertad redundantes, lo que les permite navegar a través de espacios de trabajo inciertos y realizar múltiples tareas de manera simultánea o secuencial. El uso de sistemas inteligentes de planificación de movimiento y control permite que los robots trabajen y adapten su rendimiento a espacios de trabajo no deterministas con incertidumbres. Los sistemas de planificación y control de trayectorias basados en optimización se utilizan recientemente en la literatura para el guiado y control de los robots espaciales. Estos enfoques se han propuesto para la optimización de trayectorias de naves espaciales (Mote et al., 2020) y para la planificación de trayectorias de sistemas robóticos espaciales de libre flotación (Misra and Bai, 2017), donde se ha empleado programación convexa para identificar trayectorias cinemáticas localmente factibles. Se han empleado herramientas como la programación dinámica diferencial (Albee et al., 2022) y los sistemas de control basados en LQR para controlar y optimizar las trayectorias de los robots espaciales. Estos controladores se utilizaron para planificar la ruta y controlar el robot Astrobe. En los últimos años se han propuesto nuevos métodos de planificación y control de movimiento basados en optimización para la robótica espacial, especialmente para sistemas de manipulación complejos en órbita. (Aghili, 2019) esboza una estrategia para la planificación y control óptimos del movimiento, con el objetivo de facilitar la disipación del momento angular de un satélite flotando sin control sostenido por un manipulador espacial. Asimismo, (Basmadji et al., 2020) describe la planificación del movimiento de un manipulador de un robot espacial con un doble brazo sujeto a fuerzas y momentos externos mientras opera en el espacio. (L. Ramón et al., 2022) proponen un método de optimización de trayectorias para el guiado de un robot humanoide de dos brazos que realiza tareas de manipulación en órbita, junto con un controlador óptimo para el seguimiento de las trayectorias generadas.

En el presente artículo, se propone una formulación de optimización de trayectorias para el guiado de robots múltipodos en órbita. Este método determina automáticamente las posiciones y los tiempos de acoplamiento, las fuerzas de interacción, las trayectorias de las patas y el movimiento del cuerpo para

el robot múltipodo. Se emplea una programación no lineal para crear trayectorias complejas, lo que permite al robot alcanzar un destino especificado coordinando los movimientos de sus patas y los dispositivos de acoplamiento presentes en la nave espacial objetivo.

El nivel de disponibilidad de las cámaras certificadas para el espacio y las computadoras de a bordo ha avanzado lo suficiente como para permitir la adaptación de técnicas de servovisualización de robots terrestres en su implementación en el espacio. Por ejemplo, en el trabajo de (Pinard et al., 2007), la posición relativa y la orientación de una nave espacial se obtienen con respecto a la Estación Espacial Internacional mediante la identificación de características visuales en un objetivo designado. Otros trabajos previos relevantes proponen la aplicación de sistemas de servovisualización directa para resolver problemas relacionados con el guiado de múltiples naves espaciales (Felicetti and Pomares, 2020), manipulación en órbita (Ramón et al., 2022), o manipuladores redundantes en el espacio (Ramón et al., 2023). En este artículo, el método de optimización de trayectorias propuesto utiliza la retroalimentación visual proporcionada por una cámara ubicada en el cuerpo del robot. A partir de esta información visual, se obtiene un mapa de la nave espacial objetivo que se utiliza para generar la planificación de trayectorias del cuerpo y las patas del robot.

El proceso de optimización de trayectorias implica determinar los puntos de acoplamiento en la superficie de la nave espacial objetivo, junto con su sincronización, los movimientos de las patas (teniendo en cuenta la cinemática y dinámica del robot), el movimiento del cuerpo y las fuerzas de interacción requeridas durante el acoplamiento. Para lograr esto, se introduce una novedosa formulación de programación no lineal para la optimización de trayectorias tanto del cuerpo del robot como de sus patas.

La resto de este artículo se divide en las siguientes secciones. La Sección 2 describe la arquitectura del sistema, el escenario de servicio en órbita y la cinemática y dinámica del robot. El problema propuesto de optimización de trayectorias se presenta en la Sección 3. La Sección 4 describe el método de control de trayectorias del múltipodo. Los resultados de la simulación se detallan en la Sección 5, y las principales conclusiones se presentan en la Sección 6.

2. Arquitectura del sistema y dinámicas

En la Figura 1 se representa el escenario de servicio en órbita que se considerará a lo largo del artículo. En esta figura se distingue el robot múltipodo y la superficie de la nave objetivo con los dispositivos de docking. El robot múltipodo cuenta con ζ patas con n grados de libertad cada una. Cada una de las patas presenta un sistema de anclaje en sus respectivos efectores finales. En la sección de resultados, se considera un robot de $\zeta = 4$ patas con sus respectivos $n = 6$ grados de libertad (véase la Figura 1). En cuanto a la superficie del satélite objetivo, contiene distintos dispositivos de anclaje, o docking, situados arbitrariamente a lo largo de la superficie. En la Figura 1 se considera una superficie plana, donde los anclajes están distribuidos cada 0.5 metros.

Las coordenadas articulares de cada pata se representan como $\mathbf{q}_i \in \mathbb{R}^n (i = 1 \dots \zeta)$. El sistema de coordenadas del cuerpo, B ,

está situado en su centro de masas. El robot múltipodo procurará mantenerse cerca de la superficie de la nave, permitiendo de esta manera que los efectores finales de las patas alcancen los puntos de docking en la superficie del satélite objetivo. Asimismo, se crea un mapa tridimensional del espacio de trabajo o de la superficie de la nave objetivo a partir de la nube de puntos de la captura de una cámara situada en el cuerpo del robot.

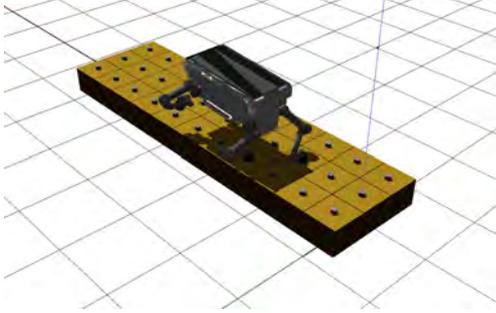


Figura 1: Escenario del servicio en órbita.

La cinemática del robot viene definida por la posición y orientación de la base del robot, \mathbf{t}_b y $\boldsymbol{\phi}_b$ (ambos respecto al sistema de referencia inercial), y por la configuración articular de cada pata, \mathbf{q}_i . La cinemática completa se define por el vector $[\mathbf{t}_b^T, \boldsymbol{\phi}_b^T, \mathbf{q}_i^T]^T$, $i = 1 \dots \zeta$.

La dinámica del sistema muestra la relación entre la aceleración, fuerzas y pares generados en la base del robot y en cada pata. Más concretamente, la dinámica del sistema relaciona las aceleraciones lineales y angulares de la base del múltipodo, $\dot{\mathbf{v}}_b = [\dot{\mathbf{t}}_b^T, \dot{\boldsymbol{\omega}}_b^T]^T \in \mathfrak{R}^6$, respecto al sistema de coordenadas inercial, las aceleraciones articulares de cada pata, $\ddot{\mathbf{q}}_i$, las fuerzas y pares ejercidas en la base del múltipodo, $\mathbf{h}_b \in \mathfrak{R}^6$, y los pares aplicados sobre cada articulación de las patas, $\boldsymbol{\tau} \in \mathfrak{R}^n$. Dicha relación puede definirse como:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{h}_b \\ \boldsymbol{\tau}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{bb} & \mathbf{M}_{bi} \\ \mathbf{M}_{bi}^T & \mathbf{M}_{ii} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{v}}_b \\ \ddot{\mathbf{q}}_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{c}_b \\ \mathbf{c}_{mi} \end{bmatrix} \quad (1)$$

donde $\mathbf{M}_{bb} \in \mathfrak{R}^{6 \times 6}$ es la matriz de inercia de la base del múltipodo, $\mathbf{M}_{bi} \in \mathfrak{R}^{6 \times n}$ es la matriz de inercia acoplada de la base del múltipodo y la pata i , $\mathbf{M}_{ii} \in \mathfrak{R}^{n \times n}$ es la matriz de inercia de cada pata i , y \mathbf{c}_b , y $\mathbf{c}_{mi} \in \mathfrak{R}^6$ son los términos no lineales de la velocidad/desplazamiento para la base de la nave espacial y la pata i , respectivamente.

La Ecuación (1) puede ser ampliada incluyendo los pares de perturbación ambiental y reescribirse de la siguiente forma:

$$\mathbf{M}_i^* \ddot{\mathbf{q}}_i + \mathbf{C}_i^* = \boldsymbol{\tau}_i + \boldsymbol{\tau}_{envi} \quad (2)$$

donde $\boldsymbol{\tau}_{envi} \in \mathfrak{R}^n$ son los pares actuando sobre cada pata i debidos a las perturbaciones ambientales, $\mathbf{M}_i^* \in \mathfrak{R}^{n \times n}$ es la matriz de inercia generalizada y $\mathbf{C}_i^* \in \mathfrak{R}^n$ es la matriz de Coriolis generalizada, que se definen como se muestra a continuación:

$$\mathbf{M}_i^* = \mathbf{M}_{ii} - \mathbf{M}_{bi}^T \mathbf{M}_{bb}^{-1} \mathbf{M}_{bi} \quad (3)$$

$$\mathbf{C}_i^* = \mathbf{c}_{mi} - \mathbf{M}_{bi}^T \mathbf{M}_{bb}^{-1} \mathbf{c}_b \quad (4)$$

Para cada pata i , los momentos lineales y angulares del sistema $[\mathbf{t}^T, \boldsymbol{\psi}^T]^T \in \mathfrak{R}^6$ se definen como:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{t} \\ \boldsymbol{\psi} \end{bmatrix}_i = \mathbf{M}_{bb} \mathbf{v}_b + \mathbf{M}_{bi} \dot{\mathbf{q}}_i \quad (5)$$

donde $\mathbf{v}_b = [\dot{\mathbf{t}}_b^T, \dot{\boldsymbol{\omega}}_b^T]^T \in \mathfrak{R}^6$ es la velocidad lineal y angular de la base del múltipodo respecto al sistema de referencia inercial, y $\dot{\mathbf{q}}_i \in \mathfrak{R}^n$ es la derivada temporal del vector articular de la pata i .

La Jacobiana de la pata, $\mathbf{J}_i \in \mathfrak{R}^{6 \times n}$, otorga la siguiente relación:

$$\dot{\mathbf{p}}_i = \mathbf{J}_i \dot{\mathbf{q}}_i + \mathbf{J}_b \mathbf{v}_b \quad (6)$$

donde $\dot{\mathbf{p}}_i \in \mathfrak{R}^6$ es la velocidad lineal y angular del efector final de cada pata en el sistema de referencia inercial, y $\mathbf{J}_b \in \mathfrak{R}^{6 \times 6}$ es la matriz Jacobiana del robot. Combinando (5) y (6) se obtiene una ecuación que relaciona de forma directa las velocidades articulares y las de los efectores finales de la pata i :

$$\dot{\mathbf{p}}_i = \mathbf{J}_{gi} \dot{\mathbf{q}}_i + \mathbf{J}_b \mathbf{M}_{bb}^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{t} \\ \boldsymbol{\psi} \end{bmatrix}_i \quad (7)$$

$$\mathbf{J}_{gi} = \mathbf{J}_i - \mathbf{J}_b \mathbf{M}_{bb}^{-1} \mathbf{M}_{bi} \quad (8)$$

donde \mathbf{J}_{gi} es la matriz Jacobiana generalizada para la pata i .

3. Optimización de trayectorias

Esta sección describe la optimización de trayectorias propuesta para la planificación de rutas del robot múltipodo en la aplicación de servicio en órbita descrita en la Sección 2. El objetivo de este método es determinar los movimientos de las patas y del cuerpo para guiar al robot desde una posición inicial dada, $[\mathbf{t}_b^T(t=0) = \mathbf{t}_{b0}^T, \boldsymbol{\phi}_b^T(t=0) = \boldsymbol{\phi}_{b0}^T]^T$, hasta la posición objetivo, $[\mathbf{t}_b^T(t=T) = \mathbf{t}_{bd}^T, \boldsymbol{\phi}_b^T(t=T) = \boldsymbol{\phi}_{bd}^T]^T$, considerando T como la duración deseada de la maniobra. El algoritmo es capaz de programar y planificar los movimientos de las ζ patas para mover al múltipodo utilizando los dispositivos de anclaje localizados en el exterior de la nave objetivo. Por lo tanto, el método de optimización de trayectorias genera la trayectoria de la base del robot $[\mathbf{t}_b^T(t), \boldsymbol{\phi}_b^T(t)]^T$, y las fuerzas de interacción y las trayectorias de los efectores finales de cada pata i , $\mathbf{f}_i(t)$ y $\mathbf{p}_i(t)$ respectivamente. Dichas fuerzas de interacción y las trayectorias de los efectores finales de las patas son automáticamente generadas por el método propuesto considerando que el movimiento de cada pata consta de dos fases: fase de contacto o anclaje ($t \in \mathcal{C}_i$), y fase de no contacto ($t \notin \mathcal{C}_i$). Consecuentemente, por cada pata i , la duración de las fases se denota como $\Delta T_{ci,j}$ y $\Delta T_{nci,j}$ respectivamente, donde $j = 1 \dots N$, siendo N el número de fases de docking o anclaje de cada pata. Por lo tanto, la duración de la maniobra debería de ser $\sum_{j=1}^N \Delta T_{ci,j} + \Delta T_{nci,j} = T$, y la trayectoria y fuerzas de interacción planificadas $\mathbf{p}_i(t, \Delta T_{ci,1}, \Delta T_{nci,1} \dots)$ y $\mathbf{f}_i(t, \Delta T_{ci,1}, \Delta T_{nci,1} \dots)$ respectivamente. Dichas trayectorias se codifican usando diferentes polinomios de duraciones fijas que se unen para crear una spline continua cuyos coeficientes son optimizados. Por ejemplo, para la trayectoria de una pata, $\mathbf{p}_i(t \notin \mathcal{C}_i)$, se consideran múltiples polinomios de tercer orden por cada fase de no contacto, y un valor constante para las fases de contacto. En cuanto al perfil de fuerza de cada pata, $\mathbf{f}_i(t \in \mathcal{C}_i)$, múltiples polinomios representan las fases de anclaje mientras que se establece una

fuerza nula durante las fases de no contacto. La duración de cada fase y, a su vez, la duración del polinomio de cada pata, varía según la duración de fase optimizada $\Delta T_{ci,j}$, $\Delta T_{nci,j}$.

También se definen varias restricciones para asegurar unos movimientos realistas garantizando las propiedades cinemáticas y dinámicas del robot. Las restricciones cinemáticas aseguran que el rango de movimientos de cada pata i , \mathcal{H}_i , es consistente con su cinemática. Las restricciones cinemáticas se definen como un prisma de lado 2ξ y centrado en la posición nominal de cada pata i :

$$|\mathbf{R}_b[\mathbf{p}_i(t) - \mathbf{t}_b^T(t)] - \mathbf{p}_{ni}| < \xi_i \quad (9)$$

donde \mathbf{p}_{ni} es la posición nominal del efector final de cada pata, y \mathbf{R}_b representa la pose de la base del robot múltipodo respecto al sistema de referencia inercial (matriz de rotación). Una vez el rango de movimientos está garantizado, se ha de considerar también las restricciones dinámicas para obtener movimientos realistas. Para ello, se incluye la Ecuación 2 como una restricción del sistema.

Adicionalmente se han de incluir restricciones en la fase de contacto, $t \in \mathcal{C}_i$, que garanticen que se ha completado el anclaje. Estas restricciones deberían aplicarse durante toda la duración de la fase de contacto, $\Delta T_{ci,j}$. El conjunto de posiciones de anclaje viene definido por el vector φ , por lo que se tiene $\mathbf{p}_{ic}(t \in \mathcal{C}_i) \in \varphi$ en una fase de contacto. Además, la coordenada z de ese punto de contacto debería de estar contenida en el mapa 3D, $m(x, y)$, obtenido por la cámara que porta el robot, es decir, $p_{ic}^z(t \in \mathcal{C}_i) = m(p_i^x, p_i^y)$. Este mapa 3D aporta información de la profundidad, o componente z , de las coordenadas de la superficie x, y respecto al sistema de coordenadas B del cuerpo del robot. A su vez, el efector final de la pata no debería de resbalar durante la fase de contacto por lo que se incluye la siguiente restricción, $\dot{\mathbf{p}}_i(t \in \mathcal{C}_i) = \mathbf{0}$, para garantizar que se mantiene la posición de contacto $\mathbf{p}_i(t \in \mathcal{C}_i) = \mathbf{p}_{ic}$.

Ninguna fuerza de contacto debería generarse cuando $t \notin \mathcal{C}_i$, por ejemplo cuando la pata no está en fase de docking. Debido a ello, en esas fases se ha incluido la siguiente restricción: $\mathbf{f}_i(t \notin \mathcal{C}_i) = \mathbf{0}$. Otras restricciones adicionales se han incorporado para generar movimientos en el robot más realistas, que vienen recogidas en la Tabla 1.

Finalmente, para minimizar las fuerzas de contacto durante la tarea, la siguiente función de coste se minimiza durante la optimización:

$$\int_0^T \sum_1^{\zeta} [\sigma_{i1}(f_i^x(t))^2 + \sigma_{i2}(f_i^y(t))^2 + \sigma_{i3}(f_i^z(t))^2] dt \quad (10)$$

donde $f_i^x(t)$, $f_i^y(t)$, y $f_i^z(t)$ son las fuerzas de interacción del efector final en las direcciones x , y , y z , y los pesos σ_i son valores constantes.

Tabla 1: Restricciones del sistema.

Restricción	Valor
Localización inicial	$\mathbf{t}_b^T(t=0) = \mathbf{t}_{b0}^T, \phi_b^T(t=0) = \phi_{b0}^T$
Localización final	$\mathbf{t}_b^T(t=T) = \mathbf{t}_{bd}^T, \phi_b^T(t=T) = \phi_{bd}^T$
Duración de la maniobra	$\sum_{j=1}^N \Delta T_{ci,j} + \Delta T_{nci,j} = T$
Dinámica, Cinemática	Ecuaciones (2) y (9)
Cuando $t \in \mathcal{C}_i$	
Efector final no se resbala	$\dot{\mathbf{p}}_i(t \in \mathcal{C}_i) = \mathbf{0}$
Efector final acoplado	$\mathbf{p}_i(t \in \mathcal{C}_i) = \mathbf{p}_{ic}$
Cuando $t \notin \mathcal{C}_i$	
Sin fuerzas de interacción	$\mathbf{f}_i(t \notin \mathcal{C}_i) = \mathbf{0}$

4. Control de trayectorias

La sección anterior ha descrito la aproximación utilizada para la planificación de movimientos del cuerpo y los efectores finales del robot. El método de optimización de trayectorias propuesto genera una trayectoria para cada uno de los efectores finales, $\mathbf{p}_{di}(t)$, y para el cuerpo del robot. Esta última trayectoria está compuesta por una trayectoria lineal del cuerpo, $\mathbf{t}_{bd}(t)$, y su orientación, $\phi_{di}(t)$. Sin embargo, el robot no puede reproducir estas trayectorias en bucle abierto ya que es necesario considerar el estado real del robot y las dinámicas y perturbaciones de libre flotación. Para ello, en este artículo se propone utilizar el controlador dinámico óptimo definido en (Ramón et al., 2022). Este controlador permite generar los pares a aplicar en las articulaciones del robot con el objetivo de seguir las trayectorias definidas por el método de planificación propuesto. Este controlador optimiza la energía necesaria para el seguimiento de las trayectorias a la vez que garantiza el correcto seguimiento de las trayectorias ante perturbaciones y errores de modelado.

5. Resultados

Esta sección describe los resultados de simulación obtenidos para mostrar el comportamiento del método de optimización de trayectorias propuesto para la generación de movimiento del múltipodo en tareas de servicio en órbita. Se considera la configuración de servicio en órbita que se muestra en la Figura 2, y en la Tabla 2 y la Tabla 3 describen las principales propiedades dinámicas y cinemáticas del robot consideradas en las simulaciones. Este robot tiene un total de 4 patas con 6 grados de libertad cada una. Cada pata tiene un sistema de docking en sus efectores finales. El objetivo principal de la aproximación de optimización de trayectorias propuesto es determinar las trayectorias y las fuerzas de interacción de los efectores finales del robot así como la trayectoria del centro de masas del cuerpo. Para generar el movimiento el robot hará uso de dispositivos de docking ubicados a lo largo de la superficie del satélite objetivo. En la posición inicial del robot se supone que al menos una de las patas del robot se encuentra en contacto con la superficie objetivo, por lo que no es necesario un sistema de impulsión adicional para realizar el acercamiento.

5.1. Optimización de trayectorias

En este experimento, el cuerpo del robot debe realizar un desplazamiento de 2.1 m a lo largo de la dirección x (ver Figura 2, en la que se ha representado con una flecha la dirección de

Tabla 2: Principales parámetros dinámicos del cuerpo del robot.

Parámetros del cuerpo	Masa (kg)	Altura (m)	Inercia (kg·m ²)					
			Ixx	Iyy	Izz	Ixy	Ixz	Iyz
	40	0.843	18.6	15.4	4.1	-0.008	-0.027	0.058

Tabla 3: Principales parámetros dinámicos de las patas del robot.

Eslabón	Masa (kg)	Altura (m)	Inercia (kg·m ²)					
			Ixx	Iyy	Izz	Ixy	Ixz	Iyz
Eslabón 1	5.369	0.18	0.0341	0.0353	0.0216	0	-0.0043	-0.0001
Eslabón 2	10	0.61	0.0281	0.7707	0.7694	0.0001	-0.0156	0
Eslabón 3	3.9	0.57	0.0101	0.3093	0.3065	0.0001	-0.0092	0
Eslabón 4	2.1	0.17	0.003	0.002	0.0026	0	0	-0.0002
Eslabón 5	1.5	0.12	0.003	0.002	0.0026	0	0	-0.0002
Eslabón 6	0.6	0.11	0	0.0004	0.0003	0	0	0

movimiento). La orientación y el desplazamiento en las otras direcciones deben permanecer constantes. Además, la disposición de los sistemas de docking en la superficie del satélite objetivo representan una restricción para las posiciones de anclaje. Estas posiciones de acoplamiento o docking están ubicadas en las esquinas de una rejilla en la que cada lado mide 0.5 m (como se muestra en la Figura 2). Por lo tanto, los puntos de contacto generados por el método de optimización de trayectorias incluyen la restricción, $p_{ic}(t \in \mathcal{C}_i) \in \varphi$, donde φ es el conjunto de posiciones de docking factibles.

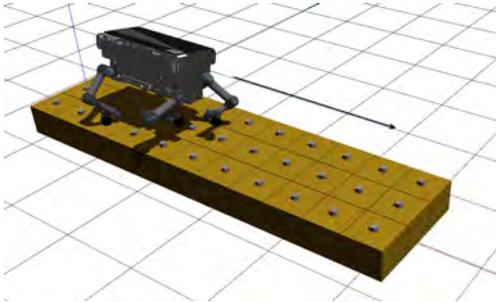


Figura 2: Configuración empleada en la simulación.

La Figura 3 muestra la planificación obtenida para la trayectoria del cuerpo del robot múltipodo durante la maniobra generada por el método de optimización trayectorias. La componente x, y, z están coloreados en azul, rojo y naranja respectivamente en todas las figuras. Como se puede observar en la Figura 3, se logra el desplazamiento de 2.1 m para el cuerpo del robot en la dirección x (el desplazamiento en las direcciones y, z permanecen constantes). Además, como también se muestra en la Figura 3, la orientación del cuerpo del robot a lo largo de la trayectoria sufre muy leves variaciones, siendo la orientación final la misma que la inicial. La Figura 4 muestra las trayectorias de los efectores finales del robot y las fuerzas de interacción necesarias para guiar el robot hacia la posición objetivo. Las trayectorias del efector final y los puntos de contacto están limitados por el conjunto φ , por lo tanto, solo se permite un número limitado de puntos de anclaje. Se utilizan varios de los dispositivos de acoplamiento disponibles y se coordinan las trayectorias y fuerzas de contacto para lograr el guiado del robot. En la Figura 4 también se representan las fuerzas de interacción

obtenidas durante el proceso de docking. Estas fuerzas permiten no solo realizar el proceso de docking, sino también aplicar el impulso necesario con cada pata para guiar al robot.

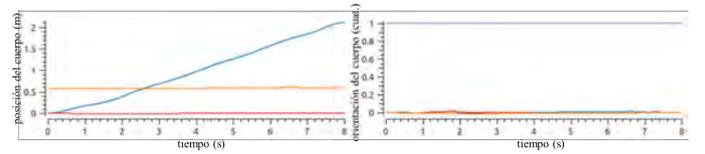


Figura 3: Posición y pose 3D del cuerpo del robot en cuaterniones (con restricciones del efector final).

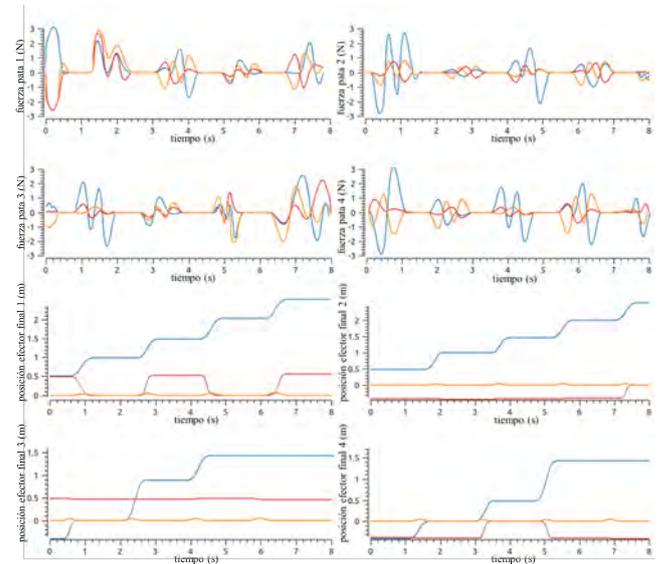


Figura 4: Fuerzas de los efectores finales de las patas, y posición 3D de los efectores finales de las patas (con restricciones del efector final).

6. Conclusiones

En este artículo se ha descrito una estrategia de optimización de trayectorias para la planificación del movimiento de un robot múltipodo en órbita. El algoritmo de planificación propuesto genera tanto las trayectorias como las fuerzas de interacción que los efectores finales deben ejercer para conseguir guiar

el cuerpo del robot hasta alcanzar una determinada ubicación. Para ello, el robot presenta en los extremos de sus patas un dispositivo de docking que les permite anclarse al satélite objetivo. La aproximación descrita considera que se utiliza una cámara 3D para obtener un mapa de profundidades del satélite objetivo del cual se extraen las ubicaciones de los dispositivos de docking. En las simulaciones realizadas se ha comprobado que la aproximación propuesta es capaz de generar correctamente tanto las fuerzas de interacción como los movimientos de todos los grados de libertad de las patas del robot, así como la trayectoria de su cuerpo. Como ejemplo, en el apartado de resultados se han dispuesto dispositivos de docking en la superficie de un satélite objetivo en los extremos de una rejilla con una separación de 0.5 m entre ellos. El algoritmo es capaz de seleccionar no solo los anclajes a utilizar, sino también el tiempo de acoplamiento y las fuerzas necesarias para impulsar al robot hasta la posición deseada a alcanzar. Actualmente se está extendiendo el método propuesto para permitir que el robot sea guiado no solo utilizando los brazos, sino también impulsores ubicados en el cuerpo de robot. Esto permitirá aumentar la autonomía del robot y que sea capaz de realizar tareas de aproximación sin la necesidad de partir de una posición inicial en la que alguna pata del robot ya se encuentre en contacto con la superficie del satélite objetivo.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado gracias al proyecto CIAICO/2022/077 “Plataforma de control y simulación de código abierto para escenarios de robótica de servicio en órbita” (Programa AICO 2023, Conselleria de Innovación, Universidades, Ciencia y Sociedad Digital de la Generalitat Valenciana).

Referencias

- Aghili, F., 12 2019. Optimal trajectories and robot control for detumbling a non-cooperative satellite. *Journal of Guidance Control and Dynamics*. DOI: 10.2514/1.G004758
- Albee, K., Ekal, M., Coltin, B., Ventura, R., Linares, R., Miller, D. W., 2022. The rattle motion planning algorithm for robust online parametric model improvement with on-orbit validation. *IEEE Robotics and Automation Letters* 7 (4), 10946–10953. DOI: 10.1109/LRA.2022.3196957
- Basmadji, F., Seweryn, K., Sasiadek, J., 09 2020. Space robot motion planning in the presence of nonconserved linear and angular momenta. *Multibody System Dynamics* 50. DOI: 10.1007/s11044-020-09753-x
- Felicetti, L., Pomares, J., 2020. Image-based visual servoing control for spacecraft formation flying. In: 2020 IEEE Aerospace Conference. pp. 1–10. DOI: 10.1109/AERO47225.2020.9172494
- L. Ramón, J., Calvo, R., Trujillo, A., Pomares, J., Felicetti, L., 2022. Trajectory optimization and control of a free-floating two-arm humanoid robot. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics* 45 (9), 1661–1675. DOI: 10.2514/1.G006828
- Mishra, H., De Stefano, M., Ott, C., 2022. Dynamics and control of a reconfigurable multi-arm robot for in-orbit assembly.
- Misra, G., Bai, X., 08 2017. Task-constrained trajectory planning of free-floating space-robotic systems using convex optimization. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics* 40, 1–14. DOI: 10.2514/1.G002405
- Mote, M., Egerstedt, M., Feron, E., Bylard, A., Pavone, M., 03 2020. Collision-inclusive trajectory optimization for free-flying spacecraft. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics* 43, 1–12. DOI: 10.2514/1.G004788
- Pinard, D., Reynaud, S., Delpy, P., Strandmoe, S. E., 2007. Accurate and autonomous navigation for the atv. *Aerospace Science and Technology* 11 (6), 490–498. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ast.2007.02.009>
- Ramón, J. L., Pomares, J., Felicetti, L., 2022. Direct visual servoing and interaction control for a two-arms on-orbit servicing spacecraft. *Acta Astronautica* 192, 368–378. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2021.12.045>
- Ramón, J. L., Pomares, J., Felicetti, L., 2023. Task space control for on-orbit space robotics using a new ros-based framework. *Simulation Modelling Practice and Theory* 127, 102790. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2023.102790>
- Shoemaker, M., Vavrina, M., Gaylor, D., Mcintosh, R., Volle, M., Jacobsohn, J., 08 2020. Osam-1 decommissioning orbit design.
- Sullivan, B. R., Parrish, J., Roesler, G., 2018. Upgrading in-service spacecraft with on-orbit attachable capabilities. In: 2018 AIAA SPACE and Astronautics Forum and Exposition. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Reston, Virginia.
- Thangavelautham, J., Chandra, A., Jensen, E., 2020. Autonomous robot teams for lunar mining base construction and operation. In: 2020 IEEE Aerospace Conference. pp. 1–16. DOI: 10.1109/AERO47225.2020.9172811



Simposio de Robótica, Bioingeniería y Visión por Computador 2024



Sesión: Robótica

Optimización de la teleoperación del robot Kinova Gen3 mediante realidad mixta

García-Gómez, M.^{a,*}, Duque-Domingo, J.^a, Gómez-García-Bermejo, J.^a, Zalama, E.^a

^aDepartamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, ITAP, Universidad de Valladolid, C/ Dr Mergelina s/n, 47011 Valladolid, España

Resumen

El presente artículo aborda la optimización de la teleoperación del robot colaborativo Kinova Gen3 a través del uso de realidad mixta. El objetivo principal es lograr que el robot imite de manera fluida los movimientos humanos durante la teleoperación, buscando alcanzar un nivel de dinamismo comparable al de un ser humano. La investigación se centra en la integración de la realidad mixta para mejorar la interacción y control del robot, buscando así una experiencia de teleoperación más natural y eficiente, por medio de la cinemática diferencial. El sistema está diseñado para su utilización por parte de cuidadores responsables de personas que necesitan asistencia, abarcando desde profesionales de la salud hasta familiares. Teniendo en cuenta que el nivel de experiencia en robótica de los cuidadores puede ser poca, se priorizan mecanismos de control intuitivos. La integración de la realidad mixta mejora la experiencia de control del robot al mapear los movimientos del robot con los del brazo del usuario dentro de un entorno virtual, con lo que se consigue un manejo del robot de manera instintiva.

Palabras clave: Robot manipulador, Teleoperación, Realidad mixta, Cinemática diferencial, Telerrobótica, Tecnología robótica

Optimizing the teleoperation of the Kinova Gen3 Robot through mixed reality

Abstract

This paper deals with the optimisation of teleoperation for the Kinova Gen3 collaborative robot through the use of mixed reality. The primary goal is to enable the robot to fluidly replicate human movements during teleoperation, aiming to achieve a level of dynamism comparable to that of a human being. The research focuses on the integration of mixed reality to improve the interaction and control of the robot, seeking a more natural and efficient teleoperation experience that can be used by anyone. The system is designed to be used by responsible caregivers of people in need of assistance, ranging from healthcare professionals to family members. Because caregivers may have limited experience with robotics, emphasis is placed on intuitive control mechanisms. The integration of mixed reality enhances the robot control experience by mapping the robot's movements to those of the user's arm within a virtual environment, resulting in instinctive operation of the robot.

Keywords: Robots manipulators, Teleoperation, Mixed reality, Differential kinematics, Telerobotics, Robotics technology

1. Introducción

La teleoperación de robots es un campo de investigación y desarrollo fundamental en el campo de la robótica actual. Esta desempeña un papel esencial en diversos ámbitos y se realiza mediante una estación de teleoperación, desde donde se emiten las órdenes, y un robot, que las ejecuta. En entornos peligrosos como las instalaciones nucleares, la exploración de las profundidades marinas o de zonas de difícil acceso, los robots teleoperados permiten a los humanos realizar tareas sin arriesgar sus vidas (Szczyrek et al., 2022), (Xia et al., 2023). Estos robots pueden navegar por terrenos comprometidos, manipular

materiales peligrosos y realizar inspecciones o reparaciones en entornos en los que la presencia humana sería poco práctica o arriesgada. También tiene aplicaciones médicas, como en la cirugía robótica, donde los cirujanos pueden realizar procedimientos quirúrgicos precisos con la ayuda de brazos robóticos controlados remotamente (Richter et al., 2019). Además, la teleoperación es capaz de mejorar la accesibilidad de las personas con discapacidad, ya que controlando dispositivos robóticos mediante interfaces adaptadas a sus necesidades específicas, pueden realizar tareas y participar en actividades que de otro modo les resultarían difíciles o imposibles (Chen et al., 2013). Asimismo, la teleoperación permite que los operadores

*Autor para correspondencia: miguel.garcia.gomez@uva.es
Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)

tomen decisiones rápidas y adapten el comportamiento del robot según sea necesario. En situaciones impredecibles, la supervisión y el control humano son esenciales para tomar decisiones informadas y ajustar la operación del robot en tiempo real.

Esta investigación se centra en la teleoperación de un brazo robótico por medio de la imitación del movimiento que una persona ejerce con su brazo. Gracias a la tecnología de las gafas de realidad virtual *Oculus Quest 2* y a sus mandos, se ha conseguido que el robot se mueva en consonancia al movimiento que un usuario ejerce con la mano.

La realidad virtual permite crear entornos tridimensionales inmersivos mediante simulaciones generadas por ordenador, ofreciendo la posibilidad de integrar elementos del mundo real en espacios virtuales (Zheng et al., 1998). Los recientes avances en los dispositivos de realidad virtual facilitan el trabajo a distancia con una mayor inmersión, permitiendo el desarrollo de entornos virtuales muy parecidos a la realidad. Por lo general, en los sistemas de teleoperación convencionales, los usuarios tienen una percepción de la realidad mediante cámaras 2D. Sin embargo, en un entorno virtual, el usuario puede obtener información sobre el espacio utilizando el procesamiento de una nube de puntos generada por una cámara 3D. En nuestro sistema se busca combinar elementos de realidad virtual con elementos del mundo real en una experiencia de realidad mixta (Speicher et al., 2019). Esta configuración permitiría al usuario ver el mundo real desde dentro de un entorno virtual, lo que podría ofrecer una experiencia más inmersiva.

No obstante, el empleo de la realidad virtual también puede desencadenar efectos adversos como mareos, ansiedad y náuseas, conocidos en conjunto como *mal de realidad virtual* (del inglés *Virtual Reality Sickness*). Las investigaciones sugieren que un factor determinante para este malestar es el flujo óptico, lo que resalta la importancia de mantener una alta frecuencia de imágenes por segundo (Wang et al., 2023), (Chang et al., 2020). Asimismo, se han identificado discrepancias sensoriales y de integración espacial como elementos clave que contribuyen a esta condición, donde el movimiento visual no coincide con el movimiento físico real del individuo (Cuevas and Aguayo, 2013). Esta situación, conocida como cinetosis o *motion sickness*, promueve el desarrollo de aplicaciones destinadas a mitigar tales efectos adversos.

El objeto de la investigación es conseguir que el robot imite de manera fluida los movimientos del usuario que está teleoperando. Esta manera de teleoperar es intuitiva y fácil de utilizar, siempre que el movimiento sea natural. Es por ello que tiene bastantes utilidades, como puede ser llevar a cabo demostraciones de trayectorias para realizar aprendizajes, como realizan (Zhang et al., 2018) o (Jang et al., 2022).

Nuestro propósito es que personas en situación de dependencia, que cuenten con un robot colaborativo en su hogar, puedan ser asistidas por un cuidador, que podría ser un familiar, que lo controle de manera remota sin necesidad de estar presente físicamente en la casa del usuario. Esto permite al cuidador realizar diversas tareas domésticas y atender al paciente sin la necesidad de desplazarse. Por esta razón, la teleoperación debe ser intuitiva, ya que se parte del supuesto de que el cuidador no posee conocimientos en robótica.

Una de las ventajas de los robots colaborativos es su capacidad para compartir espacios de forma segura con los seres

humanos. Debido a sus limitaciones de velocidad y fuerza, en caso de contacto, el robot no representa ningún riesgo de daño para las personas. Esta característica los convierte en un valioso apoyo en diversas tareas domésticas, como asistir en la alimentación de una persona o acercar objetos.

Este artículo aborda la explicación de los componentes empleados en este proyecto y del software realizado para lograr la teleoperación del robot mediante un entorno de realidad mixta. También se detalla el proceso de comunicación entre las gafas de realidad virtual y el robot. Además, se evalúa el uso de la cinemática diferencial como técnica de teleoperación, junto con la utilización de filtros de suavizado para generar un movimiento fluido.

2. Estado de Trabajos Relacionados

Diversos estudios han explorado el uso de la realidad mixta en la teleoperación robótica, centrándose en mejorar la experiencia y el rendimiento del usuario. Whitney et al. (2018) desarrollaron ROS Reality, un paquete de teleoperación de realidad virtual, que permite una integración fluida en los marcos del sistema operativo para robots ROS. Este paquete posibilita la teleoperación a través de Internet entre cualquier robot compatible con ROS y cascos de realidad virtual compatibles con Unity. Hirschmanner et al. (2019) presentaron un sistema de teleoperación de realidad virtual para robots humanoides que imita la postura de la parte superior del cuerpo del usuario, demostrando su naturaleza intuitiva y sus ventajas de rendimiento. En su estudio, Su et al. (2022a,b) examinan el efecto de la percepción de profundidad y la inmersión, facilitadas por la integración de visiones 3D/2D y el mapeado de movimiento, en la eficiencia de la teleoperación y la experiencia del usuario en entornos de realidad mixta. Además, proponen un sistema de teleoperación centrado en la velocidad, implementado a través del subespacio de realidad mixta, que permite un seguimiento preciso de los movimientos de la mano del operador para controlar el movimiento del robot. Este sistema también posibilita el control espacial basado en la velocidad del punto central de la herramienta (TCP) del robot. Welle et al. (2024) publican Quest2ROS, una aplicación para Oculus Quest 2 y 3. Su propósito es simplificar la teleoperación de robots a través de ROS. Esta aplicación publica la posición y velocidad del controlador de mano, registra las pulsaciones de botones y permite la retroalimentación háptica mediante la vibración del controlador.

3. Descripción del sistema

El sistema propuesto en el presente artículo, utiliza el equipo de realidad virtual *Oculus Quest 2* como estación de teleoperación, es decir, será el encargado de realizar peticiones de movimiento. Por otra parte, se ha escogido el brazo robótico colaborativo *Kinova Gen 3* como robot manipulador, debido a su poco peso y su controladora incorporada directamente en el brazo. Estas características hacen que sea un robot fácil de montar en cualquier sitio. La disposición del robot se puede observar en la Figura 1

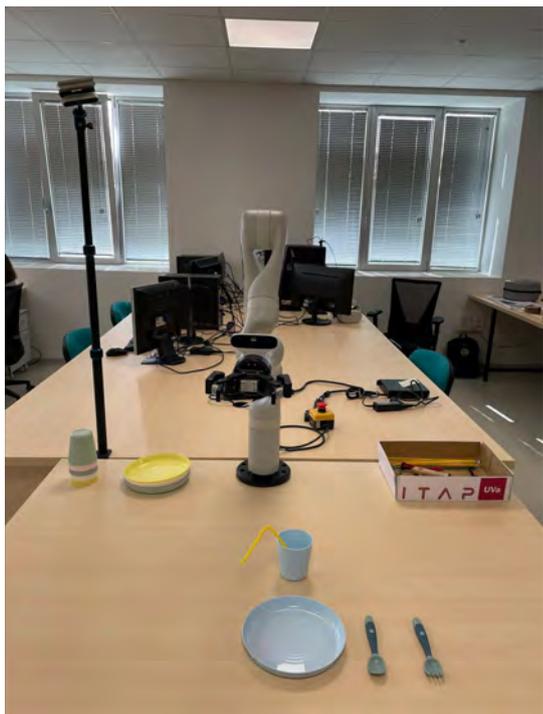


Figura 1: Configuración del sistema real.

El equipo de Kinova proporciona el software *Kinova Kortex API* (Kinova, 2023), que permite realizar el control del robot mediante lenguaje Python o C++. A partir de una aplicación en Unity que genere el entorno con el robot virtual y que permita la utilización del equipo de realidad virtual, se enviarán peticiones de movimiento a la API de Kinova. La aplicación de Unity se cargará en las gafas Oculus, las cuales son capaces de localizar los mandos y mapear su posición en función de la posición de estas. Esta aplicación se encargará de enviar los requerimientos del usuario a un programa escrito en Python, que, por medio de la API, se encargará del movimiento del robot. Además, esta aplicación tendrá que realimentar visualmente al usuario con el movimiento realizado por el robot real, por lo que estará a la escucha del valor de las articulaciones del robot para que el robot virtual las imite en cada instante. A parte, se implementará una cámara que muestre la situación del robot real, para tener consciencia del mundo exterior. El esquema de conexiones del sistema se puede observar en la Figura 2. El envío y recibo de datos entre la aplicación en Python y la aplicación en Unity (escrita en C#) se ha realizado vía sockets.

3.1. Entorno virtual

En el entorno virtual generado en Unity, se ha creado un gemelo digital del robot a partir de su URDF. Este robot replica cualquier movimiento que haga el robot real, puesto que está a la escucha de los valores de las articulaciones del robot en cada instante. El programa de Python, con la ayuda de la API de Kinova, obtiene las posiciones de las articulaciones del robot real y se encarga de enviarlas a Unity. El robot de Unity se mueve en consonancia a los cambios en el valor de las articulaciones. Se ha conseguido que este movimiento sea acorde al robot real, con una frecuencia de envío de datos de 10 Hz. Esta escena se compone también por una pantalla que permite ver el robot real

y su entorno, para poder ser consciente de lo que está pasando fuera del mundo virtual. La escena se puede ver en la Figura 3

El desplazamiento a través de una escena en un entorno virtual puede lograrse mediante teletransportación o movimiento continuo. La principal diferencia radica en que la teletransportación permite saltos instantáneos de un lugar a otro dentro de la escena, mientras que el movimiento continuo permite al usuario “caminar” por la escena utilizando el joystick de los controladores. Para mitigar los efectos de la cinetosis, se ha implementado un sistema de teletransportación. El movimiento continuo tiende a causar más cinetosis debido a que la sensación de movimiento percibida por los ojos es diferente al movimiento real del cuerpo del usuario.

El sistema de seguimiento de Oculus permite obtener, entre otros parámetros, la posición y velocidades lineales y angulares de los mandos. Estos datos serán monitorizados y enviados al robot, que calculará la cinemática inversa para imitarlos. En nuestro sistema, se monitorizarán las velocidades lineales y angulares de los mandos y se transmitirán al robot. El efector final del robot deberá seguir estas velocidades para replicar el movimiento realizado. Utilizando la cinemática diferencial, el robot calculará las velocidades articulares necesarias para alcanzar la velocidad demandada del efector final.

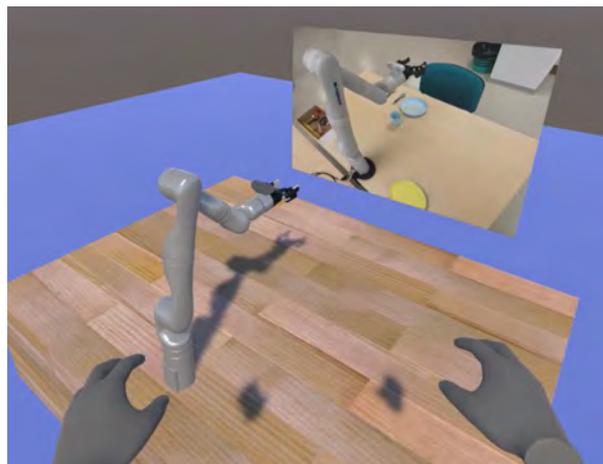


Figura 3: Vista del usuario en el entorno virtual.

Para evitar que se hagan movimientos indeseados, los datos se transmitirán sólo cuando el usuario esté pulsando uno de los botones del mando. Una ventaja de este método es que, una vez que la mano del usuario alcanza una restricción física, puede soltar el botón del controlador. Esto detiene la transmisión de órdenes al robot, permitiendo al usuario volver a la posición inicial. Posteriormente, puede continuar guiando el brazo robótico hacia las posiciones deseadas. Este enfoque supera las limitaciones causadas por la discrepancia entre el rango espacial de los movimientos del robot y el rango de movimiento del brazo del usuario.

3.2. Comunicación entre el usuario y el robot

Cuando el usuario interactúa con el mando de las Oculus, específicamente al pulsar el botón lateral del mando (botón grip), se capturan los datos relacionados con las velocidades de movimiento del propio mando. Estos datos se organizan en una matriz que luego se transmite utilizando sockets, un mecanismo

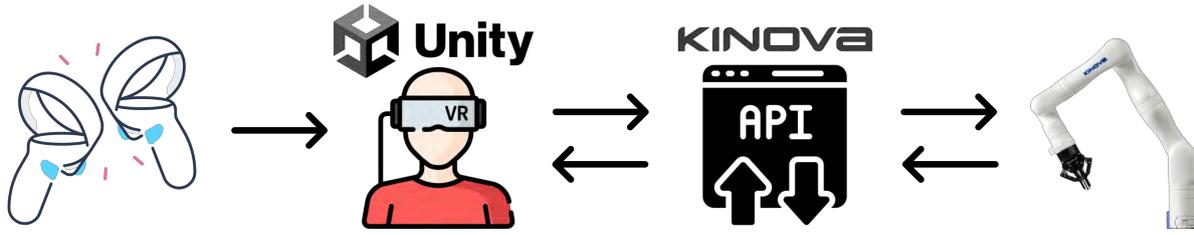


Figura 2: Esquema del sistema. Las gafas se encargan de realizar el seguimiento de los mandos. La aplicación de Unity manda los comandos de movimiento a la API, encargada de mandarlos al robot. La API recibe el valor de la posición de las articulaciones y se las envía a las gafas para que actualice el estado del robot virtual.

de comunicación que permite la transferencia de información entre distintos procesos o dispositivos dentro de una red.

Del lado del servidor, se encuentra un script implementado en Python que actúa como receptor de estos datos. Una vez recibida la matriz con las velocidades del mando, este script se encarga de procesar la información y la canaliza hacia la API de Kinova. Al recibir los datos provenientes del script de Python, la API de Kinova ejecuta los cálculos necesarios para determinar los movimientos requeridos que permitirán al robot realizar las acciones deseadas en función de las instrucciones recibidas.

Por otro lado, pulsar el botón trasero del mando (botón trigger) indica al sistema el deseo de cerrar la pinza del robot. Cuando el usuario presiona el botón trigger en el mando de las Oculus, se envía un bit desde Unity a través de la comunicación por sockets. Este bit actúa como una señal que indica al sistema la intención de cerrar la pinza del robot. Sin embargo, antes de proceder con esta acción, se verifica si el botón grip está siendo presionado. Esta verificación se realiza para evitar conflictos o acciones no deseadas que pudieran ocurrir si se intenta cerrar la pinza mientras el robot está en movimiento.

4. Estrategia de control

4.1. Control del movimiento del brazo

El sistema se ha pensado para que el robot reciba las velocidades lineales en el sistema de referencia de la base, y las velocidades angulares en el sistema de referencia del efector final. Una vez recibidas, deberá calcular las velocidades articulares necesarias $[\dot{q}]$ para que el efector final obtenga las velocidades lineales y angulares determinadas $[\dot{X}]$. El Jacobiano analítico $[J(q)]$ establece la relación entre estas velocidades (Murray et al., 2017), ver en la Ecuación 1. Esta relación se denomina cinemática diferencial. La linealidad de este método es una ventaja que tiene con respecto a la cinemática directa/inversa que relaciona la posición un punto del robot con respecto a la posición de sus articulaciones. Gracias a esto se pueden usar métodos de álgebra lineal, simplificando el coste computacional y consiguiendo un tiempo de respuesta más rápido.

$$[\dot{X}] = [J(q)] \cdot [\dot{q}] \quad (1)$$

A partir del inverso del jacobiano $[J(q)]^{-1}$, se calculan los valores del vector de velocidades articulares $[\dot{q}]$, determinados por la velocidad deseada del efector final, como se puede observar en la Ecuación 2

$$[\dot{q}] = [J(q)]^{-1} \cdot [\dot{X}] \quad (2)$$

La API que ofrece Kinova permite realizar esta operación enviándole las velocidades lineales y angulares requeridas del efector final. Calcula las velocidades articulares y las envía al robot para que las reproduzca. Es por esto por lo que no se va a entrar en la explicación del cálculo del Jacobiano. Además, permite establecer un sistema de referencia mixto, en el cual el sistema de referencia de translación es la base del robot y el sistema de referencia de orientación es el efector final.

Una vez que se implementó el sistema, se procedió a realizar pruebas con el robot. Aunque el robot lograba replicar perfectamente las velocidades lineales, se observó un mayor nivel de ruido en las velocidades angulares. Esto significaba que incluso cuando el usuario mantenía la mano casi inmóvil, el robot realizaba pequeños movimientos no deseados. Esta situación dificultaba la teleoperación, especialmente para aquellos que no estaban familiarizados con el proceso, ya que manipular objetos que requieran cierto grado de precisión se volvía bastante complicado.

Para abordar este problema, se tomó la decisión de aplicar técnicas de suavizado exponencial (Gardner Jr, 2006) a las velocidades angulares. Las técnicas de suavizado exponencial utilizan medias ponderadas de observaciones pasadas para prever nuevos valores. El objetivo es dar más importancia a los valores recientes de la serie. Así, a medida que las observaciones se hacen más antiguas en el tiempo, la importancia de estos valores se reduce exponencialmente. Esto acondiciona las velocidades antes de enviarlas al robot, con el objetivo de reducir el nivel de ruido y facilitar el control del robot.

4.1.1. Suavizado exponencial simple

El método más sencillo de suavizado exponencial se denomina suavizado exponencial simple. Esta técnica es adecuada para predecir datos que no tienen una tendencia clara o un patrón. También es conocida como promedio móvil ponderado exponencialmente (EWMA). La fórmula para calcular el valor suavizado de un conjunto de datos se define en la Ecuación 3

$$[\dot{\omega}]'_t = \alpha \cdot [\dot{\omega}]_t + (1 - \alpha)[\dot{\omega}]'_{t-1} \quad (3)$$

donde:

- $[\dot{\omega}]'_t$ son los valores de velocidad previstos en el tiempo t . Estos valores son los que se enviarán al robot para que calcule la cinemática.
- $[\dot{\omega}]_t$ son los valores de velocidad angular obtenidos del mando en el instante t .

- α es el factor de suavizado, que controla cuánto peso se les da a los datos más recientes. Está entre 0 y 1, donde valores más cercanos a 1 otorgan más peso a los datos más recientes, mientras que valores más cercanos a 0 asignan peso similar a todos los datos.

El suavizado exponencial simple es fácil de implementar y computacionalmente eficiente, lo que lo hace útil para pronósticos a corto plazo en series temporales que no tienen un patrón. Un valor de $\alpha = 0,5$ ha dado buenos resultados.

4.1.2. Suavizado exponencial doble

El método de Holt, también conocido como suavizado exponencial doble (Holt, 2004), se basa en dos componentes principales: el nivel $[\omega]_t'$ y la tendencia $[T]_t$. Además de estos, se introduce un parámetro de suavizado α para el nivel y otro para la tendencia β . Las ecuaciones en las que se basa el método se muestran en la Ecuación 4 y en la Ecuación 5.

La Ecuación 4 estima el valor de la velocidad en el instante t , combinando el valor de la velocidad angular obtenida de los mandos $[\omega]_t$ con una corrección basada en la estimación anterior de la velocidad y la tendencia.

La Ecuación 5 estima la tendencia en el tiempo t . Calcula la tasa de cambio de la serie temporal, ajustando la diferencia entre los niveles actuales y anteriores.

$$[\omega]_t' = \alpha \cdot [\omega]_t + (1 - \alpha) \cdot ([\omega]_{t-1}' + [T]_{t-1}) \quad (4)$$

$$[T]_t = \beta \cdot ([\omega]_t' - [\omega]_{t-1}') + (1 - \beta) \cdot [T]_{t-1} \quad (5)$$

donde:

- $[\omega]_t'$ son los valores de velocidad previstos en el tiempo t . Estos valores son los que se enviarán al robot para que calcule la cinemática.
- $[\omega]_t$ son los valores de velocidad angular obtenidos del mando en el instante t .
- α es el parámetro de suavizado para el nivel, y debe estar entre 0 y 1. Un α cercano a 1 da más peso a la observación más reciente, mientras que un valor cercano a 0 da un peso más uniforme a todas las observaciones pasadas.
- β es el parámetro de suavizado para la tendencia, y debe estar entre 0 y 1. Al igual que con α , un valor de β cercano a 1 da más peso a la tendencia más reciente, mientras que un valor cercano a 0 da un peso más uniforme a todas las tendencias pasadas.

Tras varios experimentos, se ha decidido utilizar unos valores de $\alpha = 0,9$ y $\beta = 0,9$, ya que se ha observado que daban un rendimiento óptimo.

Se han realizado pruebas con ambos métodos, y se ha optado por utilizar el suavizado exponencial simple, ya que ha dado mejores resultados en relación con la facilidad de movimiento. Los datos extraídos del mando no tienen un patrón de tendencia estable en el tiempo, ya que la tendencia cambia en función del movimiento que se quiera realizar. Debido a esto, el suavizado exponencial simple responde correctamente a lo deseado.

4.2. Control de la apertura de la pinza

La apertura de la pinza viene condicionada de su estado actual. Desde Unity, se enviará un bit al programa de Python cada vez que se requiera abrir o cerrar la pinza, por lo que antes se deberá comprobar en qué estado está. Para ello, al recibir el bit, el programa llamará a la API de Kinova para comprobar la situación de la pinza. Si la pinza está abierta, la cerrará y viceversa. Esta acción se podrá realizar sólo si el brazo está parado, es decir, cuando el usuario no pulse el botón para enviar comandos de movimiento. Se ha hecho de esta manera para que el usuario no tenga que estar pulsando varios botones a la vez, evitando que en medio del movimiento la pinza se abra.

5. Resultados

El sistema desarrollado ha sido sometido a pruebas ejecutando diversas tareas comunes que un cuidador podría realizar. Estas abarcan desde la simple acción de tomar un objeto y colocarlo en otro lugar, hasta actividades más complejas como verter agua en un vaso y darle de beber a una persona, tal como se muestra en la Figura 4. La estabilidad y la fluidez en los movimientos hacen que la teleoperación sea sumamente precisa. Esto permite que personas sin experiencia en robótica o realidad virtual puedan llevar a cabo tareas que, mediante métodos de teleoperación convencionales, serían complicadas y requerirían mucho tiempo.



Figura 4: Usuario realizando la tarea de recoger un vaso y moverlo para dar de beber a una persona.

6. Conclusiones

En esta investigación se ha propuesto optimizar la teleoperación del brazo robótico Kinova Gen3 mediante un entorno de realidad mixta. El principal objetivo ha sido crear un sistema

intuitivo de teleoperación del robot para que cualquier persona pueda utilizarlo. El paralelismo entre el brazo robótico y el brazo humano hace que la teleoperación por imitación del movimiento del brazo humano sea considerablemente instintiva.

La aplicación de la cinemática diferencial logra controlar la velocidad del efector final en tiempo real, en lugar de generar planes de trayectoria discretos, generando un movimiento continuo. Esta metodología garantiza un movimiento fluido y concorde al movimiento del brazo humano. El sistema propuesto ofrece un método más natural para interactuar con el robot remoto en comparación con los sistemas de teleoperación tradicionales, donde el robot se controla por medio del valor de sus articulaciones o por la posición del efector final (García-Gómez et al., 2023).

Se ha mejorado la precisión del movimiento con la aplicación del algoritmo de suavizado exponencial simple. Este ha sido más efectivo que el suavizado exponencial doble, debido a su mejor adaptabilidad a patrones cambiantes en los datos.

Las bases del sistema desarrollado pueden ser utilizadas para cualquier tipo de brazo robótico, lo que hace que este sistema sea muy interesante.

Se ha identificado un problema al utilizar una imagen en 2D como campo de visión, ya que no proporciona una sensación de profundidad adecuada. Por ello, una posible dirección para futuras investigaciones sería la incorporación de múltiples cámaras o la integración de datos de una cámara RGB-D para generar una representación tridimensional en la escena de Unity.

Se plantea también la tarea de entrenar al robot mediante técnicas de visión e inteligencia artificial (Duque Domingo et al., 2023), con el fin de capacitarlo para llevar a cabo tareas de forma autónoma. Esto incluye acciones como recoger objetos y ubicarlos en su lugar correspondiente, abrir puertas o armarios, o dar de comer a una persona entre otras. Con estos progresos, se pretende mejorar la calidad de vida de las personas dependientes y otorgarles más independencia en su día a día.

Agradecimientos

La investigación que se presenta en este trabajo ha recibido financiación del proyecto ROSOGAR PID2021-123020 OB-I00 financiado por MCI-N/AEI/10.13039/501100011033/FEDER, UE, y del proyecto EIAROB Financiado por Consejería de Familia of the Junta de Castilla y León - Next Generation EU.

Referencias

- Chang, E., Kim, H. T., Yoo, B., 2020. Virtual reality sickness: a review of causes and measurements. *International Journal of Human-Computer Interaction* 36 (17), 1658–1682.
- Chen, T. L., Ciocarlie, M., Cousins, S., Grice, P. M., Hawkins, K., Hsiao, K., Kemp, C. C., King, C.-H., Lazewatsky, D. A., Leeper, A. E., Nguyen, H., Paepcke, A., Pantofaru, C., Smart, W. D., Takayama, L., 2013. Robots for humanity: using assistive robotics to empower people with disabilities. *IEEE Robotics Automation Magazine* 20 (1), 30–39. DOI: 10.1109/MRA.2012.2229950
- Cuevas, B. G., Aguayo, L. V., 2013. Efectos secundarios tras el uso de realidad virtual inmersiva en un videojuego. *International Journal of Psychology and Psychological Therapy* 13 (2), 163–178.
- Duque Domingo, J., Gómez-García-Bermejo, J., Zalama-Casanova, E., March 2023. *Visión Artificial mediante Aprendizaje Automático con Tensorflow y Pytorch*, 1st Edition. RaMa.
- García-Gómez, M., Duque-Domingo, J., Gómez-García-Bermejo, J., Zalama, E., July 2023. Teleoperación de un robot colaborativo mediante realidad virtual. *Jornadas Nacionales de Robótica y Bioingeniería 2023: Libro de Actas*, 21-26, No publicado. DOI: 10.20868/UPM.book.74896
- Gardner Jr, E. S., 2006. Exponential smoothing: The state of the art—part ii. *International journal of forecasting* 22 (4), 637–666.
- Hirschmanner, M., Tsiourti, C., Patten, T., Vincze, M., 2019. Virtual reality teleoperation of a humanoid robot using markerless human upper body pose imitation. In: 2019 IEEE-RAS 19th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids). pp. 259–265. DOI: 10.1109/Humanoids43949.2019.9035064
- Holt, C. C., 2004. Forecasting seasonals and trends by exponentially weighted moving averages. *International journal of forecasting* 20 (1), 5–10.
- Jang, E., Irpan, A., Khansari, M., Kappler, D., Ebert, F., Lynch, C., Levine, S., Finn, C., 2022. Bc-z: Zero-shot task generalization with robotic imitation learning. In: *Conference on Robot Learning*. PMLR, pp. 991–1002.
- Kinova, 2023. Kinova Kortex API. <https://github.com/Kinovarobotics/kortex>, Último acceso: 18/03/2024.
- Murray, R. M., Li, Z., Sastry, S. S., 2017. *A mathematical introduction to robotic manipulation*. CRC press. DOI: 10.1201/9781315136370
- Richter, F., Zhang, Y., Zhi, Y., Orosco, R. K., Yip, M. C., 2019. Augmented reality predictive displays to help mitigate the effects of delayed telesurgery. In: 2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA). pp. 444–450. DOI: 10.1109/ICRA.2019.8794051
- Speicher, M., Hall, B. D., Nebeling, M., 2019. What is mixed reality? In: *Proceedings of the 2019 CHI conference on human factors in computing systems*. pp. 1–15.
- Su, Y., Chen, X., Zhou, T., Pretty, C., Chase, G., 2022a. Mixed reality-integrated 3d/2d vision mapping for intuitive teleoperation of mobile manipulator. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 77, 102332. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0736584522000217> DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2022.102332>
- Su, Y.-P., Chen, X.-Q., Zhou, T., Pretty, C., Chase, G., 2022b. Mixed-reality-enhanced human-robot interaction with an imitation-based mapping approach for intuitive teleoperation of a robotic arm-hand system. *Applied Sciences* 12 (9). URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/9/4740> DOI: 10.3390/app12094740
- Szczurek, K. A., Prades, R. M., Matheson, E., Rodriguez-Nogueira, J., Castro, M. D., 2022. Mixed reality human-robot interface with adaptive communications congestion control for the teleoperation of mobile redundant manipulators in hazardous environments. *IEEE Access* 10, 87182–87216. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3198984
- Wang, J., Shi, R., Zheng, W., Xie, W., Kao, D., Liang, H.-N., 2023. Effect of frame rate on user experience, performance, and simulator sickness in virtual reality. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 29 (5), 2478–2488. DOI: 10.1109/TVCG.2023.3247057
- Welle, M. C., Ingelhart, N., Lippi, M., Wozniak, M., Gasparri, A., Kragic, D., 2024. Quest2ros: An app to facilitate teleoperating robots. In: 7th International Workshop on Virtual, Augmented, and Mixed-Reality for Human-Robot Interactions.
- Whitney, D., Rosen, E., Ullman, D., Phillips, E., Tellex, S., 2018. Ros reality: A virtual reality framework using consumer-grade hardware for ros-enabled robots. In: 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). pp. 1–9. DOI: 10.1109/IR0S.2018.8593513
- Xia, P., Xu, F., Song, Z., Li, S., Du, J., 2023. Sensory augmentation for subsea robot teleoperation. *Computers in Industry* 145, 103836. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166361522002329> DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2022.103836>
- Zhang, T., McCarthy, Z., Jow, O., Lee, D., Chen, X., Goldberg, K., Abbeel, P., 2018. Deep imitation learning for complex manipulation tasks from virtual reality teleoperation. In: 2018 IEEE international conference on robotics and automation (ICRA). IEEE, pp. 5628–5635.
- Zheng, J., Chan, K., Gibson, I., 1998. Virtual reality. *IEEE Potentials* 17 (2), 20–23. DOI: 10.1109/45.666641



Simposio de Robótica, Bioingeniería y Visión por Computador 2024



Algoritmo de optimización híbrido para la distribución del empuje en propulsores de barcos autónomos

Castaño, A.R.^{a,*}, Acosta, J.Á.^a

^aDpto. de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad de Sevilla, Camino de los Descubrimientos s/n, 41092 Sevilla, España.

Resumen

Los algoritmos de posicionamiento dinámico (DP o *Dynamic Positioning* en su nomenclatura inglesa) permiten que un barco autónomo pueda ejecutar una determinada maniobra o trayectoria de forma muy precisa, rechazando perturbaciones, pero para ello es necesario que las fuerzas y pares generados por el algoritmo DP sean satisfechos por los actuadores del barco. Cuando el sistema de control del barco es sobreactuado, la distribución del empuje entre los diversos propulsores debe realizarse siguiendo criterios de optimización entre todas las posibles soluciones. En este artículo se propone un algoritmo de distribución de fuerzas entre los propulsores de un barco autónomo que permite compensar la diferente velocidad de respuesta en empuje y ángulo de propulsores azimutales u orientables. La novedad del algoritmo propuesto es que se realiza una descomposición en dos problemas de optimización cuadrática sujeto a restricciones convexas y se combinan de forma parcial las soluciones de ambos problemas. También se presentan los primeros resultados de validación del algoritmo, tanto de las soluciones que genera como de su tiempo de ejecución.

Palabras clave: Vehículos marinos no tripulados, Distribución del empuje, Optimización .

Hybrid optimization algorithm for thruster allocation of autonomous vessels

Abstract

Dynamic positioning (DP) algorithms allow an autonomous vessel to execute different maneuvers or trajectories very precisely, rejecting disturbances. This requires that the forces and torques calculated by the DP algorithm are allocated to the vessel's thrusters. When the ship's control system is overactuated, the allocation must be performed following some optimization criteria among all possible solutions. In this paper, a thruster allocation algorithm is proposed to compensate for the different thrust and angle transient response of azimuth thrusters. The novelty of the proposed algorithm is that a decomposition into two quadratic optimization problems subject to convex constraints is performed and the solutions of both problems are partially combined. Preliminary validation results and analysis of its execution time are also presented.

Keywords: Unmanned marine vehicles, Thruster allocation, Optimization.

1. Introducción

Existe un creciente interés en el desarrollo de barcos autónomos para muy diversas aplicaciones, principalmente en zonas marítimas Molina-Molina et al. (2021) pero también en aguas interiores Demetillo and Taboada (2019). Un ejemplo es el carguero autónomo para zonas costeras y aguas interiores desarrollado en el proyecto europeo AUTOSHIP (Molica (2024)). Con ellos se buscan objetivos como la reducción de contaminación Jovanović et al. (2022) y el aumento de la seguridad de Vos

et al. (2021).

Un requisito clave para que se extienda el uso de barcos autónomos es disponer de un sistema de control que permita navegar de manera muy precisa, imprescindible por ejemplo en maniobras de atraque o en la construcción de estructuras *offshore*. El sistema de posicionamiento dinámico (DP - *Dynamic Positioning* en la terminología inglesa) se encarga de calcular las fuerzas y pares necesarios para realizar los movimientos deseados rechazando las perturbaciones. Para este cálculo una gran variedad de técnicas de control se han propuesto. Desde méto-

*Autor para correspondencia: castano@us.es
Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)

dos no lineales basados en *backstepping* (Fossen and Grovlen (1998)) o control robusto (Du et al. (2016)) hasta aproximaciones más recientes con técnicas adaptativas empleando *Reinforcement Learning* (Shi et al. (2024)). Una vez el sistema DP calcula las fuerzas necesarias, esta demanda debe ser repartida entre los actuadores de que dispone el barco, mediante un algoritmo de distribución de propulsores (o *thrust allocation* en la terminología inglesa) Johansen and Fossen (2013). Para ello se han propuesto métodos diversos de optimización empleando, por ejemplo, programación cuadrática Witkowska and Śmierzchalski (2018), algoritmos genéticos Mou et al. (2024) o *particle swarm optimization* Xuebin (2020). Estos métodos, sin embargo, no tienen en consideración la diferente respuesta dinámica de los actuadores, en particular de los propulsores azimutales u orientables. Estos propulsores presentan una dinámica considerablemente más lenta ante un cambio de ángulo que ante una modificación de su empuje.

En este artículo se propone un nuevo método que permite resolver el problema de optimización, que es no lineal, mediante una descomposición en varios problemas lineales. Además se considera la diferente respuesta dinámica de los actuadores mediante la resolución del problema de optimización con propulsores azimutales fijos y variable, y seleccionado una combinación de ambos.

El resto del artículo está estructurado de la siguiente manera: la Sección 2 presenta la descripción detallada del problema, incluyendo el modelo de barco considerado; la Sección 3 detalla los modelos de actuadores y su representación matemática; la Sección 4 presenta el método propuesto y sus ventajas; la Sección 5 está dedicada a la implementación y la validación del algoritmo. Por último, la Sección 6 resume las conclusiones extraídas del trabajo y las propuestas de trabajos futuros.

2. Descripción del problema

2.1. Arquitectura de control

La arquitectura de control de un barco autónomo presenta, de forma general, cuatro módulos principales, como se muestra en la Figura 1: el observador, el controlador de barco, el distribuidor de empuje y el controlador de propulsores.



Figura 1: Arquitectura del sistema de control de un barco.

El observador se encarga de realizar una estimación del estado del vehículo, que de forma general incluye su posición, los ángulos de orientación, cabeceo y balanceo, así como sus respectivas velocidades. Una de las funciones principales del observador es eliminar las perturbaciones originadas por las olas.

El controlador del barco se encarga de calcular las fuerzas y pares necesarios para que se alcancen las referencias deseadas a partir del estado del barco proporcionado por el observador.

Una vez el controlador del barco determina las fuerzas y pares necesarios en su centro de masas para corregir su movimiento, el distribuidor de empuje se encarga de determinar la fuerza que debe producir cada uno de los propulsores del barco para que la fuerza requerida se alcance. Esto es especialmente relevante en barcos de tamaño medio y grande, que presentan una configuración sobreactuada para aumentar su maniobrabilidad.

Por último, el control de propulsores recibe las consignas deseadas para cada uno de los actuadores del barco y trata de que se alcancen. Estas consignas pueden ser empuje (o alternativamente revoluciones por minuto) en el caso de propulsores, ángulos en el caso de timones, o ambas en el caso de propulsores azimutales. Muy habitualmente se emplean controladores PID para esta función.

Este artículo está centrado en el módulo de distribución de propulsores.

2.2. Modelo del barco

La metodología propuesta se aplica al control de un barco en la superficie del agua (considerada como un plano), por lo que sólo se consideran 3 grados de libertad, la fuerza longitudinal (F_x), la fuerza transversal (F_y) y el par de giro (N). El sistema de referencia fijo solidario al barco se sitúa en su centro de masas, con el eje x orientado hacia la proa y el eje y orientado hacia estribor. En concreto se emplea el modelo de un barco de 80 metros de eslora y 15 metros de manga que cuenta con 2 propulsores azimutales en la popa y 1 propulsor transversal o de túnel en la proa (véase la distribución en la Figura 2). Los propulsores se hayan ubicados en las coordenadas indicadas en la Tabla 1 respecto al sistema de referencia del barco.

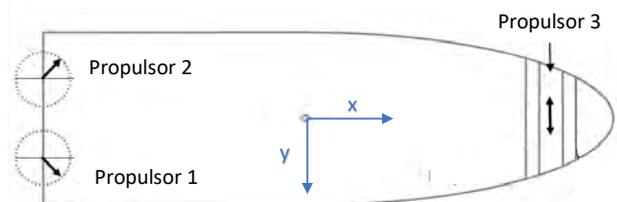


Figura 2: Sistema de referencia y situación de los propulsores en el barco.

Tabla 1: Coordenadas de los propulsores en el barco

	Propulsor 1	Propulsor 2	Propulsor 3
$l_x(m)$	-38	-38	30
$l_y(m)$	4	-4	0

3. Modelo de los actuadores

La fuerza ejercida por los propulsores $f = [f_1, \dots, f_n]^T$ se puede considerar lineal respecto a su entrada de control, y por tanto puede expresarse de la siguiente forma

$$f = Ku, \quad (1)$$

donde $u = [u_1, \dots, u_r]^T$ es el vector de señales de entrada de los actuadores (revoluciones por minuto en este caso) y K es la

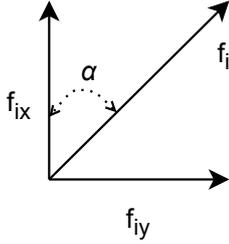


Figura 3: Generación de fuerzas de un propulsor azimutal.

En cuanto a la respuesta dinámica de los propulsores azimutales, la variación del empuje es considerablemente más rápida que la variación de su orientación, lo cual es un factor que puede resultar limitante al aplicar las fuerzas demandadas por el sistema de control.

Los propulsores tienen una saturación en su capacidad máxima de empuje (cuando las rpm son positivas), que en este caso es $f_{1max} = f_{2max} = 250kN$ y $f_{3max} = 225kN$, y también en su capacidad de empuje mínima (con rpm negativas), que en este caso es $f_{1min} = f_{2min} = -175kN$ y $f_{3min} = -150kN$. Además, los propulsores azimutales están limitados en su ángulo de giro ($\alpha_{min} \leq \alpha_i \leq \alpha_{max}$), $i = \{1, 2\}$, para evitar las perturbaciones por interferencia entre ellos, en particular se han empleado: $\alpha_{min} = -35^\circ$ y $\alpha_{max} = +35^\circ$.

3.1. Matriz de configuración de propulsores

La fuerza ejercida en el centro de masas del barco por cada propulsor depende de su tipología y de su ubicación, y puede expresarse de forma general como

$$\tau = T(\alpha)f, \quad (3)$$

donde τ es el vector de fuerzas y par en el centro de masas del barco, f es el vector de fuerzas de los propulsores, $\alpha = [\alpha_1, \dots, \alpha_p]^T \in R^p$ es el vector de ángulos de los propulsores azimutales y $T(\alpha) \in R^{n \times r}$ es la matriz de configuración de los propulsores, de un barco equipado con r actuadores para controlar n grados de libertad. La matriz de configuración de propulsores describe su tipología y localización.

Considerando los 3 grados de libertad y los 3 propulsores indicados anteriormente, las fuerzas y par ejercidos en el centro de masas pueden expresarse como

$$\tau = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ N \end{bmatrix} = T(\alpha_1, \alpha_2) \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

siendo T la siguiente matriz de configuración

$$T(\alpha_1, \alpha_2) = \begin{bmatrix} \cos(\alpha_1) & \cos(\alpha_2) & 0 \\ \sin(\alpha_1) & \sin(\alpha_2) & 1 \\ t_{31} & t_{32} & t_{33} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

donde se han definido los siguientes parámetros

$$t_{31}(\alpha_1) = l_{x1} \sin(\alpha_1) - l_{y1} \cos(\alpha_1), \quad (6)$$

$$t_{32}(\alpha_2) = l_{x2} \sin(\alpha_2) - l_{y2} \cos(\alpha_2), \quad (7)$$

$$t_{33} = l_{x3} \quad (8)$$

y los valores de l_{x1} , l_{y1} , l_{x2} , l_{y2} y l_{x3} están definidos en la Tabla 1.

3.2. Matriz de configuración extendida

La matriz de configuración (5) establece relaciones no lineales entre τ y f cuando los ángulos de los azimutales varían. Para evitar estas no linealidades, se puede utilizar una representación alternativa de la matriz de configuración, denominada matriz de configuración extendida. Esta técnica consiste en expresar la fuerza f_i de un propulsor azimutal en sus componentes f_{ix} y f_{iy} . De esta forma, la expresión (3), quedaría ahora expresada de la siguiente forma

$$\tau = T_e f_e, \quad (9)$$

o expresada en componentes de fuerzas como

$$\tau = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ N \end{bmatrix} = T_e \begin{bmatrix} f_{1x} \\ f_{1y} \\ f_{2x} \\ f_{2y} \\ f_3 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

y donde la matriz de configuración extendida queda

$$T_e = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ -l_{y1} & l_{x1} & -l_{y2} & l_{x2} & l_{x3} \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Las componentes del vector de fuerzas extendido f_e son:

$$f_{1x} = f_1 \cos(\alpha_1),$$

$$f_{1y} = f_1 \sin(\alpha_1),$$

$$f_{2x} = f_2 \cos(\alpha_2),$$

$$f_{2y} = f_2 \sin(\alpha_2).$$

En este caso, una vez se obtienen los valores de f_{ix} y f_{iy} , $i = \{1, 2\}$, se pueden calcular los valores de α_i y f_i mediante las expresiones siguientes

$$f_i = \sqrt{(f_{ix}^2 + f_{iy}^2)}, \quad (12)$$

$$\alpha_i = \arctan 2(f_{iy}, f_{ix}). \quad (13)$$

4. Método híbrido de optimización

La distribución de la fuerza y el par demandados entre los propulsores del barco presenta 2 inconvenientes principales. En primer lugar, si se tiene en cuenta el sistema completo, considerando la variación del ángulo de los propulsores azimutales, es necesario resolver un problema de optimización no lineal sujeto a restricciones, debido a los efectos del ángulo de los propulsores en la matriz de configuración T . El segundo inconveniente es que, incluso obteniendo una solución, ésta podría tener poca utilidad práctica real. Esto se debe a que los propulsores azimutales cambian de ángulo lentamente, de forma que la solución obtenida no tendrá validez en la realidad. Es decir, si se obtiene una solución que requiere una fuerza f_i y un ángulo α_i del propulsor azimutal i , pero $\alpha_i \gg \alpha_i^k$ o $\alpha_i \ll \alpha_i^k$, siendo α_i^k el ángulo del propulsor i en el instante t_k , entonces el par de valores (f_i, α_i) no llegarán a implementarse simultáneamente en el barco en la práctica, por la propia dinámica de los actuadores.

En este trabajo se propone el empleo de un método híbrido que combina la solución al problema de optimización suponiendo que los propulsores azimutales no varían su ángulo, con la solución al problema de optimización considerando la variación del ángulo, tal como se muestra en la Figura 4. De la primera solución se obtiene la fuerza f_i que debe generar cada propulsor y de la segunda los ángulos de orientación α_1 y α_2 de cada propulsor azimutal.

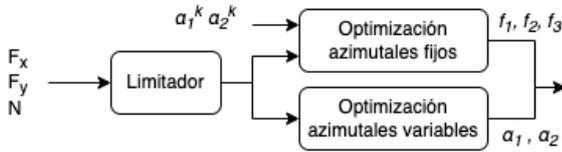


Figura 4: Método híbrido de optimización.

Además, antes de resolver el problema de optimización se acota la fuerza demandada por el controlador estableciendo los siguientes límites:

$$F_{xmax} = 2f_{1max} \quad (14)$$

$$F_{xmin} = 2f_{1min} \quad (15)$$

$$F_{ymax} = f_{3max} + 2f_{1max}s_m \quad (16)$$

$$F_{ymin} = f_{3min} - 2f_{1max}s_m \quad (17)$$

$$N_{max} = f_{1max}((-l_{x1} - l_{x2})s_m + (l_{y1} - l_{y2})c_m) \quad (18)$$

$$+ l_{x3}f_{3max} \quad (19)$$

$$N_{min} = f_{1max}((l_{x1} + l_{x2})s_m - (l_{y1} - l_{y2})c_m) \quad (20)$$

$$+ l_{x3}f_{3min} \quad (21)$$

donde $s_m = \sin \alpha_{max}$ y $c_m = \cos \alpha_{max}$. Estos valores de saturación no garantizan que cualquier terna (F_x, F_y, N) dentro de esos límites sea alcanzable. Su función es acercar la fuerza y par demandados a las capacidades máximas de los propulsores y, de esta forma, favorecer la velocidad de convergencia y posibles problemas numéricos en la resolución del problema de optimización.

4.1. Optimización de propulsores con ángulo fijo

Si se considera que los propulsores azimutales sólo pueden variar su fuerza, pero no su ángulo, calcular la fuerza que debe proveer cada propulsor se plantea como un problema de optimización lineal convexo sujeto a restricciones, y puede resolverse mediante programación cuadrática (QP). Dado el vector de fuerza demandada por el sistema de control, $\tau = [F_x F_y N]$, se trata de obtener el vector de fuerzas de los propulsores $f = [f_1 f_2 f_3]$ tal que se minimiza la expresión

$$\begin{aligned} \min_{f, s} \quad & f^T W f + s^T Q s \\ \text{s.t.} \quad & T f = \tau + s, \\ & f_{min} \leq f \leq f_{max} \end{aligned} \quad (22)$$

donde T es la matriz de configuración (5) evaluada en ese instante (considerando por tanto los ángulos α_1 y α_2 como fijos), $s = [s_1 s_2 s_3]$ es el vector de variables de holgura, $f_{min} = [f_{1min} f_{2min} f_{3min}]$ y $f_{max} = [f_{1max} f_{2max} f_{3max}]$ son los límites de fuerza de los propulsores. W y Q son las matrices de peso de las fuerzas y las holguras respectivamente. Si $Q \gg W > 0$, se obtendrá una solución con las variables de holgura cercanas a 0, es decir, intentando cumplir con la fuerza demandada. Por el contrario, si $W \gg Q > 0$ se penalizarán valores altos de f . En este caso se sacrifica la precisión en alcanzar la fuerza demandada frente al consumo de energía.

4.2. Optimización de propulsores con ángulos variables

Al considerar la variación tanto de fuerzas como de ángulos de los propulsores azimutales, tal como se indicó anteriormente, el problema de optimización se convierte en no lineal. Sin embargo, es posible formularlo de manera lineal si se emplea la matriz de configuración extendida (11) descrita en la sección 3.2. De esta manera el problema puede formularse de la siguiente forma. Dado el vector de fuerza demandada por el sistema de control, τ , obtener el vector extendido de fuerzas de los propulsores f_e tal que se minimiza la expresión

$$\begin{aligned} \min_{f_e, s} \quad & f_e^T W f_e + s^T Q s \\ \text{s.t.} \quad & T_e f_e = \tau + s, \\ & f_{1min} \leq f_{1x} \leq f_{1max}, \\ & f_{2min} \leq f_{2x} \leq f_{2max}, \\ & f_{2min} \leq f_{1y} \leq f_{2max}, \\ & f_{2min} \leq f_{2y} \leq f_{2max}, \\ & f_{3min} \leq f_3 \leq f_{3max}, \\ & \text{prop1} : r_1, r_2, r_3, r_4, r_5, r_6, r_7, r_8, r_9, r_{10}, \\ & \text{prop2} : r_1, r_2, r_3, r_4, r_5, r_6, r_7, r_8, r_9, r_{10}, \end{aligned} \quad (23)$$

donde T_e es la matriz de configuración extendida (11), $s = [s_1 s_2 s_3]$ es el vector de variables de holgura, f_{3min} y f_{3max} son los límites de fuerza del propulsor de túnel, y f_{1min} , f_{2min} , f_{1max} y f_{2max} son los límites de fuerza de los propulsores azimutales 1 y 2. W y Q son las matrices de peso de las fuerzas y las holguras respectivamente. Además, son necesarias 10 restricciones (r_1 - r_{10}) por cada uno de los dos propulsores azimutales, que se corresponden con la limitación del espacio de búsqueda

de soluciones para las fuerzas f_{ix} , f_{iy} debido al ángulo máximo de rotación α_{max} , tal como se muestra en la Figura 5. En ella el área situada en el semicírculo superior representa el espacio admisible para fuerzas de empuje f_i positivas de un propulsor azimutal, y el área situada en el semicírculo inferior representa el espacio admisible con fuerzas de empuje negativas. Puede observarse que la semicircunferencia superior tiene mayor radio que la inferior debido a que la saturación del empuje no es simétrica ($|f_{imax}| > |f_{imin}|$). Además, los arcos de circunferencia que limitan el espacio de soluciones son aproximados por cuatro tramos en el arco superior (r_3 - r_6) y otros cuatro tramos en el arco inferior (r_7 - r_{10}). Las expresiones de estas rectas son

$$r_1 : -K_m f_{ix} + f_{iy} = 0 \quad (24)$$

$$r_2 : K_m f_{ix} + f_{iy} = 0 \quad (25)$$

$$r_3 : f_{ix} + a_2 f_{iy} = b_2 \quad (26)$$

$$r_4 : f_{ix} + a_1 f_{iy} = f_{imax} \quad (27)$$

$$r_5 : f_{ix} - a_1 f_{iy} = f_{imax} \quad (28)$$

$$r_6 : f_{ix} - a_2 f_{iy} = b_2 \quad (29)$$

$$r_7 : -f_{ix} + a_2 f_{iy} = b_3 \quad (30)$$

$$r_8 : -f_{ix} + a_1 f_{iy} = -f_{imin} \quad (31)$$

$$r_9 : -f_{ix} - a_1 f_{iy} = -f_{imin} \quad (32)$$

$$r_{10} : -f_{ix} - a_2 f_{iy} = b_3 \quad (33)$$

donde

$$K_m = \tan \alpha_{max} \quad (34)$$

$$a_1 = (1 - c_2)/s_2 \quad (35)$$

$$a_2 = (c_2 - c_m)/(s_m - s_2) \quad (36)$$

$$b_2 = f_{imax}(c_2 s_m - c_m s_2)/(s_m - s_2) \quad (37)$$

$$b_3 = -f_{imin}(c_2 s_m - c_m s_2)/(s_m - s_2) \quad (38)$$

$$c_m = \cos \alpha_{max} \quad (39)$$

$$s_m = \sin \alpha_{max} \quad (40)$$

$$c_2 = \cos \frac{\alpha_{max}}{2} \quad (41)$$

$$s_2 = \sin \frac{\alpha_{max}}{2} \quad (42)$$

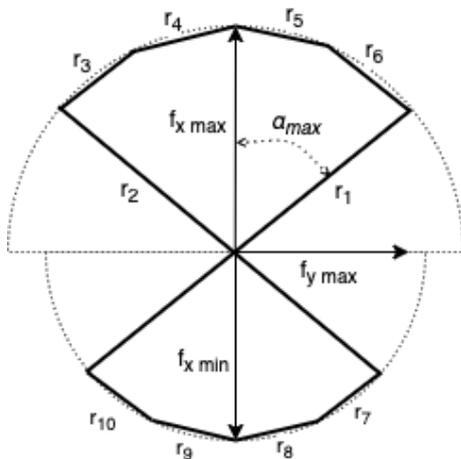


Figura 5: Aproximación lineal de las restricciones en las fuerzas extendidas f_x y f_y debido a la limitación en ángulo y empuje de un propulsor azimutal.

5. Implementación y validación del método propuesto

La implementación del método propuesto se ha realizado en *Matlab* utilizando la función *quadprog*, que permite resolver funciones objetivo cuadráticas con restricciones lineales. En el caso de optimización con ángulos variables el empleo de esta función requiere dividir la resolución en cuatro secciones. Esto se debe a que las restricciones definidas por las rectas r_1 y r_2 funcionan en sentido contrario según el signo de f_{ix} . Es decir, como se muestra en la Figura 5, en el semicírculo superior el área de soluciones admisibles viene determinada, entre otras, por las restricciones $-K_m f_{ix} + f_{iy} \leq 0$ y $K_m f_{ix} + f_{iy} \geq 0$, mientras que en el semicírculo inferior las restricciones cambian de sentido y se convierten en $-K_m f_{ix} + f_{iy} \geq 0$ y $K_m f_{ix} + f_{iy} \leq 0$. Y dado que existen dos propulsores azimutales, hay que particionar el espacio de búsqueda de soluciones en las cuatro secciones indicadas: propulsor 1 - propulsor 2 en área superior, propulsor 1 - propulsor 2 en área inferior, propulsor 1 en área superior - propulsor 2 en área inferior y propulsor 1 en área inferior - propulsor 2 en área superior.

Las primeras validaciones se han realizado seleccionando las matrices de peso Q y W con los siguientes objetivos:

- Todos los propulsores se utilicen de forma homogénea, sin penalizar unos frente a otros. Esto implica que todos los términos de la matriz W sean iguales, y se ha seleccionado la matriz identidad ($W = I$).
- En caso de que la fuerza demandada τ no pueda ser alcanzada, se priorice la fuerza que corrige la orientación (N), después la que corrige el error lateral (F_y) y, por último, la que corrige el error longitudinal (F_x). Esto implica que sus variables de holgura correspondientes deberían tener la relación $s_1 \gg s_2 \gg s_3$. Para ello se ha seleccionado la matriz de pesos

$$Q = 10^4 \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 10 & 0 \\ 0 & 0 & 100 \end{bmatrix} \quad (43)$$

$$(44)$$

- Al haber seleccionado valores de $Q \gg W$, prevalece alcanzar la fuerza demandada frente al consumo de energía y se consigue que $s \approx 0$ siempre que τ sea admisible.

El procedimiento de validación ha consistido en probar el método con 48 ternas de valores distintos (F_x, F_y, N) y en analizar sus resultados. El conjunto de valores incluye situaciones en las que la fuerza demandada está fuera del rango admisible por los actuadores. Los 48 puntos seleccionados están dentro de los siguientes rangos: $10^6 > F_x > -10^6$, $10^6 > F_y > -10^6$ y $10^8 > N > -10^8$. A continuación se analizan los resultados obtenidos en algunas situaciones concretas:

- **Fuerza longitudinal** ($F_x, F_y = 0, N = 0$). En las soluciones obtenidas los propulsores de proa no se activan y los propulsores azimutales se ponen a 0 grados con la fuerza igualmente distribuida entre los propulsores 1 y 2, como cabía esperar.

- **Fuerza transversal** ($F_y, F_x = 0, N = 0$). En las soluciones obtenidas los propulsores de proa empujan en la dirección de la fuerza lateral requerida, mientras que los propulsores azimutales empujan en sentido inverso entre ellos para cancelar el par generado por los propulsores de proa (N debe ser 0). Además, de esta forma se consigue que la fuerza longitudinal se anule (F_x debe ser 0).
- **Momento de giro** ($N, F_x = 0, F_y = 0$). En las soluciones obtenidas se ha detectado que cuando son necesarios pares altos, el algoritmo trata de llevar los azimutales al límite de ángulos ($\alpha = \pm 35$) y con empuje en sentido inverso; de esta forma se cancelan las fuerzas longitudinales ($F_x = 0$) y se maximiza el empuje. Al mismo tiempo el propulsor de proa cancela la fuerza transversal generada por los propulsores azimutales, haciendo $F_y = 0$. Sin embargo, se ha podido observar que las soluciones pueden producir cambios de ángulo bruscos de un punto a otro. Así, por ejemplo para una entrada $F_x = F_y = 0, N = 10^7$ se obtiene una solución con $\alpha_1 = 35, f_1 = 148kN, \alpha_2 = -35, f_2 = 148kN, y f_3 = 125kN$, pero si se aumenta el par requerido ($F_x = F_y = 0, N = 10^7$), entonces la solución obtenida es $\alpha_1 = -35, f_1 = 173kN, \alpha_2 = -35, f_2 = 250kN y f_3 = 220kN$. También la Figura 6 muestra este efecto; para un valor fijo $N = 16 \cdot 10^6 Nm$ y distintos valores de F_x y F_y , se muestra el valor de α_1 obtenido, y se aprecian los cambios bruscos de -35 a $+35$ para valores de fuerzas cercanos.

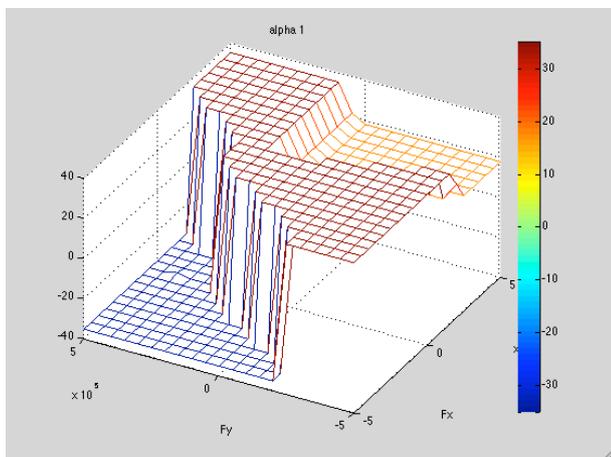


Figura 6: Ángulos del propulsor azimutal 1 para distintos valores de $F_x(N)$ y $F_y(N)$, siendo $N = 16 \cdot 10^6 Nm$.

Finalmente, respecto al tiempo de ejecución de este método, el valor máximo ha sido de 0.155 segundos, el mínimo de 0.096 segundos y una media de 0.113 segundos para obtener una solución.

6. Conclusiones

Se ha desarrollado un método que permite generar las referencias de entrada para el control de los propulsores de un barco de forma que se alcance la fuerza demandada por su sistema de control, y se ha realizado una validación preliminar.

El trabajo futuro incluye el análisis de su funcionamiento en condiciones dinámicas, simulando el sistema completo de control y la dinámica del barco ante diversos escenarios, y de esta

forma evaluar sus prestaciones en cuanto a precisión del sistema completo de control y el consumo de energía frente a otros métodos.

Agradecimientos

Esta publicación es parte del proyecto de I+D+i PID2020-119027RB-I00, financiado por MICIU/AEI/10.13039/501100011033.

Referencias

- de Vos, J., Hekkenberg, R. G., Valdez Banda, O. A., 2021. The impact of autonomous ships on safety at sea – a statistical analysis. *Reliability Engineering System Safety* 210, 107558.
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0951832021001113>
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.res.2021.107558>
- Demetillo, A., Taboada, E., 2019. Real-time water quality monitoring for small aquatic area using unmanned surface vehicle. *Engineering, Technology and Applied Science Research* 9 (2), 3959–3964.
DOI: 10.48084/etasr.2661
- Du, J., Hu, X., Krstić, M., Sun, Y., 2016. Robust dynamic positioning of ships with disturbances under input saturation. *Automatica* 73, 207–214.
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0005109816302473>
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2016.06.020>
- Fossen, T., Grovlen, A., 1998. Nonlinear output feedback control of dynamically positioned ships using vectorial observer backstepping. *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 6 (1), 121–128.
DOI: 10.1109/87.654882
- Johansen, T. A., Fossen, T. I., 2013. Control allocation—a survey. *Automatica* 49 (5), 1087–1103.
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0005109813000368>
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2013.01.035>
- Jovanović, I., Perčić, M., Koričan, M., Vladimir, N., Fan, A., 2022. Investigation of the viability of unmanned autonomous container ships under different carbon pricing scenarios. *Journal of Marine Science and Engineering* 10 (12).
DOI: 10.3390/jmse10121991
- Molica, M., 2024. Proyecto autoship. Acceso 9 de abril de 2024.
URL: <https://www.autoship-project.eu/>
- Molina-Molina, J. C., Salhaoui, M., Guerrero-González, A., Arioua, M., 2021. Autonomous marine robot based on ai recognition for permanent surveillance in marine protected areas. *Sensors* 21 (8).
DOI: 10.3390/s21082664
- Mou, J., Zhu, Q., Liu, Y., Bai, Y., 2024. Multi-objective optimal thrust allocation strategy for automatic berthing of surface ships using adaptive non-dominated sorting genetic algorithm iii. *Ocean Engineering* 299, 117288.
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801824006255>
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117288>
- Shi, Q., Wang, R., Li, X., Yang, J., 2024. Barrier lyapunov function-based adaptive optimized control for full-state and input-constrained dynamic positioning of marine vessels with simulation and model-scale tests. *Ocean Engineering* 301, 117534.
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801824008710>
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117534>
- Witkowska, A., Śmierczalski, R., 2018. Adaptive dynamic control allocation for dynamic positioning of marine vessel based on backstepping method and sequential quadratic programming. *Ocean Engineering* 163, 570–582.
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801818309338>
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.05.061>
- Xuebin, L., 2020. Dynamic multiobjective optimization for thrust allocation in ship application. *Ocean Engineering* 218, 108187.
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801820311161>
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108187>



Simposio de Robótica, Bioingeniería y Visión por Computador 2024



An open-source implementation of a force-torque sensor data acquisition device for the humanoid robot TEO

Lukawski, B.* , Rodríguez Sanz, A., Victores, J. G., Balaguer, C.

RoboticsLab, Department of Systems Engineering and Automation, Universidad Carlos III de Madrid, Avda. Universidad, 30, 28911, Leganés, Spain.

Resumen

Los sensores de fuerza-par multieje extienden las capacidades de un robot humanoide para percibir su entorno físico e interactuar con él en tareas de alto nivel. Existen soluciones comerciales que proporcionan el hardware (sensor) junto con una capa software cerrada para aplicaciones robóticas. Para sortear una serie de inconvenientes de este paradigma sobre el robot humanoide TEO, se ha desarrollado una solución libre y de código abierto para implementar un nuevo firmware sobre un dispositivo embebido de bajo coste que realice adquisición y tratamiento de datos para un sensor de este tipo. La implementación es suficientemente flexible para replicar el anterior firmware comercial y añadir mejoras con respecto al mismo. Se describe la integración del sensor y sus nuevos componentes software, y se validan estos sobre una serie de experimentos con hardware real usando una nueva aplicación diseñada para el guiado manual de un brazo robótico.

Palabras clave: Robótica, Robot humanoide, Sensor fuerza-par, Arquitecturas software.

Abstract

Multi-axis force-torque sensors extend the capabilities of a humanoid robot to perceive its physical environment and interact with it in high-level tasks. Ready-to-use commercial solutions exist which provide the hardware (sensor) along with a proprietary software layer for robotic applications. To overcome a set of drawbacks of this paradigm on the humanoid robot TEO, a free and open-source firmware has been developed to perform sensor data acquisition and treatment on a low-cost embedded device. The implementation is flexible enough to replicate and add more functionalities over the previous closed-source solution. The integration of the sensor and its new software components is described, and validated against experiments on the real hardware using a newly developed manual trajectory teaching app for a robotic arm.

Keywords: Robotics, Humanoid robot, Force-torque sensor, Software architectures.

1. Introduction

Humanoid robots are complex systems that require a wide range of sensors to perceive their environment and interact with it. Among these, force-torque sensors are essential for tasks that involve physical contact with objects. These sensors provide information about the external forces and torques applied to the robot's end effector, which can be used to control the robot's movements and interactions with the environment, and to identify its dynamic parameters (Ogawa et al., 2014).

In humanoid robots devised as household companions such as the TEO robot, these sensors have been a main component of applications that cover activities of the daily living such as folding garments and ironing (Estevez et al., 2017).

In research, force-torque sensors have been also used in a variety of applications depending on their placement. Sensors mounted on the robot's ankles allow to estimate the zero-moment point (ZMP) in gait algorithms (Kim, 2020; Lipa et al., 2023). On the other hand, sensors mounted on the robot's wrists were used to estimate the contact forces during bimanipulation tasks to hold and lift boxes (Hernandez-Vicen et al., 2021). Other applications include balance control for a waiter robot (Garcia-Haro et al., 2018a,b), and kinesthetic teaching in the context of robot imitation (Fernandez-Fernandez et al., 2018).

This paper outlines the characteristics of the hardware setup of the TEO robot, and describes the solutions adopted to replace a closed-source proprietary device for acquiring and treating data from a commercial force-torque sensor.

*Corresponding author: blukawsk@ing.uc3m.es
Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)

2. Materials

2.1. Humanoid robot

TEO, depicted in Figure 1, is a full-size humanoid robot developed in the RoboticsLab group of Universidad Carlos III de Madrid, Spain. It has 28 degrees of freedom (DOF) distributed along its four limbs (6 joints each), neck (2 joints), and torso (2 joints). It weighs about 60 kg and its height is approximately 1.70 m. Originally codenamed as RH-2, it is the main exponent of the third generation of humanoid robots in RoboticsLab. With regard to its predecessor RH-1, it features several improvements in the mechanical design, such as a revamped cantilever-type structure and revised communications and control architectures (Pérez Martínez et al., 2010).

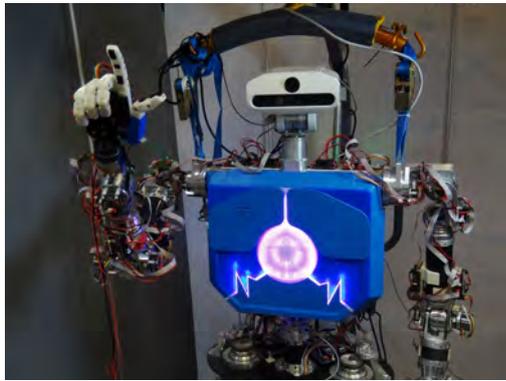


Figure 1: TEO humanoid robot.

TEO's joints are actuated by brushless DC motors managed through individual embedded joint control units. These latter are distributed over four CAN buses and connected to a main computer, which runs the YARP middleware for interfacing with external clients over a local network. The robot features several sensing and human-robot interaction-oriented devices: relative and absolute encoders, an inertial measurement unit, a stereo vision system involving RGBD cameras, microphone, speaker, and four force-torque sensors. The robot's hands can be equipped with either 1-DOF grippers or dexterous hands, depending on the task requirements.

2.2. Force-torque sensor

A collection of four commercial 6-axis force-torque sensors from JR3 has been integrated in TEO (see Figure 2(a)). Two different models were chosen having a diameter of 50 mm and 85 mm, mounted on the wrist and ankle end effectors respectively (see Figure 2(b)).

The manufacturer provides a PCI card driven by a DSP for real-time data acquisition and processing. The card is connected to an external PC running a proprietary software package. It performs offset removal, data decoupling, saturation detection, digital low-pass signal filtering, peak detection and threshold monitoring, among other functions, at a 8 KHz sampling rate. Data is stored in an 4k serial EEPROM. An open-source kernel device implementation for Linux was developed by a third party and adopted in TEO in order to interface with the DSP through *ioctl* calls (Prats, 2011).

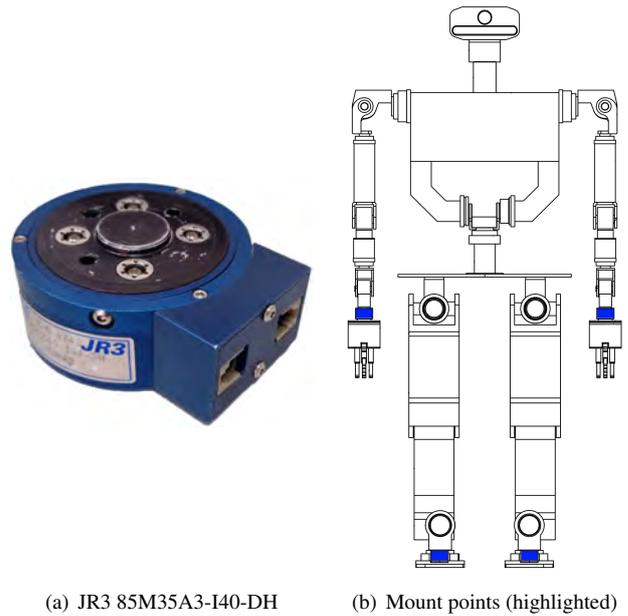


Figure 2: Multi-axis force-torque sensor.

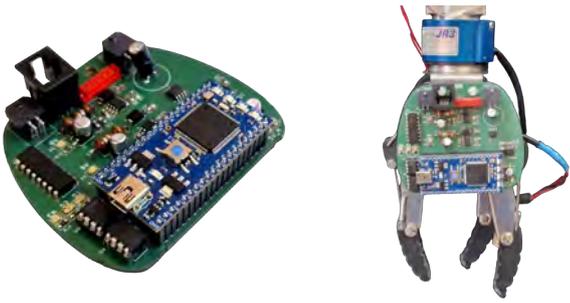
The onboard electronics of the JR3 sensor include a 14-bit analog-digital converter (ADC). Outcoming data is packed in 20-bit frames, which are transmitted serially over a 6-wire RJ-11 interface driven by RS-485 differential drivers, split into: data signals (DATA+, DATA-), digital clock signals (DCLK+, DCLK-), and power supply (VCC, GND). The clock rate is 2 MHz. Data frames are split into 4 channel bits and 16 data bits, with the former indicating the channel number, and the latter the force or torque value. Eight channels are streamed in the following sequence at 64 KHz: voltage level, 3 forces, 3 torques, and calibration information.

Calibration data contains the decoupling matrix downloaded by the PCI card on power-up. The matrix is used to decouple the sensor's six axes, and it is stored in the EEPROM in order to correct the raw data.

2.3. Embedded microcontroller

In order to interface with selected hardware components, an embedded microcontroller for general and IoT applications was integrated in TEO. The Mbed LPC1768 chip adopts the ARM Cortex-M3 architecture and runs at 96 MHz. It features 512 KB of flash memory, 32 KB of RAM, and multiple communication interfaces: Ethernet, USB, CAN, SPI, I2C, ADC, DAC, PWM and GPIO. It is programmed in C++ using the Keil online compiler for embedded applications. A stack of libraries called Mbed OS is provided, including a real-time operating system (RTOS).

A dedicated electronics circuit was designed to interface the microcontroller with the CAN bus (see Figure 3(a)). Originally, this device was used in TEO to command an 1-DOF underactuated gripper using PWM signals, only (Figure 3(b)). It was later found suitable for extending it to perform data acquisition from the JR3 sensors. The CAN bus interface was chosen to communicate the controller with the main computer, similarly to the joint control units.



(a) Mbed LPC1768 (b) Lacquey robot gripper

Figure 3: Embedded microcontroller and peripherals.

2.4. YARP middleware

The middleware and robotics framework YARP allowed the implementation of a distributed architecture of low-level control and high-level application modules. It is a C++ library that provides a set of classes and tools for developing robot applications, which can communicate with each other over a YARP network through local and remote ports (Metta et al., 2006). In this work, a collection of components encapsulate the intended behavior, e.g. a client to send commands to the Mbed over CAN (Section 3.1), and the robot teaching application (Section 3.3).

3. Implementation

This work sought to replace the vendor-distributed PCI data acquisition card with a custom solution based on the Mbed microcontroller. Formerly, the JR3 sensor was interfaced with the PCI card through a proprietary firmware and software package, and physically it required a direct connection to an external PC hosting said card (Figure 4(a)).

It was decided to adopt an open-source implementation for the firmware, and to replace the external PC with the embedded microcontroller (Figure 4(b)). As a result, the code managed by the Mbed needs to handle both gripper commands as well as sensor data acquisition and processing. The source code has been published on GitHub (Łukawski, 2024a).

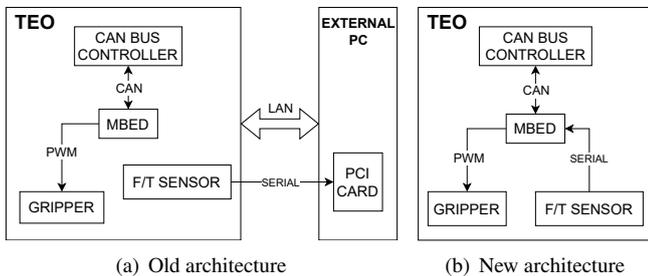


Figure 4: Comparison of software architectures.

3.1. Data acquisition device

In order to acquire data from the sensor, the new firmware needed to process raw JR3 signals in two phases at distinct rates: first it had to detect individual 20-bit frames, store them in memory, then accumulate all six channels so that a full sensor read could be completed (with 3 force and 3 torque channels, respectively) and streamed to the main robot’s computer.

To identify individual clock flanges occurring at 2 MHz, the firmware has to update its state variables every 250 nanoseconds (half a DCLK pulse) or less. For this task, interrupt service routines (ISR) proved not performant enough to reach such high rates. Instead, a polling approach was adopted called “bit banging”, where the microcontroller reads the corresponding clock and data pins in a continuous fashion (using infinite read loops until the pin state changes), with no blocking delays.

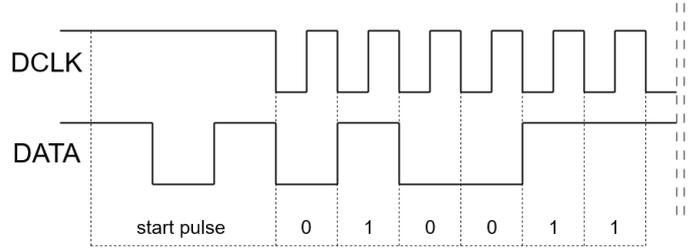


Figure 5: Expected start pulse ahead of a JR3 20-bit frame.

The “bit banging” approach was implemented in the *await_next_frame()* function (Algorithm 1). It analyzes the incoming clock and data streams looking for a specific pattern which signifies the beginning of a new frame (Figure 5). While the clock stream is high, a high-low-high sequence must occur in the data stream.

Algorithm 1: Implementation of *await_next_frame()*.

```

Function await_next_frame():
  while true do
    while not (data == 1 and clock == 1) do
      | // await end of previous frame
    end
    while data == 1 and clock == 1 do
      | // await beginning of start pulse
    end
    if not (data == 0 and clock == 1) then
      | // not a start pulse, retry
      continue
    end
    while data == 0 and clock == 1 do
      | // await rising edge of start
      | pulse
    end
    if not (data == 1 and clock == 1) then
      | // not a start pulse, retry
      continue
    end
    // start pulse completed
    break
  end

```

Once a new frame is detected, the *read_frame()* function (Algorithm 2) is called to read the 20 bits of data consecutively, also by means of the “bit banging” method. The function reads the data stream in a loop, waiting for the clock signal to change from low to high, then reads the data bit and stores it in the frame array. The process is repeated 20 times, until the full frame is read.

Algorithm 2: Implementation of *read_frame()*.

```
Function read_frame():
    frame ← {0}
    await_next_frame()
    for bit ← 20 to 1 do
        while clock == 1 do
            | // await next clock pulse
        end
        while clock == 0 do
            | // await clock rising edge
        end
        frame[bit] ← data
    end
    return frame
```

The RTOS threading feature is used to run the *read_frame()* function in parallel with the main loop. The read loop depicted in Algorithm 3 acquires a frame from the sensor, processes it, and stores it in a shared variable, using 6-element arrays (one per sensor channel). The processing includes decoupling the raw data with the coefficients obtained from the calibration matrix, filtering it, and normalizing it by subtracting the offset obtained at boot up. The resulting shared data array is queried on demand by the main loop. If requested, offsets are updated using the latest measurements. Because of the lack of a floating point unit (FPU) on the LPC1768 chip, all floating-point values are converted into fixed-point in the Q1.30 format (1 sign bit, 1 bit for the integer part, 30 bits for the fraction part).

Algorithm 3: Parse and signal treatment loop.

```
Data: coeffs[6], factor
Result: shared[6]
raw ← {0}
offset ← {0}
decoupled ← {0}
filtered ← {0}
normalized ← {0}
shared ← {0}
frame_counter ← 0
while not stop_requested do
    raw[channel] ← read_frame()
    if not all_channels_read then
        | continue
    end
    for i ← 1 to 6 do
        decoupled[i] ← coeffs * raw[i]
        filtered[i] ← filtered[i] + factor * (decoupled[i]
            + filtered[i])
        normalized[i] ← filtered[i] - offset[i]
    end
    if zero_offsets then
        | offset ← filtered
        | shared ← {0}
    else
        | shared ← normalized
    end
    frame_counter ← frame_counter + 1
end
```

The proprietary firmware features a cascaded low-pass filter using six cutoff frequencies evaluated at different sensor bandwidths. The new firmware simplifies this by adopting a first-order IIR filter with a configurable smoothing factor α . The basics of a low-pass filter, also referred to as “exponential moving average”, are outlined in Equation (1), where x denotes the raw data, and y the resulting filtered data, for iteration i .

$$y[i + 1] = y[i] + \alpha \cdot (x[i + 1] - y[i]) \quad (1)$$

The top-level main function runs on its own thread. It performs the configuration of the CAN bus and Mbed pins. Initially, the calibration matrix of the sensor is populated, and a bootup message is sent to the main computer afterwards as a means to indicate presence of this CAN node. A circular buffer is used to store incoming CAN messages containing commands issued from the main computer. No hardware acceptance filter functionality has been implemented in the Mbed OS library yet, hence basic CAN ID software filtering had to be used instead. The main function loops indefinitely over CAN reads.

The CAN protocol the new Mbed firmware understands to parse incoming commands and stream sensor data has been detailed in Table 1 and described below. Command codes are mapped to the four most significant bits of the CAN ID, and the direction of the message indicates if the Mbed should produce an output (“out”) or not (“in”). The payload of the message varies across commands. This protocol is synchronous, i.e., the main computer sends a command and waits for a response.

- **sync** – a synchronization message sent by the main computer, adhering to the CiA 301 SYNC protocol. If in synchronous mode, the Mbed controller sends a force-torque packet as soon as this message is received.
- **acknowledge** – a response message sent by the Mbed controller to confirm the reception of a command.
- **start sync** – start the controller in synchronous mode, i.e. a SYNC message is awaited. The desired cutoff frequency of the low-pass filter is provided in the payload.
- **start async** – start the controller in asynchronous mode, i.e. an additional thread is spawned to stream force-torque packets at the specified rate.
- **stop** – stop the controller threads.
- **zero offsets** – use the latest measurements as the current offset to be removed from subsequent values.
- **set filter** – reconfigure the low-pass filter using the specified cutoff frequency.
- **get state** – query the current state of the controller (ready or not initialized).
- **get full scales** – query the full scales of the sensor’s ADC.
- **reset** – perform the initialization of the sensor.
- **force-torque data** – send latest measurements (filtered).
- **bootup** – a message sent only once to the main computer.
- **gripper** – a PWM command to the gripper, if available.

Table 1: CAN protocol adopted for interfacing with the Mbed controller.

command	code	direction	payload (bytes)	details
sync	0x080	in	0	
acknowledge	0x100	out	1–7	LSB byte: 0x00 – sensor ready, 0x01 – not initialized 6 MSB bytes (optional): see command details
start sync	0x180	in	2	low-pass filter cutoff frequency in 0.01 Hz (integer)
start async	0x200	in	6	2 LSB bytes: cutoff frequency (as above) 4 MSB bytes: period in μs (integer)
stop	0x280	in	0	
zero offsets	0x300	in	0	
set filter	0x380	in	2	cutoff frequency (as above)
get state	0x400	in	0	
get full scales (forces)	0x480	in	0	
get full scales (moments)	0x500	in	0	
reset	0x580	in	0	
force data	0x600	out	8	(3x) 2 LSB bytes: Fx, Fy, Fz (integer, signed) 2 MSB bytes: frame counter
moment data	0x680	out	8	(3x) 2 LSB bytes: Mx, My, Mz (integer, signed) 2 MSB bytes: frame counter
bootup	0x700	out	0	
gripper PWM	0x780	in	4	PWM command between -100.0 and 100.0 (float)

Since CAN messages can store up to 8 bytes of data, and JR3 channels are 16-bit integers making up to 12 bytes (6 channels) in total, the force-torque data is split into two messages: one for the forces and another for the moments. The frame counter is included in the two most significant bytes of the message, to allow the main computer to detect lost frames.

3.2. CAN device

The software counterpart that runs on the main computer and interfaces with the new Mbed force-torque controller through a CAN bus was built as a YARP component (a “device” in YARP slang). It is meant to fit into an existing architecture which encompasses a set of nodes devoted to motor actuation and reading data from absolute encoders. A new device type was added to model and interact with generic sensors, including force-torque acquisition devices. An example of the latter corresponds to a new device which maps remote commands (detailed in Table 1) to CAN messages and forwards them to the Mbed node. Concurrently, it also listens to any force-torque data streamed from the Mbed, and exposes this information to remote clients, e.g. high-level applications such as the one described in Section 3.3.

Similarly to other CAN devices in this architecture, this device attends to a bootup signal received from the Mbed controller in order to perform initialization on the main computer side. Also, a monitor thread is used to act upon device disconnections, cycling through an internal state machine. An optional diagnostics thread analyzes the frame counter included in all incoming data messages in order to provide feedback on the health of the connection and on any internal issues the Mbed may encounter.

The source code of this device was published on GitHub (RoboticsLab, 2024a).

3.3. Trajectory teaching app

A high-level application for TEO was proposed involving the usage of a force-torque sensor. Since this robot lacks sensors on its joint shafts, it is not possible to directly compensate their friction and the weight of their links in order to perform manual guiding. In contrast, collaborative robots usually allow operators to enable a gravity and friction compensation mode in such a way that joints are no longer blocked, yet the robot maintains its current position if not acted upon. A user may still manually reposition the robot arm and thus register new robot targets through “teaching”.

The *ftCompensation* application was developed to overcome this limitation using the force-torque sensor. External forces and torques are sensed on the end effector, and used to drive the kinematic chain in a specific direction. Through differential inverse kinematics, these forces are mapped to tiny position displacements (and treated as a Cartesian velocity, or “twist”), and the resulting joint velocities are commanded to the robot joints. Alternatively, joints can also be commanded in torque mode, i.e. input force-torque data (a “wrench”) is converted to joint torques through inverse dynamics.

An impedance mode is being investigated for its inclusion. The source code of the *ftCompensation* application has been published on GitHub (RoboticsLab, 2024b).

4. Experiments

The proposed firmware was tested and validated in a series of experiments. Calibrated weights were used in order to assess the accuracy of the measurements and the correctness of the calibration matrix. The sensor was on the left wrist of the TEO robot, and the Mbed microcontroller was connected to the CAN bus. The *ftCompensation* app (Section 3.3) was used, as shown in Figure 6.

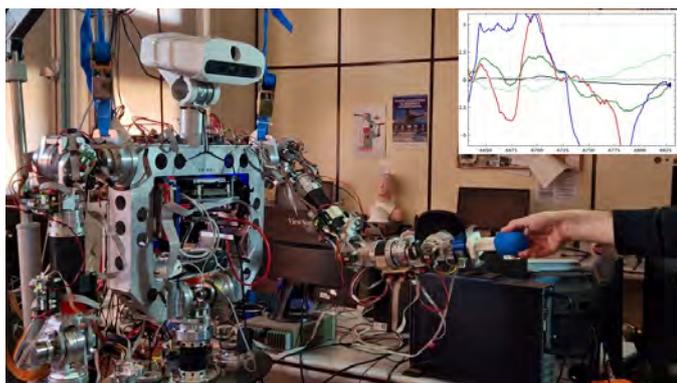


Figure 6: TEO teaching experiment (Łukawski, 2024b).

It was concluded that the selection of a convenient cutoff frequency was crucial to avoid working with noisy sensor data. Given the high frame sample rate of 8 kHz (its exact period was measured with an oscilloscope, obtaining 128.5 milliseconds), it was found that a cutoff frequency of 1–2 Hz provided better results in terms of smoothness and reduced noise.

In terms of CAN communications, due to the fact that the Mbed CAN node coexists with up to 14 other nodes over the same bus, which correspond to the joint control units and the absolute encoders, it was also important to determine either a working synchronization (in synchronous mode) or force-torque data streaming (in asynchronous mode) rate. The new architecture has been validated on a default 2 milliseconds SYNC command period in the former case, and on a 1 millisecond streaming period in the latter. Data loss was detected and attributed to the limited computing power of the Mbed, although it has been deemed acceptable due to the fact that CAN clients on the main computer expect incoming force-torque data streams at much lower rates, e.g. 200 Hz.

5. Conclusions

A shift in the paradigm of force-torque data acquisition and treatment for TEO has been proposed and implemented in the form of an embedded low-cost application, which overcomes the limitations of the previous closed-source proprietary solution. Thanks to this, it is no longer necessary to introduce an external computer for this purpose, and the footprint of the circuitry necessary to operate a microcontroller aboard TEO is much less than the sheer size of the PCI card connected to said external computer. Besides, an open-source firmware implementation provides much more flexibility for performing customized data treatment and adding new functions (e.g. complex filters can now be easily implemented).

The new implementation has been validated against the results provided with the PCI card and a set of calibrated weights. A high-level application was developed involving the usage of a force-torque sensor, and the new Mbed controller has been proved performant and accurate enough to fulfill this task.

In a broader context, the YARP-CAN device associated to this new force-torque controller fits in the new communications architecture envisioned for TEO. This work paves the way for the future adoption of the EtherCAT protocol, and an extension to the ROS2 network.

Acknowledgments

This research has been financed by ALMA, “Human Centric Algebraic Machine Learning”, H2020 RIA under EU grant agreement 952091; ROBOASSET, “Sistemas robóticos inteligentes de diagnóstico y rehabilitación de terapias de miembro superior”, PID2020-113508RB-I00, financed by AEI/10.13039/501100011033; “RoboCity2030-DIH-CM, Madrid Robotics Digital Innovation Hub”, S2018/NMT-4331, financed by “Programas de Actividades I+D en la Comunidad de Madrid”; “iREHAB: AI-powered Robotic Personalized Rehabilitation”, ISCIII-AES-2022/003041 financed by ISCIII and EU; and EU structural funds.

References

- Estevez, D., Victores, J. G., Fernandez-Fernandez, R., Balaguer, C., 2017. Robotic ironing with 3D perception and force/torque feedback in household environments. In: *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. pp. 6484–6489. DOI: 10.1109/IR0S.2017.8206556
- Fernandez-Fernandez, R., Victores, J. G., Estevez, D., Balaguer, C., 2018. Robot imitation through vision, kinesthetic and force features with online adaptation to changing environments. In: *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. pp. 6546–6551. DOI: 10.1109/IR0S.2018.8593724
- Garcia-Haro, J. M., Daniel Oña, E., Martinez, S., Hernandez-Vicen, J., Balaguer, C., 2018a. Waiter robot application: Balance control for transporting objects. In: *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. pp. 1–9. DOI: 10.1109/IR0S.2018.8593760
- Garcia-Haro, J. M., Martinez, S., Balaguer, C., 2018b. Balance computation of objects transported on a tray by a humanoid robot based on 3D dynamic slopes. In: *IEEE-RAS 18th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)*. pp. 704–709. DOI: 10.1109/HUMAN0IDS.2018.8624920
- Hernandez-Vicen, J., Martinez, S., Menendez, E., Balaguer, C., et al., 2021. Characterization and study of the primitive dynamic movements required to bi-manipulate a box. *Electronics* 10 (11). DOI: 10.3390/electronics10111354
- Kim, J.-H., 2020. Multi-axis force-torque sensors for measuring zero-moment point in humanoid robots: A review. *IEEE Sensors Journal* 20 (3), 1126–1141. DOI: 10.1109/JSEN.2019.2947719
- Lipa, G. M., Muñoz, J., Łukawski, B., Monje, C. A., Balaguer, C., 2023. Estrategia de caminata para el robot humanoide TEO. In: *Jornadas Nacionales de Robótica y Bioingeniería*. pp. 163–170. DOI: 10.20868/UPM.book.74896
- Łukawski, B., 2024a. Mbed firmware for interfacing with a JR3 6-axis force-torque sensor through CAN. <https://github.com/roboticslab-uc3m/jr3-mbed-firmware/>.
- Łukawski, B., 2024b. Trajectory teaching on TEO via force-torque sensor (v2). https://youtu.be/_9cs9j6SWUU.
- Metta, G., Fitzpatrick, P., Natale, L., 2006. YARP: yet another robot platform. *International Journal of Advanced Robotic Systems* 3 (1), 43–48. DOI: 10.5772/5761
- Ogawa, Y., Venture, G., Ott, C., 2014. Dynamic parameters identification of a humanoid robot using joint torque sensors and/or contact forces. In: *IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*. pp. 457–462. DOI: 10.1109/HUMAN0IDS.2014.7041401
- Pérez Martínez, C., Piero, P., Martínez, S., Pabon, L., Arbulú, M., Balaguer, C., 2010. RH-2: an upgraded full-size humanoid platform. In: *Mobile Robotics: Solutions and Challenges*. World Scientific, pp. 471–478. DOI: 10.1142/9789814291279_0058
- Prats, M., 2011. JR3 force/torque sensor kernel module for GNU/Linux, v0.3. <https://sourceforge.net/projects/jr3pci-linux/>.
- RoboticsLab, 2024a. A place for YARP devices. <https://github.com/roboticslab-uc3m/yarp-devices/>.
- RoboticsLab, 2024b. Kinematics and dynamics solvers and controllers. <https://github.com/roboticslab-uc3m/kinematics-dynamics/>.



Simposio de Robótica, Bioingeniería y Visión por Computador 2024



Control por rechazo activo de las perturbaciones de los motores de un robot móvil que presentan retardo inducido por hardware

Cerro-Sánchez, Alberto^{a,*}, Mérida-Calvo, Luis^a, Feliu-Batlle, Vicente^b

^aInstituto de Investigaciones Energéticas y Aplicaciones Industriales, Universidad de Castilla-La Mancha, 13071 Ciudad Real, España

^bEscuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Ciudad Real, Universidad de Castilla-La Mancha, 13071 Ciudad Real, España

Resumen

El objetivo de este trabajo es desarrollar un sistema de control para los motores de un robot móvil que presentan retardo inducido por hardware (*HID*). Dicho robot móvil transporta una antena háptica, diseñada para realizar tareas de medición e identificación de objetos. Este sistema de control debe ser robusto ante perturbaciones tipo escalón a la entrada que modelan, por ejemplo, inclinaciones desconocidas del terreno. Entonces se presenta un esquema de control complejo diseñado a partir de la combinación de dos esquemas conocidos en la literatura: el control por rechazo activo de perturbaciones y el predictor de Smith. Además de un breve estudio de los dos esquemas por separado y de la propuesta del esquema combinado, se incluye el resultado de varias simulaciones, diferenciando entre la versión ideal y la versión real del esquema, y experimentos realizados que justifican la validez de este esquema combinado.

Palabras clave: Rechazo de perturbaciones, Sistemas con retardo, Sistemas con saturación, Sistemas de control de movimiento, Robots móviles.

Active disturbance rejection control of the motors of a mobile robot with hardware induced delay

Abstract

The objective of this research is developing a control system of the motors of a mobile robot which presents hardware induced delay (*HID*). Such mobile robot transports a haptic antenna, designed to perform measurement and identification tasks. This control system must be robust to steplike disturbances at the input which model, e.g., unknown terrain slopes. Then a complex control scheme is presented which is designed from the combination of two schemes known in the literature: the active disturbance rejection control and the Smith predictor. This new scheme is used to control the wheel motors of a mobile robot equipped with a haptic antenna, designed to perform measurement and identification tasks. In addition to a brief study of the two schemes separately and the proposal of the combined scheme, the paper includes the result of some simulations, differentiating between the ideal and the real version of the scheme, and experiments carried out to justify the validity of the combined scheme.

Keywords: Disturbance rejection, Delay systems, Systems with saturation, Motion Control Systems, Mobile robots.

1. Introducción

La metodología de identificación y reconocimiento de objetos mediante tecnología háptica es objeto de estudio en el campo de la robótica. Frente a otras tecnologías como sistemas de visión por cámaras o sensores de ultrasonidos, la tecnología háptica ofrece mejores resultados en tareas de inspección que han de realizarse en ambientes de mala visibilidad, debido a humo, humedad o partículas en suspensión. El objetivo de esta tecnología consiste en captar información del entorno en el que

se desenvuelve un robot de forma háptica (es decir, táctil). En el Instituto de Investigaciones Energéticas y Aplicaciones Industriales de Ciudad Real se cuenta con el prototipo robótico de la Figura 1 formado por una plataforma móvil omnidireccional y una antena háptica robótica, del cual se hizo un estudio y modelado en (Haro et al., 2023). La plataforma móvil cuenta con cuatro ruedas omnidireccionales gobernadas por cuatro motores de corriente continua y reductoras de relación 1:75. La antena está gobernada por dos motores y equipada con un

*Autor para correspondencia: Alberto.Cerro@uclm.es
Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)

sensor de fuerzas que mide las vibraciones que se producen en una varilla de fibra de carbono (la antena). La antena robótica empleada para la medición ha sido desarrollada en (Feliu and Castillo, 2017).

La eficacia en las tareas de reconocimiento de este prototipo recae en la precisión con la que se posiciona la antena. Si se desconoce el entorno en el que se realizan las mediciones, el robot puede verse sometido a perturbaciones que dificulten el posicionamiento del mismo, empeorando así la precisión de las mediciones de la antena. Por tanto, es necesario implementar un sistema de control para los motores de la plataforma móvil que elimine su efecto.

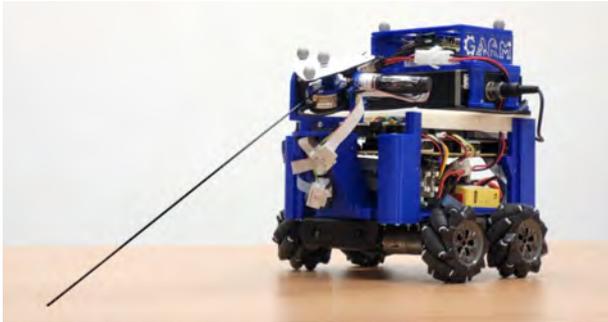


Figura 1: Plataforma móvil con sistema háptico. Extraída de Modelado de un sistema háptico móvil basado en antenas flexibles. Haro-Olmo, M^a Isabel. Reproducida con permiso.

Uno de los esquemas de control más extendidos para la compensación de perturbaciones es el Active Disturbance Rejection Control (*ADRC*) (Han, 1998), empleado típicamente en el espacio del estado (Ohnishi et al., 1996). Este esquema realiza una estimación de las perturbaciones aplicadas al sistema, sin ser necesario modelarlas a priori. Otro aspecto para tener en cuenta es que este prototipo de robot móvil cuenta además con retardo en su dinámica inducido por el hardware que equipara. Este retardo dificulta en gran medida el control mediante *ADRC*, puesto que se dan controles no causales. A pesar de que se han realizado trabajos como en (Jin et al., 2020) o en (Ran et al., 2017) que abordan este asunto, no se han aplicado a sistemas con retardo inducido por hardware. En (Merida et al., 2023) se presenta un esquema de control combinando un regulador *PID* con prefiltro y un predictor de Smith para lidiar con el retardo del sistema, pero no se tiene en cuenta la acción de una perturbación persistente en el sistema. En (Mehallel et al., 2024) se estudia el efecto de estas perturbaciones y se propone una modificación del predictor de Smith para compensar la perturbación.

En este trabajo se plantea un esquema *ADRC* combinado con un predictor de Smith (Smith, 1959) para compensar perturbaciones y eliminar efectos causados por retardos de forma simultánea, con el objetivo de tener un control sobre los motores de las ruedas mucho más preciso. Destacar que en este trabajo los esquemas de control diseñados se plantean en el dominio de Laplace, en lugar de hacerlo en espacio de estados, como suele ser habitual cuando se trabaja con *ADRC*. Esto permite combinar ambos esquemas (el *ADRC* y el Predictor de Smith) de manera más sencilla.

2. Desarrollo del esquema

En una tarea típica de inspección el prototipo navegará en un entorno desconocido. Resulta de vital importancia que el robot no realice movimientos descontrolados que puedan derivar en colisiones o pérdidas de adherencia, empobreciendo así la calidad de las mediciones hápticas. Por ello, como especificaciones para el diseño del control, se requiere que el sistema sea lo más rápido posible, pero sin tener sobrepasamientos ni sobrees oscilaciones en el movimiento de los motores.

2.1. Control basado en *ADRC*

Como ya se ha mencionado, el *ADRC* es un esquema que permite compensar perturbaciones desconocidas realizando una estimación sin necesidad de llevar a cabo un estudio o modelado de las mismas. Un ejemplo de *ADRC* aplicado con funciones de transferencia es el esquema de la Figura 2, donde $G(s)$ es la planta del sistema, y $C(s)$ un regulador. Normalmente, la función $G(s)$ no es invertible, por lo que es necesario incluir una función filtro $F(s)$ de la forma:

$$F(s) = \frac{1}{(1 + \lambda \cdot s)^n} \quad (1)$$

siendo λ un parámetro escogido para incluir polos que modifiquen mínimamente la dinámica, y n el número de polos necesarios para hacer invertible la función $G(s)$, es decir, es al menos la diferencia entre los órdenes del denominador y numerador de $G(s)$.

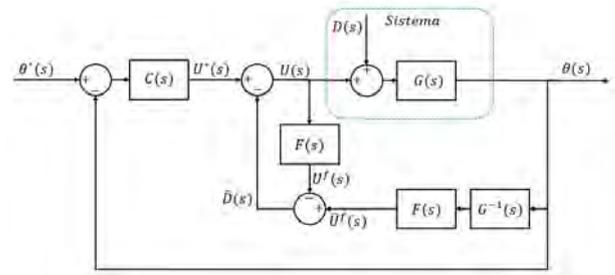


Figura 2: Esquema de control *ADRC*.

Es de gran importancia que la comparación entre las señales $U(s)$ y $\hat{U}^f(s)$ se realice en las mismas condiciones para estimar correctamente la perturbación $\hat{D}(s)$. Por este motivo es necesario incluir el bloque $F(s)$ en el esquema para finalmente comparar la señal estimada $\hat{U}^f(s)$ con la señal real filtrada $U^f(s)$.

Desarrollando matemáticamente el esquema, se puede llegar a la siguiente expresión:

$$\hat{D}(s) = D(s) \cdot F(s) \quad (2)$$

de forma que la perturbación estimada es muy similar a la real, puesto que $F(s)$ no modifica considerablemente la señal. Se hace la observación de que el filtro (1) no introduce un error en régimen permanente en la estimación $\hat{D}(s)$ de $D(s)$ si $D(s)$ es un escalón.

2.2. Control basado en predictor de Smith

El predictor de Smith permite eliminar en el sistema el efecto producido por el retardo de la planta. Para ello, elimina este efecto en la realimentación que cierra el lazo de control, según la Figura 3,

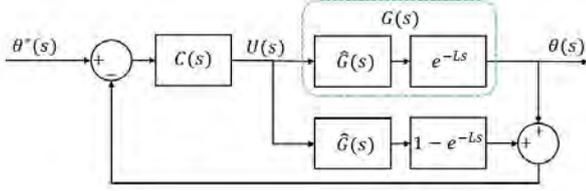


Figura 3: Esquema de control predictor de Smith.

donde se puede observar que la señal de realimentación es $U(s) \cdot \hat{G}(s)$.

2.3. Desarrollo ideal del esquema combinado

En la literatura no existe una combinación de los esquemas mencionados, sino que se plantean modificaciones de los esquemas originales. Por ejemplo, en (Mehallel et al., 2024) se plantea un predictor de Smith modificado para compensar perturbaciones constantes.

Se plantea una combinación del ADRC y predictor de Smith en la Figura 4 donde, en este caso, $G(s)$ es la función de transferencia de un motor que relaciona su posición angular $\theta(s)$ con la tensión aplicada $U(s)$, y es de la forma:

$$G(s) = \frac{\theta(s)}{U(s)} = \frac{A}{s \cdot (s + B)} \cdot e^{-Ls} = \hat{G}(s) \cdot e^{-Ls} \quad (3)$$

Se denominan A_0 , B_0 y L_0 los valores identificados de A , B y L , respectivamente.

Se puede observar que el predictor se encuentra anidado por las ramas propias del ADRC, pero su entrada se encuentra fuera de éste. De este modo, se elimina en el ADRC el efecto producido por retardo del sistema, y el predictor no se ve influenciado por la perturbación ni su compensación.

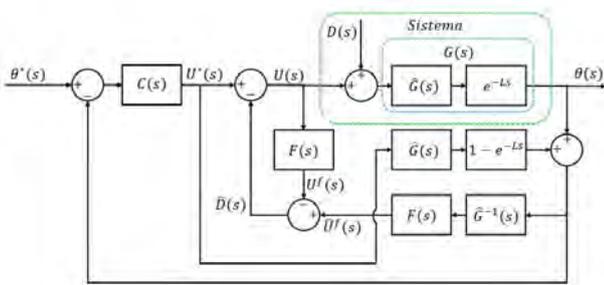


Figura 4: Esquema de control ADRC combinado con predictor de Smith.

Se propone un regulador $C(s)$ sin parte integral, ya que el polo en el origen del sistema $G(s)$ ya actúa como integrador. Según las especificaciones, no es necesario modificar la dinámica del sistema para disminuir el tiempo de establecimiento en un valor concreto, únicamente se busca que éste sea rápido. Por

este motivo, se calcula el máximo valor de ganancia proporcional posible que no incurra en sobreoscilaciones. El resultado es un regulador P de la forma:

$$C(s) = \frac{B_0^2}{4 \cdot A_0} \quad (4)$$

que hace que el sistema nominal en cadena cerrada sea críticamente amortiguado.

2.4. Control de no-linealidades

Si se desea aplicar este esquema en un sistema real, es necesario tener en consideración más aspectos que los asumidos a nivel ideal, como las no-linealidades. Se tienen en cuenta saturación, fenómenos de rozamiento (estático o zona muerta y rozamiento de Coulomb) y la resolución de los decodificadores de posición.

La Figura 5 muestra el esquema de control definitivo implementado en el prototipo. La tensión de saturación y la resolución de decodificadores son datos conocidos, puesto que son aportados por el fabricante, y se incluyen en el esquema en los bloques llamados *SAT* y *ENC*, respectivamente. Los valores de tensión que definen los límites de rozamiento permiten modelizar estos fenómenos de rozamiento, y se incluyen en el esquema con el bloque denominado *NL*.

Para que la comparación entre señales se realice de forma correcta, se tiene en cuenta además otra saturación sobre la señal $U(s)$, para que su diferencia con la señal $\hat{U}^f(s)$ se calcule en condiciones similares.

Con el fin de contrarrestar el efecto de estas no-linealidades, se incluye en el esquema un conjunto de compensadores, llamados *COMP* en el esquema, que contrarrestan los efectos del rozamiento, actuando sobre la señal $U(s)$, y sobre la estimación de la perturbación, $\hat{D}(s)$. Estos compensadores incluyen la definición de una banda de error de ± 2 pulsos, que equivalen a $\pm 0,042$ rad, que hacen que la señal de error sea nula si la posición angular se encuentra dentro de la banda. De esta forma se evita que el motor oscile alrededor de la referencia por el efecto que introduce la zona muerta del motor y su compensación. En 5 se define matemáticamente el conjunto compensadores,

$$V_c(t) = \begin{cases} V_c(t - T_s), & |e(t)| \leq e_{min} \\ V_r^s \cdot \text{sign}(V_I(t)), & |e(t)| \geq e_{min} \text{ y } |V_I(t)| + V_r^k \leq V_f^s \\ V_I(t) + V_r^k \cdot \text{sign}(V_I(t)), & |e(t)| \geq e_{min} \text{ y } |V_I(t)| + V_r^k \geq V_f^s \end{cases} \quad (5)$$

donde $V_I(t)$ es la tensión que entra al compensador, $V_c(t)$ es la tensión que sale de él, V_r^s es la tensión equivalente al rozamiento estático (límite de zona muerta), V_r^k es la tensión equivalente al rozamiento de Coulomb, $e(t)$ la señal de error, e_{min} el ancho de la banda de error (2 pulsos), y T_s el tiempo de muestreo.

3. Simulaciones y resultados experimentales

En este apartado se muestran los resultados de las simulaciones y de los experimentos realizados con el prototipo robótico.

Los valores de los parámetros del modelo se han identificado en (Merida et al., 2023), y se incluyen en la Tabla 1.

los motores y/o pérdidas de adherencia debidas a aceleraciones elevadas, se establece una señal de consigna que alcanza su valor final de forma suave, limitando la velocidad y aceleración máximas. La trayectoria definida para aplicar en los experimentos realizados es la representada en la Figura 8, donde se muestran la evolución de la posición, velocidad y aceleración angulares frente al tiempo. Esta referencia es equivalente a un desplazamiento de $0,70\text{ m}$, con valores de velocidad y aceleración máximas de $0,1\text{ m/s}$ y $0,2\text{ m/s}^2$, respectivamente.

La perturbación aplicada durante la fase experimental es la misma que la definida y aplicada en (Mehallel et al., 2024), que consiste en disponer al prototipo sobre una plataforma inclinada arrastrando un lastre, de manera que la perturbación que éste soporta sea constante y debida a la inclinación de la rampa y al peso total del sistema más el lastre, según la Figura 9. En este caso, se aplica en el momento en el que el robot comienza su movimiento, cuando se separa del apoyo que lo sujeta mientras se encuentra parado.

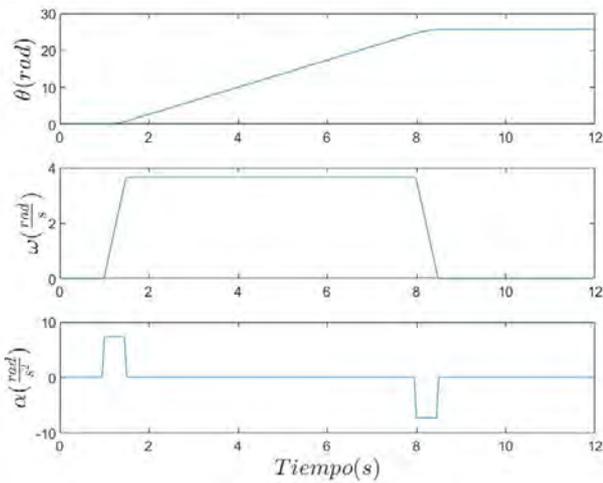


Figura 8: Señal de referencia para los experimentos realizados

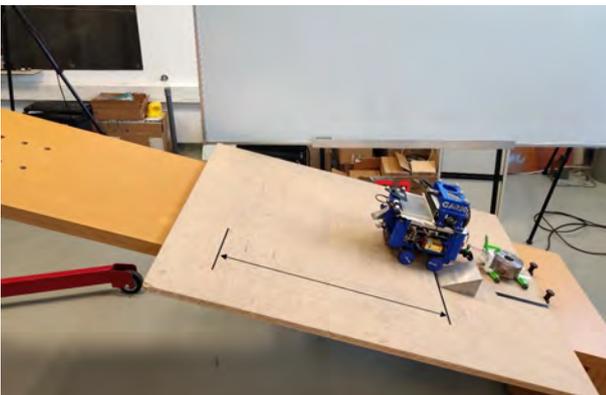


Figura 9: Preparación experimental

En la Figura 10 se muestran las señales registradas de un experimento aplicando esta señal de referencia y se comparan con una simulación que ofrece el modelo con el esquema de control. En ella se muestra la posición angular de los cuatro motores de las ruedas (denominados *BR*, *BL*, *FR* y *FL* por su disposición en el robot), y la señal de tensión que se les aplica.

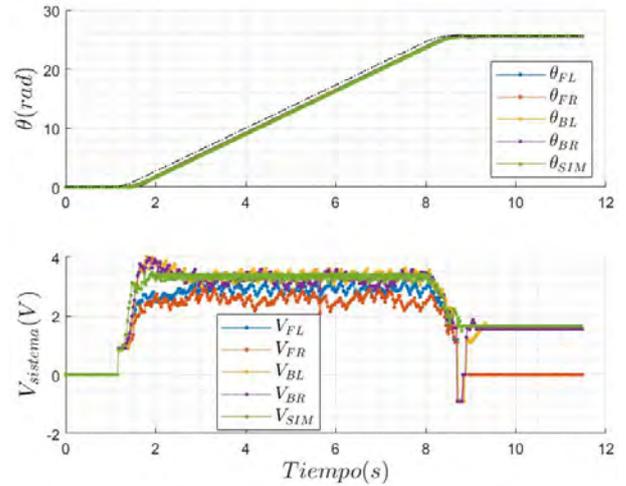


Figura 10: Resultados experimentales: comparación con simulación.

Se puede observar que la posición angular simulada se comporta de forma muy fidedigna con respecto a los resultados experimentales: las señales de posición angular de los cuatro motores de las ruedas son idénticas a la obtenida mediante simulación. El ajuste entre las señales se mide mediante la raíz del error cuadrático medio, siendo su valor medio entre todas las réplicas realizadas de $RMS E = 0,1027\text{ rad}$ o, en formato porcentual, $RMS PE = 0,4\%$. Esto permite concluir que, además de que el esquema propuesto cumple las especificaciones impuestas, aspectos como las no-linealidades se encuentran bien identificados.

Con respecto a la señal de tensión aplicada a cada uno de los motores, se observa que los motores pertenecientes a las ruedas traseras son alimentados con una señal de tensión similar a la simulada, mientras que las ruedas delanteras son alimentadas con menos tensión. Esto se debe a que existe transferencia de carga, y el eje delantero soporta menos carga que el trasero.

4. Conclusiones

Con este trabajo se ha conseguido una novedosa formulación del esquema *ADRC* con una interconexión original de los bloques de dicho *ADRC* con los del predictor de Smith. El diseño de esquemas complejos de control que realicen varias funciones a partir de esquemas más sencillos es una posibilidad real, y este trabajo es un ejemplo de ello. El esquema planteado cumple satisfactoriamente las especificaciones impuestas, siendo capaz de eliminar los aspectos que dificultaban el control. En concreto, ha demostrado ser capaz de eliminar los efectos en el posicionamiento del robot móvil de perturbaciones tipo escalón en la entrada - como puedan ser las pendientes desconocidas del terreno - minimizando la degradación producida en la respuesta transitoria por el retardo inducido por el hardware. Esta investigación plantea algunas posibles líneas de trabajo futuro, como pueda ser la realización de una versión discreta del esquema.

Agradecimientos

Este trabajo es fruto del Proyecto PID2022-141409OB-C21 financiado por MCIN/AEI /10.13039/501100011033 / FE-

DER, UE Una manera de hacer Europa y de la beca PRE2020-095222.

Referencias

- Feliu, V., Castillo, C. F., 2017. Improved object detection using a robotic sensing antenna with vibration damping control. *Sensors*.
DOI: 10.3390/s17040852
- Han, J., 1998. Active disturbance rejection controller and its applications. *Control and Decision*.
- Haro, M. I., Mérida, L., Benfima, S., Gharab, S., Feliu, V., 2023. Modelado de un sistema háptico móvil basado en antenas flexibles. *XLIV Jornadas de Automática 2023*.
- Jin, Q., Cai, W., Du, X., 2020. Improved disturbance observer-based control for multivariable processes with time delays based on modified inverse model. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*.
- Mehallel, A., Mérida, L., Rivas, R., Feliu, V., 2024. A new smith predictor motor control system to reduce disturbance effects caused by unknown terrain slopes in mobile robots. *Actuators*.
- Merida, L., San-Millán, A., Ramos, F., Feliu, V., 2023. Advanced motor control for improving the trajectory tracking accuracy of a low-cost mobile robot. *Machines*.
- Ohnishi, K., Shibata, M., Murakami, T., 1996. Motion control for advanced mechatronics. *IEEE*.
DOI: 10.1109/3516.491410
- Ran, M., Wang, Q., Dong, C., 2017. Active Disturbance Rejection Control for Uncertain Nonaffine-in-Control Nonlinear Systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*.
DOI: 10.1109/TAC.2016.2641980
- Smith, O., 1959. A controller to overcome dead time. *ISA J*.



Simposio de Robótica, Bioingeniería y Visión por Computador 2024



Sesion: <Robótica>

Evaluación de un sensor de deformación basado en una matriz polimérica de poliuretano termoplástico (TPU) aditivado con partículas de base carbono

Sánchez, Claudia^{a,*}, Rodríguez del Rosario, Daniel^b, Mena, Lisbeth^a, Monje, Concepción A.^a, Otero, Susana^b

^aDepartamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, RoboticsLab, Universidad Carlos III de Madrid, Av. de la Universidad, 30, 28911 Leganés, Madrid, España.

^bDepartamento de Ingeniería, Instituto Tecnológico del Plástico, València Parc Tecnològic, Calle Gustave Eiffel 4, 46980 Paterna, Valencia, España

To cite this article: Sánchez, Claudia, Rodríguez del Rosario, Daniel José, Mena, Lisbeth, Monje, Concepción A., Otero, Susana. 2024. Evaluation of a strain sensor based on a thermoplastic polyurethane (TPU) polymeric matrix enhanced with carbon-based particles.

Simposio de Robótica, Bioingeniería y Visión por Computador, 2024, 1-5. <https://doi.org/>

Resumen

En las últimas décadas, la convergencia del desarrollo de la impresión 3D y los avances en nanotecnología ha generado una revolución significativa en la fabricación de sensores flexibles con excelentes propiedades electromecánicas. Sin embargo, a pesar de su elevada flexibilidad y adaptabilidad, estos sensores ven limitada su sensibilidad para amplios rangos de trabajo afectando su aplicabilidad. Este estudio se centra en la evaluación de un sensor de deformación flexible impreso en 3D utilizando un material compuesto por una matriz polimérica de poliuretano termoplástico (TPU) aditivado con partículas de base carbono. Se llevaron a cabo pruebas estáticas y dinámicas para caracterizar el rendimiento electromecánico del sensor demostrándose linealidad en el rango del 1 % al 5 %, pero se observó no linealidad e histéresis a mayores deformaciones. La sensibilidad fue evaluada en un rango de trabajo probable de 1 % a 10 %, obteniéndose un factor de galga de 1.506. La repetibilidad se demostró mediante pruebas cíclicas, destacando la consistencia de la respuesta eléctrica en el tiempo como una de las principales ventajas de este sensor flexible.

Palabras clave: Sensor flexible, Materiales avanzados, Fabricación avanzada, Robótica blanda.

Evaluation of a printed strain sensor based on silver nanocomposites on a flexible thermoplastic polyurethane (TPU) substrate

Abstract

In recent decades, the convergence of 3D printing development and advancements in nanotechnology has led to a significant revolution in manufacturing flexible sensors with excellent electromechanical properties. However, despite their high flexibility and adaptability, these sensors face limitations in sensitivity across broad working ranges, affecting their applicability. This study evaluates a 3D-printed flexible deformation sensor using a composite material of a thermoplastic polyurethane (TPU) polymer matrix enhanced with carbon-based particles. Static and dynamic tests were conducted to characterize the electromechanical performance of the sensor, demonstrating linearity in the range of 1 % to 5 %. However, non-linearity and hysteresis were observed at higher deformations. Sensitivity was evaluated in a probable working range of 1 % to 10 %, resulting in a gauge factor (GF) of 1.506. Repeatability was demonstrated through cyclic tests, highlighting the consistency of the electrical response over time as a key advantage of this flexible sensor.

Keywords: Flexible sensor, Advanced materials, Advanced manufacturing, Soft robotics.

*Autor para correspondencia: clausanc@ing.uc3m.es

1. Introducción

Durante las últimas décadas, la impresión 3D ha transformado radicalmente la concepción y fabricación convencional de dispositivos electrónicos. Conocida también como fabricación aditiva, esta tecnología se basa en la deposición de cordones de material fundido en sucesivas capas hasta conformar totalmente el objeto, lo cual la hace idónea para la producción de elementos geoméricamente complejos en un tiempo considerablemente más corto en comparación con los métodos de fabricación tradicionales. En consecuencia, en los últimos años, han surgido numerosas técnicas de impresión 3D que han aportado de manera significativa no solo a la fabricación de componentes mecánicos, sino también al desarrollo de componentes electrónicos y sensores (Khosravani and Reinicke, 2020), (Xu et al., 2017), (Song et al., 2023).

El avance tecnológico actual ha desencadenado una transformación de los sensores tradicionales, llevándolos hacia nuevas posibilidades en términos de versatilidad y adaptabilidad en diversas aplicaciones. Esta evolución ha dado lugar a la creación de los sensores flexibles, en cuya fabricación se emplean materiales maleables y dúctiles que, debido a su naturaleza y estructura, confieren al sensor una flexibilidad excepcional. La destacada capacidad de los sensores flexibles para captar señales de manera accesible, combinada con su fabricación eficiente en costos, ha propiciado un aumento significativo en su utilización en campos como la robótica blanda, la electrónica vestible y los dispositivos destinados al monitoreo de la salud (Yang et al., 2018), (Ma et al., 2021).

Son diversos los materiales que se emplean para desarrollar sensores flexibles, sin embargo el poliuretano termoplástico (TPU) es ampliamente utilizado debido a su comportamiento similar al elastómero, excelente flexibilidad y facilidad para combinarse con aditivos conductores. Estas propiedades son idóneas para satisfacer la cada vez más demandante necesidad de desarrollar sensores flexibles con mayor capacidad de deformación y estiramiento, así como una mayor sensibilidad y un rango de trabajo más amplio (Chen et al., 2021). Estos sensores, dependiendo de su mecanismo de funcionamiento, se pueden clasificar en capacitivos y resistivos, siendo estos últimos aquellos en los que el TPU se combina con aditivos conductivos logrando así cambios en la resistividad a causa de estímulos externos. La combinación de las excelentes propiedades eléctricas de los materiales conductores y la elevada ductilidad y elasticidad del TPU da lugar a sensores de deformación óptimos para diversas aplicaciones como el monitoreo de diferentes movimientos del cuerpo humano, la adquisición de señales fisiológicas, el desarrollo de electrónica vestible o la sensorización de robots blandos, entre otros (Lin et al., 2021), (Li et al., 2021), (Chen et al., 2021).

Son muchos los aditivos/partículas conductores que se embeben en TPU; polímeros conductivos, nanopartículas metálicas y materiales de carbono destacan entre los más utilizados por sus propiedades mecánicas y conductivas. Particularmente los nanomateriales basados en carbono muestran un potencial excepcional en el desarrollo de sensores de deformación flexibles Yan et al. (2018). En Xiang et al. (2019) se utilizaron nanotubos de carbono y TPU para desarrollar un sensor de deformación altamente flexible mediante modelado por deposición

fundida (FDM). El sensor propuesto ofrece capacidad de deformación de hasta el 250 % con un factor de galga muy elevado lo cual lo hace idóneo para monitorear movimientos corporales y para aplicaciones en robótica y dispositivos electrónicos portátiles. También Li et al. (2022) mezcló partículas de carbón negro (CBPs) como relleno conductor y TPU como polímero elástico para crear filamentos compuestos exclusivamente para su uso en FDM. Mediante esta técnica de impresión 3D obtuvieron y evaluaron para distintos valores de deformación varios sensores flexibles con configuraciones periódicas. Destacan con los mejores resultados los que tienen forma de zigzag semejan-do una letra S que mostraron los mejores resultados enfocados a la monitorización de la salud humana. Igualmente en Hohimer et al. (2020) se estudia la conductividad y la capacidad de detección piezorresistiva de muestras impresas utilizando fabricación de filamentos fundidos (FFF). Fabricados con compuestos flexibles de TPU y nanotubos de carbono de paredes múltiples (MWCNT) estos sensores mostraron un comportamiento conductivo repetitivo aplicable a actuadores robóticos blandos.

Sin embargo, a pesar de los avances y los excelentes resultados obtenidos en cuanto a propiedades electromecánicas de estos materiales, sigue siendo un reto significativo lograr sensores flexibles con una elevada sensibilidad en un alto rango de trabajo. En consecuencia, el Instituto Tecnológico del Plástico (AIMPLAS) ha desarrollado un sensor de deformación flexible utilizando un material compuesto de por una matriz polimérica de TPU aditivado con partículas de base carbono (Figura 1) con el objeto de contribuir a la mejora del estado del arte en este campo. En este trabajo se analiza y evalúa el rendimiento electromecánico de estos sensores de deformación flexible impresos en 3D, con énfasis en su capacidad para responder a deformaciones y en consecuencia su adaptabilidad en diversas aplicaciones. El estudio se centra en la caracterización del sensor buscando proporcionar una comprensión integral de su potencial y sus limitaciones, con el fin de avanzar en el conocimiento de la fabricación de sensores flexibles y su aplicabilidad práctica en campos como la robótica blanda, la electrónica vestible y el monitoreo de la salud.



Figura 1: Muestra de sensor flexible fabricado por AIMPLAS.

2. Metodología

2.1. Sensor de deformación flexible

El sensor de deformación flexible se fabricó utilizando un filamento conductivo compuesto por una matriz polimérica de TPU aditivado con partículas de base carbono desarrollado por AIMPLAS, seleccionado por su capacidad para proporcionar

conductividad eléctrica y flexibilidad adecuadas a la necesidad requerida.

Diseño del Sensor: Se diseñó el sensor de deformación flexible utilizando software de diseño asistido por computadora (CAD), considerando las especificaciones necesarias para la detección precisa de deformaciones y ajustándolo a los requerimientos para su posterior medición en pruebas de ensayo. Las muestras se diseñaron con unas dimensiones de 50x1x10 mm. Se incorporaron extremos delgados en ambos lados de la probeta de 10x2x1 mm, con el propósito de realizar las pertinentes conexiones para medición de resistencia eléctrica y garantizar una respuesta eficiente a diferentes tipos de deformación.

Configuración de la Impresora 3D: Se estableció una configuración adecuada para asegurar una deposición precisa del material y una adhesión óptima entre las capas, así como una homogeneidad en todo el volumen del sensor. Requerimiento necesario para asegurar una transmisión de la conductividad similar en toda la sección del sensor. Los parámetros de impresión se ajustaron de acuerdo a lo descrito en la Tabla 1.

Tabla 1: Parámetros de impresión

Parámetro	Valor
Diámetro de boquilla	0,8 mm
Altura de capa	0,2 mm
Ancho de línea	0,96 mm
Densidad de relleno	100 %
Temperatura de impresión	220°C
Temperatura de la base	45°C
Velocidad de impresión	20 mm/s

Fabricación del Sensor: Se procedió a la fabricación del sensor mediante la impresión 3D del diseño previamente elaborado mediante una impresora 3D de deposición de material fundido (FDM) Ultimaker 3 Extend. Durante el proceso de impresión, se supervisó la calidad para detectar posibles defectos y garantizar la integridad estructural del sensor.

Post-procesamiento: Tras la fabricación, se realizó un proceso de post-procesamiento que incluyó la eliminación de posibles defectos inherentes al proceso de impresión y el acondicionamiento superficial para mejorar la uniformidad y la resistencia del sensor, así como retirada de material superficial generado por desviaciones dimensionales en la expansión del material o ajuste de parámetros de impresión. Esta precisión dimensional es de vital importancia ya que puede ocasionar desviaciones y pérdida de repetitibilidad en la fabricación de sensores con una conductividad eléctrica similar.

Este enfoque metodológico permitió la fabricación de sensores de deformación flexible impresos en 3D con el filamento conductivo desarrollado por AIMPLAS. Estos sensores tienen el potencial de contribuir al avance en el campo de la electrónica flexible y su aplicabilidad en áreas como la robótica blanda, la electrónica flexible y el campo de la salud.

2.2. Condiciones Experimentales

En el marco del presente estudio se utilizaron dos muestras del sensor suministradas por AIMPLAS, con una geometría rectangular de 50x1x10 mm. Para realizar los experimentos, el sensor se sujetó a un banco de pruebas de fabricación propia,

que consiste en un tornillo de avance conectado a un motor paso a paso NEMA 17 cuya velocidad, dirección y posición fueron controladas utilizando un controlador A4988 (ver Figura 2). Los datos de resistencia se recolectaron utilizando un multímetro digital Hewlett Packard 34401A (Keysight Technologies, Santa Rosa, CA, EE.UU.). Para reducir al máximo los errores de medición causados por la resistencia de las sondas de pruebas, el multímetro se configuró para realizar mediciones de resistencia a 4 hilos. Simultáneamente, se registraron los datos de desplazamiento a través de un sensor de posición magnético incremental lineal AS5311 de ams OSRAM integrado en el banco de pruebas. Ambos datos, posición y resistencia, fueron enviados a una computadora en tiempo real y una vez recogidos se procesaron en MatlabR2023b (MathWorks, Inc., Natick, MA, USA).

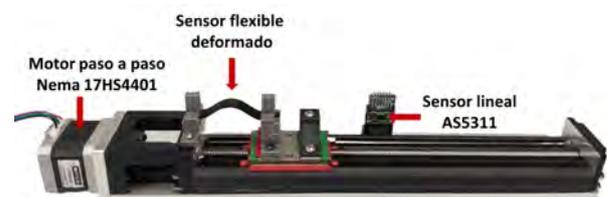


Figura 2: Banco de pruebas de materiales empleado para realizar las pruebas estáticas y dinámicas del sensor.

Se realizaron pruebas estáticas y dinámicas a temperatura ambiente, deformando el sensor en una sola dirección como se aprecia en la Figura 2.

Las pruebas estáticas se realizaron deformando el sensor ocho valores igualmente espaciados desde el 5 % hasta el 40 %, y la variación de resistencia fue medida durante dos minutos. Para evaluar el comportamiento del sensor bajo condiciones normales, se repitieron las pruebas estáticas tres veces para cada valor de deformación y se consideraron la media y la desviación estándar.

Por otra parte, las pruebas dinámicas se realizaron para los mismos valores de deformación que se emplearon para las pruebas estáticas, pero en este caso manteniendo una velocidad de deformación constante de 0.25 mm/s con la que fue posible obtener un elevado número de muestras durante cada ciclo. Para cada valor de deformación, las pruebas fueron repetidas tres veces y se consideró la media para evaluar los resultados. Adicionalmente, se realizaron otras pruebas dinámicas cíclicas para tener información sobre la respuesta temporal del sensor y otras propiedades.

2.3. Indicadores de Evaluación del Rendimiento

Varias propiedades electromecánicas de la respuesta del sensor fueron analizadas con el objetivo de evaluar mejor su rendimiento, las cuales se definen de la siguiente manera (Colli Alfaro and Trejos, 2023), (Bozali et al., 2022):

Linealidad: se refiere a la capacidad del sensor para mantener una relación constante entre el cambio en su resistencia y el cambio correspondiente en la deformación a la que está sometido. Se expresa a través del coeficiente de determinación R^2 , cuyo valor indica mayor linealidad cuanto más cercano a 1 sea.

Sensibilidad: en el caso de un sensor de deformación resistivo, esta métrica indica cuánto cambia la resistencia con respecto a una deformación aplicada. La forma de representar esta propiedad es el Factor de Galga (GF), expresado mediante la siguiente ecuación:

$$GF = \frac{\Delta R}{R_0 \cdot \epsilon} \quad (1)$$

donde ΔR es el cambio en la resistencia, R_0 es la resistencia inicial y ϵ representa la deformación que provoca un cambio en la longitud del sensor y se calcula de la siguiente manera:

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2)$$

donde ΔL es la longitud del sensor bajo la condición de deformación y L_0 indica la longitud inicial del sensor antes de la deformación.

Repetibilidad: esta propiedad permite conocer la capacidad del sensor para mantener su respuesta eléctrica original a lo largo de un cierto número de ciclos y/o ante distintas deformaciones.

Reproducibilidad: es una propiedad que se asocia con la capacidad que tiene un sensor de responder de la misma forma al analizar diferentes muestras.

3. Resultados y Discusión

Para lograr una comprensión más clara de la respuesta del sensor a las deformaciones aplicadas durante las pruebas estáticas y dinámicas todas las gráficas que reflejan los cambios de la resistencia se presentan de forma normalizada. La curva de calibración obtenida como resultado de las pruebas realizadas al sensor en condiciones estáticas se muestra en la Figura 3. Teniendo en cuenta que se realizaron tres pruebas estáticas, se obtuvo la media de la resistencia eléctrica para cada valor de deformación aplicado.

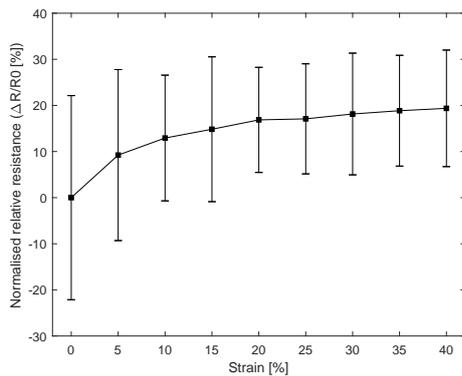


Figura 3: Curva de calibración estática en un rango de 0% a 40% de deformación. La media y la desviación estándar (barras) se muestran como resultado de las tres pruebas realizadas.

La respuesta del sensor a las deformaciones se representa mediante la normalización de la resistencia relativa demostrando un comportamiento piezorresistivo, fundamentalmente para deformaciones de 0, 5 y 10%. Además, se calculó la desviación estándar (barras) para cada valor de deformación, que alcanza un valor máximo del 22.12% para una deformación del 0%,

lo que indica una alta variabilidad en la respuesta eléctrica del sensor. Esta elevada variabilidad, fundamentalmente sin deformación alguna aplicada, podría asociarse con el proceso de fabricación, la geometría del diseño o los materiales empleados, y debe considerarse como una de las limitaciones del sensor.

En la Figura 4 se muestra la relación que ofrece el sensor entre la resistencia relativa normalizada y la deformación en condiciones dinámicas. Para deformaciones bajas el sensor exhibe un comportamiento lineal que indica una respuesta proporcional a la deformación aplicada sugiriendo que el sensor está operando en su región elástica y que en consecuencia podrá recuperarse completamente después de la deformación manteniendo una relación lineal entre la resistencia y la deformación. Sin embargo a medida que aumenta el porcentaje de deformación el sensor experimenta una transición a la deformación plástica, etapa en la cual el material puede experimentar cambios permanentes en su estructura afectando la relación entre la resistencia y la deformación de manera no lineal. Otro de los aspectos a destacar es la presencia de histéresis, el sensor exhibe diferencias notables en su respuesta al ciclo de carga y descarga, lo que puede deberse a fenómenos como la relajación del material o la presencia de efectos viscoelásticos.

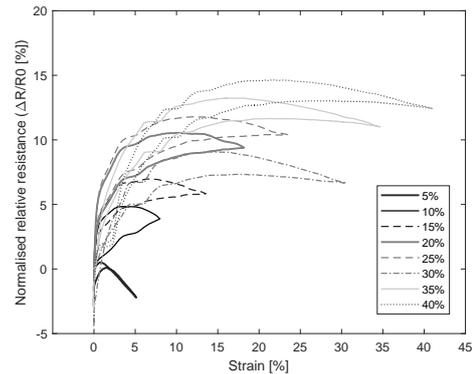


Figura 4: Curva de calibración dinámica en un rango de 5% a 40% igualmente espaciado a una velocidad constante de 0.25 mm/s. Para cada valor de deformación se realizaron tres repeticiones y se muestra la media de cada uno.

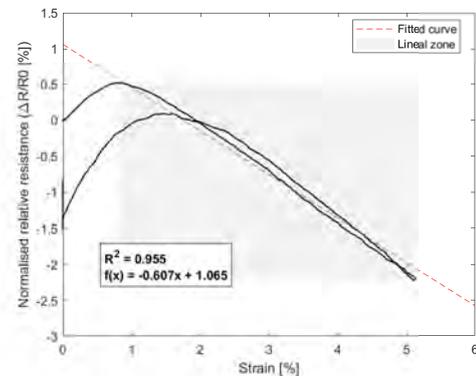


Figura 5: Curva de calibración dinámica para un 5% de deformación dinámica. Se muestran en el cuadro de texto los parámetros correspondientes a los ajustes polinomiales de primer orden realizados en la zona lineal.

Basados en los resultados obtenidos de las pruebas dinámicas, se analizaron diversas propiedades del sensor. La linealidad

del sensor se estudió para cada una de las deformaciones destacando un comportamiento altamente lineal, específicamente monótono decreciente, para deformaciones en el rango del 1% al 5%, como se muestra en la Figura 5. Sin embargo, la precisión mostrada por el excelente ajuste de los resultados ($R^2 = 0.955$) no se mantiene para deformaciones fuera de este rango, en las cuales la linealidad se ve afectada por la limitada variación de la resistencia a causa de la transición a la deformación plástica que sufre el material.

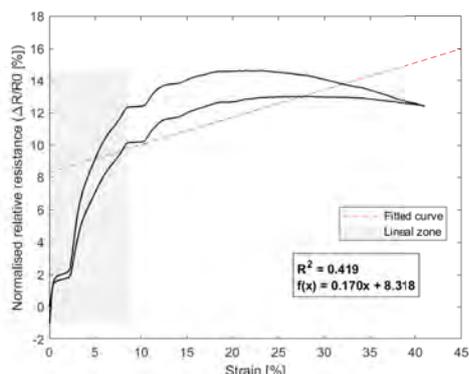


Figura 6: Curva de calibración dinámica para un 40% de deformación dinámica. Se muestran en el cuadro de texto los parámetros correspondientes a los ajustes polinomiales de primer orden realizados en la zona lineal.

De acuerdo con lo planteado en (De Focatiis et al., 2012), se considera conveniente utilizar la ecuación (2) cuando se trata de sistemas lineales. Por tanto, la sensibilidad del sensor se analizó para el 10% de deformación correspondiente al rango de trabajo probable y los resultados se muestran en la Figura 7. Se realizó una prueba de 10 ciclos y se obtuvo el promedio de la resistencia relativa normalizada para las deformaciones al 1%, 3%, 5%, 7% y 9%, obteniéndose un GF de 1.506, lo que representa una sensibilidad del 1.5% de cambio en la resistencia por cada 2 mm de deformación con un coeficiente de correlación de 0.953. De igual forma se obtuvo la desviación estándar, siendo el valor máximo 4.76 para un 3% de deformación, lo cual mejora notablemente la variabilidad de los datos respecto a las pruebas estáticas realizadas.

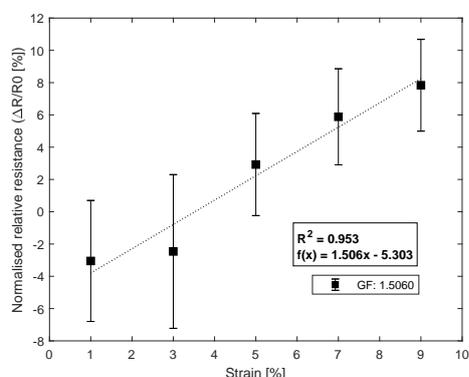


Figura 7: Representación gráfica del Factor de Galga. Se muestran en el cuadro de texto los parámetros correspondientes a los ajustes polinomiales de primer orden realizados

La repetibilidad de la muestra se evaluó realizando pruebas

cíclicas que demostraron que el sensor mantenía la misma respuesta eléctrica en el tiempo a determinadas deformaciones. En la Figura 8 se muestra la variación de la resistencia relativa normalizada durante tres ciclos de deformaciones del 5% al 40%, destacando la consistencia de los valores máximos y mínimos de la variación de resistencia en cada ciclo.

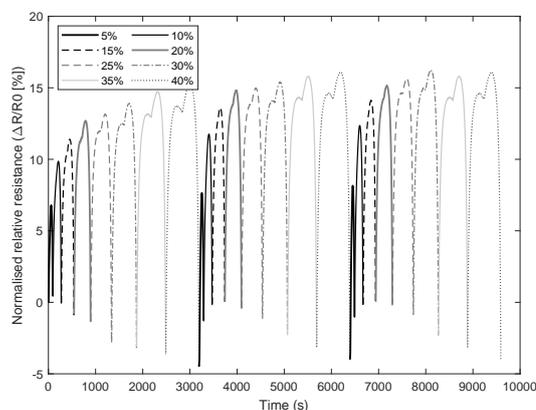


Figura 8: Respuesta eléctrica temporal del sensor durante tres ciclos de deformaciones variables.

Por otra parte, la Figura 9 muestra la respuesta eléctrica de diferentes muestras del sensor para 30 ciclos de 10% de deformación. A partir de estos resultados se puede observar que la resistencia inicial de cada muestra del sensor se desplaza hacia arriba en cada ciclo, siendo más pronunciado este comportamiento en el Sensor 2, que alcanza valores cercanos al 15% de su valor inicial de resistencia, mientras el Sensor 1 parece estabilizar alrededor del ciclo 25. Sin embargo, se debe destacar que el comportamiento observado en las pruebas dinámicas se produce en ambas muestras y no cambia con el aumento del número de ciclos, lo cual sugiere buena reproducibilidad, una ventaja deseable para la producción a gran escala de sensores.

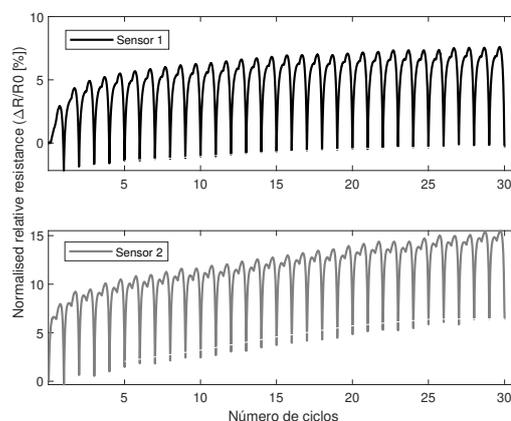


Figura 9: Respuesta eléctrica de dos muestras del sensor ante una deformación del 10% durante 30 ciclos.

4. Conclusiones

El estudio del sensor de deformación flexible fabricado por AIMPLAS revela un comportamiento lineal en el rango del 1%

al 5%, lo cual indica su idoneidad para aplicaciones que requieren mediciones precisas en deformaciones moderadas. Este comportamiento lineal sugiere que el sensor puede proporcionar mediciones confiables y repetibles en aplicaciones donde las deformaciones se mantienen dentro de este intervalo. Este aspecto, sumado a los datos de sensibilidad obtenidos, es particularmente valioso en campos como la robótica blanda, donde la capacidad de detectar y responder a cambios sutiles en la deformación de los materiales es esencial para lograr movimientos robustos y seguros, entre otros.

Sin embargo, a medida que las deformaciones aumentan, se observa un comportamiento no lineal y la presencia de histéresis en el sensor. Este hallazgo sugiere limitaciones en su capacidad para mantener una relación constante entre la deformación aplicada y la respuesta eléctrica en regiones de deformación más elevadas. En consecuencia, se recomienda cautela al considerar este sensor para aplicaciones que implican deformaciones superiores al 10%, ya que la no linealidad significativa y la presencia de histéresis podría afectar la precisión de las mediciones en estos rangos.

Se plantea entonces como trabajo futuro optimizar los materiales y el diseño del sensor para abordar así estas limitaciones y mejorar la sensibilidad en un mayor rango de trabajo, lo cual sigue siendo el reto principal en este tipo de sensores. Además, se debe valorar la posible integración del sensor en determinados sistemas destinados a aplicaciones biomédicas o robóticas, para evaluar su rendimiento en contextos más prácticos.

AIMPLAs ha desarrollado un sensor de deformación flexible que, aunque presenta áreas de mejora y refinamiento, muestra atributos prometedores que demuestran la importancia de la investigación continua en este campo.

Agradecimientos

La investigación que ha conducido a estos resultados está parcialmente financiada por los proyectos SOFIA, con referencia PID2020-113194GB-I00, financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033; ADAPTA, con referencia PLEC2023-010218, financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033; y por los proyectos financiados por el Instituto de Competitividad Empresarial (IVACE) dentro de la línea nominativa concedida a la Asociación de Investigación de Materiales Plásticos y Conexas (AIMPLAS) para apoyar su actividad en materia de I+D independiente, difusión de resultados de investigación y transferencia de conocimiento y tecnología a las empresas de la Comunitat Valenciana. (Expediente IMAMCA/2023/4).

Referencias

- Bozali, B., Ghodrati, S., Plaude, L., van Dam, J. J., Jansen, K. M., 10 2022. Development of Low Hysteresis, Linear Weft-Knitted Strain Sensors for Smart Textile Applications. *Sensors* 22 (19).
DOI: 10.3390/s22197688
- Chen, T., Xie, Y., Wang, Z., Lou, J., Liu, D., Xu, R., Cui, Z., Li, S., Panahi-Sarmad, M., Xiao, X., 11 2021. Recent Advances of Flexible Strain Sensors Based on Conductive Fillers and Thermoplastic Polyurethane Matrixes. *ACS Applied Polymer Materials* 3 (11), 5317–5338.
DOI: 10.1021/acscapm.1c00840
- Colli Alfaro, J. G., Trejos, A. L., 1 2023. Design and Fabrication of Embroidered Textile Strain Sensors: An Alternative to Stitch-Based Strain Sensors. *Sensors* 23 (3), 1503.
DOI: 10.3390/s23031503
- De Focatiis, D. S., Hull, D., Sánchez-Valencia, A., 9 2012. Roles of prestrain and hysteresis on piezoresistance in conductive elastomers for strain sensor applications. *Plastics, Rubber and Composites* 41 (7), 301–309.
DOI: 10.1179/1743289812Y.0000000022
- Hohimer, C. J., Petrossian, G., Ameli, A., Mo, C., Pötschke, P., 2020. 3D printed conductive thermoplastic polyurethane/carbon nanotube composites for capacitive and piezoresistive sensing in soft pneumatic actuators.
DOI: 10.1016/j.addma.2020.101281
- Khosravani, M. R., Reinicke, T., 2020. 3D-printed sensors: Current progress and future challenges. *Sensors and Actuators A* 305, 111916.
DOI: 10.1016/j.sna.2020.111916
- Li, B., Zhang, S., Zhang, L., Gao, Y., Xuan, F., 2 2022. Strain sensing behavior of FDM 3D printed carbon black filled TPU with periodic configurations and flexible substrates. *Journal of Manufacturing Processes* 74, 283–295.
DOI: 10.1016/J.JMAPRO.2021.12.020
- Li, S., Li, R., Gelis González, O., Chen, T., Xiao, X., 2021. Highly sensitive and flexible piezoresistive sensor based on c-MWCNTs decorated TPU electrospun fibrous network for human motion detection. *Composites Science and Technology* 203, 108617.
DOI: 10.1016/j.compscitech.2020.108617
- Lin, L., Choi, Y., Chen, T., Kim, H., Lee, K. S., Kang, J., Lyu, L., Gao, J., Piao, Y., 2021. Superhydrophobic and wearable TPU based nanofiber strain sensor with outstanding sensitivity for high-quality body motion monitoring. *Chemical Engineering Journal* 419, 1385–8947.
DOI: 10.1016/j.cej.2021.129513
- Ma, L., Xia, T., Yu, R., Lei, X., Yuan, J., Li, X., Cheng, G. J., Liu, F., 10 2021. A 3D-Printed, Sensitive, Stable, and Flexible Piezoresistive Sensor for Health Monitoring. *Advanced Engineering Materials* 23 (10), 2100379.
DOI: 10.1002/ADEM.202100379
- Song, D., Chen, X., Wang, M., Wu, Z., Xiao, X., 2023. 3D-printed flexible sensors for food monitoring. *Chemical Engineering Journal* 474, 1385–8947.
DOI: 10.1016/j.cej.2023.146011
- Xiang, D., Zhang, X., Li, Y., Harkin-Jones, E., Zheng, Y., Wang, L., Zhao, C., Wang, P., 2019. Enhanced performance of 3D printed highly elastic strain sensors of carbon nanotube/thermoplastic polyurethane nanocomposites via non-covalent interactions.
DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.107250
- Xu, Y., Wu, X., Guo, X., Kong, B., Zhang, M., Qian, X., Mi, S., Sun, W., 5 2017. The Boom in 3D-Printed Sensor Technology. *Sensors* 17 (5), 1166.
DOI: 10.3390/s17051166
- Yan, T., Wang, Z., Pan, Z.-J., 2018. Flexible strain sensors fabricated using carbon-based nanomaterials: A review.
DOI: 10.1016/j.cossms.2018.11.001
- Yang, H., Leow, W. R., Chen, X., 1 2018. 3D Printing of Flexible Electronic Devices. *Small Methods* 2 (1).
DOI: 10.1002/SMTD.201700259



Simposio de Robótica, Bioingeniería y Visión por Computador 2024



Protocolo de navegación y reconocimiento de un sistema háptico móvil basado en antenas flexibles

Mérida-Calvo, Luis^{a,*}, Haro-Olmo, María Isabel^a, Benftima, Salma^{a,b}, Gharab, Saddam^{a,c}, Feliu-Batlle, Vicente^c

^a*Instituto de Investigaciones Energéticas y Aplicaciones Industriales, 13005 Ciudad Real, Universidad de Castilla-La Mancha.*

^b*Université de Tunis El Manar, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis,*

LR11ES20 Laboratoire d'Analyse, Conception et Commande des systèmes, 1002, Tunis, Tunisie.

^c*Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial, 13001 Ciudad Real, Universidad de Castilla-La Mancha.*

Resumen

El desarrollo de sistemas de medición para dotar a los robots de mayor capacidad y autonomía es un campo de estudio en continuo avance, concretamente dentro de la robótica móvil. En los últimos años ha aumentado el interés por dotar a estos robots con sistemas táctiles basados en antenas sensoras bioinspiradas en los bigotes y antenas de animales e insectos. En este trabajo se presenta el desarrollo de un prototipo robótico que equipa una antena sensora. Se diseña un protocolo de navegación y reconocimiento háptico basado en tareas y eventos, según el cual el robot navega libremente en un entorno desconocido en busca de objetos para, una vez localizados, proceder a su reconocimiento. Se describen los algoritmos de procesamiento y control de señales implicados en su funcionamiento. También se detallan los modelos del sistema empleados para el desarrollo de estos algoritmos.

Palabras clave: Robots móviles, Percepción y sensores, Vibraciones y análisis modal, Sistemas lagrangianos y hamiltonianos, Integración y percepción de sensores, Control de movimiento.

Navigation and recognition protocol of a mobile haptic system based on flexible antennas

Abstract

The development of measurement systems to provide robots with greater capability and autonomy is a continuously advancing field of study, specifically within mobile robotics. In recent years, there has been increasing interest in equipping these robots with tactile systems based on sensing antennae inspired by the whiskers and antennae of animals and insects. This work presents the development of a robotic prototype equipped with a sensing antenna. A navigation and haptic recognition protocol based on tasks and events is designed, according to which the robot navigates freely in an unknown environment in search of objects to, once located, proceed to their recognition. The algorithms for signal processing and control involved in its operation are described. The system models employed for the development of these algorithms are also detailed.

Keywords: Mobile robots, Perception and sensing, Vibration and modal analysis, Lagrangian and Hamiltonian systems, Sensor integration and perception, Motion control.

1. Introducción

Los movimientos controlados de bigotes o antenas flexibles se conocen como 'whisking' y constituyen un reto importante de la robótica, que trata de imitar el funcionamiento de estos órganos de los animales. En la naturaleza, el sentido del tacto es un estímulo que tiene gran cantidad de funciones complejas, como: determinar texturas de superficies u objetos, su posición y forma, distinguir si algo es blando o duro, identificar si algo

se mueve, su dirección y velocidad, etc. En la Figura 1 se muestran algunos ejemplos de animales que usan estos sistemas. La información adquirida por medio de estos sensores permite localizar con precisión los objetos contactados en el espacio. Los bigotes o antenas reales dan información que ayuda a algunos animales a detectar, reconocer, seguir, y atrapar las presas con precisión y gran velocidad. En algunas especies, sobre todo las que viven bajo tierra o que cazan de noche, estos sistemas sensoriales pueden ser más importantes que los ojos.

*Autor para correspondencia: Luis.Merida@uclm.es



Figura 1: Sensores tipo antena y tipo bigote en la naturaleza

En estos sistemas sensoriales, los movimientos de los receptores, que son los encargados de detectar y adquirir información del medio, son transmitidos al otro extremo del sensor, donde existen pequeños sensores de presión dentro de folículos especializados. Para esta función, los transductores permanecen lejos de la superficie de contacto, debido a los problemas de desgaste o fractura que pueden sufrir por el contacto.

El estudio de sistemas de tacto artificiales se inició a mediados de los años ochenta. El progreso reciente ha sido motivado por los avances en la comprensión de los sistemas de vibración naturales, los avances en ingeniería, microelectrónica, sistemas de transducción y actuación. El reto de diseñar sistemas sensoriales robóticos táctiles, con las capacidades ya citadas, demuestra el gran potencial que tienen los sistemas flexibles artificiales, debido a sus características para realizar una gran cantidad de funciones y aplicaciones que incluyen la solución de problemas en la industria, tales como: aplicaciones en robótica móvil y la navegación en espacios cerrados, la navegación en lugares oscuros, la capacidad de sortear objetos, etc. Existen, además, interesantes aplicaciones de sistemas táctiles en cirugía, rehabilitación, y en robots de servicio, que han recibido recientemente mucha atención y son motivo de investigación.

Los sistemas de detección de objetos con antenas usan sensores táctiles muy sofisticados combinados con actuadores espaciales de alta precisión, que son bastante diferentes en propósito y diseño dependiendo de cada aplicación. A veces se utiliza el conocimiento de las características flexibles de varillas o barras para su diseño. Estas miden los valores de fuerza y par para determinar la posición y punto de contacto. Trabajos iniciales en esta línea fueron los de Tsujimura and Yabuta (1992). Algunos experimentos en Russell (1992) añadieron interruptores a un sensor para detectar el contacto en el extremo y la deflexión en la base. Fend et al. (2004) realizaron trabajos con antenas colocadas sobre plataformas móviles para un reconocimiento más dinámico del medio, de modo muy similar al sistema de reconocimiento que usan los ratones. Los trabajos de Kaneko and Tsuji (2000) y Russell and Wijaya (2003) describen experimentos donde el punto de contacto del sensor se establece conociendo la deflexión de una antena movida por motores con un sistema que incluye sensores de par y posición. Ueno and Kaneko (1995) presenta las ventajas de trabajar con deslizamiento lateral. En trabajos posteriores Clements and Rahn (2006) establecieron el punto de contacto gracias a modelos estáticos. En estos trabajos se describe el diseño, modelado, control y procesado de datos de este tipo de sensores sobre una antena de dos grados de libertad actuada por motores. Este tipo de trabajos utilizan sistemas que son los más parecidos al prototipo de antena sensora que se usa en este trabajo de investigación. Fend et al. (2004) han desarrollado el aMouse que es un robot con un conjunto móvil de múltiples bigotes reales para detectar el contacto con objetos. Pearson et al. (2007) desarrollaron el proyecto Whiskerbot que es un modelo que intenta reproducir el sistema sensorial de las ratas. También existen al-

gunos robots como el Koala Robot, que tienen como función principal hacer reconocimiento de la forma de los objetos Kim and Moller (2007) o experimentos con antenas Arabzadeh and Petersen (2003) que se diseñan para diferenciar texturas.

El propósito de este trabajo es desarrollar un robot háptico basado en una antena sensora montada sobre una plataforma móvil. Para ello se han realizado algunos desarrollos novedosos: 1) un modelo del conjunto plataforma-antena en movimiento, 2) un sistema de detección del punto de contacto más eficiente y 3) un planificador de movimientos y tareas para realizar reconocimiento de objetos.

Este artículo consta de: la Sección 2 que describe las características del prototipo; la Sección 3 que explica el protocolo de navegación y reconocimiento; la Sección 4 que presenta el modelo dinámico del sistema y el control de los motores utilizados; la Sección 5 que describe los algoritmos implicados en el proceso y la Sección 6 donde se dan algunas conclusiones.

2. Descripción del sistema

En la Figura 2 se muestra el prototipo desarrollado, que consiste en una plataforma móvil omnidireccional que equipa un sistema robótico de medición háptica de tipo antena. Por un lado, la plataforma móvil está compuesta por cuatro motores con reductoras que conducen cuatro ruedas suecas (o tipo mecanum) que dotan al sistema de la capacidad de desplazamiento en los tres grados de libertad del plano de forma independiente (sistema holonómico). Por otro lado, la antena robótica es un sistema de dos grados de libertad que está compuesto por dos servomotores, un sensor de fuerzas y una varilla esbelta y ligera de fibra de carbono. Esta varilla se fija por un extremo al sensor de fuerzas para medir con éste los contactos y las vibraciones a las que se ve sometida mientras rota y barre el espacio en los ángulos azimutal y cenital por medio de los servomotores.

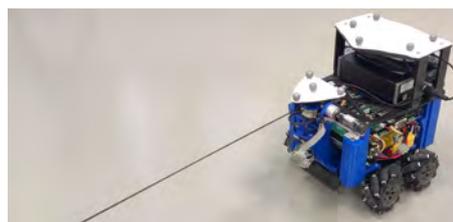


Figura 2: Plataforma móvil con sistema háptico

El prototipo se ha diseñado con la idea de que la antena realice un barrido del espacio que abarca mientras que la plataforma móvil la desplaza para extender su rango de medición. De esta manera, este sistema háptico no solo sirve para detectar y reconocer objetos sino también para realizar tareas de navegación en un entorno desconocido. Sin embargo, de la combinación de ambos sistemas surgen una serie de efectos adversos que afectan la precisión de las mediciones que se realizan, como pueden ser: (1) baja precisión en el posicionamiento del robot, degradando significativamente las mediciones del sistema; (2) baja velocidad de desplazamiento de la plataforma móvil, reduciendo la eficiencia en las tareas de toma de datos; y (3) la inducción de vibraciones a la antena sensora a causa del movimiento de la plataforma, reduciendo drásticamente la precisión y orientación de la antena. Estos efectos condicionan tanto el

diseño de las estrategias de control del sistema como el planteamiento de los protocolos de actuación necesarios para realizar las tareas de reconocimiento y navegación del equipo.

3. Descripción del protocolo de navegación y reconocimiento

Se diseña un protocolo bajo el cual el robot navega libremente por un entorno desconocido buscando algún objeto con el que pueda entrar en contacto para, posteriormente, proceder a su reconocimiento. Todo este proceso se realiza empleando la antena sensora como sistema de medición, registrando los datos de los contactos de la antena con la superficie del objeto. El protocolo se divide en una serie de tareas que se desencadenan en función de determinados eventos que ocurren durante el proceso.

3.1. Navegación libre en busca de un objeto

La primera etapa o tarea consiste en la navegación libre del robot y la búsqueda de posibles objetos. Inicialmente, el robot se coloca en un entorno desconocido donde puedan aparecer objetos y obstáculos. Esto implica que exista un alto riesgo de impacto durante su desplazamiento, ya que no se proporciona información sobre el entorno. Por lo tanto, en la primera etapa, se programa un avance controlado del robot mientras la antena realiza un barrido del espacio delante de él, buscando un obstáculo que potencialmente interseque la trayectoria del robot. La velocidad a la que puede funcionar el sistema en esta etapa está limitada por la antena robótica. En particular, la frecuencia del barrido de la antena debe establecerse lo más alta posible sin superar las siguientes limitaciones: (1) las capacidades de los motores, evitando la saturación y las sobrecargas; (2) mantener las deflexiones de la antena por debajo del límite del 10 % establecido en el modelado para mantener una deflexión geoméricamente lineal, condición en riesgo al inducir altas aceleraciones al sistema; y (3) limitar la fuerza ejercida sobre un obstáculo en caso de impacto. Por ello, la velocidad del desplazamiento del robot debe definirse de acuerdo con la oscilación de la antena para cubrir todo el espacio barrido frente al robot y evitar zonas ciegas.

3.2. Impacto de la antena con un objeto y registro de datos

Cuando un objeto desconocido interfiere en la trayectoria, la antena que barre el espacio frente al robot colisiona con él. Este evento inicia una nueva etapa en la que el robot debe detenerse y registrar los datos causados por la colisión. La forma en que el robot detecta el instante del impacto proviene de un algoritmo en el que las medidas del sensor de fuerzas se verifican constantemente y se comparan en tiempo real con los valores que proporciona el modelo del sistema. Una vez que se detecta el instante del impacto, el robot se detiene inmediatamente y registra todos los datos relacionados con la posición y orientación del robot (por odometría), los ángulos de los motores de la antena y las vibraciones de la misma a través del sensor de fuerzas.

3.3. Estimación del punto de contacto

Una vez se ha detectado el impacto y se han registrado los datos de la colisión, se procesa esta información y se obtiene una primera estimación de la posición del objeto. Los ángulos de los motores de las ruedas nos dan la posición y orientación del robot en el espacio por odometría. Los ángulos de los motores de la antena nos proporcionan la orientación relativa al robot a la que se ha detectado el contacto. Las medidas registradas del sensor de fuerzas se procesan mediante un algoritmo que determina el punto de la antena en el cual se ha producido el contacto. También se procesan mediante otro algoritmo que determina la dirección normal a la superficie con la que se ha contactado. Combinando estos resultados, se estima la posición relativa al robot del objeto que se ha encontrado. Esta información se emplea a continuación, no para comenzar la etapa de reconocimiento, sino para realizar una tarea previa de posicionamiento y orientación del robot frente al objeto detectado, con el fin de colocar la antena robótica en la mejor pose posible y mejorar así la calidad del reconocimiento.

3.4. Posicionamiento y orientación

En esta etapa, según la información registrada de la tarea anterior, se establece una nueva trayectoria para mover al robot a la mejor posición para realizar el reconocimiento. Esta tarea ayuda a que durante el reconocimiento se tomen datos de los contactos con la mayor precisión posible. Para ello, el procedimiento que mejores resultados ofrece consiste en fijar el robot en una posición y orientación determinada respecto al objeto detectado, y ahí iniciar el reconocimiento. Esto se debe al hecho de que cada vez que el robot se desplaza, induce vibraciones no deseadas en la antena, aumentando así la perturbación en las mediciones. Además, dado que el movimiento de la antena robótica es mucho más rápido y preciso que el de la plataforma móvil, resulta más eficiente obtener una nube de puntos de la superficie del objeto moviendo el primero que el segundo.

Por tanto, en esta tarea se ejecuta una nueva trayectoria para mover al robot a la posición deseada. Esta trayectoria se planifica de manera segura, donde el robot primero se aleja del objeto y luego se orienta y se acerca al objeto cuidadosamente, evitando colisiones no deseadas. Se establece que el robot se oriente frente al objeto y se posicione a una distancia relativa de aproximadamente el 75 % de la longitud de la antena, con el fin de realizar los contactos con el tramo que va desde la mitad de la varilla hasta su extremo. De esta manera, el robot está a una distancia segura del objeto, pero dentro del alcance de la antena.

3.5. Reconocimiento

Existen principalmente dos estrategias diferentes para realizar el reconocimiento. La primera se inspira en los insectos, basada en antenas, donde el sistema oscila la antena de un lado a otro impactando con el objeto en diferentes puntos, adquiriendo datos discretos de la superficie del objeto. La segunda es una estrategia inspirada en los mamíferos, basada en bigotes, donde el sistema desliza la antena alrededor del objeto con una fuerza controlada para mantener contacto con la superficie. Ambas estrategias se utilizan para calcular la posición y orientación de la superficie del objeto, creando así mapas tridimensionales que permiten el reconocimiento.

En este trabajo se aborda la primera metodología. Se diseñan trayectorias controladas de barrido de la antena que alejan y aproximan la varilla hacia la superficie del objeto hasta que se produce el impacto. Con cada contacto que se produce se recalculan las trayectorias de la antena con el objetivo de generar nuevos contactos alrededor de toda la superficie del objeto. Durante todo este proceso se recompilan los datos del sensor de fuerzas y de orientación de la antena mientras se ejecutan los algoritmos previamente mencionados de detección de impacto, estimación del punto de contacto de la antena y estimación de la dirección normal a la superficie del objeto.

Una vez el sistema ha completado el barrido de la superficie del objeto se obtienen dos mapas: uno de puntos tridimensionales de la superficie del objeto y otro de vectores normales a la superficie en estos puntos. Esta nube de puntos y vectores se analiza y compara con una base de datos de diferentes objetos para identificar el objeto que el robot ha detectado. En caso de no haber suficientes puntos/vectores tridimensionales, el sistema necesitará reiniciar el procedimiento reposicionando el robot y direccionando la antena hacia el objeto en una orientación diferente, para de nuevo ejecutar el reconocimiento y así obtener una nueva vista de la superficie.

3.6. Trayectorias diseñadas

Es importante destacar que, debido a los desafíos asociados con la interacción entre la plataforma móvil y la antena, es necesario diseñar trayectorias con aceleración y velocidad acotadas a un valor máximo. Esto se hace con el objetivo de minimizar las vibraciones no deseadas que se inducen en el sistema, lo que a su vez mejora el rendimiento de los algoritmos y la calidad de las mediciones obtenidas.

4. Modelado y control del sistema

Según el protocolo que se ha diseñado, el robot podrá encontrarse principalmente en dos estados diferentes: un primer estado (A) en el que se encuentra navegando libremente mientras mueve la antena barriendo el espacio, sin contactar con ningún objeto; y un segundo estado (B) en el que se detecta un impacto, el robot se detiene y la antena entra en contacto con el objeto, quedándose apoyada en su superficie. Estos dos estados dan lugar a dos modelos diferentes del sistema. Conceptualmente, tenemos dos modelos distintos para la antena: el primero (A) es equivalente a modelar un eslabón flexible, empotrado en su base y libre en su extremo, que cuenta con movimientos rígidos de traslación y rotación en la base; mientras que el segundo (B) equivale a modelar un eslabón flexible empotrado en la base pero apoyado en un punto determinado, considerando únicamente movimiento rígido de rotación. Ambos modelos se basan en la ecuación de viga de Euler-Bernoulli, pero difieren en las condiciones de contorno que se definen para el sistema.

4.1. Modelo (A): desplazamiento del robot, antena sin contacto

El esquema del conjunto plataforma-antena en el plano vertical se representa en la Figura 3. El robot de masa M_b avanzará debido a una fuerza $F_a(t)$ producida por los pares de los motores y se ve afectado por una fuerza de reacción con el suelo $F_r(t)$ debido a el efecto de la gravedad g . Su movimiento está

descrito por el desplazamiento horizontal $p_b(t)$ y vertical $h_b(t)$ de su centro de masas (marcado por el sistema de referencia no inercial (X_b, Z_b)) con respecto a un sistema inercial (X_0, Z_0) . La antena viene caracterizada por su longitud L , densidad lineal ρ y rigidez a la flexión EI (siendo E el modulo de Young e I el momento de inercia de área de la sección transversal). El motor de la antena tiene una inercia de rotación J_m y aplica un par $\Gamma_m(t)$. Además, se define el ángulo que gira el motor con respecto al robot como $\theta_m(t)$ y la deflexión de la antena con respecto a su posición sin deformar como $w(x, t)$. Esta deflexión, como se ha comentado antes, se supone menor a $10\%L$ y se describe mediante la teoría de vigas de Euler-Bernoulli.

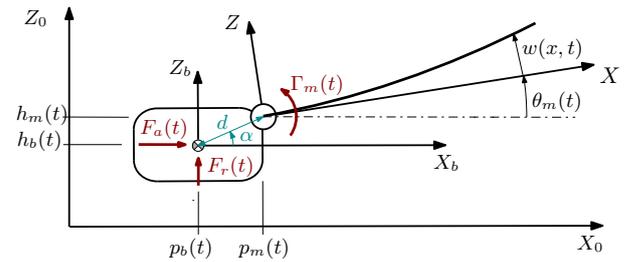


Figura 3: Esquema del sistema.

Las ecuaciones de movimiento que modelan el sistema, cuya obtención se detalla en Haro-Olmo et al. (2023), son

$$\begin{aligned} & (M_b + \rho L) \ddot{p}_b(t) - \rho \int_0^L \ddot{w}(x, t) dx \sin(\theta_m(t)) \\ & - \rho \left(\frac{L^2}{2} \sin(\theta_m(t)) + \int_0^L w(x, t) dx \cos(\theta_m(t)) \right) \ddot{\theta}_m(t) \\ & - \rho \left(\frac{L^2}{2} \cos(\theta_m(t)) - \int_0^L w(x, t) dx \sin(\theta_m(t)) \right) \dot{\theta}_m^2(t) \\ & - \rho \int_0^L \dot{w}(x, t) dx \dot{\theta}_m(t) \cos(\theta_m(t)) = F_a(t) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & (M_b + \rho L) \ddot{h}_b(t) - \rho \int_0^L \ddot{w}(x, t) dx \cos(\theta_m(t)) \\ & + \rho \left(\frac{L^2}{2} \cos(\theta_m(t)) - \int_0^L w(x, t) dx \sin(\theta_m(t)) \right) \ddot{\theta}_m(t) \\ & - \rho \left(\frac{L^2}{2} \sin(\theta_m(t)) + \int_0^L w(x, t) dx \cos(\theta_m(t)) \right) \dot{\theta}_m^2(t) \\ & - \rho \int_0^L \dot{w}(x, t) dx \dot{\theta}_m(t) \sin(\theta_m(t)) + g(M_b + \rho L) = F_r(t) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \left(J_m + \rho \frac{L^3}{3} \right) \ddot{\theta}_m(t) + \rho \int_0^L x \ddot{w}(x, t) dx + g \rho \frac{L^2}{2} \cos(\theta_m(t)) \\ & - \rho \left(\frac{L^2}{2} \sin(\theta_m(t)) + \int_0^L w(x, t) dx \cos(\theta_m(t)) \right) \ddot{p}_b(t) \\ & + \rho \left(\frac{L^2}{2} \cos(\theta_m(t)) - \int_0^L w(x, t) dx \sin(\theta_m(t)) \right) \ddot{h}_b(t) = \Gamma_m(t) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & EI w''''(x, t) + \rho (\ddot{w}(x, t) + x \ddot{\theta}_m(t) - \ddot{p}_b(t) \sin(\theta_m(t)) \\ & + \dot{h}_b(t) \cos(\theta_m(t))) = -g \rho \cos(\theta_m(t)) \end{aligned} \quad (4)$$

donde (1)-(2) modelan el movimiento de la plataforma, (3) el motor de la base de la antena y (4) la deflexión del eslabón flexible que conforma la antena. Esta última ecuación cuenta con cuatro condiciones de contorno que indican que la antena está fija al motor, $w(0, t) = 0$ y $w'(0, t) = 0$, y libre en el otro extremo, $w''(L, t) = 0$ y $w'''(L, t) = 0$.

Adicionalmente, se aplica el análisis modal para sistemas continuos a la ecuación (4) para convertir la ecuación en derivadas parciales en un conjunto de infinitas ecuaciones diferenciales ordinarias en función del tiempo. Para ello, se asume que la deflexión se puede expresar como $w(x, t) = \sum_{i=1}^{\infty} \psi_i(x)\phi_i(t)$, donde $\phi_i(t)$ son las funciones armónicas del tiempo y $\psi_i(x)$ son los modos normales de una viga, siendo estos últimos de la forma

$$\psi_i(x) = C_i [(\cos(\beta_i x) - \cosh(\beta_i x))(\sin(\beta_i L) - \sinh(\beta_i L)) - (\sin(\beta_i x) - \sinh(\beta_i x))(\cos(\beta_i L) - \cosh(\beta_i L))]$$

donde β_i se obtiene de la siguiente ecuación característica

$$1 + \cos(\beta L) \cosh(\beta L) = 0 \quad (5)$$

y que se relaciona con las infinitas frecuencias de vibración de la antena ω_i mediante $\beta_i^4 = \frac{\omega_i^2 \rho}{EI}$. La constante C_i se calcula mediante la condición de ortonormalidad $\rho \int_0^L \psi_i(x)\psi_j(x)dx = \Delta_{ij}$ siendo Δ_{ij} la delta de Kronecker e $i, j = 1, 2, \dots, \infty$.

De este modo, y truncando los infinitos modos de vibración de la antena a n modos y definiendo $\boldsymbol{\phi}(t) = [\phi_1(t) \phi_2(t) \dots \phi_n(t)]^T$ y $\boldsymbol{\psi}(t) = [\psi_1(t) \psi_2(t) \dots \psi_n(t)]^T$ pertenecientes a $\mathcal{R}^{n \times 1}$, la vibración de la antena viene descrita por

$$\mathbf{I}\ddot{\boldsymbol{\phi}}(t) + \mathbf{W}\boldsymbol{\phi}(t) = \mathbf{P}\mathbf{u}(t) \quad (6)$$

donde $\mathbf{I} \in \mathcal{R}^{n \times n}$ es la matriz identidad y

$$\mathbf{W} = \text{diag}(\omega_1^2, \omega_2^2, \dots, \omega_n^2) \in \mathcal{R}^{n \times n} \quad (7)$$

$$\mathbf{P} = \rho \int_0^L \begin{bmatrix} -x\psi(x) & \psi(x) & -\psi(x) & -g\psi(x) \end{bmatrix} dx \in \mathcal{R}^{n \times 4} \quad (8)$$

$$\mathbf{u}(t) = \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_m(t) \\ \ddot{p}_b(t) \sin(\theta_m(t)) \\ \ddot{h}_b(t) \cos(\theta_m(t)) \\ \cos(\theta_m(t)) \end{bmatrix} \in \mathcal{R}^{4 \times 1} \quad (9)$$

Además, del modelo nos interesa calcular el par de acoplamiento que se produce entre la antena y el motor y el ángulo del extremo de la antena con respecto al robot:

$$\Gamma_c(t) = -EIw''(0, t) = -EI\boldsymbol{\psi}''(0)^T \boldsymbol{\phi}(t), \quad (10)$$

$$\theta_t(t) = \theta_m(t) + \frac{w(L, t)}{L} = \theta_m(t) + \frac{1}{L}\boldsymbol{\psi}(L)^T \boldsymbol{\phi}(t) \quad (11)$$

Este modelo se ha desarrollado para el caso simplificado en dos dimensiones del plano vertical, donde el sistema se ve afectado por la gravedad. Partiendo de éste, obtener el modelo del sistema en el plano horizontal es inmediato.

4.2. Modelo (B): robot estático, antena apoyada en objeto

El modelo dinámico de la antena cuando un punto del eslabón l_c está en contacto con la superficie de un objeto fue desarrollado por Ueno et al. (1998), asumiendo un eslabón con masa distribuida y una carga en el extremo. La antena robótica del sistema esquematizada en la Figura 4 no cuenta con masa en el extremo de la antena, por lo que la ecuación de las frecuencias resultante da lugar a la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} & \cosh(\beta_i \cdot (L - l_c)) \cdot [\sin(\beta_i \cdot L) \cdot \cos(\beta_i \cdot l_c) - \sin(\beta_i \cdot (L - l_c))] \\ & + \cos(\beta_i \cdot (L - l_c)) \cdot [\sinh(\beta_i \cdot (L - l_c)) - \sinh(\beta_i \cdot L) \cdot \cos(\beta_i \cdot l_c)] \\ & + \cosh(\beta_i \cdot l_c) \cdot \sin(\beta_i \cdot l_c) - \cos(\beta_i \cdot l_c) \cdot \sinh(\beta_i \cdot l_c) = 0 \end{aligned} \quad (12)$$

cuya resolución, como en (5), da como resultado las frecuencias de vibración de la antena, pero en función del punto l_c .

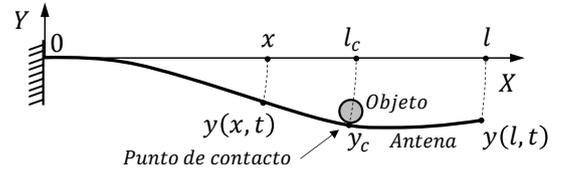


Figura 4: Esquema del modelo de la antena con contacto.

4.3. Modelado y control de los motores del sistema

En los modelos anteriores se considera que los movimientos de rotación y traslación del sistema están perfectamente controlados. Para lograr esto es necesario modelar los actuadores del sistema (los motores) y establecer las leyes de control que hagan que el sistema se comporte de la forma más rápida y eficiente posible. Así, se diseñan unos esquemas de control para cada motor del sistema que consisten en la combinación de diferentes sistemas de control avanzado. Estos se componen de un regulador PID con prefiltro combinado con un predictor de Smith, un esquema anti-windup y un compensador de las no linealidades del sistema. El modelado, el proceso de identificación de los parámetros del sistema, el desarrollo del esquema y el sintonizado de los parámetros del regulador se detalla en Mérida-Calvo et al. (2023).

5. Algoritmos implicados

5.1. Detección del impacto

El algoritmo que se ha desarrollado está basado en el algoritmo presentado en Feliu-Batlle et al. (2017). La idea consiste en simular el modelo del sistema (6) al mismo tiempo que el robot ejecuta las trayectorias correspondientes a la etapa en la que se encuentre. El par de acoplamiento de la antena registrado por el sensor se compara en tiempo real con los resultados que ofrece el modelo a través de (10). Esta comparación nos genera una señal de error residual $E(t)$ que es aproximadamente cero, siempre que el robot no impacte con ningún obstáculo. Entonces, se determina que ha ocurrido un contacto con la antena en el momento en que el valor absoluto de la derivada temporal de este error residual excede un umbral ϵ , $\left| \frac{dE(t)}{dt} \right| > \epsilon$, el cual se determina experimentalmente registrando el mayor valor detectado en un movimiento sin impacto.

5.2. Estimación del punto de contacto

En Ueno et al. (1998), se demostró que se podría estimar el punto de contacto de un eslabón flexible con un objeto procesando las señales de vibración producidas en la estructura mecánica de la antena. Estas frecuencias cambian del caso de movimiento libre – modelo (A) – al caso de movimiento restringido – modelo (B) –, y además cambian en este último caso en función de la ubicación del punto de contacto. Partiendo de esta idea, se establece el algoritmo desarrollado en Mérida-Calvo et al. (2021) que se basa en la combinación de dos estimadores.

El primero caracteriza las frecuencias de vibración de la antena registradas por el sensor cuando se produce el contacto mediante la resolución de la expresión (12). La relación que ofrece esta expresión entre el primer modo de vibración y el punto l_c se tabula para agilizar el proceso. Obtener la ubicación del contacto a partir de esa frecuencia proporciona una estimación muy precisa, pero en algunos casos arroja dos posibles soluciones, tal y como se representa en la Figura 5. Para decidir cuál de esas soluciones es la correcta, se utiliza un segundo estimador. Este estimador calcula el punto de contacto utilizando las medidas de fuerza y par estáticos del sensor y la relación entre estas magnitudes. Como el par es la fuerza aplicada a una distancia, es simple despejar la distancia para obtener el punto de contacto. En comparación con el primero, este método da resultados pobres en términos de precisión, pero es suficiente para distinguir entre las dos posibles soluciones que el primer estimador puede proporcionar.

De este modo, la estimación procede de la siguiente manera: una vez se detecta el impacto se aplica una transformada rápida de Fourier (FFT) a las señales de par registradas tras el contacto y se obtienen las frecuencias de vibración de la antena. Después, se toma la frecuencia más baja (primer modo) y se acude a los resultados tabulados de (12) para determinar l_c . Por último, en el caso de que existan dos posibles soluciones, se toma el resultado del segundo estimador para discernir la correcta de entre estas dos soluciones.

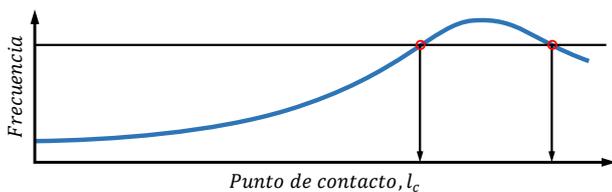


Figura 5: Proceso de estimación del punto de contacto del primer estimador.

5.3. Estimación del vector normal a la superficie de contacto

La dirección normal a la superficie del objeto puede estimarse en función de las mediciones estáticas del sensor de fuerzas una vez se ha producido el contacto. Los componentes de la fuerza de reacción leída por el sensor cuando la antena colisiona con el objeto se combinan para obtener tanto la magnitud de la fuerza de reacción normal a la superficie como su dirección. Las fuerzas de reacción empleadas son aquellas cuyas direcciones son perpendiculares al eje longitudinal de la antena. Específicamente, se utilizan las fuerzas de reacción cortantes F_y , F_z leídas por el sensor, mientras que la fuerza axial de reacción F_x relativa a la antena se descarta. Por lo tanto, la magnitud de la fuerza F_{\perp} y la dirección normal a la superficie del objeto α_{\perp} se calculan como $F_{\perp} = \sqrt{F_y^2 + F_z^2}$ y $\alpha_{\perp} = \arctan\left(\frac{F_z}{F_y}\right)$ respectivamente.

6. Conclusiones

En este artículo se ha presentado un prototipo de antena sensora que tiene movimientos de dos grados de libertad y que reproduce los sensores táctiles (antenas o bigotes) utilizados por algunos animales. Dicha antena está montada sobre una plataforma omnidireccional, lo cual añade complicación a su dinámica. De entre los distintos temas de investigación vinculados a estos sistemas, nos hemos centrado en el modelado dinámico y el control de sus actuadores, en la detección eficiente del punto de contacto de la antena y en la planificación de las tareas implicadas en el reconocimiento de objetos. Este trabajo deja muchos temas abiertos, entre los que se hallan la estimación de la impedancia mecánica del objeto contactado, el reconocimiento efectivo de objetos, etc.

Agradecimientos

Este trabajo es fruto del Proyecto PID2022-141409OB-C21 financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 / FEDER, UE Una manera de hacer Europa y de la beca PRE2020-095222

Referencias

- Arabzadeh, E., Petersen, R., 2003. Encoding of a whisker vibration by a rat barrel cortex neurons: Implications for texture discrimination. *Journal of Neuroscience* 23 (27), 9146–9154.
- Clements, T., Rahn, C., 2006. Three-dimensional contact imaging with an actuated whisker. *IEEE Transactions on Robotics* 22 (4), 844–848.
- Feliu-Battle, V., Feliu-Talegón, D., Castillo-Berrio, C. F., 2017. Improved object detection using a robotic sensing antenna with vibration damping control. *Sensors* 17 (4).
- Fend, M., Yokoi, H., Pfeifer, R., October 2004. Development of a whisker sensor system and simulation of active whisking for agent navigation. In: *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*. IEEE Press, pp. 607–612.
- Haro-Olmo, M. I., Mérida-Calvo, L., Benfima, S., Gharab, S., Feliu-Battle, V., aug 2023. Modelado de un sistema háptico móvil basado en antenas flexibles. In: *XLIV Jornadas de Automática*. Servicio de Publicacións. Universidade da Coruña, pp. 605–610.
- Kaneko, M., Tsuji, T., May 2000. A whisker tracing sensor with 5 μm sensitivity. In: *Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE Press, pp. 3907–3912.
- Kim, D., Moller, R., 2007. Biomimetic whiskers for shape recognition. *Robotics and Autonomous Systems* 55 (3), 229–243.
- Mérida-Calvo, L., Feliu-Talegón, D., Feliu-Battle, V., 2021. Improving the detection of the contact point in active sensing antennae by processing combined static and dynamic information. *Sensors* 21 (5).
- Mérida-Calvo, L., Rodríguez, A. S.-M., Ramos, F., Feliu-Battle, V., 2023. Advanced motor control for improving the trajectory tracking accuracy of a low-cost mobile robot. *Machines* 11 (1).
- Pearson, M., Pipe, A., Melhuish, C., Mitchinson, B., Prescott, T., 2007. Whiskerbot: a robotic active touch system modeled on the rat whisker sensory system. *Adaptive Behavior* 15 (3), 223–240.
- Russell, R., May 1992. Using tactile whiskers to measure surface contours. In: *Proceedings of the 1992 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE Press, pp. 1295–1299.
- Russell, R., Wijaya, J., 2003. Object location and recognition using whisker sensors. In: *Proceedings of the Australasian Conference on Robotics and Automation*. pp. 761–768.
- Tsujimura, T., Yabuta, T., May 1992. A tactile sensing method employing force torque information through insensitive probes. In: *Proceedings of the 1992 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE Press, pp. 1315–1320.
- Ueno, N., Kaneko, M., May 1995. On a new contact sensing strategy for dynamic active antenna. In: *Proceedings of the 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE Press, pp. 1120–1125.
- Ueno, N., Svinin, M., Kaneko, M., 1998. Dynamic contact sensing by flexible beam. *IEEE/ASME Trans. Mechatron.* 3, 254–264.



Simposio de Robótica, Bioingeniería y Visión por Computador 2024



Sesión: Robótica

Integración de técnicas inteligentes de aprendizaje en un sistema de visión para aplicaciones de pick&place con un robot paralelo Delta

Saratxaga, E.¹, Alonso, R.², Mancisidor, A.¹, Leizea, I.², Cabanes, I.^{1*}

¹Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Escuela de Ingeniería de Bilbao, Universidad del País Vasco (UPV/EHU), C/Plaza Ingeniero Torres Quevedo, 1. E-48013 Bilbao, España.

²Departamento de Diseño e Ingeniería de Precisión, Ideko Centro Tecnológico, C/Arriaga Kalea, 2. E-20870 Elgoibar, España.

To cite this article: Saratxaga, E., Alonso, R., Mancisidor, A., Leizea, I., Cabanes, I. 2024. Integration of intelligent learning techniques in a vision system for pick&place applications with a Delta parallel robot. Simposio de Robótica, Bioingeniería y Visión por Computador, 2024, 1-6. <https://doi.org/>

Resumen

Este trabajo se centra en el diseño e implementación de una célula robotizada con un sistema de visión artificial inteligente para operaciones de pick and place. La célula incorpora un robot paralelo tipo Delta, equipado con una cámara y programas de visión que permiten percibir el entorno. La aplicación permite formar palabras mediante cubos con letras serigrafadas, utilizando una interfaz gráfica desarrollada *ad hoc* para que el usuario monitorice el proceso y seleccione la palabra deseada. Con la finalidad de reconocer la letra correcta de forma automática, se ha desarrollado un modelo inteligente basado en una Red Neuronal Convolutiva que toma decisiones en función de la palabra seleccionada por el usuario y del entorno percibido por la cámara. Los resultados muestran que este modelo inteligente es capaz de formar cualquier palabra, empleando letras mayúsculas, minúsculas o una combinación de ellas, con una tasa de acierto del 100%.

Palabras clave: Robot Delta, Visión Artificial, Automatización, Redes Neuronales, Aprendizaje Automático.

Integration of intelligent learning techniques in a vision system for pick&place applications with a Delta parallel robot

Abstract

This work focuses on the design and implementation of a robotic cell with an intelligent artificial vision system for pick and place operations. The cell incorporates a Delta-type parallel robot, equipped with a camera and artificial vision programs that allow it to perceive the environment. The application allows the formation of words using cubes with serigraphed letters, using a graphical interface developed *ad hoc* for the user to monitor the process and select the desired word in different ways. In order to recognise the correct letter automatically, an intelligent model has been developed based on a Convolutional Neural Network that makes decisions based on the word selected by the user and the environment perceived by the camera. The results show that this intelligent model is able to form any word, using uppercase letters, lowercase letters or a combination of them, with a 100% success rate.

Keywords: Delta robot, Artificial Vision, Automation, Artificial Neural Network, Machine learning.

1. Introducción

El concepto de Industria 4.0 se basa en conseguir un flujo de producción completamente integrado, automatizado y optimizado, logrando así mayor productividad y eficiencia en

las fábricas. A tal fin, se ha incorporado a la industria nuevas tecnologías, como es la inteligencia artificial, la robótica, la computación en la nube y el Internet of Things (IoT), entre otras (Beier et al., 2020).

*Autor para correspondencia: itziar.cabanes@ehu.eus

La integración de la tecnología IoT en un proceso productivo permite convertir recursos de producción típicos en objetos de fabricación inteligentes, proporcionando gran flexibilidad y versatilidad a las máquinas y plantas industriales (Zhong et al., 2017). Un ejemplo de esto son las aplicaciones robóticas. Antes de la implantación de la Industria 4.0, el objetivo de dichas aplicaciones se basaba en sustituir los trabajos repetitivos y de grandes cargas que tenía que soportar el personal de planta, por robots que no tenían poder de decisión. Sin embargo, las nuevas tecnologías, como los sistemas de visión y la inteligencia artificial, dotan a los robots de la capacidad para la toma de decisiones en función de las necesidades del proceso. Ello permite aumentar la autonomía y la personalización en las aplicaciones robóticas.

En cuanto a los robots industriales, desde el punto de vista de su estructura mecánica, se distinguen dos tipos: los robots serie y los robots paralelos. En entornos industriales, están presentes de una manera más extendida los brazos robóticos de tipo serie. Estos están formados por una cadena cinemática abierta, y cuentan con mayor espacio de trabajo que los robots paralelos. En cambio, éstos últimos están formados por una plataforma móvil conectada a una base mediante al menos dos series de cadenas cinemáticas independientes, por lo que tienen una configuración de cadena cinemática cerrada. Esta última configuración concede a los robots paralelos diferentes ventajas en términos de velocidad, precisión, rigidez y repetibilidad con respecto a los robots serie (Nzue et al., 2013).

Uno de los mecanismos paralelos de mayor éxito es el robot Delta, un tipo de robot paralelo de alta velocidad, posicionamiento preciso, bajo coste y alta eficiencia. Este robot es ampliamente utilizado en líneas de producción de alimentos, medicamentos y productos electrónicos para realizar tareas de clasificación rápida y ensamblaje, entre otros. Debido a su excelente rendimiento dinámico, se utiliza comúnmente para ejecutar operaciones de pick&place en líneas de producción (Su et al., 2018).

Para llevar a cabo correctamente sus aplicaciones, es común que estos robots integren sistemas de visión artificial. Esto permite utilizar métodos inteligentes, y procesar y analizar imágenes de las piezas, herramientas y componentes del entorno. La implementación de sistemas de visión artificial proporciona al robot la capacidad de controlar automáticamente el efector final.

Los estudios realizados para la implementación de sistemas de visión en la robótica presentan diferentes enfoques. En mayor medida, tratan de reconocer un objeto en el espacio de trabajo del robot y en obtener las coordenadas del mismo (Su et al., 2018). En otras ocasiones, el enfoque consiste en reconocer y clasificar diferentes tipos de objetos según su forma y color, para así poder seleccionar el objeto que sea necesario (Harada et al., 2014). En ambos casos, el objeto seleccionado será posteriormente manipulado por el robot.

En cambio, en otras ocasiones el sistema de visión es utilizado para inspeccionar y detectar posibles defectos de las piezas o identificar el grabado que contienen para realizar la clasificación según dichas letras. En este último caso, resulta esencial el reconocimiento de caracteres, siendo numerosos los estudios que se basan en técnicas inteligentes de aprendizaje (Xue et al., 2021). Entre otros, se han realizado estudios para el reconocimiento de caracteres chinos mediante redes

neuronales convolucionales (Li et al., 2020), o aprendizaje profundo por refuerzo (Sihang et al., 2020); o para el reconocimiento de caracteres en Braille (Kausar et al., 2021).

En estos últimos casos, cuyos trabajos están dirigidos al reconocimiento de caracteres, es común utilizar un set de datos llamado EMNIST (Extended MNIST) que consiste en 814.255 caracteres y dígitos manuscritos por 3.700 escritores diferentes, de los cuales 697.932 se utilizan para entrenamiento y 116.323 para test (Baldominos et al., 2019). Este dataset se ha utilizado para diferentes técnicas inteligentes de aprendizaje, como por ejemplo redes neuronales convolucionales profundas (DCNN) (Ma et al., 2020) y técnicas de aprendizaje no supervisado (Vaila et al., 2022).

En este artículo se presenta una solución robotizada capaz de formar palabras mediante cubos que contienen letras serigrafiadas y que el usuario podrá seleccionar a través de una pantalla táctil. Esto implica la integración de una interfaz gráfica, junto con un sistema de visión artificial que dota al robot de inteligencia, permitiéndole conocer el entorno que lo rodea y así actuar en consecuencia sin necesidad de ser reprogramado. Está equipado con un modelo basado en técnicas inteligentes de aprendizaje, dentro de una célula robotizada compuesta por un robot paralelo Delta.

Tras esta introducción, en el apartado 2 se presenta la descripción detallada de la célula robotizada con todos sus componentes. En el apartado 3 se explica el desarrollo e integración de las técnicas inteligentes de aprendizaje para resolver la aplicación de pick&place mediante un robot paralelo. En el apartado 4 se analizan los resultados obtenidos. Finalmente, en el apartado 5 se resumen las conclusiones extraídas del trabajo.

2. Descripción de la célula robotizada

En el presente trabajo se plantea desarrollar una aplicación de manipulación de 63 cubos azules de 25x25x25 mm que contienen diferentes caracteres en blanco sobre ellos (Figura 1). En este caso, se desea identificar las letras que contienen en la superficie de las piezas cúbicas y seleccionarlas para formar la palabra requerida por el usuario mediante una interfaz gráfica desarrollada para esta aplicación.

El robot, equipado con un sistema de visión artificial, debe reconocer las letras serigrafiadas de la cara superior de las piezas cúbicas dispuestas aleatoriamente en una plataforma grande y colocarlas en una plataforma pequeña, formando así la palabra deseada.

Además de posibilitar seleccionar la palabra deseada, la interfaz permite monitorizar el proceso, informando al usuario del estado de la palabra que se va a escribir, el estado de la conexión y las posiciones de los cubos, pudiendo además regular la velocidad del robot.

A continuación, se describen los diferentes componentes que forman la célula robotizada.

2.1. Objetos a manipular por la célula robotizada

El entorno de trabajo del robot se compone de los siguientes componentes (Figura 1), diseñados ad-hoc para esta aplicación:

- Una plataforma grande fija, ajustado al espacio de trabajo del robot con 63 huecos para albergar piezas

cúbicas. De esta plataforma es de donde el robot recoge los cubos con la letra correspondiente para formar la palabra seleccionada por el usuario.

- Una plataforma pequeña fija, con 18 huecos donde el robot deberá depositar los cubos formando la palabra deseada.
- 63 cubos azules, de 25mm de lado, los cuales tienen serigrafiados en su cara superior letras mayúsculas y minúsculas, números y emoticonos. Estos son los objetos a manipular por el robot para formar las distintas palabras.



Figura 1. Plataforma grande (parte superior), plataforma pequeña (abajo izquierda) y cubo de 25mm con la letra K serigrafiada (abajo derecha).

La plataforma grande, se ha diseñado con el objetivo de formar la mayor cantidad de palabras posible. Cuenta con 63 huecos, cada uno de 27 mm para albergar cubos de 25 mm de lado. Se ha añadido un margen de 2 mm alrededor de los cubos y un chaflán de 3 mm en cada lado de los huecos para facilitar el deslizamiento y la caída de los cubos. Estos huecos se distribuyen en 7 filas y 9 columnas, con una separación de 10 mm entre cubos, resultando en dimensiones finales de 381 mm de largo, 295 mm de ancho y 55 mm de alto.

La plataforma pequeña, mostrará la palabra final formada por el robot. Con dos filas de 9 huecos, esta plataforma tiene dimensiones de 381 mm de largo y 80 mm de ancho, y mantiene las mismas dimensiones de los huecos y el espacio entre ellos que la plataforma grande.

2.2. Robot paralelo Delta

Con el objetivo de realizar manipulaciones de objetos de bajo peso a alta velocidad, se selecciona el robot paralelo Delta (CR-UGD4MINI-NR Sysmac Delta Robot), de la empresa Omron (Figuras 2 y 4). Este robot posee 3 grados de libertad de traslación (sin rotación de la pinza), y está diseñado para manipular cargas de hasta 1 kg a velocidades de hasta 200 ciclos por minuto. Con una repetibilidad de 0,2 mm y una protección IP65. Por lo que es ideal para aplicaciones que requieren precisión y rapidez.

Dado que las piezas a manipular no superarán los 50 gramos y no se requiere la rotación de la pinza, la simplicidad y tamaño del robot lo posicionan como la opción óptima para la tarea propuesta. Además, presenta un sistema de control abierto, lo que permite implementar estrategias de control avanzadas.

2.3. Sistema de visión artificial

Con objeto de detectar cada uno de los cubos de la plataforma y distinguir cada una de las letras serigrafiadas en la cara

superior, se integra la visión en esta célula. Concretamente, se incorpora una webcam (Logitech c270). Además, con la prioridad de identificar correctamente las letras y evitar cualquier oclusión posible, la cámara se ubica en la localización del escenario que muestra la Figura 2.

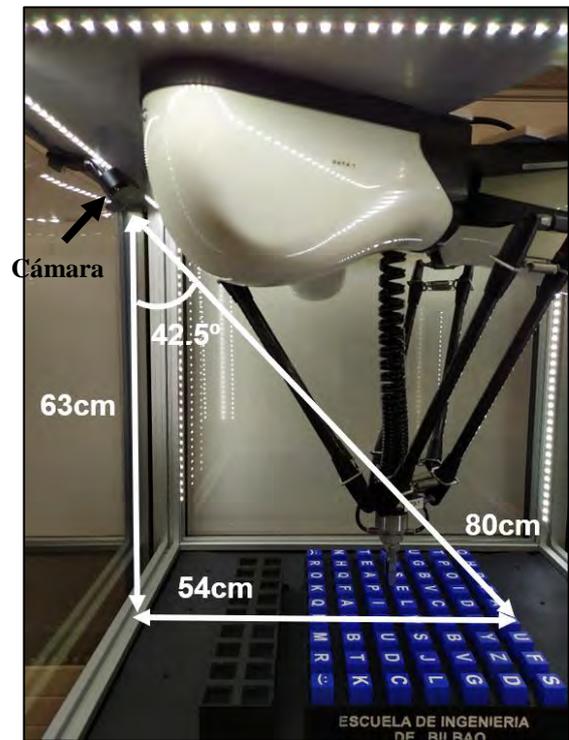


Figura 2. Disposición de la cámara.

Para la calibración de la cámara se emplea un tablero de ajedrez, que se coloca en la base de la plataforma para conocer cuál es el tamaño de la cuadrícula del tablero (30x30mm). Adicionalmente, un factor muy importante es la iluminación, la cual no es homogénea ni constante. Por ello se ha añadido un sistema de iluminación artificial, frontal y lateral, para mantener este factor lo más controlado posible.

2.4. Interfaz gráfica de usuario

La Figura 3 muestra la interfaz desarrollada para esta aplicación empleando la herramienta Matlab Guide.

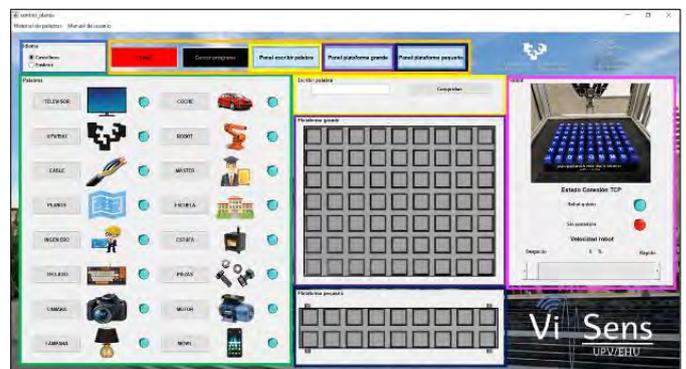


Figura 3. Interfaz gráfica de usuario desarrollada.

Esta interfaz, cuya monitorización se visualiza en la pantalla táctil de la célula robotizada (Figura 4), permite realizar las siguientes funcionalidades:

- 1) El panel del robot informa del estado de la comunicación de la interfaz con el robot y permite regular la velocidad de movimiento del robot (recuadrado en color rosa).
- 2) Selección por parte del usuario de la palabra que se desea formar, bien escogiendo entre las propuestas o bien escribiendo en pantalla la que desee e informando de si es una palabra posible de formar (recuadrado en color verde y amarillo, respectivamente).
- 3) Comunicación de la interfaz con el sistema de visión artificial para que detecte donde se encuentra cada una de las letras en cada momento, visualizando en pantalla las posiciones de los cubos que va a recoger y depositar en cada plataforma (en color morado y azul oscuro).
- 4) Panel de selección de idioma de las palabras de la interfaz (recuadrado en color azul claro).
- 5) Pulsadores de arranque y paro de la interfaz permitiendo parar y arrancar la interfaz y los movimientos del robot de forma segura (recuadrado en color naranja).
- 6) Por último, se habilitan dos pestañas. La primera pestaña muestra un documento con el histórico de las palabras que se han escrito con la fecha y hora de cada una de ellas y la segunda pestaña contiene un manual de usuario para el correcto uso de la interfaz.

En la Figura 4 se muestra el escenario de trabajo completo de esta célula robotizada dedicada a las operaciones de pick&place para la recogida y colocación de cubos.



Figura 4. Escenario de trabajo.

3. Integración de técnicas inteligentes de aprendizaje en la aplicación de pick&place

Con objeto de reconocer los distintos caracteres contenidos en las piezas a manipular, se plantea implementar algoritmos inteligentes basados en Redes Neuronales Convolucionales. Para el entrenamiento de la red se utiliza el set de datos de EMNIST (Extended Modified National Institute of Standards and Technology). A continuación, se detalla la metodología utilizada para el aprendizaje en la aplicación descrita.

3.1. Diseño de la red propuesta

Para realizar el reconocimiento de caracteres, se ha elegido implementar una Red Neuronal Convolutiva (CNN) debido a su baja complejidad y su alta flexibilidad para abordar este problema. Se ha creado el modelo de CNN utilizando la biblioteca de Redes Neuronales de Código Abierto Keras, desarrollada en Python. En este contexto, se ha empleado la clase secuencial.

El modelo creado está formado por 8 capas; una capa de entrada, una de salida y 6 capas intermedias que se detallan a continuación (Figura 5).

La primera capa, la de entrada, identifica el formato de entrada, el cual es de 28x28x1 debido a que las imágenes obtenidas para la realización de la predicción son imágenes de 28x28 píxeles y de un único canal (imágenes en escala de grises). Esta capa es la encargada de aplicar la convolución a las imágenes de entrada para encontrar los patrones que más tarde permitirán clasificarlas. Cuenta con un espacio de salida de 128, una ventana de convolución de 5x5 y la función de activación “ReLU”, esta es una función que genera una salida igual a cero cuando la entrada es negativa, y una salida igual a la entrada cuando esta es positiva. De esta forma, la imagen se transforma en 128 mapas de 28x28 píxeles.

La segunda capa, es una capa de pooling. Esta capa permite reducir el peso de la representación para así agilizar el proceso de aprendizaje de la red neuronal. Esta capa asegura que los patrones detectados en la capa convolutiva se mantengan en la siguiente capa de la red. Además, permite reducir el sobreajuste y aumenta la abstracción sobre los datos de entrada. El tamaño de ventana utilizado para obtener el número máximo es de 2x2. El valor de zancada o stride, el cual especifica como de lejos se mueve la ventana de agrupación para cada paso de agrupación, también es de 2.

La tercera capa vuelve a ser de convolución, en este caso, con un espacio de salida de 64 y una ventana de convolución de 3x3, la función de activación utilizada sigue siendo “ReLU”.

A continuación, en la cuarta capa, se vuelve a aplicar una ventana de max pooling de 2x2. El valor de zancada también es de 2, siendo la salida de 64 mapas de 7x7 píxeles.

La quinta capa, se utiliza para aplanar las salidas de la fase convolutiva. Las imágenes son de dos dimensiones, por lo que se utiliza esta capa para convertir los datos en un vector que prepare la entrada para las capas densas.

La sexta capa ha sido desarrollada para conectar las neuronas densamente, esto significa que todas las neuronas de la capa están conectadas a todas las neuronas de la siguiente capa. En esta función se puede elegir el número de neuronas a utilizar. En este caso, se ha decidido utilizar 128 neuronas, con la función de activación “ReLU”.

La séptima capa es denominada capa de abandono, ya que establece aleatoriamente las unidades de entrada en 0 con una frecuencia de “rate” en cada paso durante el tiempo de entrenamiento, lo que ayuda a evitar el sobreajuste. El parámetro “rate” establece la fracción de las unidades de entrada que hay que dejar caer, y puede tener valores de entre 0 y 1. En este caso el valor asignado para este parámetro es de 0.5, por lo que en cada entrenamiento se deshabilitarán el 50% de las neuronas.

Por último, la capa de salida vuelve a ser una capa de conexión densa de neuronas. En este caso, el número de neuronas se ha establecido igual al número de letras a predecir, y la función de activación utilizada es la denominada “softmax”, la cual es comúnmente utilizada en la capa de salida de las redes neuronales de clasificación multiclase. Esta función se utiliza para convertir las salidas de la capa anterior en probabilidades que suman uno, de esta forma se puede medir la confianza del modelo en la pertenencia a cada clase.

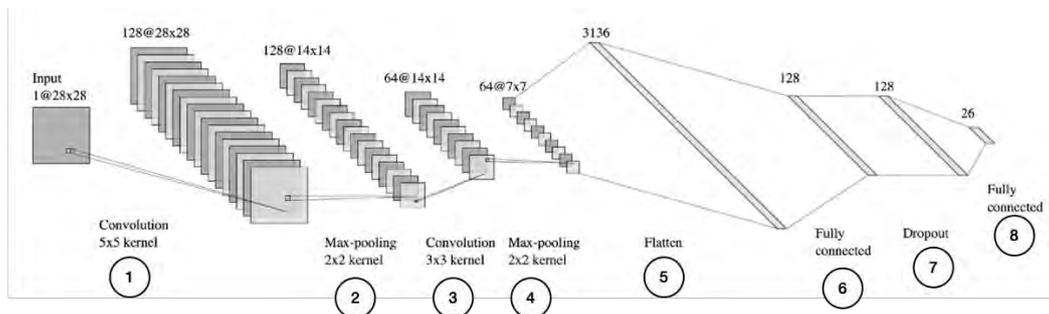


Figura 5. Estructura de la Red Neuronal Convocional formado por 8 capas utilizada.

3.2. Entrenamiento de la red propuesta

Una vez definido el modelo a utilizar, se especifica su proceso de aprendizaje, donde se deben seleccionar los argumentos de función de pérdida, optimizador y métrica:

- **Función de pérdida:** esta función se utiliza para medir la diferencia entre la salida real y la salida predicha por la red, y la reduce a un solo valor que se utiliza para actualizar los pesos de la red. En este caso, se ha utilizado la función de pérdida entropía cruzada categórica, utilizada en problemas de clasificación multiclase.
- **Optimizador:** es el algoritmo que se utiliza para actualizar los pesos de la red durante el entrenamiento. En este caso se utiliza el optimizador Adam.
- **Métrica:** se utiliza para evaluar el rendimiento de la red neuronal durante el entrenamiento. En este caso se ha elegido la métrica de precisión.

Una vez especificado el proceso de aprendizaje, se procede a entrenar el modelo. Para ello se ha decidido entrenar durante 50 épocas con un tamaño de lote de 512. Esto puede parecer exagerado para la aplicación en cuestión, pero se han definido tres objetos “callbacks” para el entrenamiento:

- **ModelCheckpoint:** guarda los mejores puntos del modelo durante el entrenamiento.
- **EarlyStopping:** detiene el entrenamiento si no se observa una mejora en la precisión de validación después de cierto número de épocas.
- **ReduceLROnPlateau:** reduce la tasa de aprendizaje si no se observa una mejora en la pérdida de validación después de cierto número de épocas.

3.3. Conjunto de datos utilizado

Los conjuntos de datos desempeñan un papel muy importante en el desarrollo y entrenamiento de modelos. Por ello, se ha seleccionado uno de los más utilizados, el EMNIST, que recoge letras mayúsculas y minúsculas escritas a mano (Figura 6).



Figura 6. Ejemplo del conjunto de datos EMNIST (Baldominos et al., 2019).

El conjunto de datos EMNIST está compuesto por un total de 814.255 caracteres y dígitos manuscritos por 3.700 escritores diferentes. A su vez está formado por 6 conjuntos de datos diferentes, cada uno con diferente número y clases de muestra. Tras analizar todos, se escogió el conjunto de datos EMNIST Letters. Este conjunto de datos está formado por 145.600 imágenes en escala de grises, distribuidas en 26 clases de letras mayúsculas y minúsculas del alfabeto. Cada imagen tiene un tamaño de 28x28 píxeles, lo que hace un total de 784 características.

4. Análisis de los resultados

Con objeto de estudiar la precisión y robustez de la aplicación desarrollada, se han realizado 6 tipos de pruebas diferentes: 3 primeras modificando la disposición de los cubos (estando la luz de los LEDs encendida), y otras tres pruebas fijando un posicionamiento de los cubos y variando la iluminación, es decir, con los LEDs apagados y con pruebas realizadas a 3 horas diferentes, para estudiar cómo afecta a la aplicación la incidencia de la iluminación exterior. A continuación, se muestran los resultados de algunas de estas pruebas, donde en todos los casos se ha obtenido un 100% de acierto en las predicciones.

La primera de ellas se ha realizado con la iluminación activada. En la Figura se han recuadrado en rojo las diferentes letras “E” encontradas. A pesar de ser la misma letra y tipografía, se observa que son diferentes, pero a pesar de ello, la red realiza la predicción correcta en todas ellas.



Figura 7. Análisis de los resultados - 1ª prueba iluminación con LEDs.

En la segunda prueba (Figura 8), se observa que la letra “D” marcada en verde no está perfectamente colocada, sino que se encuentra parcialmente rotada en la plataforma, lo cual deforma levemente la letra. Y, aun así, la predicción realizada por la red ha sido correcta.



Figura 8. Análisis de los resultados - 2ª prueba iluminación con LEDs.

Atendiendo a los resultados, queda demostrada la robustez del modelo ante la variabilidad en cuanto a posicionamiento de los cubos, errores de colocación y cambios de iluminación.

5. Conclusiones

Las demandas del mercado están impulsando a las empresas hacia la creación de células robotizadas inteligentes con capacidad de tomar decisiones. En este trabajo se ha implementado una célula robotizada con un sistema de visión artificial para realizar operaciones de pick&place, utilizando visión artificial y Redes Neuronales Convolucionales, dotando al sistema de inteligencia y reconociendo los objetos que rodean su entorno. De esta manera el robot es capaz de tomar decisiones sin reprogramar el código, lo que aumenta su versatilidad.

Concretamente, se ha diseñado una aplicación de pick&place, donde el robot Delta es capaz de escribir la palabra seleccionada por el usuario con cubos con letras serigrafiadas. Para ello, por un lado, se ha desarrollado el escenario de trabajo del robot conformado por varias plataformas, permitiendo maximizar la cantidad de cubos disponibles. Por otro lado, se ha programado una interfaz de usuario que permite monitorizar el proceso y seleccionar la palabra a escribir. Por último, se ha diseñado un modelo basado en técnicas inteligentes de aprendizaje para el reconocimiento de caracteres.

El modelo de reconocimiento de caracteres está basado en una Red Neuronal Convolucional. Esta red ha conseguido un rendimiento excelente, con un porcentaje de acierto del 100%

en diferentes situaciones del entorno. De esta forma, el sistema robotizado es capaz de interactuar con el usuario formando las palabras de 9 letras (como máximo) en tiempos por debajo de 1 minuto.

A partir del trabajo realizado, se ha abierto la oportunidad de integrar técnicas inteligentes de aprendizaje en diferentes aplicaciones robotizadas, aumentando la flexibilidad y la robustez de los procesos.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Gobierno Vasco (ref. IT1726-22).

Referencias

- Baldominos, A., Saez, Y., & Isasi, P. (2019). A survey of handwritten character recognition with MNIST and EMNIST. *Applied Sciences (Switzerland)*, 9(15). <https://doi.org/10.3390/APP9153169>
- Beier, G., Ullrich, A., Niehoff, S., Reißig, M., & Habich, M. (2020). Industry 4.0: How it is defined from a sociotechnical perspective and how much sustainability it includes – A literature review. *Journal of Cleaner Production*, 259. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2020.120856>
- Harada, K., Tsuji, T., Nagata, K., Yamanobe, N., & Onda, H. (2014). Validating an object placement planner for robotic pick-and-place tasks. *Robotics and Autonomous Systems*, 62(10), 1463-1477. <https://doi.org/10.1016/J.ROBOT.2014.05.014>
- Henry, C., Ahn, S. Y., & Lee, S. W. (2020). Multinational License Plate Recognition Using Generalized Character Sequence Detection. *IEEE Access*, 8, 35185-35199. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2974973>
- Kausar, T., Manzoor, S., Kausar, A., Lu, Y., Wasif, M., & Adnan Ashraf, M. (2021). Deep Learning Strategy for Braille Character Recognition. *IEEE Access*, 9, 169357-169371. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3138240>
- Li, Z., Wu, Q., Xiao, Y., Jin, M., & Lu, H. (2020). Deep Matching Network for Handwritten Chinese Character Recognition. *Pattern Recognition*, 107, 107471. <https://doi.org/10.1016/J.PATCOG.2020.107471>
- Ma, B., Li, X., Xia, Y., & Zhang, Y. (2020). Autonomous deep learning: A genetic DCNN designer for image classification. *Neurocomputing*, 379, 152-161. <https://doi.org/10.1016/J.NEUCOM.2019.10.007>
- Nzue, R. M. A., Brethé, J. F., Vasselín, E., & Lefebvre, D. (2013). Comparison of serial and parallel robot repeatability based on different performance criteria. *Mechanism and Machine Theory*, 61, 136-155. <https://doi.org/10.1016/J.MECHMACHTHEORY.2012.10.004>
- Sihang, W., Jiapeng, W., Weihong, M., & Lianwen, J. (2020). Precise detection of Chinese characters in historical documents with deep reinforcement learning. *Pattern Recognition*, 107. <https://doi.org/10.1016/J.PATCOG.2020.107503>
- Su, T., Cheng, L., Wang, Y., Liang, X., Zheng, J., & Zhang, H. (2018). Time-Optimal Trajectory Planning for Delta Robot Based on Quintic Pythagorean-Hodograph Curves. *IEEE Access*, 6, 28530-28539. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2831663>
- Vaila, R., Chiasson, J., & Saxena, V. (2022). A Deep Unsupervised Feature Learning Spiking Neural Network With Binarized Classification Layers for the EMNIST Classification. *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computational Intelligence*, 6(1), 124-135. <https://doi.org/10.1109/TETCI.2020.3035164>
- Xue, Y., Tong, Y., Yuan, Z., Su, S., Slowik, A., & Toglaw, S. (2021). Handwritten character recognition based on improved convolutional neural network. *Intelligent Automation and Soft Computing*, 29(2), 497-509. <https://doi.org/10.32604/IASC.2021.016884>
- Zhong, R. Y., Xu, X., Klotz, E., & Newman, S. T. (2017). Intelligent Manufacturing in the Context of Industry 4.0: A Review. *Engineering*, 3(5), 616-630. <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2017.05.015>



Simposio de Robótica, Bioingeniería y Visión por Computador 2024



Combinación de un brazo robótico de 6-DOF con una nariz electrónica para la discriminación automática de muestras de corcho

Lozano, Jesús.^{a,*}, López, Ángel.^a, Meléndez, Félix.^a, Fernández, Víctor.^a, Santamaría, Nohely.^a, Arroyo, Patricia.^a, Díaz, Fernando.^a, González, Víctor.^a, Suarez, José Ignacio.^a

^aEscuela de Ingenierías Industriales, Avda. de Elvas, s/n, 06006, Badajoz, España.

Resumen

El 2,4,6-tricloroanisol (TCA) es un compuesto orgánico responsable de un defecto del vino denominado "sabor a corcho". Este compuesto se produce durante la fabricación de los tapones de corcho. La solución actual a este problema consiste en análisis costosos que requieren mucho tiempo; por lo tanto, las industrias del vino y de los tapones de corcho necesitan una solución in situ y de bajo coste. En este artículo describimos el diseño de una nariz electrónica combinada con un brazo robótico como solución al problema de la contaminación del corcho. La nariz electrónica, formada por una matriz de 5 sensores digitales, está conectada, por un lado, al brazo robótico con E/S digitales y, por otro, a una aplicación Android que muestra los datos. Se analizaron 3 lotes diferentes de tapones de corcho con distintas concentraciones de TCA. El conjunto de datos resultante se procesó y se redujo mediante el análisis de componentes principales, mostrando que la e-nose era capaz de diferenciar los tapones de corcho en función de su concentración de TCA.

Palabras clave: brazo robótico, nariz electrónica, sensores de gas, muestreo automático.

Combination of a 6-DOF robot arm with an electronic nose for automatic discrimination of cork samples

Abstract

2,4,6-trichloroanisole (TCA) is an organic compound responsible for a wine fault called cork taint. This compound is produced during cork stopper manufacturing. The current solution to this issue consists of expensive and time-consuming analysis; therefore, the wine and cork stopper industries require a low-cost, on-the-spot solution. In this paper, we describe the design of an electronic nose combined with a robotic arm as a solution to the cork taint problem. The electronic nose, formed by an array of 5 digital sensors, is connected, on the one hand to the robotic arm with digital I/O, and on the other hand to an Android application that displays the data. Three different batches of cork stoppers with different TCA concentrations were analyzed. The resulting data set was processed and reduced using Principal Component Analysis, and it showed the e-nose was able to differentiate cork stoppers depending on their TCA concentration.

Keywords: robotic arm, electronic nose, gas sensors, automatic sampling.

1. Introducción

En las últimas décadas se han desarrollado sistemas olfativos electrónicos (e-noses) como alternativa al olfato tradicional para detectar e identificar olores. Estos dispositivos pueden detectar compuestos orgánicos volátiles presentes en el aire haciendo uso de un conjunto de sensores químicos, normalmente basados en semiconductores de óxido metálico (MOS), y técnicas de aprendizaje automático. Ya han demostrado ser muy útiles en diversos campos, como la industria alimentaria, la cali-

dad del aire o la seguridad (Cipriano and Capelli, 2019; Tan and Xu, 2020; Matatagui et al., 2019). En particular, son muy útiles en procesos industriales como la seguridad alimentaria, la monitorización de procesos y el control de calidad (Peris and Escuder-Gilbert, 2013; Navrátil et al., 2004; Deshmukh et al., 2015).

En los últimos años se han realizado cada vez más estudios sobre las posibilidades de integrar narices electrónicas (e-noses) en robots. Este campo, denominado olfato robóti-

*Autor para correspondencia: jesuslozano@unex.es

co móvil (MRO), se divide principalmente en dos ramas de investigación: localización de fuentes de gas (GSL) (Burgués et al., 2019; Monroy et al., 2018; Monroy and Gonzalez-Jimenez, 2018) y cartografía de distribución de gas (GDM) (Bennetts et al., 2014; Loutfi et al., 2009). Las narices electrónicas podrían ser especialmente adecuadas para los robots, ya que pueden utilizarse para desplegar sistemas olfativos en entornos de difícil acceso o peligrosos, como en las operaciones de búsqueda y rescate tras un desastre natural. Además, el uso de robots puede aumentar la precisión de las mediciones e-nose, ya que los robots pueden programarse para seguir protocolos de muestreo estandarizados.

Por otro lado, la combinación de un brazo robótico con una nariz electrónica es un enfoque novedoso para la fabricación que tiene el potencial de mejorar significativamente la productividad y el control de calidad. Las ventajas de esta combinación para diversas aplicaciones incluyen la capacidad de automatizar tareas que en la actualidad se realizan manualmente, la mejora de la exactitud y la precisión, o el aumento de la velocidad. Por ejemplo, el brazo robótico podría utilizarse para colocar una nariz electrónica cerca de un objeto o zona objetivo, o para moverla alrededor de obstáculos y hacia zonas de difícil acceso. Sin embargo, en la bibliografía existente se observa una escasez de trabajos sobre su integración en brazos robóticos. En (Schleif et al., 2016), una e-nose con muestreo activo se acopla a un brazo robótico montado a su vez en un robot móvil. El brazo se utiliza para acercar la e-nose a diferentes contenedores con acetona, etanol, butano y ginebra. Por otro lado, Rendyansyah et al. también utilizaron un sistema robótico móvil equipado con un brazo robótico y una nariz electrónica para encontrar una fuente de gas butano o gasolina (Rendyansyah et al., 2019).

Merece la pena considerar el uso de robots colaborativos (cobots) en este tipo de entornos. Los cobots son una nueva clase de robots diseñados para trabajar junto a los humanos en entornos industriales y de fabricación (El Zaatari et al., 2019). Suelen ser mucho más pequeños y ligeros que los robots industriales y están equipados con sensores y software que les permiten interactuar de forma segura con los humanos. Por tanto, los cobots tienen el potencial de revolucionar la fabricación y el trabajo industrial, aumentando la productividad y reduciendo los costes. También tienen el potencial de mejorar la seguridad en estos entornos, al reducir la necesidad de que los humanos trabajen cerca de máquinas peligrosas.

Este trabajo propone la implementación de una nariz electrónica de pequeño tamaño en un cobot 6-DOF para la detección de TCA (2,4,6-tricloroanisol), un compuesto responsable del deterioro de los vinos tapados con corcho (Cravero, 2020). La e-nose utilizada en este estudio incorpora sensores de gas MOS digitales miniaturizados de última generación con procesamiento integrado (Rüffer et al., 2018; Yurko et al., 2019). Estos sensores tienen un rápido tiempo de respuesta y recuperación, lo que permite su uso en aplicaciones como la presentada. Además, existe comunicación vía E/S digital entre la nariz y el brazo. Esto permite que el brazo actúe en función de lo que mide la nariz, y por tanto la automatización del proceso objetivo.

El sistema completo se describe detalladamente a lo largo del documento. En primer lugar, se describen el brazo robótico y la nariz electrónica, así como su interconexión y procesamien-

to de datos. A continuación, se representan y discuten los resultados obtenidos al utilizar el sistema para discriminar tapones de corcho con TCA. Por último, se presentan las conclusiones y el trabajo futuro.

2. Descripción del sistema

2.1. Brazo robótico

El sistema incluye un brazo robótico de 6 grados de libertad (DOF) fabricado por Elephant Robotics, modelo catbot. Se trata de un robot colaborativo de 18 kg de peso, fabricado en aluminio, policarbonato y caucho, compuesto principalmente por la carcasa del robot, la unidad motriz, la unidad de transmisión y los sensores internos. Tiene una carga útil de 3 kg y un alcance de 600 mm.

El cobot incluye varias interfaces de interconexión. Entre ellas se encuentran una interfaz de audio, comunicación wifi y ethernet, un puerto de datos serie USB 2.0, HDMI, 12 entradas digitales y 8 salidas digitales. Además, incorpora 3 salidas digitales y 3 entradas digitales para la comunicación con la herramienta instalada (en este caso, una pinza).

En un extremo, dispone de una pinza a la que se acopla el e-nose. Ambas están conectadas al robot mediante E/S digitales. El brazo se encarga de posicionar la nariz electrónica por encima de las muestras de corcho y de completar las mediciones para realizar la discriminación de las muestras de corcho. El modelo 3D se muestra en la (Figura 1).

Para programar el robot se debe utilizar el software ya implementado en el robot (RoboFlow). En palabras de Elephant Robotics "Roboflow es un software operativo interactivo hombre-máquina, desarrollado por Elephant Robotics para facilitar a los usuarios el rápido dominio de la operación y uso del brazo robótico, y ayudar a los usuarios a completar eficientemente el control del brazo robótico y el trabajo de programación a través de un proceso de operación simple".

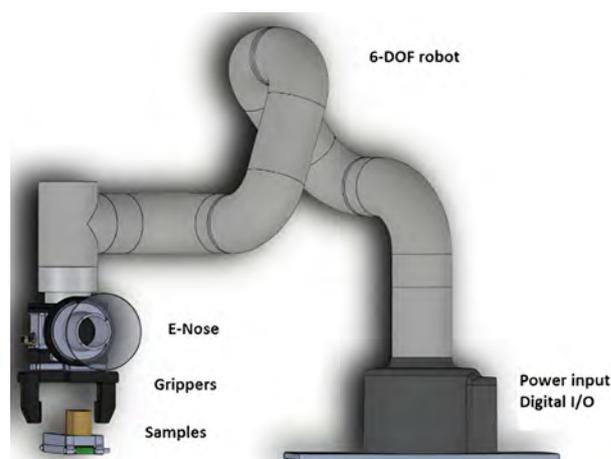


Figura 1: Modelo 3D del robot

2.2. Nariz electrónica

La nariz electrónica (e-nose) utilizada en este robot es un prototipo de fabricación propia (Arroyo et al., 2020). Se trata de un circuito de dimensiones muy reducidas (39 mm x 32,5 mm), alimentado por una batería LiPo de 3,7 V_{DC} y 2000 mAh.

Su pequeño tamaño, peso y bajo consumo (185 mA) hacen que sea fácilmente integrable en un pequeño maletín, convirtiendo esta nariz electrónica en un dispositivo transportable y manipulable.

El diagrama de bloques de la nariz electrónica se muestra en la (Figura 2) en la que se pueden observar los diferentes componentes de la nariz electrónica.

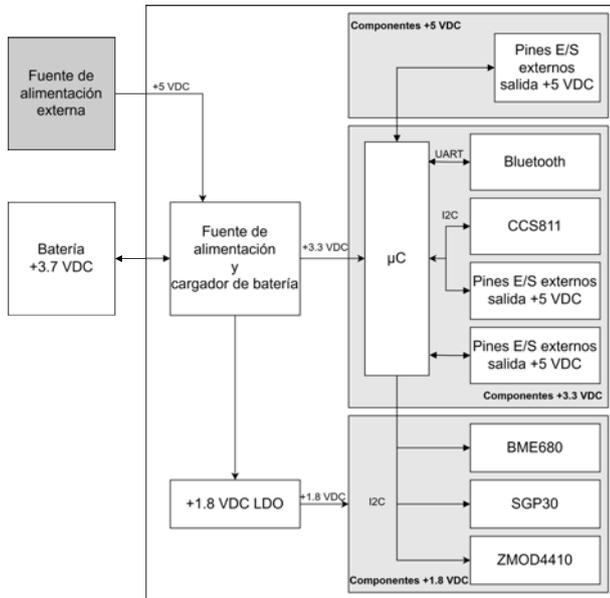


Figura 2: Diagrama de bloques de la nariz electrónica

Los componentes principales de la nariz electrónica son:

- **Microcontrolador:** Se trata del PIC32MM0256GPM048 de Microchip Technology Inc. (Chandler, AZ, EE.UU.). Entre otras características, se eligió este microcontrolador porque tiene 256 KB de memoria de programa, 32 KB de memoria de datos y varios módulos I2C y UART.
- **Módulo Bluetooth:** Se trata del RN4871 de Microchip, un módulo Bluetooth de baja energía que permite la transmisión de datos a través de un servicio UART transparente.
- **Sensores:** Los sensores utilizados en esta nariz electrónica son de tipo MOS. Todos ellos tienen su propio convertidor analógico-digital e interfaz de comunicación I2C integrados en su encapsulado, por lo que la comunicación y envío de datos al microcontrolador se realiza digitalmente a través del bus I2C, lo que reduce la circuitería externa y facilita el uso de los sensores. Los sensores utilizados se especifican en la (Tabla 1).
- **Fuentes de alimentación y cargador de batería:** La placa de circuito impreso contiene una fuente de +3,3 V_{DC} para alimentar todo el circuito y una fuente de +5 V_{DC} para alimentar a este voltaje algunos componentes externos, como un módulo SIM. También tiene un regulador lineal de +1,8 V_{DC} para alimentar los sensores que operan a este voltaje, como se muestra en el diagrama de la (Figura 2). También dispone de un cargador de batería para recargar vía micro USB-B la batería LiPo. Este cargador permite utilizar la e-nose mientras se realiza el proceso de carga.

- **Electroválvula:** La e-nose está equipada con un conector diseñado para controlar una electroválvula, permitiendo así la conmutación automática entre dos fuentes de gas mediante el control del microcontrolador. No obstante, es importante destacar que esta funcionalidad no se encuentra implementada en este proyecto de brazo robótico.
- Se han hecho accesibles 4 pines de entrada/salida reprogramables del microcontrolador, junto con una salida de +5 V_{DC} para conectar o comunicarse con otros dispositivos. Estos pines son utilizados para la comunicación con el brazo robótico.

Para poder utilizar la nariz electrónica con el brazo robótico, se ha diseñado una carcasa impresa en 3D. Ésta contiene tanto la placa de circuito impreso de la nariz electrónica como la batería que la alimenta. También permite el acoplamiento a la pinza del brazo robótico para medir los tapones de corcho. Esta carcasa se muestra en la (Figura 3).



Figura 3: Nariz electrónica en la carcasa impresa en 3D y acoplada a la pinza del brazo robótico.

2.3. Interconexión

En cuanto a la comunicación de la e-nose, el dispositivo puede enviar los datos obtenidos a una aplicación para Smartphone Android desarrollada a tal efecto. El protocolo de comunicación está basado en comandos ASCII y envía cada señal separada por tabulaciones, estando cada medida separada por filas, quedando en una tabla donde cada columna corresponde a una señal de un sensor y cada fila a una medida distinta. Estas mediciones o filas se envían cada dos segundos.

El brazo robótico y la e-nose también están interconectados a través de E/S digitales. Gracias a esta conexión, la e-nose puede comunicar los resultados de las mediciones al robot y,

basándose en ellos, el robot clasifica la muestra. Sin embargo, la fase de toma de decisiones aún no está implementada en la e-nose. Estas conexiones están optoacopladas debido a las diferentes tensiones de trabajo de los dispositivos. El diagrama de bloques de la interconexión se muestra en la (Figura 4).

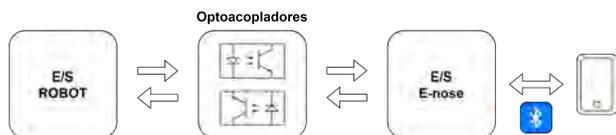


Figura 4: Diagrama de bloques de interconexión entre dispositivos

2.4. Montaje experimental y tratamiento de datos

Se midieron tres lotes diferentes de tapones de corcho utilizando el dispositivo. Estos tapones habían sido previamente analizados y su concentración de TCA había sido calculada por cromatografía de gases y espectrometría de masas siguiendo la norma UNE 56930:2017. La concentración de TCA en estos tapones de corcho fue de 10-20 ppt para el lote 1, el lote 2 tuvo 5-10 ppt y el lote 3 tuvo <0,5 ppt. La (Figura 5) muestra una imagen de las muestras. Estas muestras se colocaron dentro de un recipiente y se midieron con tiempos de adsorción y desorción de 120 segundos. Se realizaron un total de 18 ciclos de adsorción/desorción. El primer ciclo de todas las muestras se descartó para garantizar la estabilidad del espacio de cabeza y la respuesta del sensor.

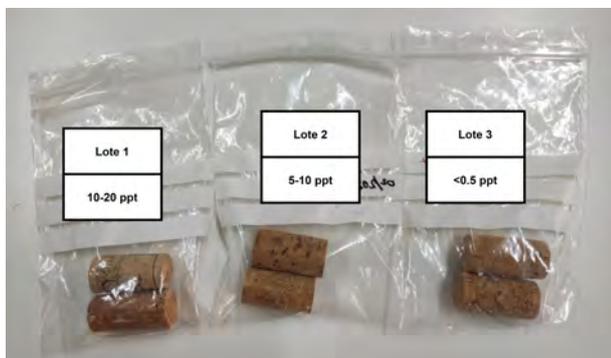


Figura 5: Muestras de tapones de corcho. Los tapones etiquetados como lote 1 tenían 10-20 ppt de TCA, los etiquetados como lote 2 tenían 5-10 ppt y el lote 3 tenía aproximadamente 0 ppt.

Después de medir todas las muestras, el conjunto de datos resultante era una matriz de $16 \times 2160 \times 3$, por lo que era necesaria una etapa de reducción de la dimensionalidad. Para ello se utilizó el análisis de componentes principales (PCA). Para la extracción de características elegimos el algoritmo (1) para cada ciclo de medición, donde r es la respuesta del sensor siendo R_{\max} y R_{\min} los valores máximo y mínimo de la resistencia del sensor:

$$r = 100 * (R_{\max}/R_{\min}) \quad (1)$$

3. Resultados y debate

El análisis de componentes principales nos permitió verificar si el dispositivo era capaz de discriminar entre tapones de corcho dada su concentración de TCA. La (Figura 6) representa los resultados cuando se consideran todas las respuestas del sensor, es decir, 16 entradas. Aquí se observan dos efectos no deseados; en primer lugar, hay solapamiento entre los tapones 2 y 3, lo que podría deberse a concentraciones similares. En segundo lugar, este gráfico muestra una deriva significativa, especialmente en el lote 2. Este PCA representa el 84 % de la varianza.

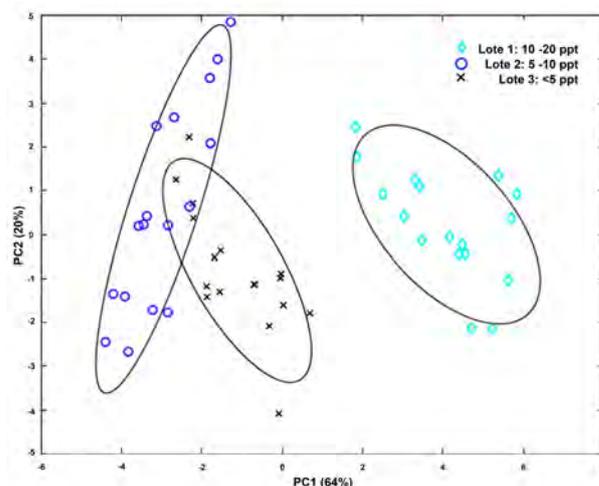


Figura 6: Análisis de componentes principales cuando se consideran todas las respuestas (brutas y procesadas).

Tabla 1: Sensores usados en la nariz electrónica.

Sensor	Fabricante	Señales
BME680	Bosch Sensortech GmbH (Alemania)	Temperatura (°C), Presión (hPa), Humedad (% R.H.), y valores resistivos del sensor (Ω).
SGP30	Sensirion AG (Suiza)	eCO2 (ppm), TVOC (ppb) y medidas de H2 y etanol en bruto.
CCS811	ScioSense B.V. (Países Bajos)	eCO2 (ppm), TVOC (ppb) y valor resistivo del sensor (Ω).
iAQ - CoreC	ScioSense B.V. (Países Bajos)	eCO2 (ppm), TVOC (ppb) y valor resistivo del sensor (Ω).
ZMOD4410	Renesas Electronics Corporation (Japón)	Valores brutos de etanol, valores resistivos del sensor, eCO2 (ppm), TVOC (ppb), e IAQ.

Sin embargo, como muestra la (Figura 7), cuando sólo se representan las respuestas brutas del conjunto de sensores (6 respuestas) no se observan los problemas de solapamiento ni deriva. En este caso, se representa el 95 % de la varianza. Las elipses alrededor de los datos representan un intervalo de confianza del 85 %. Además, tanto en esta representación como en la anterior, la elipse alrededor del lote 1 no está en contacto con las otras dos, mientras que las elipses alrededor de los lotes 2 y 3 están en contacto o se solapan.

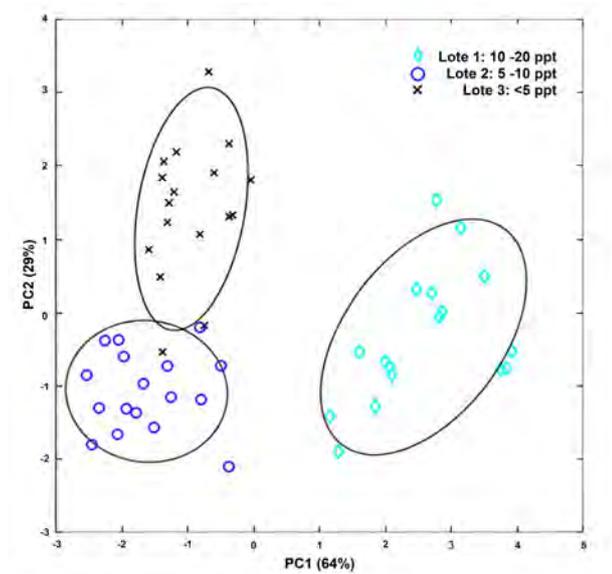


Figura 7: Análisis de componentes principales sólo con respuestas brutas.

4. Conclusiones y trabajos futuros

En este manuscrito hemos descrito el diseño, desarrollo y funcionamiento de un sistema automático y colaborativo basado en una nariz electrónica acoplada a un brazo robótico de 6 DOF para la discriminación de tapones de corcho en función de su concentración de 2,4,6-tricloroanisol.

La nariz electrónica, formada por una matriz de 5 sensores digitales de óxido metálico, nos permitió medir tres lotes de tapones de corcho que contenían una concentración de TCA de 10-20 ppt, 5-10 ppt y menos de 0,5 ppt.

Mediante un brazo robótico, pudimos automatizar el proceso, ahorrando tiempo, recursos y permitiéndonos realizar experimentos más largos. Este robot está conectado a la nariz electrónica mediante E/S digitales. Además, la nariz electrónica está conectada mediante Bluetooth a una aplicación para smartphone Android desarrollada para esta tarea.

Los resultados muestran que la nariz electrónica puede diferenciar entre tapones de corcho con 10-20 ppt de aquellos con 5-10 ppt y <5 ppt cuando se consideran todas las respuestas del sensor (brutas y procesadas). Sin embargo, cuando sólo se tienen en cuenta las respuestas brutas, esta clasificación es más clara, y los tapones de los lotes 2 y 3 también se separan.

Los trabajos futuros se centrarán en la integración de la etapa de toma de decisiones en la nariz electrónica, con el fin de disponer de un sistema completamente autónomo para la clasificación de los tapones de corcho.

Referencias

- Arroyo, P., Meléndez, F., Suárez, J. I., Herrero, J. L., Rodríguez, S., Lozano, J., Jan. 2020. Electronic nose with digital gas sensors connected via bluetooth to a smartphone for air quality measurements. *Sensors (Basel)* 20 (3), 786. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20030786>
- Bennetts, V. H., Schaffernicht, E., Pomareda, V., Lilienthal, A. J., Marco, S., Trincavelli, M., Sep. 2014. Combining non selective gas sensors on a mobile robot for identification and mapping of multiple chemical compounds. *Sensors (Basel)* 14 (9), 17331–17352. DOI: <https://doi.org/10.3390/S140917331>
- Burgués, J., Valdez, L. F., Marco, S., 2019. High-bandwidth e-nose for rapid tracking of turbulent plumes. In: 2019 IEEE International Symposium on Olfaction and Electronic Nose (ISOEN). pp. 1–3. DOI: <https://doi.org/10.1109/ISOEN.2019.8823158>
- Cipriano, D., Capelli, L., 2019. Evolution of electronic noses from research objects to engineered environmental odour monitoring systems: A review of standardization approaches. *Biosensors* 9 (2). DOI: <https://doi.org/10.3390/BIOS9020075>
- Cravero, M. C., Jun. 2020. Musty and moldy taint in wines: A review. *Beverages* 6 (2), 41. DOI: <https://doi.org/10.3390/BEVERAGES6020041>
- Deshmukh, S., Bandyopadhyay, R., Bhattacharyya, N., Pandey, R., Jana, A., 2015. Application of electronic nose for industrial odors and gaseous emissions measurement and monitoring – an overview. *Talanta* 144, 329–340. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2015.06.050>
- El Zaatari, S., Marei, M., Li, W., Usman, Z., Jun. 2019. Cobot programming for collaborative industrial tasks: An overview. *Rob. Auton. Syst.* 116, 162–180. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.R0BOT.2019.03.003>
- Loutfi, A., Coradeschi, S., Lilienthal, A. J., Gonzalez, J., Mar. 2009. Gas distribution mapping of multiple odour sources using a mobile robot. *Robotica* 27 (2), 311–319. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0263574708004694>
- Matatagui, D., Bahos, F. A., Gràcia, I., Horrillo, M. d. C., 2019. Portable low-cost electronic nose based on surface acoustic wave sensors for the detection of btx vapors in air. *Sensors* 19 (24). DOI: <https://doi.org/10.3390/s19245406>
- Monroy, J., Gonzalez-Jimenez, J., 2018. Towards Odor-Sensitive mobile robots. In: *Electronic Nose Technologies and Advances in Machine Olfaction. IGI Global*, pp. 244–263. DOI: <https://doi.org/10.4018/978-1-5225-3862-2.CH012>
- Monroy, J., Ruiz-Sarmiento, J.-R., Moreno, F.-A., Melendez-Fernandez, F., Galindo, C., Gonzalez-Jimenez, J., 2018. A semantic-based gas source localization with a mobile robot combining vision and chemical sensing. *Sensors* 18 (12). DOI: <https://doi.org/10.3390/s18124174>
- Navrátil, M., Cimander, C., Mandenius, C.-F., 2004. On-line multisensor monitoring of yogurt and filmjolk fermentations on production scale. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 52 (3), 415–420, PMID: 14759126. DOI: [10.1021/jf0304876](https://doi.org/10.1021/jf0304876)
- Peris, M., Escuder-Gilabert, L., 2013. On-line monitoring of food fermentation processes using electronic noses and electronic tongues: A review. *Analytica Chimica Acta* 804, 29–36. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aca.2013.09.048>
- Rendyansyah, Rivai, M., Purwanto, D., Mar. 2019. Olfactory arm mobile robot for object inspection based on fuzzy logic and support vector machine. *J. Phys. Conf. Ser.* 1196, 012019.
- Rüffer, D., Hoehne, F., Bühler, J., Mar. 2018. New digital metal-oxide (MOx) sensor platform. *Sensors (Basel)* 18 (4), 1052. DOI: <https://doi.org/10.3390/s18041052>
- Schleif, F.-M., Hammer, B., Monroy, J. G., Jimenez, J. G., Blanco-Claraco, J.-L., Biehl, M., Petkov, N., Feb. 2016. Odor recognition in robotics applications by discriminative time-series modeling. *Pattern Anal. Appl.* 19 (1), 207–220. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10044-014-0442-2>
- Tan, J., Xu, J., 2020. Applications of electronic nose (e-nose) and electronic tongue (e-tongue) in food quality-related properties determination: A review. *Artificial Intelligence in Agriculture* 4, 104–115. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aiia.2020.06.003>
- Yurko, G., Roostaei, J., Dittrich, T., Xu, L., Ewing, M., Zhang, Y., Shreve, G., Aug. 2019. Real-time sensor response characteristics of 3 commercial metal oxide sensors for detection of BTEX and chlorinated aliphatic hydrocarbon organic vapors. *Chemosensors (Basel)* 7 (3), 40. DOI: <https://doi.org/10.3390/chemosensors7030040>



Simposio de Robótica, Bioingeniería y Visión por Computador 2024



Actuadores neumáticos blandos basados en hidrogeles inteligentes: avances hacia rigidez variable

De La Morena, J.^a, Pérez, J.A.^a, Ramos, F.^a, Vázquez, A.S.^{a,*}

^aEscuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial, Av/ Camilo José Cela SN, 13071, Ciudad Real, España.

Resumen

La robótica blanda se está convirtiendo en una alternativa muy interesante a la robótica tradicional. Los robots blandos pueden ser de gran utilidad en ámbitos tales como la manipulación delicada de objetos (p. ej. en manipulación de alimentos) y la interacción robot/humano (p.ej. en robots para rehabilitación, robots quirúrgicos o robots colaborativos). Sin embargo, los actuadores de los robots blandos presentan una serie de dificultades, derivadas de su propia elasticidad, que dificultan su diseño y control. Bajo este contexto, en este trabajo presentamos los avances que el grupo RobInd de la UCLM ha logrado en el diseño y control de actuadores blandos basados en nuestro hidrogel CN. Este hidrogel es un material que, además de tener un módulo de Young adecuado para aplicaciones blandas, confiere a nuestros actuadores de capacidades inteligentes de autocurado y propiocepción. Sin embargo, su carácter blando, además de dificultar su control, limita su aplicación a situaciones donde no se requiera una gran precisión y/o fuerza. Por este motivo, recientemente estamos trabajando en cómo variar su rigidez de manera controlada. Nuestros avances en este aspecto son presentados como novedad en este artículo.

Palabras clave: Robótica blanda, Materiales inteligentes, Modelado y control de actuadores blandos, Rigidez variable.

Soft pneumatic actuators based on smart hydrogels: Advances towards variable stiffness

Abstract

Soft robotics is becoming an interesting alternative to traditional robotics. Soft robots can be useful in areas such as delicate object manipulation (e.g., food handling) and human interaction (e.g., in rehabilitation systems, surgical robots, or collaborative robots). However, soft robots present a series of challenges arising from their own flexibility that complicate their design and control. In this work, we present the advances achieved by the RobInd group at UCLM in the design and control of soft actuators based on smart hydrogels. These materials, besides having an adequate Young's modulus for soft applications, endow our actuators with self-healing and proprioception capabilities. Nevertheless, its softness complicates their control and application in situations requiring precision and/or force. For this reason, we are currently working on controlling their stiffness. Our advancements in this aspect are presented as novelty in this article.

Keywords: Soft robotics, Smart materials, Modeling and control of soft actuators, Variable stiffness.

1. Introducción

La robótica blanda abarca el diseño, fabricación y control de máquinas que interactúen con el entorno y que puedan experimentar grandes deformaciones debidas a la flexibilidad inherente de sus estructuras (Cianchetti et al., 2015). Los robots blandos son muy diferentes de los robots tradicionales. Por ejemplo, los clásicos robots industriales están fabricados con materiales rígidos, lo que les otorga potencia y precisión para tareas de fabricación automatizada, pero su incapacidad para deformar-

se elásticamente limita su aplicación a entornos sin presencia humana. Por el contrario, los robots blandos tienen la capacidad de absorber impactos, lo que les permite interactuar de forma segura con los humanos y/o manipular objetos de manera delicada. Además, los robots blandos a menudo están fabricados con materiales inteligentes que les proporcionan capacidades tales como *autocuración* (Terry et al., 2021) o *propiocepción* (Xavier et al., 2022). Estas características han suscitado un creciente interés entre la comunidad científica, que investiga la

*Autor para correspondencia: andress.vazquez@uclm.es
Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)

aplicación de los robots blandos en multitud de campos, como la industria (Rossiter and Hauser, 2016), la agricultura (Navas et al., 2021) o la salud (Cianchetti et al., 2018). Sin embargo, los robots blandos presentan una serie de desafíos que dificultan su uso en la mayoría de las aplicaciones reales. Muchos de estos desafíos recaen en la capacidad de actuación que tienen los robots blandos: en primer lugar, suelen carecer de la fuerza y precisión necesarias para la mayoría de las tareas clásicas de manipulación. En segundo lugar, los actuadores blandos, debido a su elasticidad, presentan comportamientos altamente no lineales, lo que dificulta mucho su control en posición/fuerza.

Muchos autores identifican el control de la rigidez como el *desafío prioritario* de la robótica blanda ya que la falta de fuerza y/o precisión de los manipuladores blandos se debe a su propia falta de rigidez (Manti et al., 2016). Los sistemas con rigidez variable pueden hacer que un manipulador sea flexible cuando necesite interactuar con el entorno de manera delicada y/o segura, o volverse rígidos para aumentar la capacidad de carga y precisión del manipulador. Esto permite que este tipo de robots trabajen en entornos con humanos mientras ajustan su dinámica según la aplicación que estén llevando a cabo.

En este trabajo presentamos, primero, un resumen de las aportaciones que ha realizado el grupo RobInd de la UCLM en el desarrollo y control del movimiento de actuadores blandos basados en materiales inteligentes. En segundo lugar presentamos, como novedad, los avances que estamos realizando para el control activo de rigidez de actuadores blandos.

1.1. Control de rigidez en actuadores blandos

El control de la rigidez en robótica blanda se puede obtener a nivel del actuador o a nivel estructural. A nivel del actuador se utilizan métodos activos y pasivos (Ham et al., 2009). En los pasivos, el actuador contiene elementos elásticos, como muelles. Tal es el caso del manipulador DLR HAND/ARM (Greibenstein et al., 2011). En los activos el actuador es rígido, pero su software permite emular el comportamiento de un resorte, como ocurre con el robot DLR Lightweight (DLR LWR) (Albuschäffer et al., 2007). A nivel estructural encontramos trabajos que presentan mecanismos bioinspirados como tentáculos de pulpo (Cianchetti et al., 2015) o trompas de elefante (Cheng et al., 2012). Estos sistemas utilizan actuadores activos dispuestos de manera antagonista que les permite variar la rigidez y la posición de equilibrio del sistema de manera independiente. Otros autores utilizan actuadores semipasivos que pueden cambiar las propiedades mecánicas intrínsecas del material. Un ejemplo es la conocida *universal gripper* (Brown et al., 2010). Por último, existen trabajos basados en cambios reológicos del material debido a campos magnéticos y eléctricos, aunque producen cambios mucho más pequeños en la rigidez (Majidi and Wood, 2010).

Nuestro grupo tiene experiencia en el desarrollo de sistemas de rigidez variable a nivel estructural. En (Lopez-Diaz et al., 2019) presentamos el desarrollo de yemas blandas, para los dedos de una mano robótica (Barret-Hand), fabricadas con hidrogeles inteligentes con capacidad de cambio de rigidez. En dicho trabajo, el cambio de rigidez en las yemas era controlado mediante el control de la cantidad de agua contenida en el hidrogel a través de la variación de campos eléctricos. En este artículo presentamos este mismo concepto de cambio de rigidez basado

en el control del agua presente en los hidrogeles, pero aplicado a actuadores blandos y utilizando técnicas de secado/hidratación por aire en lugar de utilizar corrientes eléctricas.

2. Actuador modular blando basado en hidrogeles

Nuestro grupo ha desarrollado en los últimos años un nuevo tipo de actuador blando neumático que está siendo utilizado en el desarrollo de exoesqueletos para rehabilitación de manos y en el desarrollo de pinzas blandas para manipulación delicada de alimentos (ver Figura 1). Las principales características de nuestro actuador provienen del material inteligente con el que está fabricado (Hidrogel CN, Sección 2.1) y la modularidad de su diseño (Sección 2.2).

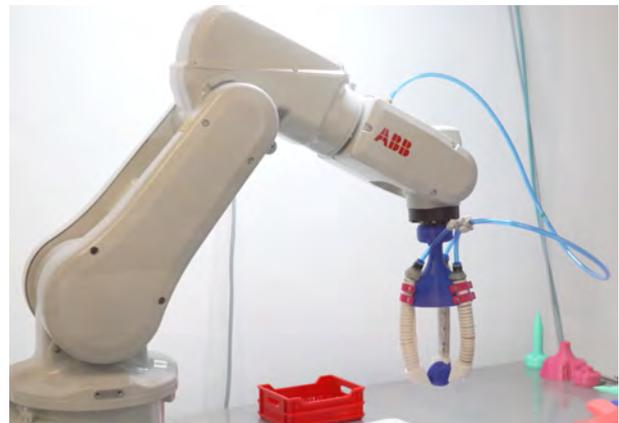


Figura 1: Robot industrial equipado con una pinza blanda diseñada para la manipulación delicada de alimentos y fabricada con nuestros actuadores neumáticos blandos basados en hidrogeles inteligentes.

2.1. Hidrogel CN con propiedades inteligentes

El material inteligente que utilizamos en nuestros actuadores es el Hidrogel-CN (Naranjo et al., 2020) desarrollado en colaboración con el MSOC-Nanochemistry de la UCLM. Se prepara mediante la polimerización radical de una solución formada por cloruro de [2-(acriloxi)etil]-trimetilamonio (AETA) como monómero (44.84 % en peso), N,N'-metilbisacrilamida (MBA) como agente de reticulación (0.09 % en peso), 2,4,6-trimetilbenzoilfosfonato de sodio (NaTPO) como iniciador de fotopolimerización (0.17 % en peso) y agua desionizada como solvente (54.90 % en peso). La fotopolimerización se lleva a cabo bajo luz UV (365 nm) durante menos de 2 minutos (el tiempo exacto depende de la cantidad de hidrogel y la potencia de la luz). Después de la fotopolimerización, las muestras se hinchan con moléculas de agua libre para luego equilibrarse con el entorno. Este material dota a nuestros actuadores de las siguientes propiedades inteligentes:

- **Autocuración.** Cuando el grado de absorción o *swelling degree* (SD) del hidrogel se encuentra equilibrado con el ambiente (i.e. no hay intercambio de agua) se forma una segunda capa de solvatación (ver Figura 2 central) que propicia la aparición de puentes de hidrógeno que son los responsables del *autocurado*. En los últimos años hemos utilizado este mecanismo de *autocurado* para el diseño y fabricación de músculos McKibben (Lopez-Diaz et al., 2020) y actuadores pneumáticos blandos López-Díaz et al. (2024) que se reparan tras cortes o roturas.

- **Autoadhesión** La propia capacidad de *autocurado* puede utilizarse como mecanismo de *autoadhesión*: en estado equilibrado, dos piezas de hidrogel pueden *pegarse* por el mecanismo de *autocurado*. Pero en el caso de que el hidrogel esté demasiado húmedo o demasiado seco (ver Figura 2 laterales) la capa de solvatación desaparece, pudiendo utilizarse como mecanismo de despegado. Este mecanismo de pegado/despegado ha sido utilizado como mecanismo de unión en manipuladores blandos modulares López-Díaz et al. (2022) y más recientemente como mecanismo de fabricación que permite la modularidad de los actuadores blandos objeto de estudio en este artículo (de la Morena et al., 2024).
- **Propiocepción**. Puesto que el hidrogel CN es un material conductor, es posible hacer circular a través de él una corriente eléctrica. Cuando la geometría del hidrogel sufre algún tipo de deformación, al cambiar su sección transversal y su longitud, también lo hace su resistencia eléctrica. Este comportamiento nos ha permitido, mediante el diseño de circuitos acondicionadores de señal, medir la deformación mecánica de una pieza de hidrogel (Payo et al., 2021) y calcular la curvatura de los actuadores blandos modulares (López-Díaz et al., 2024).

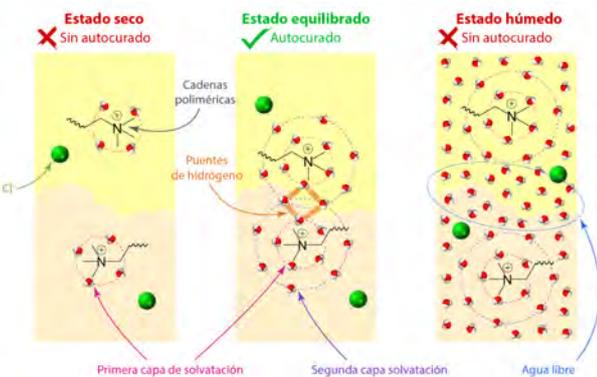


Figura 2: Mecanismo de autocurado en el hidrogel-CN.

2.2. Diseño del actuador modular blando

Nuestro actuador modular se compone de dos partes distintas (Figura 3): un cilindro interno formado por uno o varios módulos neumáticos fabricados con hidrogel CN, y un refuerzo externo fabricado mediante impresión 3D en Filaflex (un termoplástico flexible). En el cilindro interno, los módulos neumáticos hacen la función de cámaras de aire que cuando se hinchan producen la deformación del actuador. Con un solo módulo (de sección 360°) se obtiene una deformación/movimiento en una dirección. Con dos módulos (de sección 180°) se obtiene una deformación/movimiento en dos direcciones. Con tres módulos (de sección 120°, ver Figura 4), se obtiene una deformación/movimiento en tres direcciones. El refuerzo externo, con forma de costillar, tiene la misión de dirigir las deformaciones, generando las trayectorias curvas al introducir aire a presión en algún módulo del actuador.

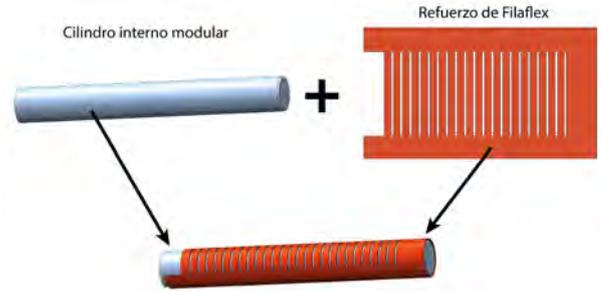


Figura 3: Esquema del actuador modular blando basado en el hidrogel CN.

Los módulos del cilindro se ensamblan/desensamblan utilizando el mecanismo de autoadhesión. Por ejemplo, en la Figura 4 se muestra el proceso de montaje para un cilindro modular tridireccional simplemente uniendo los módulos de 120°. También se muestra cómo, en el caso de que fuera necesario, los módulos pueden ser desmontados y reemplazados simplemente añadiendo agua en las uniones.

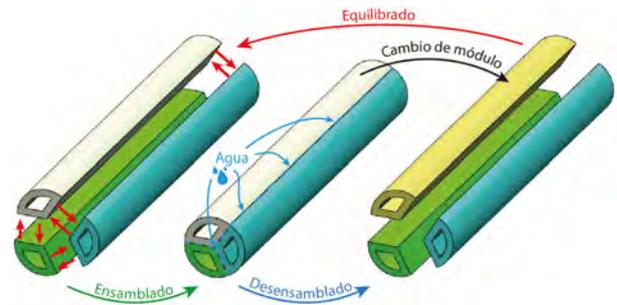


Figura 4: Ensamblado/desensamblado del cilindro interno modular para un actuador tridireccional. Para ensamblar solo es necesario poner en contacto las caras de los módulos. Para desensamblarlo basta con echar agua en las uniones.

A lo largo de la cara interna del refuerzo de Filaflex, hay colocados una serie de electrodos de cobre que entran en contacto con el cilindro de hidrogel al enrollar el refuerzo sobre este 5. Al existir una relación entre la deformación del hidrogel con su resistencia eléctrica, es posible obtener una relación lineal entre la curvatura del actuador y la resistencia medida entre dos puntos del mismo, como demostramos en (López-Díaz et al., 2024). Los electrodos que se encuentran en los extremos del refuerzo se utilizan para inyectar una corriente eléctrica alterna al hidrogel y así no alterar su estructura. Los otros cuatro electrodos son los que permiten medir la resistencia eléctrica del actuador en distintos tramos del mismo y así actuar como sensores propioceptivos de curvatura.

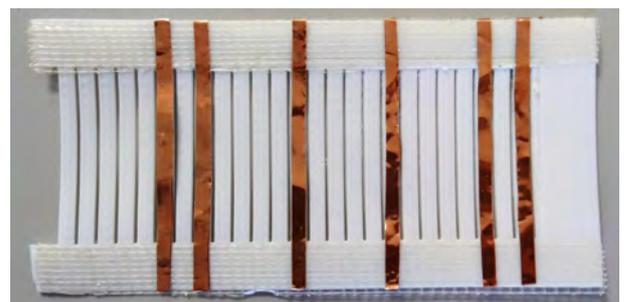


Figura 5: Electrodos en el refuerzo externo del actuador.

2.3. Modelado y control de posición del actuador

Nuestro actuador blando ha sido modelado dinámicamente en trabajos recientes (López-Díaz et al., 2024). La problemática principal que tienen estos actuadores blandos son las no linealidades debidas, principalmente, a la hiperelasticidad del material y a la histéresis que sufre el conjunto actuador-sistema neumático. Debido a estos problemas, recientemente se ha propuesto un modelado de orden fraccionario (pendiente de publicación) que, con un modelo simple, es capaz de obtener la misma precisión que un modelo de orden entero de orden muy superior. El control del actuador se realiza gracias a la realimentación de posición obtenida por el sensor propioceptivo comentado en la Sección anterior. En López-Díaz et al. (2024) hemos propuesto un controlador basado en el esquema de la Figura 6, mientras que recientemente se ha diseñado un controlador fraccional basado en la inversión del modelo fraccionario que es posible debido a la propia sencillez del modelo.

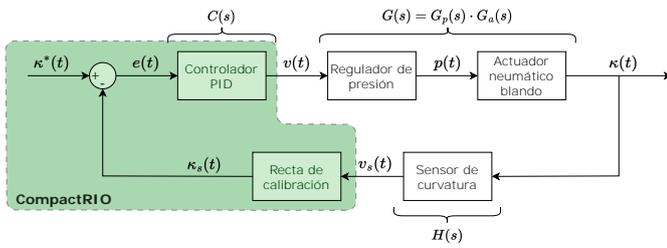


Figura 6: Esquema de control del actuador blando.

3. Control de la rigidez del actuador blando neumático

En este apartado presentamos nuestros últimos avances para el control de rigidez de nuestro actuador blando. Como fundamento para este control de rigidez, se plantea realizar un control del ya mencionado *swelling degree* (SD), que representa la relación entre la masa de agua y la masa de polímero contenidas en el hidrogel, según la relación

$$SD = \frac{m_{\text{agua}}}{m_{\text{polimero}}} = \frac{m_{\text{hidrogel}} - m_{\text{polimero}}}{m_{\text{polimero}}}. \quad (1)$$

En Lopez-Díaz et al. (2019) se mostró la relación existente entre el SD y la rigidez, la cual se representa gráficamente en la Figura 7. A medida que el contenido en agua es mayor (aumenta el SD), la rigidez del hidrogel disminuye (baja su módulo de Young, E). Por tanto, necesitaremos *secar* el hidrogel para interactuar con objetos rígidos que requieran de más fuerza y/o precisión para su manipulación, mientras que, para tareas que requieran de una mayor adaptabilidad en el agarre, por ejemplo, deberemos *hidratar* el hidrogel.

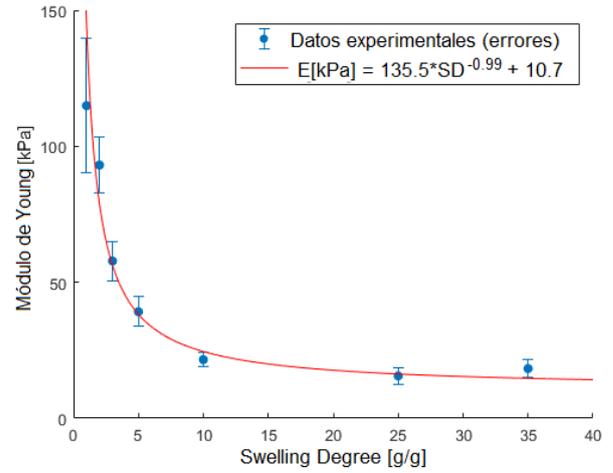


Figura 7: Relación entre el módulo de Young del hidrogel y su SD.

Para realizar estas dos tareas se propone introducir corrientes de aire caliente y de aire húmedo para secar e hidratar, respectivamente, el actuador. El esquema de la plataforma experimental diseñada para secar/hidratar de manera controlada y monitorizar el cambio de SD en el actuador se muestra en la Figura 8. Por un lado, utilizamos un secador comercial para generar el flujo de aire caliente que se conduce a través de una tobera hacia el interior del actuador. Este sistema tiene el inconveniente de que aumenta la temperatura del hidrogel rápidamente, lo que podría afectar a algunas de sus propiedades. Es por ello que el aire caliente se aplica a intervalos, impidiendo que el hidrogel alcance gran temperatura. Con este sistema se consigue realizar un rápido intercambio de agua debido a la convección forzada y al alto gradiente de temperatura entre hidrogel y aire. Por otro lado, se ha creado un circuito que conduce el aire a través de un recipiente con agua, lo que aumenta su contenido de vapor de agua (es decir, su humedad relativa), y lo dirige hacia el interior del actuador. En ambos casos, el peso del actuador se monitoriza de manera constante mediante una báscula electrónica conectada a un computador a través de su puerto de salida serie. De esta manera, es posible verificar el incremento o la reducción de la masa de agua contenida en el actuador ya que la masa del polímero permanece constante.

Se han realizado experimentos con el circuito de secado con resultados bastante exitosos. La Figura 9 muestra la evolución temporal del SD del actuador sometido a la corriente de aire caliente durante media hora. En ella se aprecia un descenso de tipo exponencial en el SD del actuador. De hecho, los ajustes conseguidos mediante modelos exponenciales simples

$$SD(t) = A \cdot e^{-Bt} + C \quad (2)$$

donde A , B y C son las constantes del ajuste, son bastante buenos. Hemos monitorizado reducciones de en torno al 50 % del agua extraíble del hidrogel. La explicación a este límite es que existiría una fracción de agua que no sería posible eliminar por este procedimiento (representada en el ajuste por la constante C) y que requeriría de métodos más agresivos, como hornos de secado.

Por último, se están realizando ensayos del sistema de hidratación, cuyos avances se muestran en la Figura 10. Aunque

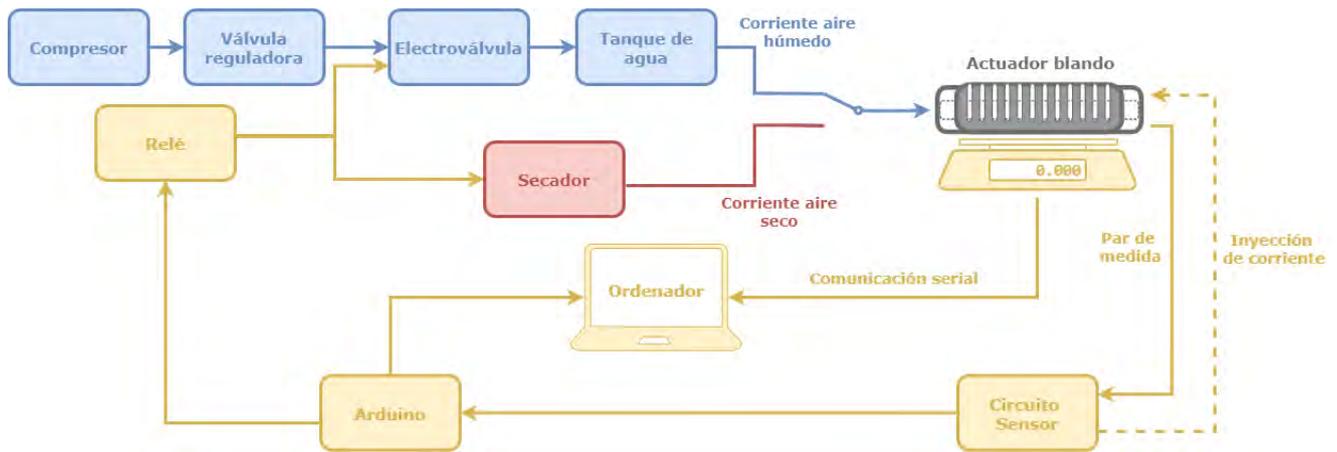


Figura 8: Esquema que representa los elementos del sistema experimental de secado e hidratación del actuador.

los resultados son positivos, observamos que el proceso de hidratación del actuador se produce más despacio que el de secado descrito anteriormente. Aún se está buscando mejorar el procedimiento experimental para acelerar este proceso.

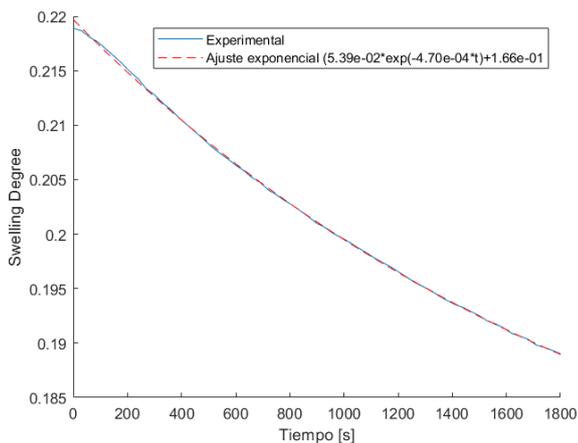


Figura 9: Evolución temporal del SD en un experimento de secado del actuador

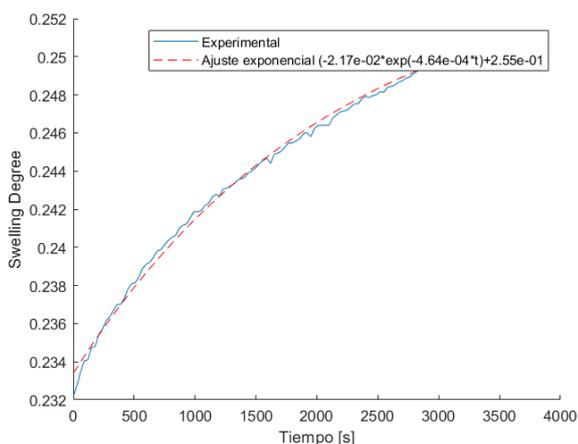


Figura 10: Evolución temporal del SD en un experimento de hidratación del actuador.

4. Conclusiones

En este trabajo hemos presentado los últimos logros del grupo RobInd de la UCLM en el desarrollo de actuadores blandos con hidrogeles inteligentes. Estos actuadores presentan grandes ventajas derivadas de las propiedades inteligentes de los hidrogeles, como son el *autocurado*, la *propiocepción* o la *autoadhesión*. Sin embargo, el carácter blando del hidrogel hace que sea necesario variar su rigidez para ampliar el campo de aplicación de los actuadores: un actuador blando con rigidez variable puede volverse más rígido para tareas de precisión o que requieran fuerza, y volverse blando para tareas de manipulación delicada. En este sentido, hemos presentado los últimos avances del grupo para controlar la rigidez modificando el grado de *swelling degree* del hidrogel por medio de un sistema humidificador/secador diseñado para nuestros actuadores blandos.

Se han presentado resultados iniciales que corroboran que con nuestro sistema es posible cambiar el *swelling degree* de los actuadores y por lo tanto su rigidez. Estos buenos resultados nos alientan a seguir por esta línea. El siguiente paso será realizar un estudio de la fuerza real ejercida por el actuador al alcanzar diferentes curvaturas con diferentes *swelling degrees*. También deberemos estudiar como afecta este cambio de rigidez a las medidas de curvatura obtenidas por el sensor de propiocepción. Por último, se deberá desarrollar un controlador adaptativo que se ajuste a los diferentes estados del actuador debido a su cambio de rigidez.

Agradecimientos

Este trabajo forma parte del Programa de Materiales Avanzados y cuenta con el apoyo del MCIN con financiación de la Unión Europea NextGenerationEU (PRTR-C17. I 1) y de la Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha (Proyecto SBPLY/21/180501/000135).

Referencias

Albu-Schäffer, A., Haddadin, S., Ott, C., Stemmer, A., Wimböck, T., Hirzinger, G., Aug. 2007. The dlr lightweight robot: design and control concepts for robots in human environments. *Industrial Robot: An International Journal* 34 (5), 376–385. DOI: 10.1108/01439910710774386

- Brown, E., Rodenberg, N., Amend, J., Mozeika, A., Steltz, E., Zakin, M. R., Lipson, H., Jaeger, H. M., Oct. 2010. Universal robotic gripper based on the jamming of granular material. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 107 (44), 18809–18814.
DOI: 10.1073/pnas.1003250107
- Cheng, N. G., Lobovsky, M. B., Keating, S. J., Setapen, A. M., Gero, K. I., Hosoi, A. E., Iagnemma, K. D., May 2012. Design and analysis of a robust, low-cost, highly articulated manipulator enabled by jamming of granular media. In: 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE.
DOI: 10.1109/icra.2012.6225373
- Cianchetti, M., Calisti, M., Margheri, L., Kuba, M., Laschi, C., 2015. Bioinspired locomotion and grasping in water: the soft eight-arm octopus robot. *Bioinspiration & biomimetics* 10 (3), 035003.
- Cianchetti, M., Laschi, C., Menciassi, A., Dario, P., May 2018. Biomedical applications of soft robotics. *Nature Reviews Materials* 3 (6), 143–153.
DOI: 10.1038/s41578-018-0022-y
- de la Morena, J., López-Díaz, A., Ramos, F., Payo, I., Vázquez, A. S., 2024. Modular bending actuators based on self-x properties of the CN-Hydrogel. In: 2024 IEEE 7th International Conference on Soft Robotics (RoboSoft). p. Accepted.
- Grebenstein, M., Albu-Schaffer, A., Bahls, T., Chalon, M., Eiberger, O., Friedl, W., Gruber, R., Haddadin, S., Hagn, U., Haslinger, R., Hoppner, H., Jorg, S., Nickl, M., Nothhelfer, A., Petit, F., Reill, J., Seitz, N., Wimbock, T., Wolf, S., Wusthoff, T., Hirzinger, G., May 2011. The dlr hand arm system. In: 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE.
DOI: 10.1109/icra.2011.5980371
- Ham, R., Sugar, T., Vanderborght, B., Hollander, K., Lefeber, D., Sep. 2009. Compliant actuator designs. *IEEE Robotics and Automation Magazine* 16 (3), 81–94.
DOI: 10.1109/mra.2009.933629
- López-Díaz, A., de la Morena, J., Braic, A., Serna, C., Ramos, F., Vázquez, E., Vázquez, A. S., 2024. Proprioception and control of a soft pneumatic actuator made of a self-healable hydrogel. *Soft robotics*, Accepted.
- López-Díaz, A., De La Morena, J., Ramos, F., Vázquez, E., Vázquez, A. S., 2022. A novel hydrogel-based connection mechanism for soft modular robots. In: 2022 International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, pp. 7124–7130.
- Lopez-Diaz, A., Martin-Pacheco, A., Fernandez, R., Rodriguez, A. M., Herrero, M. A., Vazquez, E., Vazquez, A. S., may 2019. A new soft fingertip based on electroactive hydrogels. In: 2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE.
DOI: 10.1109/icra.2019.8794105
- Lopez-Diaz, A., Martin-Pacheco, A., Naranjo, A., Martin, C., Herrero, M. A., Vazquez, E., Vazquez, A. S., may 2020. Autonomous self-healing pneumatic McKibben muscle based on a new hydrogel material. In: 2020 3rd IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft). IEEE.
DOI: 10.1109/robosoft48309.2020.9115992
- Majidi, C., Wood, R. J., Oct. 2010. Tunable elastic stiffness with microconfined magnetorheological domains at low magnetic field. *Applied Physics Letters* 97 (16).
DOI: 10.1063/1.3503969
- Manti, M., Cacucciolo, V., Cianchetti, M., Sep. 2016. Stiffening in soft robotics: A review of the state of the art. *IEEE Robotics and Automation Magazine* 23 (3), 93–106.
DOI: 10.1109/mra.2016.2582718
- Naranjo, A., Martín, C., López-Díaz, A., Martín-Pacheco, A., Rodríguez, A. M., Patiño, F. J., Herrero, M. A., Vázquez, A. S., Vázquez, E., dec 2020. Autonomous self-healing hydrogel with anti-drying properties and applications in soft robotics. *Applied Materials Today* 21, 100806.
DOI: 10.1016/j.apmt.2020.100806
- Navas, E., Fernández, R., Sepúlveda, D., Armada, M., Gonzalez-de Santos, P., Apr. 2021. Soft grippers for automatic crop harvesting: A review. *Sensors* 21 (8), 2689.
DOI: 10.3390/s21082689
- Payo, I., Polo, J. L., López, B., Serrano, D., Rodríguez, A. M., Herrero, M. A., Martín-Pacheco, A., Sánchez, I., Vázquez, E., 2021. Signal conditioning circuit for gel strain sensors. *Smart Materials and Structures* 31 (1), 015020.
- Rositer, J., Hauser, H., Sep. 2016. Soft robotics - the next industrial revolution? [industrial activities]. *IEEE Robotics and Automation Magazine* 23 (3), 17–20.
DOI: 10.1109/mra.2016.2588018
- Terryn, S., Langenbach, J., Roels, E., Brancart, J., Bakkali-Hassani, C., Poutrel, Q.-A., Georgopoulou, A., Thuruthel, T. G., Safaei, A., Ferrentino, P., et al., 2021. A review on self-healing polymers for soft robotics. *Materials Today* 47, 187–205.
- Xavier, M. S., Tawk, C. D., Zolfagharian, A., Pinskiel, J., Howard, D., Young, T., Lai, J., Harrison, S. M., Yong, Y. K., Bodaghi, M., et al., 2022. Soft pneumatic actuators: A review of design, fabrication, modeling, sensing, control and applications. *IEEE Access* 10, 59442–59485.



Simposio de Robótica, Bioingeniería y Visión por Computador 2024



Sesion: <Robótica>

Selección automática de comportamientos mediante estrategias de Deep Reinforcement Learning en el robot social Mini

Sofía Álvarez-Arias , Marcos Maroto-Gómez , Sara Carrasco-Martínez , José Carlos Castillo , María Malfaz , Miguel Ángel Salichs 

^aDepartamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad Carlos III de Madrid. Avenida de la Universidad, 30. 28911 Leganés, Madrid. España.

To cite this article: Álvarez-Arias, S et al. 2024. Automatic behavior selection using Deep Reinforcement Learning strategies in the Mini social robot
Simposio de Robótica, Bioingeniería y Visión por Computador, 2024, 1-6. <https://doi.org/>

Resumen

Los robots sociales han aparecido en nuestras vidas con el propósito de mejorarlas como agentes necesarios para reducir el impacto de aspectos clave de nuestra sociedad, como el envejecimiento de la población. Sin embargo, la población adulta, uno de los sectores a los que mayores beneficios puede aportar, aún sienten rechazo debido a la dificultad que tienen para el uso de la tecnología y la baja confianza en la misma. Para solventar este problema, es necesario diseñar robots que aporten confianza al usuario y faciliten su uso mostrando comportamientos que resulten naturales y fácilmente reconocibles. Este artículo propone combinar estrategias de aprendizaje por refuerzo profundo o *Deep Reinforcement Learning* con un sistema de generación de comportamiento biológicamente inspirado en humanos que permita a robots sociales adaptarse a entornos dinámicos sociales de gran complejidad mientras muestran un comportamiento natural. El robot es capaz de percibir estímulos del ambiente, emular procesos biológicos internos y motivar el comportamiento. El objetivo de todo el sistema propuesto es mantener el bienestar fisiológico, cognitivo y emocional de Mini en la mejor condición posible. Los resultados muestran como *Rainbow*, uno de los más novedosos algoritmos de *Deep Reinforcement Learning*, permite al robot funcionar de forma óptima durante largos periodos de tiempo generando comportamientos adecuados a cada situación a la que se enfrenta el robot.

Palabras clave: Robots sociales, Procesos biológicamente inspirados, Interacción humano-robot, Deep Reinforcement Learning, Rainbow, Bienestar emocional, Bienestar fisiológico.

Automatic behavior selection using Deep Reinforcement Learning strategies in the Mini social robot.

Abstract

Social robots have appeared in our lives to improve their lives as necessary agents to reduce the impact of key aspects of our society, such as the aging population. However, the adult population, one of the sectors to which they can bring the most significant benefits, still feels rejected due to their difficulty in using technology and their low confidence in it. To solve this problem, it is necessary to design robots that provide confidence to the user and facilitate their use by showing natural and easily recognizable behaviors. This paper proposes to combine Deep Reinforcement Learning strategies with a human-inspired biological behavior generation system that allows social robots to adapt to highly complex dynamic social environments while displaying natural behavior. The robot can sense environmental stimuli, emulate internal biological processes, both physiological and psychological, and motivate the Mini social robot's behavior to maintain physiological, cognitive, and emotional well-being in the best possible condition. The results show how Rainbow, one of the newest Deep Reinforcement Learning algorithms, allows the robot to function optimally over long periods by generating behaviors appropriate to each situation the robot faces.

Keywords: Social Robots, Biologically Inspired Processes, Human-Robot Interaction, Deep Reinforcement Learning, Rainbow, Emotional Well-being, Physiological Well-being.

*Sofía Álvarez Arias: sofalvar@pa.uc3m.es

Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)

Correos electrónicos: sofalvar@pa.uc3m.es (Sofía Álvarez-Arias ) , marmarot@ing.uc3m.es (Marcos Maroto-Gómez ) ,

1. Introducción

La robótica social ofrece posibilidades y alternativas para solucionar algunos de los problemas de la sociedad actual, como la soledad de las personas mayores o la escasez de terapéutas y cuidadores (Vázquez Blanco et al., 2021). Algunos autores (Pedersen et al., 2018; Pu et al., 2019) destacan el impacto positivo que los robots sociales pueden tener en la vida de las personas mayores prestándoles ayuda en tareas y actividades de su día a día. Por ello, nuestro objetivo es diseñar y desarrollar robots capaces de realizar sus tareas de forma efectiva y adaptadas a sus usuarios.

La asistencia a personas mayores requiere que el robot incorpore estrategias que reduzcan el rechazo que normalmente este sector de la población tiene hacia las nuevas tecnologías, ya sea por complejidad o por falta de conocimiento. Para contrarrestar estos problemas, buscamos desarrollar robots autónomos capaces de adaptar su comportamiento en entornos sociales complejos mostrando un comportamiento lo más natural y entendible posible. Para operar en entornos complejos, el robot debe ser capaz de ejecutar una gran variedad de acciones que permitan la adaptación del comportamiento a la situación que se le presenta. Este hecho requiere conocer y gestionar adecuadamente un gran volumen de información del entorno para elegir la mejor acción en cada situación. En los últimos años, los modelos de aprendizaje basado en *Deep Reinforcement Learning* (François-Lavet et al., 2018) han proporcionado resultados positivos para aprender estrategias de comportamiento en entornos dinámicos y complejos. Esta metodología permite tener en cuenta grandes volúmenes de información gracias al uso de redes neuronales y mecanismos de aprendizaje basados en acción-recompensa obteniendo experiencias al interactuar con el entorno. En interacción humano-robot, varios autores (Malfaz et al., 2011; Maroto-Gómez et al., 2018) destacan la importancia de que el robot se comporte de forma natural. Para lograr este objetivo se ha diseñado un sistema autónomo de generación de comportamiento basado en emular procesos biológicamente inspirados que ocurren en humanos (por ejemplo dormir, el estrés o el nivel de energía). Estos procesos varían en función de los estímulos que el robot percibe y dinámicas internas que hemos establecido para obtener una evolución temporal. Además, consideramos emociones y normas sociales para que el robot responda a las peticiones de sus usuarios. Este sistema se complementa con el sistema de aprendizaje para maximizar el bienestar fisiológico, emocional y social del robot.

El sistema propuesto se desarrolla para su integración en el robot social Mini. Mini está destinado a asistir a mayores con un grado leve de deterioro cognitivo y a sus cuidadores ofreciendo actividades de estimulación física, cognitiva y de entretenimiento (Maroto-Gómez et al., 2021). Este trabajo pretende complementar trabajos previos realizados para mejorar el robot Mini basados en la evaluación de la generación y expresión de emociones y estados de ánimo (Fernández-Rodicio et al., 2022), sobre aprendizaje de comportamiento autónomo y de preferencias (Maroto-Gómez et al., 2021) y sobre procesos de

inspiración biológica para generar un comportamiento natural (Maroto-Gómez et al., 2018, 2022).

Con el objetivo de lograr un comportamiento más natural, hemos diseñado un sistema bioinspirado de mayor complejidad en comparación con entornos utilizados en investigaciones anteriores (Maroto-Gómez et al., 2018, 2021, 2022). Este entorno permite al robot considerar un gran número de situaciones diferentes donde el usuario tiene un papel muy relevante y el robot tiene en cuenta las acciones conjuntas para aprender su política óptima. El sistema genera todos los procesos básicos del robot, condicionados o no al usuario, como por ejemplo jugar solo o con el usuario. Además, incluye procesos que imitan emociones básicas (alegría, enfado, tristeza o calma) y normas sociales para realizar actividades que el usuario necesita. El conjunto de todos esos procesos forman un sistema que, en sentido figurado, mantiene vivo al robot y motiva su comportamiento.

La sección 2 presenta los métodos basados en *Deep Reinforcement Learning* que hemos utilizado en este trabajo. En concreto, se presenta *Rainbow*, uno de los algoritmos más recientes y novedosos para abordar problemas de toma de decisiones autónomas en entornos dinámicos. La sección 3 presenta al robot Mini y su sistema bioinspirado propuesto, describiendo todos los procesos que se generan en el robot y como se relacionan entre sí. La sección 4 describe el proceso de entrenamiento del modelo. La sección 5 presenta los resultados de integrar los modelos propuestos en el robot social Mini. Por último, la sección 6 presenta las conclusiones de este trabajo.

2. Metodología basada en Deep Reinforcement Learning

El aprendizaje de acciones y comportamientos que maximicen los valores de bienestar fisiológico, emocional y social del robot es el objetivo principal del sistema basado en *Deep Reinforcement Learning* propuesto en este trabajo. El *Deep Reinforcement Learning* (François-Lavet et al., 2018) surge de la combinación de dos métodos de aprendizaje con gran éxito en la actualidad: el aprendizaje por refuerzo (*Reinforcement Learning*) (Sutton and Barto, 2018) y el aprendizaje profundo (*Deep Learning*) (Goodfellow et al., 2016). Por un lado, el aprendizaje por refuerzo consiste en aprender qué acción se debe realizar en cada situación para maximizar una función de refuerzo. El aprendizaje tiene lugar mediante interacciones repetidas con el entorno que permiten al agente conocer el efecto positivo o negativo de sus acciones. Por otro lado, el aprendizaje profundo es un método supervisado que consiste en utilizar redes neuronales para obtener para buscar relaciones en los datos de entrada y resolver un problema conociendo la salida esperada de los datos de entrenamiento.

La metodología basada en *Deep Reinforcement Learning* trata de cumplir dos objetivos clave a nivel computacional: minimizar la función de pérdidas representada en la ecuación 1 para obtener los parámetros más óptimos de la red neuronal para el problema que se plantea y maximizar la función de refuerzo de la ecuación 2 para obtener una política de comportamiento

que permita al agente cumplir su función.

$$\mathcal{L}(\theta) = E_{s,s',a,r}[(Q(s,a,\theta_i) - Y_i)^2] \quad (1)$$

$$R_t = \sum_{\tau=t}^{\infty} \gamma^{\tau-t} r_{\tau} \quad (2)$$

En la ecuación 1, \mathcal{L} representa la pérdida obtenida para las acciones realizadas en cada intervalo de tiempo t . Esta pérdida depende de θ_i , que representa el conjunto de pesos de la red neuronal. El peso de las acciones indica cuanto aumenta o disminuye el valor numérico de cada uno de los estados afectados en la función de pérdidas. E representa las expectativas sobre los parámetros s, s', a y r , donde s es el estado del agente (en este caso, el robot) en el instante de tiempo t , s' es el estado al que transita el robot tras realizar la acción a y r es el valor de refuerzo obtenido tras realizar la acción a . Por último, Q es el valor objetivo esperado que representa la bondad de ejecutar la acción a en el estado s . Y_i representa el valor objetivo que se debe actualizar para entrenar el modelo.

En la ecuación 2, el parámetro $\gamma \in (0, 1)$ es el factor de descuento y representa la importancia de las experiencias futuras sobre las pasadas. Valores de γ próximos a uno reducen el impacto de experiencias pasadas y próximos a 0 minimizan las nuevas experiencias. Finalmente, r_{τ} representa el valor numérico del refuerzo obtenido tras realizar la acción a . Sobre él se aplica el ratio de descuento para determinar el valor final del refuerzo en función de la importancia.

En los últimos años, *Rainbow* (Hessel et al., 2018) ha ganado protagonismo como uno de los algoritmos de *Deep Reinforcement Learning* más novedosos. *Rainbow* combina múltiples mejoras en un solo algoritmo: Integrando técnicas como Double Q-learning, Dueling Networks, Prioritized Experience Replay y aprendizaje de distribución cuantil. Además, prioriza experiencias de aprendizaje para centrarse en transiciones de estado más informativas, acelerando el aprendizaje. Aprovecha la diversidad de políticas mediante técnicas como aprendizaje de políticas multinomiales y entropía máxima para explorar y aprender de manera más eficiente. Esta combinación de técnicas permite generalizar experiencias para enfrentar problemas similares que se presentan en el futuro. *Rainbow* calcula el refuerzo con una distribución de probabilidad obtenida por aprendizaje por refuerzo distributivo, además incorpora iteración N-pasos, esto actualiza los parámetros con más frecuencia obteniendo un mayor número de información. Gracias a esto *Rainbow* puede explorar eficientemente el espacio de acciones, equilibrando la exploración se mejora el aprendizaje. Debido a la combinación de múltiples técnicas, *Rainbow* es adaptable a una variedad de entornos y problemas de aprendizaje por refuerzo, por lo que ha sido la opción adoptada en este trabajo para resolver el problema de aprendizaje propuesto.

3. El robot Mini y su generación de comportamiento

3.1. Robot social Mini

Mini (Salichs et al., 2020) es un robot social de sobremesa capaz de asistir a personas mayores y cuidadores en terapias de estimulación cognitiva y física. Mini cuenta con un gran número de actividades destinadas a proporcionar entretenimiento al

usuario. Para ello, dispone de una *tablet* interactiva en la que muestra contenido multimedia y recibe las respuestas del usuario a las distintas actividades y retos que se le plantean. El robot, mostrado en la figura 1, posee un altavoz y un micrófono que permite la comunicación verbal y no verbal con sus usuarios. Mini tiene tres sensores de tacto en hombros y tripa y una cámara 3D que le permiten recoger información del usuario y percibir sus acciones. Para expresarse, el robot puede mover cabeza, cuello, brazos y cadera. Además, posee dos pantallas que emulan los ojos del robot. Por último, unos LEDs iluminan la boca, las mejillas y el corazón de Mini para dotarle de expresividad.



Figura 1: Mini social robot.

3.2. Procesos biológicos

En el robot se implementa un sistema biológicamente inspirado el cual imita procesos biológicos humanos naturales. Para conseguir la mayor naturalidad posible, estos procesos se han diseñado para que se vean afectados por el paso del tiempo, la ejecución de las diferentes acciones de Mini y la interacción con el usuario. En el sistema bioinspirado propuesto, el objetivo es maximizar el bienestar del robot, entendiendo bienestar como el valor del conjunto de procesos bioinspirados. Este bienestar, se ha dividido en tres: fisiológico, emocional y social. Para ello, el robot tiene una serie de procesos fisiológicos, emocionales y sociales que debe regular correctamente mediante la selección de acciones. Por ejemplo, si el robot tiene sueño, deberá dormir para regular el proceso asociado. De igual forma, si el robot está triste deberá ejecutar acciones que le permitan mejorar ese estado, como por ejemplo jugar.

La tabla 1 muestra los procesos que forman el estado interno del robot, así como su variación en el tiempo, el valor ideal de cada uno de ellos y una breve descripción. Estos procesos han sido elegidos en función de las capacidades de Mini y el comportamiento social que queremos generar en él. Todos ellos varían con el tiempo de forma lineal de acuerdo a una tasa de variación que se ha seleccionado de forma empírica para dar más importancia a determinados procesos. Esta variación hace que sufran un deterioro según la ecuación 3 que les aleja de su valor ideal. En ella, $d_i(t)$ representa el déficit que sufre el proceso i en el instante de tiempo t , vi_i representa el valor ideal del proceso y $cv_i(t)$ es el valor actual del proceso en el instante de tiempo t . El robot tratará de reducir de forma más urgente aquellos procesos que sufran un mayor déficit.

$$d_i(t) = |vr_i - cv_i(t)|, \quad (3)$$

Tabla 1: Procesos biológicamente inspirados junto a sus variaciones temporales, valores ideales y descripción.

Proceso biológico	Variación	Valor ideal	Descripción
Dormir	+0,2	0	Representa la evolución del sueño del robot
Entretenimiento social	-0,3	100	Simula el deseo de Mini de interactuar con el usuario
Autoentrenamiento	-0,3	100	Simula la necesidad de interacción sin el usuario
Interacción cognitiva	-0,2	100	Cuantifica la necesidad del robot de recibir refuerzo positivo
Interacción física	-0,2	100	Representa la necesidad de interacción física con el usuario
Estrés	+0,1	0	Cuantifica las experiencias negativas con el usuario
Energía	-0,2	100	Cuantifica el nivel de actividad que el robot puede realizar
Vínculo	-	100	Representa el vínculo humano-robot
Alegría	-0,1	100	Representa la emoción de felicidad
Tristeza	+0,1	0	Emoción contraria a la felicidad
Calma	-0,1	100	Emoción percibida generalmente como neutra
Enfado	+0,1	0	Emoción contraria a la calma

3.3. Estímulos externos percibidos por el robot

El comportamiento de Mini se ve afectado por una serie de estímulos externos que el robot es capaz de percibir a través de sus múltiples sensores. La percepción de estímulos y su inclusión en el sistema de aprendizaje es una novedad de este trabajo y aumenta la complejidad del sistema considerablemente. La tabla 2 muestra los estímulos que el robot es capaz de percibir y los efectos que tienen sobre los procesos biológicos. Algunos estímulos no tienen efectos, pero son necesarios para realizar algunas acciones. Por ejemplo, el usuario debe estar presente para poder jugar.

3.4. Normas sociales

En el caso del bienestar social no intervienen procesos biológicos, sino preferencias y eventos del usuario que condicionan el comportamiento del robot, a lo que nos referimos como procesos sociales. La tabla 3 muestra las dos acciones que se activan en caso de existir normas sociales. Además, la tabla muestra los refuerzos que proporcionan si se ejecutan y la necesidad de que el usuario esté presente para obtener dicho refuerzo. La norma ejecutar evento se activa cuando el usuario tiene en su agenda realizar una actividad con Mini. La norma ejecutar recordatorio se activa cuando el usuario tiene un recordatorio que Mini debe comunicarle, como una cita médica. Es importante señalar que a diferencia de los procesos biológicos, no siempre existen normas sociales activas y su valor puede ser nulo.

Tabla 2: Estímulos externos perceptibles por el robot y los efectos que provocan sobre los procesos fisiológicos, emocionales y sociales.

Estímulo	Efectos	Descripción
Presencia del usuario	-	La cámara 3D detecta al usuario
Emoción del usuario	-	Permite conocer cómo se siente el usuario
Satisfacción	-	Permite conocer la calidad de la interacción
Caricia	Alegría: +0,8	Presión leve y
	Vínculo: +0,3	continuada sobre los
	Calma: +1	sensores de tacto
Golpe	Tristeza: -0,8	
	Tristeza: +2	Gran presión
	Estrés: +2	de corta duración
Respuesta correcta	Vínculo: -50	sobre los sensores del robot
	Calma: -100	
	Alegría: +0,5	El usuario responde
Respuesta incorrecta	Calma: +0,3	correctamente a los
	Enfado: -0,3	juegos durante la
	Estrés: -0,8	interacción
Jugar	Enfado: +0,3	El usuario no responde
	Calma: -0,3	correctamente a los juegos
	Estrés: +0,3	durante la interacción
Rechazar el juego	Alegría: +2,4	Señala la interacción
	Estrés: -1,8	entre el usuario y robot
Rechazar el juego	Tristeza: +0,8	El usuario rechaza
		y la interacción con Mini

3.5. Comportamiento del robot

El comportamiento del robot hace referencia a la política de acciones que este ejecuta para dar una respuesta a las diferentes situaciones a las que se enfrenta en la interacción con el usuario y el ambiente. Mini puede ejecutar 14 acciones diferentes, cada una de las cuales afecta a uno o más procesos biológicos, a excepción de los procesos asociados al bienestar social de la tabla 3. La tabla 4 muestra los efectos de cada acción sobre los procesos biológicos y su magnitud.

Tabla 3: Acciones asociadas a las normas sociales en el entorno.

Acción	Prioridad	Refuerzo social	Estímulo necesario
Ejecutar evento	Alta	+4	Usuario presente
	Media	+3	
	Baja	+2	
Ejecutar recordatorio	Alta	+4	Usuario presente
	Media	+3	
	Baja	+2	

Tabla 4: Acciones del robot y los efectos que producen sobre los procesos biológicos y los estímulos del entorno.

Acción del robot	Refuerzo fisiológico y emocional	Descripción
Esperar	Energía: -2,3	Da tiempo al usuario para responder
	Estrés: -1,4	
Dormir	Sueño: -3,8	Simulación de sueño en periodos de baja actividad
	Energía: +2,4	
Jugar con el usuario	Energía: -0,4	Activa la función de juegos de Mini
	Entret. social: +4,2	
	Alegría: +1,4	
Bailar	Energía: -0,4	Movimiento de las partes móviles del robot
	Entret. social: +4,2	
	Enfado: -2	
	Tristeza: -1,8	
Hablar	Energía: -0,2	Mini entabla conversación con el usuario
	Int. cognitiva: +3,2	
Meditar	Estrés: -2,2	Restablece procesos negativos
	Energía: +0,1	
	Enfado: -1,8	
Pedir afecto	Vínculo: +3	Restaura procesos emocionales
	Int. física: +3,6	
Jugar solo	Energía: -0,4	Atiende necesidades de autoentrenamiento
	Autoentren.: +2,1	
	Calma: +1	
Alentar	Tristeza: -2,1	Anima al usuario a continuar con la interacción
	Vínculo: +1	
	Energía: -0,4	
Lamentar	Energía: -0,8	Da a conocer al usuario la disconformidad del robot
	Tristeza: +1,4	
	Estrés: +0,7	
	Enfado: +0,3	
Queja	Energía: -0,8	Respuesta a acciones extremas como pegar al robot
	Tristeza: +0,8	
	Estrés: +1,4	
	Vínculo: -1,4	
Llamar al usuario	-	Hace saber al usuario que necesita interactuar con él
	-	
Ejecutar evento	-	Existe un evento
Ejecutar recordatorio	-	Existe un recordatorio

4. Entrenamiento

El sistema biológicamente inspirado genera la evolución dinámica de los procesos. Estos procesos, los estímulos y las normas sociales sirven de entrada al algoritmo de aprendizaje

Rainbow. Este algoritmo genera como salida la acción que debe realizar el robot en cada instante de tiempo en base al valor de los 12 procesos biológicos, los estímulos y si alguna norma social está activa con el objetivo de mejorar su estado de bienestar todo lo posible regulando sus procesos internos.

El aprendizaje sucede en un entorno virtual basado en Gym (Piano, 2020) con *Deep Reinforcement Learning* donde el robot se enfrenta a una situación que simula dinámicas reales. En este entorno, el robot interactúa con un usuario también virtual que realiza acciones cada cierto tiempo y responde a las peticiones del robot con cierta probabilidad. El robot deberá elegir aquellas acciones que, para la situación en la que se encuentra, tengan efectos más importantes sobre sus procesos biológicos y normas sociales.

El valor de refuerzo de ejecutar cada acción viene establecido por la suma de las tres funciones que indican el bienestar del robot (ecuaciones 4, 5 y 6).

$$\text{Bienestar fisiológico}(t) = 100 - \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N w_i(t) \cdot d_i(t) \quad (4)$$

$$\text{Bienestar emocional}(t) = 100 - \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N w_i(t) \cdot d_i(t) \quad (5)$$

$$\text{Bienestar social}(t) = \sum_{i=0}^N vr_i(t) \quad (6)$$

Las ecuaciones anteriores permiten calcular el valor promedio de los déficits asociados al estado fisiológico y afectivo respectivamente. En ambas ecuaciones, podemos encontrar tres parámetros: $w_i(t)$ representa el peso o influencia que tiene cada una de las acciones en función del tiempo. Los pesos se obtienen dividiendo el deterioro sufrido por el proceso entre 100. Por último, $d_i(t)$ se calcula según la ecuación 3, que tiene en cuenta la diferencia entre el valor actual del proceso biológico y su valor ideal. El bienestar social se calcula directamente con los valores de refuerzo definidos en la tabla 3.

Para el aprendizaje, se ha entrenado el entorno durante 3000 pasos máximos por episodio, 500 episodios y 15 rondas. Un episodio terminaba cuando el robot era capaz de regular sus procesos adecuadamente o si alguno de ellos alcanzaba su peor valor posible. Los resultados del aprendizaje mostrados en la siguiente sección describen la evolución del bienestar del robot para mantener un estado interno óptimo en base a la dinámica de sus procesos biológicos y las estímulos que percibe del entorno.

5. Resultados

La figura 2 muestra la evolución de los tres tipos de bienestar que Mini debe regular para mantener su bienestar general en buena condición. El bienestar fisiológico y el bienestar emocional comprenden procesos evaluados de 0 a 100 unidades siendo 100 el valor óptimo, con recompensas significativamente menores que el bienestar social. Este último bienestar se mide directamente con los refuerzos acumulados, teniendo un rango mucho menor debido a que los eventos sociales no suceden siempre. Por este motivo, se han multiplicado por 1000 los resultados obtenidos para el bienestar social, permitiendo así una comparación de tendencia de aprendizaje más clara.

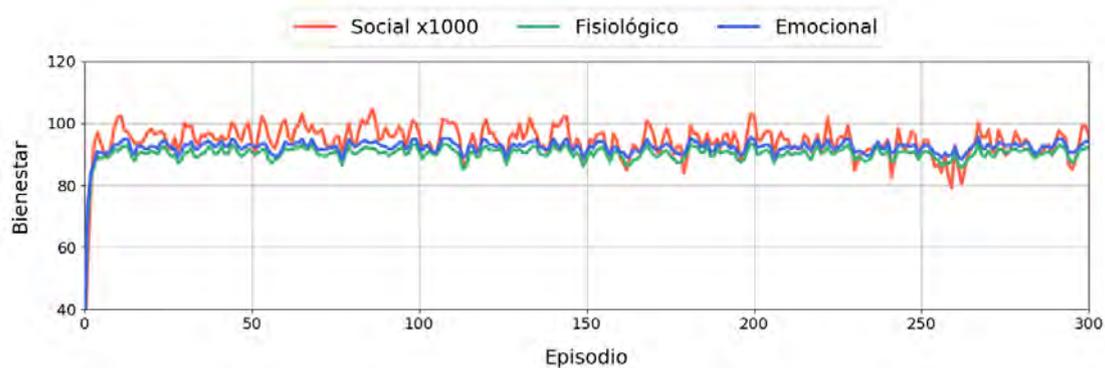


Figura 2: Regulación del bienestar fisiológico, emocional y social tras el entrenamiento con algoritmo *Rainbow*.

En la comparativa se puede apreciar como el algoritmo *Rainbow* consigue aprender a regular el bienestar fisiológico (verde) y emocional (azul) antes de los 50 episodios. Llama la atención que ninguno de los procesos llega a optimizarse a valores máximos, es decir, no llegan nunca a 100. Esto se debe a que es una media de muchos procesos ensayados un gran número de veces. Que el algoritmo optimice el aprendizaje tan pronto nos indica que *Rainbow* es un algoritmo capaz de aprender rápidamente en entornos complejos.

En cuanto al bienestar social (rojo), vemos como no consigue un aprendizaje tan estable como los casos anteriores, pues presenta oscilaciones que indican que el algoritmo no consigue optimizar este bienestar eficientemente. *Rainbow* es un algoritmo que proporciona muy buenos resultados trabajando con refuerzos pequeños. Sin embargo, los procesos sociales tienen refuerzos demasiado grandes ya que no ocurren muy a menudo y es necesario premiar la satisfacción de las normas sociales de forma más contundente. Además, *Rainbow* tiende a priorizar la supervivencia del agente por lo que optará por optimizar aquellos procesos que intervienen en mayor medida en las ecuaciones de vida del robot al igual que ocurre en humanos. Por ello *Rainbow* nos ofrece unos resultados satisfactorios.

6. Conclusiones

El sistema de aprendizaje *Rainbow* muestra resultados robustos al integrar las fortalezas de varios algoritmos de *Deep Reinforcement Learning*. Sin embargo, enfrenta dificultades cuando los refuerzos varían ampliamente, como en nuestro caso, donde los refuerzos de normas sociales son significativamente mayores que los de otros procesos. Esta discrepancia en los refuerzos lleva a interrupciones tempranas en el entrenamiento, acortando el tiempo de experiencia del agente y ralentizando el aprendizaje. Además, las limitaciones del diseño del modelo, como el ajuste manual de parámetros y la selección de parámetros para equilibrar las actividades del robot, contribuyen a resultados subóptimos. La aleatoriedad de las experiencias y la falta de métodos para calcular refuerzos óptimos complican la aceleración del aprendizaje, lo que subraya la necesidad de ajustar e implementar el modelo.

Agradecimientos

Estos resultados han sido financiados por los proyectos PID2021-123941OA-I00, financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y

por ERDF A way of making Europe; TED2021-132079B-I00 financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y por la Unión Europea NextGenerationEU/PRTR; Mejora del nivel de madurez tecnológica del robot Mini (MeNiR) financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033. 13039/501100011033 y por la Unión Europea NextGenerationEU/PRTR; Robot social portable con alto grado de vinculación (PoSoRo) PID2022-140345OB-I00 financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y ERDF A way of making Europe.

Referencias

- Fernández-Rodicio, E., Maroto-Gómez, M., Castro-González, Á., Malfaz, M., Salichs, M. Á., 2022. Emotion and mood blending in embodied artificial agents: expressing affective states in the mini social robot. *International Journal of Social Robotics* 14 (8), 1841–1864.
- François-Lavet, V., Henderson, P., Islam, R., Bellemare, M. G., Pineau, J., et al., 2018. An introduction to deep reinforcement learning. *Foundations and Trends® in Machine Learning* 11 (3-4), 219–354.
- Goodfellow, I., Bengio, Y., Courville, A., 2016. *Deep learning*. MIT press.
- Hessel, M., Modayil, J., Van Hasselt, H., Schaul, T., Ostrovski, G., Dabney, W., Horgan, D., Piot, B., Azar, M., Silver, D., 2018. Rainbow: Combining improvements in deep reinforcement learning. In: *Proceedings of the AAAI conference on artificial intelligence*. Vol. 32. pp. 3215–3222.
- Malfaz, M., Castro-González, Á., Barber, R., Salichs, M. A., 2011. A biologically inspired architecture for an autonomous and social robot. *IEEE Transactions on Autonomous Mental Development* 3 (3), 232–246.
- Maroto-Gómez, M., Castro-González, Á., Castillo, J. C., Malfaz, M., Salichs, M. A., 2018. A bio-inspired motivational decision-making system for social robots based on the perception of the user. *Sensors* 18 (8), 2691.
- Maroto-Gómez, M., González, R., Castro-González, Á., Malfaz, M., Salichs, M. Á., 2021. Speeding-up action learning in a social robot with dyna-q+: A bioinspired probabilistic model approach. *IEEE Access* 9, 98381–98397.
- Maroto-Gómez, M., Malfaz, M., Castro-González, Á., Salichs, M. Á., 2022. Deep reinforcement learning for the autonomous adaptive behavior of social robots. In: *International Conference on Social Robotics*. Springer, pp. 208–217.
- Pedersen, I., Reid, S., Aspevig, K., 2018. Developing social robots for aging populations: A literature review of recent academic sources. *Sociology Compass* 12 (6), e12585.
- Piano, F., 2020. Deep reinforcement learning con pytorch. In: *Deep Reinforcement Learning con Pytorch*. pp. 1–53.
- Pu, L., Moyle, W., Jones, C., Todorovic, M., 2019. The effectiveness of social robots for older adults: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled studies. *The Gerontologist* 59 (1), e37–e51.
- Salichs, M. A., Castro-González, Á., Salichs, E., Fernández-Rodicio, E., Maroto-Gómez, M., Gamboa-Montero, J. J., Marques-Villarroya, S., Castillo, J. C., Alonso-Martín, F., Malfaz, M., 2020. Mini: a new social robot for the elderly. *International Journal of Social Robotics* 12 (6), 1231–1249.
- Sutton, R. S., Barto, A. G., 2018. *Reinforcement learning: An introduction*. MIT press.
- Vázquez Blanco, A., Baz Codesal, M., Blanco Martín, M. P., 2021. El confinamiento por el covid-19 causa soledad en las personas mayores. revisión sistemática. *International Journal of Developmental and Educational Psychology*.



Simposio de Robótica, Bioingeniería y Visión por Computador 2024



Selección y agarre robótico de objetos basada en el seguimiento de la mirada

Menéndez, E.* , Martínez, S., Balaguer, C.

*RoboticsLab, Dpto. de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad Carlos III de Madrid,
Av. De la Universidad 30, 28911 Leganés, España.*

Resumen

Este artículo presenta un método que permite a los robots agarrar objetos basándose en la mirada del usuario, obtenida mediante gafas de seguimiento ocular. Este método no requiere conocimiento previo de los objetos ni de sus ubicaciones, ni marcadores externos. El proceso se divide en varias fases: primero, la estimación de la forma y posición de los objetos mediante supercuádricas; segundo, la identificación del objeto observado con redes siamesas; tercero, el cálculo de posiciones de agarre; finalmente, se selecciona el brazo robótico más adecuado y se planifica la trayectoria óptima de agarre. Experimentos en un entorno controlado indican que el sistema capta eficazmente las intenciones del usuario. Sin embargo, muestran variabilidad, lo que sugiere la necesidad de optimizar la planificación de movimientos. Este estudio destaca la mirada como una interfaz intuitiva para la interacción humano-robot en la manipulación de objetos.

Palabras clave: Aprendizaje automático, Interfaces inteligentes, Robótica Inteligente, Percepción y detección, Robots manipuladores

Selection and robotic grasping of objects based on gaze tracking

Abstract

This article presents a method that allows robots to grasp objects based on the user's gaze, tracked via eye-tracking glasses. This method does not require prior knowledge of the objects or their locations, nor external markers. The process is divided into several phases: first, the estimation of the shape and position of the objects using superquadrics; second, the identification of the observed object with siamese networks; third, the calculation of grasping positions; finally, the most suitable robotic arm is selected and the optimal grasping trajectory is planned. Experiments in a controlled environment indicate that the system effectively captures the user's intentions. However, they show variability, suggesting the need to optimize motion planning. This study highlights gaze as an intuitive interface for human-robot interaction in object manipulation.

Keywords: Machine learning, Intelligent interfaces, Intelligent robotics, Perception and sensing, Robots manipulators

1. Introducción

La interacción humano-robot (HRI), que cobra cada vez más importancia, revela la mirada como un método de comunicación intuitivo y no verbal (Cañigüeral and Hamilton, 2019). Este aspecto fundamental de la comunicación humana facilita la transmisión rápida de intenciones (Yu et al., 2012), especialmente útil en entornos dinámicos. Además, la comunicación a través de la mirada disminuye la carga cognitiva para los usuarios (Zhang et al., 2017). El desafío es traducir la intención de la mirada del usuario en acciones concretas del robot.

La mirada es clave para tareas colaborativas en HRI, permiti-

tiendo una comunicación efectiva y directa. Algunos enfoques utilizan la cámara del robot para seguir la mirada (Hanifi et al., 2023), limitándose a escenarios donde tanto los objetos como el rostro del usuario están visibles. Otros emplean gafas de seguimiento ocular que proyectan el punto de fijación de la mirada del usuario sobre la imagen que este ve, facilitando la comprensión de sus intenciones visuales. Muchos estudios que utilizan estas gafas se centran en métodos para estimar la intención del usuario a partir de la mirada (Belardinelli, 2023). Si bien interpretar la mirada y la intención del usuario es fundamental, el siguiente desafío radica en traducir esta información en ac-

*Autor para correspondencia: emenende@ing.uc3m.es
Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)

ciones robóticas concretas, lo cual se complica especialmente cuando el robot no posee conocimiento previo sobre los objetos en su entorno. Esta situación exige que el robot identifique y actúe en función de los objetos que el usuario está observando, a pesar de no tener información inicial sobre ellos.

En el artículo anterior (Menendez et al., 2024), se presentó un enfoque en HRI donde el robot identifica objetos basándose exclusivamente en la mirada del usuario mediante gafas de seguimiento ocular. Este método resulta de gran ayuda para personas con movilidad limitada o dificultades cognitivas, proporcionando un medio de interacción intuitivo y efectivo en una variedad de condiciones de visualización y sin necesidad de marcadores externos (Weber et al., 2020) ni ubicaciones fijas de objetos (Shi et al., 2021).

La Figura 1 muestra el escenario presentado donde el usuario selecciona un objeto en una mesa con su mirada y la tarea del robot es identificarlo y recogerlo. En este contexto, el robot debe deducir la intención del usuario dirigida hacia un objeto específico, en este caso, un vaso rojo, sin saber previamente qué objetos están presentes o dónde se ubican. La estrategia presentada permite al robot identificar objetos basándose en estimaciones de la mirada, incluso sin conocimiento previo sobre ellos. Para ello, se utiliza una estimación de pose y forma basada en supercuádricas, y redes siamesas para correlacionar el objeto observado por el usuario con los que están en el campo visual del robot.

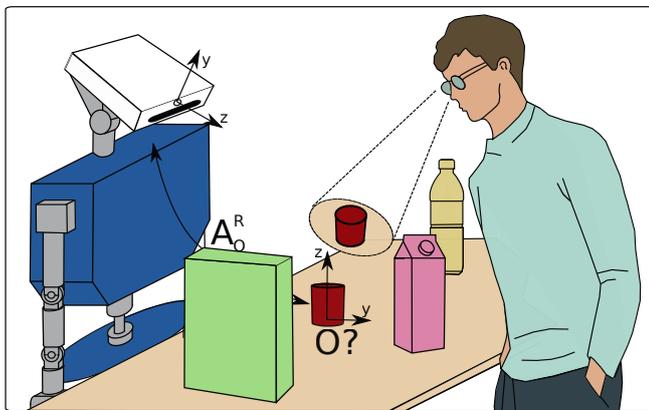


Figura 1: El usuario dirige su mirada hacia un vaso rojo sobre una mesa, lo que incita al robot a identificarlo y agarrarlo. Sin embargo, el robot carece de conocimiento previo sobre las categorías y posiciones de los objetos. (Menendez et al., 2024)

Este artículo se basa en el trabajo previo y expande significativamente la funcionalidad al implementar un sistema completo que incluye la estimación de las posiciones de agarre y la planificación de la trayectoria para la manipulación de objetos, complementado con experimentos con usuarios para validar la eficacia de este sistema de HRI. El artículo se organiza de la siguiente manera: En la Sección 2 se discuten las diferentes etapas del proceso propuesto para que el robot agarre el objeto en que el usuario ha fijado su mirada. La Sección 3 muestra los experimentos realizados con usuarios y los resultados obtenidos. Finalmente en la Sección 4, se presentan las conclusiones y las líneas futuras de este trabajo.

2. Solución propuesta

La metodología propuesta describe un proceso integrado de varias etapas para determinar el objeto en el que el usuario ha fijado su mirada dentro del sistema de referencia del robot *Tiago++* (Pages et al., 2016), seguido del agarre del objeto por parte del robot. Este enfoque elimina la necesidad de usar marcadores externos o ubicaciones predefinidas de los objetos.

La primera etapa involucra la estimación de la forma y posición de los objetos (Subsección 2.1) utilizando el sensor RGB-D del robot, donde se estiman supercuádricas para los objetos en la escena. Simultáneamente, el usuario, equipado con gafas de seguimiento ocular *Pupil Invisible* (Tonsen et al., 2020), evita mirar directamente a los objetos para prevenir fijaciones prematuras de la mirada. A medida que avanza el proceso, el usuario puede explorar libremente el entorno y fijar su mirada en cualquier objeto. El módulo de estimación de intención de la mirada (Gonzalez-Diaz et al., 2019), que opera en tiempo real, determina la intención del usuario de interactuar con un objeto específico y proporciona una probabilidad de decisión. Cuando esta probabilidad supera un umbral predeterminado, el módulo activa una acción que genera una imagen recortada alrededor del punto de fijación desde el punto de vista del usuario.

Una vez que el sistema detecta una clara intención de agarre basada en la mirada del usuario, se procede a la siguiente etapa (Subsección 2.2), donde se compara la imagen recortada del usuario con la vista del robot para identificar el objeto deseado mediante una red siamesa. Con el objeto adecuadamente identificado, el sistema avanza a la etapa de determinar las posibles posiciones de agarre del objeto (Subsección 2.3). La última fase, que implica elegir el brazo del robot más apropiado y planificar la trayectoria que seguirá para realizar el agarre efectivo del objeto seleccionado, se describe en la Subsección 2.4.

2.1. Estimación de la forma y posición de los objetos

En la primera etapa se estima la forma y la pose de los objetos en el sistema de referencia del robot utilizando únicamente una imagen de profundidad obtenida con la cámara del robot bajo ciertas suposiciones. Primero, se asume que los objetos están situados en una superficie horizontal. Segundo, los objetos pueden estar parcialmente ocluidos por otros objetos pero no deben estar colocados unos sobre otros. Tercero, se considera que los objetos pueden modelarse aproximadamente con formas simples 3D. Finalmente, la cámara del robot observa los objetos desde un ángulo inclinado.

La etapa comienza con la transformación de la imagen de profundidad en una nube de puntos 3D, seguido por la eliminación de la superficie horizontal para aislar los objetos. Posteriormente, la nube de puntos se segmenta en clusters, cada cluster representa un objeto distinto. La reconstrucción de partes ocluidas en los objetos segmentados se logra mediante la proyección y extrusión vertical de su contorno 2D, generando así una nube de puntos simplificada del objeto que facilita la posterior estimación supercuadrática.

A partir de las nubes de puntos simplificadas, se aplica un método de optimización que asigna a cada objeto una supercuadrática, simplificando la representación de su forma. Una supercuadrática utiliza parámetros geométricos λ_1 , λ_2 , and λ_3 para definir las longitudes de los semiejes en las direcciones x , y , z ,

mientras que los parámetros λ_4 and λ_5 ajustan la curvatura, influyendo en la redondez del objeto. Dado que el modelo supercuádrico asume un sistema de referencia centrado en el objeto, para integrarlo en el sistema de referencia del robot, se añaden parámetros de traslación (p_x, p_y, p_z) y orientación (θ, ϕ, γ). Esto nos permite calcular no solo la forma sino también la posición y orientación exactas del objeto, facilitando su manipulación en el entorno robótico. La versatilidad de este modelo permite representar una amplia gama de formas, desde esferas hasta prismas, lo que es esencial para diversas aplicaciones de manipulación robótica.

2.2. Selección del objeto con la mirada

En este proyecto, se utiliza una sola rama de una red siamesa previamente entrenada para identificar el objeto que el usuario está observando mediante la comparación de imágenes obtenidas con las gafas de seguimiento ocular y la cámara del robot, conforme se describe en el trabajo anterior (Menendez et al., 2024). La red incluye tres ramas idénticas con arquitectura ResNet-50, que se complementan con capas de *Spatial Pyramid Pooling* (SPP) y varias capas completamente conectadas (FC). Esta configuración permite que la red maneje diferentes tamaños de imágenes, generando vectores de características de longitud fija.

La red se entrena con tripletas de imágenes: una imagen ancla de un objeto desde el punto de vista del usuario capturada a través de las gafas de seguimiento ocular, una imagen positiva del mismo objeto desde la perspectiva de la cámara del robot, y una imagen negativa de un objeto diferente también vista por la cámara del robot. Utilizando la función de *triplet loss*, la red aprende a diferenciar entre el objeto observado y otros objetos en el entorno del robot.

Durante la aplicación práctica, los recortes de los objetos vistos desde el robot se obtienen calculando las *bounding boxes* de todas las supercuádras identificadas previamente, asignándoles el mismo identificador. El módulo de estimación de la intención de mirada detecta en tiempo real el objeto que el usuario observa y extrae un recorte desde la perspectiva del usuario. Solo se utiliza una rama de la red entrenada para procesar estos recortes, calculando la distancia euclidiana cuadrada entre los vectores de características del recorte del usuario y los vectores de los recortes de los objetos del robot. El recorte con la menor distancia identifica el objeto observado. Gracias a que los recortes desde la perspectiva del robot comparten el mismo identificador que las supercuádras, el sistema puede avanzar a calcular las poses de agarre adecuadas para la manipulación del objeto identificado.

2.3. Cálculo de las poses de agarre

Para determinar las poses de agarre en objetos modelados como supercuádras, primero identificamos el eje más largo entre λ_1, λ_2 , y λ_3 como el principal para el agarre. Si dos o más ejes presentan longitudes comparables, se evalúan como alternativas viables para diferentes estrategias de agarre. El gripper se posiciona perpendicularmente a estos ejes principales, y su apertura se ajusta para ser ligeramente mayor que la dimensión del objeto en la dirección perpendicular al eje seleccionado.

Además, el gripper se desplaza a lo largo del eje principal, permitiendo múltiples posiciones de agarre. En casos donde el

objeto es más o menos uniforme en las dimensiones λ_1, λ_2 (indicando una forma cercana a cilíndrica), y estas dimensiones son menores que la apertura máxima del gripper, también se considera la rotación del gripper alrededor del eje principal. Esto incrementa las opciones de agarre disponibles, potenciando la capacidad del sistema para manipular el objeto de diversas maneras.

Las poses de agarre se establecen con respecto al centro de la supercuádras. Dado que en la primera etapa se determina no solo la forma, sino también la posición de la supercuádras respecto a la base del robot, es posible transformar las poses de agarre al sistema de coordenadas de la base del robot.

2.4. Selección del brazo y planificación del movimiento

En este sistema de Interacción Humano-Robot, se ha implementado una versión modificada del algoritmo RRT bidireccional para optimizar de forma autónoma el movimiento de cada brazo robótico (Haustein et al., 2019). Dado que el robot *Tiago++* cuenta con un brazo derecho e izquierdo, en esta etapa se selecciona el brazo que ofrece la trayectoria más óptima para agarrar el objeto deseado. El algoritmo planea movimientos para cada brazo de forma separada, mientras que el otro brazo permanece en posición de reposo.

El algoritmo inicia con un proceso iterativo que alterna entre el muestreo de objetivos y la planificación de movimientos. A partir de las poses de agarre determinadas previamente, se utiliza la cinemática inversa para generar un conjunto finito de configuraciones articulares libres de colisión, denotado por G . Cada elemento de G , identificado como un par (q, a) , representa una configuración articular q para un brazo específico a .

Para cada brazo del robot, se construye un árbol RRT *forward* partiendo de la posición articular de reposo, y simultáneamente, se lanzan múltiples árboles *backward* desde las configuraciones articulares especificadas en G . Cuando el árbol *forward* logra conectarse con uno de los árboles *backward*, se identifica esta conexión como una solución viable y se procede a registrar su coste. Este coste se calcula sumando ponderadamente las distancias en el espacio articular y las distancias euclidianas en el espacio de trabajo. Además, una vez que se establece una conexión exitosa, el árbol *backward* implicado se fusiona con el árbol *forward*. Las configuraciones objetivo que han llevado a soluciones exitosas se eliminan de G , optimizando así el proceso de búsqueda y evitando redundancias en las iteraciones futuras.

El proceso de planificación implica una comparación constante del coste de cada nueva trayectoria descubierta con las mejores soluciones previamente identificadas para cada brazo, actualizando continuamente la trayectoria preferida cuando se encuentra una opción de menor coste. Este ciclo de planificación y comparación incluye un mecanismo de parada automático: si tras n intentos de conexión entre los árboles *backward* y *forward* no se consigue encontrar una solución que mejore el coste acumulado, el sistema finaliza la búsqueda y se opta por la mejor solución encontrada hasta ese momento.

3. Experimentos y Resultados

La fase experimental de este estudio se diseñó para evaluar la efectividad del sistema de HRI en un entorno controlado que

simulase condiciones reales. Se involucró a un total de 20 participantes en una serie de pruebas para determinar la eficiencia del sistema en la identificación y manipulación de objetos basados únicamente en la mirada del usuario.

Cada sesión experimental se desarrolló en un entorno controlado, donde se dispuso una mesa con cuatro objetos distintos, seleccionados de un conjunto de doce elementos de desayuno no frágiles. Estos objetos estaban dispuestos de manera aleatoria para permitir oclusiones parciales, simulando un escenario cotidiano de visibilidad limitada.

Al inicio de cada prueba, los participantes, equipados con las gafas de seguimiento ocular Pupil Invisible, se posicionaban frente a la mesa, inicialmente dirigiendo su mirada hacia un punto neutro, fuera del área de los objetos. La interacción comenzaba cuando el robot Tiago++ les preguntaba qué les apetecería para desayunar, momento en el que el usuario señalaba con la mirada el objeto de su elección. Utilizando la información recogida, el robot identificaba el objeto observado y calculaba las poses de agarre adecuadas. Luego seleccionaba el brazo robótico más apropiado para ejecutar la tarea y realizaba el movimiento necesario para agarrar el objeto seleccionado. La Figura 2 ilustra uno de estos momentos experimentales, mostrando al robot en el acto de agarrar el objeto que el usuario había seleccionado con su mirada.



Figura 2: Tiago++ ejecutando la acción de agarre del objeto seleccionado por la mirada del usuario.

Durante los experimentos, se midieron dos variables temporales principales para evaluar la efectividad del sistema. El tiempo de respuesta se define como el intervalo desde que el usuario fija la atención en un objeto hasta que el robot comienza a moverse para ejecutar la acción de agarre. Este tiempo engloba los procesos de detección de la intención de agarre, identificación del objeto mediante la red siamesa, cálculo de las poses de agarre adecuadas, y la planificación de la trayectoria y selección del brazo más apropiado. El tiempo hasta el agarre corresponde al período desde que el usuario fija su atención en el objeto hasta que el robot completa la acción de agarre. Los resultados se resumen en la Tabla 1, donde se muestra la media y desviación estándar de ambos tiempos. Además, la Figura 3 ilustra estos tiempos mediante un diagrama de cajas, proporcionando una visualización clara de la distribución de los tiempos medidos.

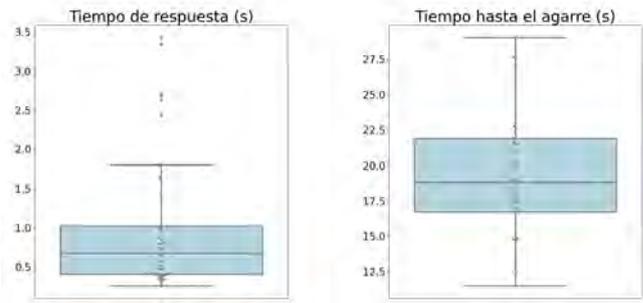


Figura 3: Diagramas de cajas de los tiempos de respuesta y los tiempos hasta el agarre.

El análisis estadístico destaca una media de tiempo de respuesta de 0.962 segundos, con una mediana que indica una distribución ligeramente asimétrica. La presencia de valores atípicos apunta a incidentes aislados donde la complejidad de la planificación de la trayectoria y la selección del brazo alargaron el proceso. Estos casos pueden estar relacionados con la variabilidad en la disposición de los objetos. Además, el algoritmo RRT bidireccional modificado juega un rol crítico en la duración del tiempo de respuesta, especialmente en situaciones que demandan generar y evaluar múltiples configuraciones articulares libres de colisión. La combinación de estos elementos con el límite de intentos del algoritmo para encontrar una trayectoria de menor coste podría explicar los tiempos prolongados observados en algunos ensayo.

Tabla 1: Media y Desviación Estándar de los Tiempos de Respuesta y Tiempos hasta el Agarre

	Media (s)	Desviación Estándar (s)
Tiempo de Respuesta	0.962	0.803
Tiempo hasta el Agarre	19.195	4.271

La distribución del tiempo hasta el agarre demuestra una variabilidad significativa, manifestada en una desviación estándar de 4.271 segundos. A pesar de esta variabilidad, la distribución mantiene su simetría, como lo indica la mediana centrada dentro del diagrama de cajas. Este tiempo, con una media de 19.195 segundos, presenta valores atípicos en ambos extremos. Los valores superiores pueden interpretarse como casos en los que el robot enfrentó dificultades adicionales, como la necesidad de maniobras complejas para alcanzar el agarre correcto. Contrariamente, los valores inferiores sugieren instancias donde las condiciones eran óptimas, permitiendo al robot ejecutar un agarre más directo. Estas diferencias en los tiempos hasta el agarre subrayan la importancia de contar con un sistema robótico que posea una capacidad de planificación de movimiento adaptativa. La consistencia en los tiempos de agarre, junto con un enfoque en minimizar los tiempos extremos, podría contribuir significativamente a la mejora de la percepción de naturalidad y la respuesta intuitiva del sistema robótico.

4. Conclusiones

En este estudio, se desarrolló un sistema de Interacción Humano-Robot que permite al robot identificar objetos basándose en la mirada del usuario, utilizando gafas de seguimiento ocular como interfaz de comunicación. Este método proporciona una comunicación intuitiva y rápida. El sistema fue implementado exitosamente en el robot Tiago++, demostrando su capacidad para discernir y agarrar objetos seleccionados mediante la mirada del usuario en un entorno controlado. Durante los experimentos con múltiples participantes, se comprobó que el sistema responde de manera eficiente a las intenciones del usuario, validando su efectividad en escenarios cotidianos. Aunque se observó variabilidad en los tiempos de respuesta y de agarre, estos se mantuvieron dentro de rangos considerados aceptables, indicando la viabilidad del sistema para diversos contextos de uso. Como línea futura de investigación, se propone optimizar el algoritmo de planificación de movimientos, identificado como el principal factor detrás de la variabilidad en los tiempos de respuesta y de agarre. La optimización de este algoritmo mejoraría significativamente la interacción con el usuario al hacerla más ágil y fluida.

Agradecimientos

La investigación que ha conducido a estos resultados ha recibido financiación del proyecto COMPANION-CM: Inteligencia artificial y modelos cognitivos para la interacción simétrica humano-robot en el ámbito de la robótica asistencial, con referencia Y2020/NMT-6660, financiado por Proyectos Sinérgicos de I+D la Comunidad de Madrid.

Referencias

- Belardinelli, A., 2023. Gaze-based intention estimation: principles, methodologies, and applications in hri. arXiv preprint arXiv:2302.04530.
- Cañigueral, R., Hamilton, A. F. d. C., 2019. The role of eye gaze during natural social interactions in typical and autistic people. *Frontiers in Psychology* 10.
- Gonzalez-Diaz, I., Benois-Pineau, J., Domenger, J.-P., Cattaert, D., de Rugy, A., 2019. Perceptually-guided deep neural networks for ego-action prediction: Object grasping. *Pattern Recognition* 88, 223–235.
- Hanifi, S., Maiettini, E., Lombardi, M., Natale, L., 2023. iCub detecting gazed objects: A pipeline estimating human attention. arXiv preprint arXiv:2308.13318.
- Haustein, J. A., Hang, K., Stork, J., Kragic, D., 2019. Object placement planning and optimization for robot manipulators. In: 2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, pp. 7417–7424.
- Menendez, E., Martínez, S., Díaz-de María, F., Balaguer, C., 2024. Integrating egocentric and robotic vision for object identification using siamese networks and superquadric estimations in partial occlusion scenarios. *Bio-mimetics* 9 (2).
- Pages, J., Marchionni, L., Ferro, F., 2016. Tiago: the modular robot that adapts to different research needs. In: International workshop on robot modularity, IROS. Vol. 290.
- Shi, L., Copot, C., Vanlanduit, S., 2021. Gazeemd: Detecting visual intention in gaze-based human-robot interaction. *Robotics* 10 (2), 68.
- Tonsen, M., Baumann, C. K., Dierkes, K., 2020. A high-level description and performance evaluation of pupil invisible. arXiv preprint arXiv:2009.00508.
- Weber, D., Santini, T., Zell, A., Kasneci, E., 2020. Distilling location proposals of unknown objects through gaze information for human-robot interaction. In: 2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, pp. 11086–11093.
- Yu, C., Schermerhorn, P., Scheutz, M., 2012. Adaptive eye gaze patterns in interactions with human and artificial agents. *ACM Transactions on Interactive Intelligent Systems (TiIS)* 1 (2), 1–25.
- Zhang, Y., Beskow, J., Kjellström, H., 2017. Look but don't stare: Mutual gaze interaction in social robots. In: Social Robotics: 9th International Conference, ICSR 2017, Tsukuba, Japan, November 22-24, 2017, Proceedings 9. Springer, pp. 556–566.



Simposio de Robótica, Bioingeniería y Visión por Computador 2024



Teleoperation of the robot TIAGo with a 3D mouse controller

Calzada, A., Łukawski, B. *, Victores, J. G., Balaguer, C.

RoboticsLab, Department of Systems Engineering and Automation, Universidad Carlos III de Madrid, Avda. Universidad, 30, 28911, Leganés, Spain.

Resumen

El robot TIAGo es un manipulador móvil desarrollado por PAL Robotics. Combina las capacidades de percepción, navegación, manipulación e interacción humano-robot. El propósito de este trabajo es revisar las diferentes técnicas disponibles para teleoperar este robot, y para mover su base y sus articulaciones. Adicionalmente, se describe un nuevo controlador de ROS diseñado para operar el brazo de TIAGo de 7 grados de libertad, empleando las lecturas cartesianas de un ratón 3D para diseño CAD reconvertido en una interfaz de control para habilitar la teleoperación del robot. Su comportamiento ha sido probado en simulación sobre Gazebo, y validado sobre el robot real en una tarea de tipo pick-and-place con manipulación de objetos en un entorno de laboratorio.

Palabras clave: Robótica, Teleoperación, Arquitecturas software.

Abstract

The robot TIAGo is a mobile manipulator developed by PAL Robotics. It combines perception, navigation, manipulation and human-robot interaction skills. The purpose of this work is to review the main teleoperation techniques available out-of-the-box to control this robot and move both its base and its joints. Additionally, this paper describes a new ROS controller designed to move TIAGo's arm (which has 7 degrees of freedom), which accepts Cartesian input from a 3D mouse used in CAD applications, repurposed as a teleoperation control interface. Its behavior has been tested in a virtual environment within the Gazebo simulator, and validated against the actual robot in the context of a pick-and-place task involving the manipulation of objects in a real environment.

Keywords: Robotics, Teleoperation, Software architectures.

1. Introduction

Teleoperation is defined as the remote control of a device, in this case a robot, by a human. In this context, the task at hand could be classified as telemanipulation, as the objective is to be able to control TIAGo so that it can manipulate objects and carry out pick and place tasks. The movement of this robot can be automated, as it has an exploration module to map the area it is located in, and later navigate it in an autonomous fashion. It can also perform pre-programmed movements like waving or grasping an object.

However, there are certain environments and situations when this robot would be a convenient tool, but automation is not an option. For instance, TIAGo could be used as a companion to people with reduced mobility, to carry objects that are out of their reach to somewhere else where this person could grab them comfortably. The variability of this task is too big to consider automating it due to the presence of obstacles. This is why, for certain scenarios, teleoperation is best suited.

PAL Robotics offers a premium software package that includes a web interface for teleoperating TIAGo, an advanced grasping software tool and a whole-body controller compatible with ROS. These components make up a full teleoperation framework that doesn't require previous programming experience, yet its extra costs need to be considered.

ROS offers an open-sourced set of controllers and frameworks that enables a user to control each joint of TIAGo with great precision, also accounting for velocity and effort commands. Additionally, the user can program trajectories and pre-defined motions, and test all these tools in a simulation environment. As a downside, this approach requires previous knowledge of programming in C++ and some experience with ROS.

In this work, a new ROS controller is proposed to map Cartesian increments of a 3D mouse into displacements in the arm's joints, aimed at performing online trajectories. Regardless of experience, this allows to perform telemanipulation tasks with TIAGo in an intuitive way and with no additional costs.

*Corresponding author: blukawsk@ing.uc3m.es

2. TIAGo

The robot TIAGo (Figure 1(a)) is a mobile manipulator developed by PAL Robotics (Pages et al., 2016). It is composed of a mobile base, a torso, an arm, a wrist, an end effector and a head. It uses Ubuntu Linux LTS as operative system, and can be controlled using ROS.

The PBM-2 base can be used as an independent mobile robot. It is equipped with laser sensors on the sides to perform SLAM (Simultaneous Localization And Mapping), and three ultrasonic sensors on the back to prevent crashing as it moves backwards. It can reach a maximum speed of 1.5 m/s and move around overcoming potholes or bumps of up to 1.5 cm. The maximum payload it can carry on top of itself is 100 kg (PAL Robotics, 2021).

The torso, similarly to other components, has been designed to be modular, therefore it can have an optional arm attached to it. The flat tray on its upper side can hold different objects; for instance, a laptop can be placed on top in order to connect it to one of the ports of the torso's user panel and thus gain access to the onboard computer.

TIAGo's arm has been developed on the basis of its predecessors, REEM and REEM-C (Marchionni et al., 2013). It has 7 degrees of freedom (DOF). The first 4 DOF belong to the arm and they host brushless motors; the remaining three belong to the wrist. On the end effector of the latter, a force-torque sensor can be mounted in order to make the arm compliant; it detects excess force during a grasping action and halts motion if necessary. TIAGo can have one arm or two arms (TIAGo++). Without the end effector, the arm can lift up to 3 kg.

Two different end effectors can be mounted at the end of the wrist: the Hey5 hand (Catalano et al., 2014) and a gripper with parallel plates. Unofficial end effectors should be connected to the user panel using external cables.

Lastly, the head contains an RGBD camera and has been designed so that more sensors can be attached to its flat top. Two joints provide the ability perform pan and tilt motions.



Figure 1: TIAGo robot and its default controller device.

3. PAL Teleoperation Tools

TIAGo can be teleoperated without resorting to any programming language nor interfacing with ROS, simply by using a collection of tools provided by PAL Robotics instead. In the first place, a set of preprogrammed movements such as waving or shaking hands can be issued through a web interface. It also allows to move individual joints using graphical components, e.g. blocks and sliders.

TIAGo is shipped with a remote controller, see Figure 1(b). The robot's base can be commanded through its left and right sticks, achieving forward or backward motion and left-right rotation, respectively. It also features several buttons which are mapped to the pan-tilt movement of the head, the vertical extension of the torso, and the gripper's open-close actions.

4. ROS teleoperation tools

ROS is an open-source robotic middleware for the large-scale development of complex robotic systems (Quigley et al., 2009). It implements a publisher/subscriber structure in which some nodes (the publishers) write information into a topic and some others (the subscribers) read it and use it to carry out a task. To control TIAGo through ROS, some previous installation steps are needed. If virtualization with Docker is to be avoided, the best options are systems running Ubuntu 18.04 or 20.04 with ROS1 Melodic or Noetic distributions, respectively. Additionally, all TIAGo files and packages need to be stored in a local workspace (PAL Robotics, 2023).

4.1. *key_teleop*

Arrow keys on a usual computer keyboard can be used to control TIAGo's base in the Gazebo simulator. To achieve this, the ROS *key_teleop* node has to be launched beforehand. The parent *key_teleop* package consists of a Python node that implements a simple keyboard controller. Once launched, the node will send messages of the *geometry_msgs/Twist* type, a standard geometry message which encodes a Cartesian velocity split into linear and angular subparts, each of them stored in 3-vectors. The *key_teleop* node only generates X-linear and Z-angular commands.

4.2. *cmd_vel*

It is also possible to send velocity commands to TIAGo's mobile base through the *cmd_vel* topic. The messages exchanged with this topic belong to the *geometry_msgs/Twist* type which encodes a Cartesian velocity, split into linear and angular components as was explained earlier. The command to publish such a message is as follows:

```
rostopic pub /mobile_base_controller/cmd_vel
geometry_msgs/Twist "linear:
  x: 0.5
  y: 0.0
  z: 0.0
angular:
  x: 0.0
  y: 0.0
  z: 0.0" -r 3
```

A different velocity can be specified in each component of the linear and angular 3-vectors. The “-r” option determines the rate at which the message will be published (i.e. 3 Hz). If it is omitted, the controller will only apply the given velocity for less than a second, for safety considerations. Because of this, the client is forced to keep publishing the desired speeds for a continued motion, otherwise the last published velocity would keep being applied until the robot crashed with an obstacle in its environment.

This method is more flexible than using the *key_teleop* node, as it allows the user to send velocity commands for all the velocity components, even at the same time, while the first method can only send X-linear and Z-angular commands.

4.3. Joint trajectory controller

The *joint_trajectory_controller* package is meant for executing joint-space point-to-point trajectories on a group of joints. These trajectories are specified as a set of waypoints to be reached at specific time instants. Waypoints consist of positions, and optionally velocities and accelerations.

Trajectories can be sent to the controller by means of the action interface or the topic interface. Both use the *trajectory_msgs/JointTrajectory* message type. It consists of a header to store metadata for high-level data types (sequence ID, timestamp and frame ID), an array containing the names of the joints involved in the trajectory, and an array of *JointTrajectoryPoints*. Each of these points specifies an array of positions, velocities, accelerations or efforts for the trajectory to be executed, as well as the duration of it.

The action interface allows to specify the trajectory to execute, besides its path and goal tolerances. It grants the user a deeper level of execution monitoring. The topic interface enables to send waypoints without caring for the path and general execution. To execute a trajectory through this interface, a node has to be implemented that defines the positions for the joints to be moved, and sends a message to the corresponding topic. Five different topics can be interfaced with to control different parts of TIAGo, namely:

1. `/torso_controller/command`
2. `/head_controller/command`
3. `/arm_controller/command`
4. `/hand_controller/command`
5. `/gripper_controller/command`

To implement such a node, the code must adhere to a structure as follows: first, it should declare the names of the moving joints as well as their velocities and the duration of the movement. Then, it should create a publisher node for the desired topic (see Section 4.3) and a message of the *JointTrajectoryPoint* type, and the message fields (positions, velocities and duration) have to be set. Lastly, a *JointTrajectory* message has to be created (containing the joint names and the previously created point) and published.

4.4. Individual joints

Joints can be moved individually via command line or using the companion GUI node of *joint_trajectory_controller*. The latter option uses “rqt”, a software framework of ROS that implements various graphical tools as plugins. In this case, by

running the *rqt_joint_trajectory_controller* node, the interface shown in Figure 2 pops up, which allows to control each joint by moving the sliders or writing a specific position.



Figure 2: *rqt_joint_trajectory_controller*.

From command line, each joint can be moved by sending a message to the *move_joint* node of the *play_motion* package, and specifying the joint name, the new position and the duration of the movement. This package also allows the user to play predefined motions on TIAGo.

4.5. Predefined motions

The *play_motion* tool is used to play prerecorded motions on *ros_control*-compliant robots via a simple “actionlib” interface. The *actionlib* package provides tools to create servers that execute long-running goals which can be cancelled. It also provides a client interface for sending requests to the server.

The *play_motion* action server is automatically launched on robot bringup. All motions have to be defined in a YAML file and loaded to the ROS parameter server. Those contained in (PAL Robotics, 2024) are also loaded on bringup for TIAGo.

To define a new motion, the following structure has to be added to the *tiago_motions.yaml* file:

```

motion_name:
  joints: [joint_a, joint_b]
  points:
  - positions: [a, b]
    time_from_start: 0.5
  - positions: [c, d]
    time_from_start: 6.0
  meta:
    name: 'descriptive motion name'
    usage: demo
    description: 'motion description'

```

The motions can be customized for the end effector used for TIAGo, and require a planner to avoid collisions between the actual position and the first position of the predefined motion.

5. Custom arm controller

As it has been demonstrated in the previous section, a variety of ROS tools exist that allow the user to control TIAGo remotely. However, these control methods are not intuitive and require the user to have a clear notion of the pose or velocity to be sent to the robot as a command. To overcome this limitation, a new interface is introduced to be able to operate TIAGo in a way that feels intuitive and immersive.

The peripheral selected for this task is the SpaceMouse Compact by 3Dconnexion, a 6 DoF USB joystick designed to offer an efficient navigation interface for CAD applications; see Figure 3. It also features two side buttons that will be used for commanding TIAGo’s gripper.



Figure 3: SpaceMouse Compact by 3Dconnexion.

In order to adopt the SpaceMouse as a control device for teleoperating TIAGo, a custom ROS controller was implemented. It receives input from the joystick and transforms it into Cartesian velocity commands for moving the arm joints. Velocity is preferred over position because of the small range of motion the SpaceMouse offers. Following the idea of (Łukawski et al., 2023), these motions should be interpreted by the controller as small displacements in the pose of the commanded entity. Later, differential inverse kinematics are performed to obtain the resulting joint velocities. As a final step, a convenient scale factor is applied to limit the maximum speed. Joint commands are actually interpreted as position increments (see Section 5.1).

The *ros_control* framework was used to implement the new controller (Chitta et al., 2017). These packages follow the structure shown in Figure 4. The *hardware_interface::RobotHW* C++ class provides a base from which specific robot implementations have to inherit. It is an abstraction layer on which actuators, sensors and general hardware can be modeled, regardless of whether the robot is real or simulated. The *hardware_interface* package defines read-only or read-write typed interfaces for abstracting state, position, velocity and effort command interfaces.

The *controller_manager* node allows to start, stop, load and unload controllers. The *realtime_tools* package adds utility classes handling ROS communications in a real-time fashion. Finally, the *transmission_interface* package contains classes that model mechanical transmissions (differential, four bar linkage, joint state, position, and velocity).

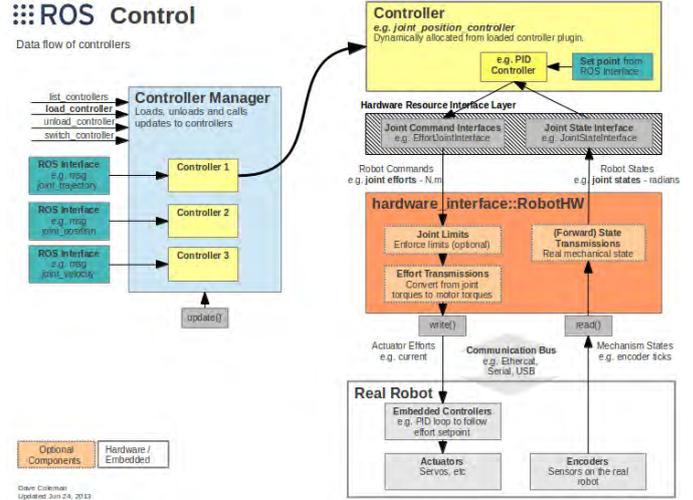


Figure 4: Structure of the *ros_control* package.

The following steps were extracted from (Joseph and Caccace, 2018), a controller for the PR2 robot, and adopted in the implementation described in this paper:

- Create a ROS package and specify its dependencies.
- Write the controller’s code in C++.
- Register or export the C++ class as a plugin.
- Provide the plugin’s definition in an XML file.
- Update *package.xml* for exporting the plugin.
- Write *CMakeLists.txt*.
- Compile the C++ code.
- Write configuration for our controller.
- Test as a simulation in Gazebo.
- Load the controller using the controller manager.

The package is initialized using the *catkin_create_pkg* command. It will contain a *config* directory where the YAML configuration for the controller will be stored, as well as the pre-defined motions. The *include* directory will contain the header files for the C++ code, stored in the *src* directory. A *launch* directory can also be added, where the ROS launchers can be stored for different scenarios, for instance, simulation and real robot. A *CMakeLists.txt* file in the root directory is necessary to build the project using CMake, as well as an XML file with the definition of the ROS plugin. Finally, for convenience, two additional Python scripts were placed in the *scripts* directory, devoted to easily loading and unloading the controller.

The following sections describe the key aspects of the proposed controller. Its source code has been uploaded to GitHub (Łukawski and Calzada, 2024).

5.1. Implementation

Any ROS controller that implements the *controller_interface* includes four methods: `init()`, `starting()`, `update()` and `stopping()`. The first one is called at most once, as soon as the controller is loaded by the *controller_manager*. When started, `update()` is looped at a rate of 1000 Hz. The `starting()` and `stopping()` functions are callbacks invoked at the start and end of the execution of said loop, respectively. In this controller, two auxiliary functions were added: `checkReturnCode()` and `snavCallback()`.

The `init()` method initializes all internal class members needed for the controller to work. The Orocos Kinematics and Dynamics Library (Open Robot Control Software, 2024), i.e. KDL, is used in this implementation to describe the kinematic chain. To achieve this, all relevant parameters are queried from the ROS parameter server and parsed from its URDF descriptor, directly into an instance of `KDL::Chain`. Besides, a KDL solver is instantiated to perform differential inverse kinematics using said kinematic description. Lastly, a ROS subscription is created to the SpaceMouse publisher topic, using the `snavCallback()` method as a callback that handles incoming messages. After initialization, `starting()` stores and logs the initial joint configuration of the arm in order to provide a feedback about the correct configuration of the controller.

The `snavCallback()` method is called every time a new message is streamed by the SpaceMouse ROS node through the `"/spacenav/joy"` topic. The new state of the joystick axes and buttons is stored atomically into class member variables that will be later accessed by the `update()` method. A mutually exclusive lock (mutex) is used to avoid simultaneous reads and writes on said variables.

The key functionality of the controller resides in the `update()` method, where the data received from the SpaceMouse is used to command the robotic arm and gripper. The class `KDL::ChainIkSolverVel_pinv` performs differential inverse kinematics using the current joint configuration and desired Cartesian velocities as inputs, and it outputs the resulting joint velocity. The joint configuration is queried only once during the execution of the controller, in the `starting()` method, and subsequently updated using the increments resulting from the kinematic computations. In this manner, a virtual reference is actually commanded in joint space instead, thus allowing to perform safety checks prior to sending the actual motion command to the robot.

Before commanding the robot, a look-ahead action is performed. The return value of the solver is inspected in `checkReturnCode()` to test against singularities. In case no such issue arises, the new joint configuration is obtained as the result of multiplying the desired joint velocity (obtained from the solver) times the control loop period times a scaling factor. Then, the resulting joint vector is checked against the robot's joint limits and passed through to the next step if successful. The solver is called on the new joint configuration to determine whether the next iteration could fail due to singularities. Without this double computation of the differential kinematics, the arm could reach a configuration that would impede motion due to these safety checks. Instead of that, the arm is stopped as soon as any problem arises, and it is allowed to return to a safe work space again if commanded in the opposite direction.

5.2. Configuration

The files contained in the *config* directory define all relevant parameters that will be used throughout the controller code, as well as predefined motions of the robot.

The *snav_controller.yaml* file defines the plugin name and the names of the joints that will be controlled. These comprise a portion from the full kinematic chain, from `arm_1_joint` to `arm_7_joint`, as well as the gripper's left and right finger joints. Besides, a few relevant parameters related to the KDL solver are also defined, namely `eps` (an epsilon value) and `maxiter` (the maximum number of iterations). Lastly, scale factors are included to limit the speed (through joint increments) of both arm and gripper. These latter specifications are the key to the teleoperation experience, as very small increments will force the operator to exert larger displacements on the joystick only to get a slow motion in the robot arm, while bigger increments will produce fast and potentially dangerous movements.

The *tiago_snav_motions.yaml* file was introduced to define any necessary predefined motions as preparation to the teleoperation task. Since in its default home position TIAGo's arm is folded and tucked next to its shoulder, a new such predefined motion (following the structure explained in Section 4.5) was configured so that the robot lifts its torso a bit and extends its arm before allowing the user to operate it through the SpaceMouse. In this new initial joint configuration, self-collisions are avoided.

5.3. Launching

The setup and activation of this controller was automated through the usage of ROS XML launch files and two helper Python scripts to load and unload the new controller.

Two launch files were prepared: one to start the controller in a virtual environment within the Gazebo simulator, and another one to launch it on the real robot. Both transclude a third file which loads all the parameters specified in the configuration file, as well as the predefined motions. It also instructs the *controller_manager* to load the SpaceMouse controller in its stopped state, then it executes a Python script that switches between controllers. This is necessary since it is not allowed to run two controllers at once which manage the same subset of joints and send commands to them. Therefore, the original arm and gripper controllers must be stopped before the SpaceMouse controller is started. Additionally, this script also executes the predefined motion to extend TIAGo's arm using the *play_motion* package tools.

A second Python script was introduced to perform a graceful stop of the SpaceMouse controller and to reinstate the original arm and gripper controllers. This script has to be manually invoked when the teleoperation task is finished.

6. Experiments

Some experiments were conducted both in a simulated environment and on the real robot. They were based on a simple pick-and-place task with different objects randomly distributed in the scenario. The Logitech joypad (Figure 1(b)) was used to command the robot's base until it reached the target object, then the SpaceMouse joystick was used to perform the grasping.

Figure 5 depicts the initial pose of the robot in Gazebo, in its arm tucked 5(a) and arm extended 5(b) configurations. The scripts described in Section 5.3 help to automate this step.

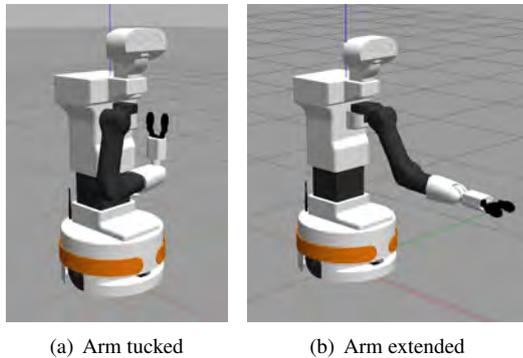


Figure 5: Predefined motions of TIAGo's 7-DoF arm.

Figure 6 depicts the teleoperation experiment conducted with the real robot during which a cube-like object was picked from a table and the robot was commanded to move closer to a person to drop it on in their hand.

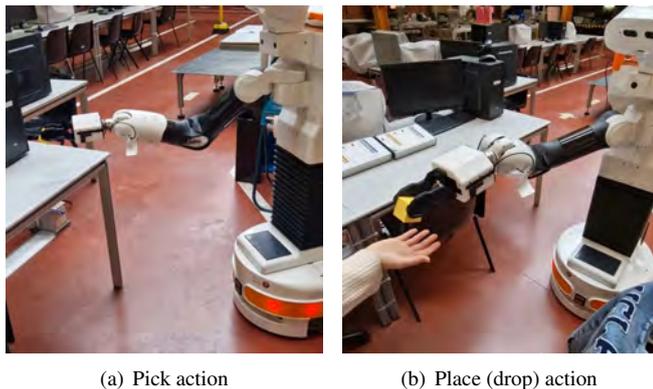


Figure 6: Pick and place task through teleoperation.

7. Conclusions

A new ROS controller was proposed to enable users to teleoperate TIAGo's arm and gripper using a low-cost peripheral: the SpaceMouse. Different ROS interfaces were analyzed which offer direct control over the position and velocity of robot joints, and the best suited ones have been selected to adequately use specific degrees of freedom of the input device (the SpaceMouse's joystick and buttons) to command the robot, accounting for the necessary safety considerations (e.g. checking against singularities and joint limits).

The SpaceMouse has proved to be a suitable tool for this task considering the range of movements its 6 degrees of freedom offer, although it has been noted that unexperienced users find it difficult to rotate the wrist until a comfortable grasping angle is found. Increments in the joystick are correctly mapped to displacements in the robotic arm. As was noted in (Łukawski et al., 2023), a virtual reference point was needed in order to represent a point in space which corresponds to the ideal position of the commanded TCP. This way, the effect of gravity on the extended arm could be mitigated.

The combination of the SpaceMouse with the remote controller offered by PAL for the base proves an effective way to control all the parts in the robot's structure and allows for the work zone to be extended. However, users have remarked that they are hard to operate at the same time, having to first move the base to a suitable position for the manipulation task, and then switch to the new controller to operate the arm. This will be taken into account to test new teleoperation devices.

Future work includes the possibility of adding haptic feedback to the gripper controller using the force sensors of the robot, as well as using the RGBD camera situated in the robot's head to get visual feedback when a direct line of sight is not possible. The two-armed TIAGo++ robot could also be controlled by using two SpaceMouse devices at the same time, one for each arm. Other line of work is to generalise this controller to be used with different input devices and different robots, as well as making a new version compatible with ROS2.

Acknowledgments

This research has been financed by ALMA, "Human Centric Algebraic Machine Learning", H2020 RIA under EU grant agreement 952091; ROBOASSET, "Sistemas robóticos inteligentes de diagnóstico y rehabilitación de terapias de miembro superior", PID2020-113508RB-I00, financed by AEI/10.13039/501100011033; "RoboCity2030-DIH-CM, Madrid Robotics Digital Innovation Hub", S2018/NMT-4331, financed by "Programas de Actividades I+D en la Comunidad de Madrid"; "iREHAB: AI-powered Robotic Personalized Rehabilitation", ISCIII-AES-2022/003041 financed by ISCIII and EU; and EU structural funds.

References

- Catalano, M. G., Grioli, G., Farnioli, E., Serio, A., Piazza, C., Bicchi, A., 2014. Adaptive synergies for the design and control of the Pisa/IIT SoftHand. *The International Journal of Robotics Research* 33 (5), 768–782.
- Chitta, S., et al., 2017. *ros_control*: A generic and simple control framework for ROS. *The Journal of Open Source Software*. DOI: 10.21105/joss.00456
- Joseph, L., Cacace, J., 2018. *Mastering ROS for Robotics Programming: Design, build, and simulate complex robots using the Robot Operating System*. Packt Publishing Ltd.
- Łukawski, B., Victores, J. G., Balaguer, C., 2023. A generic controller for teleoperation on robotic manipulators using low-cost devices. In: *XLIV Jornadas de Automática*. pp. 785–788. DOI: 10.17979/spudc.9788497498609.785
- Marchionni, L., Pages, J., Adell, J., Capriles, J. R., Tomé, H., 2013. REEM service robot: How may I help you? In: *Int. Work-Conference on the Interplay Between Natural and Artificial Computation*. Springer, pp. 121–130.
- Open Robot Control Software, 2024. *Orocos Kinematics and Dynamics C++ library*. https://github.com/orocos/orocos_kinematics_dynamics.
- Pages, J., Marchionni, L., Ferro, F., 2016. TIAGo: the modular robot that adapts to different research needs. In: *International workshop on robot modularity, IROS*. Vol. 290.
- PAL Robotics, 2021. TIAGo base – technical specifications.
- PAL Robotics, 2023. Public tutorials of TIAGo robot. https://github.com/pal-robotics/tiago_tutorials.
- PAL Robotics, 2024. Predefined motions for the Hey-5 hand. https://github.com/pal-robotics/tiago_robot/tree/kinetic-devel/tiago_bringup/config/motions.
- Quigley, M., Conley, K., Gerkey, B., Faust, J., Foote, T., Leibs, J., Wheeler, R., Ng, A. Y., et al., 2009. ROS: an open-source Robot Operating System. In: *ICRA workshop on open source software*. Vol. 3. Kobe, Japan, p. 5.
- Łukawski, B., Calzada, A., 2024. TIAGo arm teleoperation with a SpaceNavigator 3D mouse. https://github.com/asrob-uc3m/tiago_snav_teleop.



Simposio de Robótica, Bioingeniería y Visión por Computador 2024



Sesion: <Robótica>

Estimando la región de atención mediante atención compartida en robots sociales

Jesús García-Martínez , Javier Sevilla-Salcedo , José Carlos Castillo Montoya , Álvaro Castro-González , Miguel Ángel Salichs 

Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad Carlos III de Madrid. Avenida de la Universidad, 30. 28911 Leganés, Madrid. España.

To cite this article: García-Martínez, J., Sevilla-Salcedo, J., Castillo Montoya, J.C., Castro-González, Á., and Salichs-Sánchez-Caballero, M.A. 2024. Estimating Region of Attention through Joint Attention in Social Robots. Simposio de Robótica, Bioingeniería y Visión por Computador, 2024, 1-6. <https://doi.org/>

Resumen

La cognición social es necesaria para el desarrollo de interacciones humano-robot naturales y efectivas en la robótica social. Estas interacciones se basan en la habilidad del robot para compartir y dirigir la atención hacia objetos o eventos comunes, un proceso conocido como atención compartida. Este trabajo introduce un algoritmo de visión por computador diseñado para estimar la región de atención cuando un usuario señala en una dirección dentro del campo de visión del robot social Mini. Complementado con técnicas adicionales de postprocesamiento, como el crecimiento de regiones y la detección de contornos, este trabajo mejora la precisión en la identificación de la región de atención. Adoptando un enfoque bioinspirado, el sistema permite al robot interpretar y seguir las indicaciones de los usuarios de manera intuitiva, dirigiendo su atención hacia la zona más relevante de la escena, la región de atención.

Palabras clave: Robótica social, Atención compartida, Visión por ordenador, Interacción humano-robot, Foco de Atención, Cognición social.

Estimating Region of Attention through Joint Attention in Social Robots.

Abstract

Social cognition is necessary to develop natural and effective human-robot interactions in social robotics. These interactions rely on the robot's ability to share and direct attention to common objects or events, a process known as joint attention. This study introduces a computer vision algorithm designed to estimate the focus of attention when a user points in a direction, implemented on the Mini social robot. Supplemented with additional post-processing techniques, such as region growing and contour detection, this work improves the accuracy in identifying the area of attention. Adopting a bio-inspired approach, the system allows the robot to interpret and follow human cues intuitively, directing its attention towards the most salient zone.

Keywords: Social Robots, Joint Attention, Computer Vision, Human-Robot Interaction, Focus of Attention, Social Cognition

1. Introducción

Una interacción eficaz depende en gran medida de la capacidad para compartir y dirigir la atención hacia objetos o eventos comunes de los participantes, un fenómeno conocido como

Atención Compartida (AC) (Moore et al., 2014). Este proceso, que fundamenta la comunicación y el aprendizaje social desde las etapas más tempranas del desarrollo humano, se divide en dos fases principales: la Iniciación de la Atención Conjunta

*Jesús García-Martínez: jesusgar@ing.uc3m.es

Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)

Correos electrónicos: jesusgar@ing.uc3m.es (Jesús García-Martínez ) , javier.sevilla@uc3m.es (Javier Sevilla-Salcedo ) , jocastil@ing.uc3m.es (José Carlos Castillo Montoya ) , acgonzal@ing.uc3m.es (Álvaro Castro-González ) , salichs@ing.uc3m.es (Miguel Ángel Salichs )

ta (IAC) y la Respuesta a la Atención Conjunta (RAC) (Yoder et al., 2006). Por un lado, la IAC se refiere a la capacidad de una persona para atraer la atención de otra hacia un objeto, evento o experiencia. Implica que un individuo utilice medios como el lenguaje, gestos o señales no verbales para compartir su interés por algo específico (región de atención¹). Por otro lado, la RAC se refiere a la capacidad de una persona para reconocer y responder a las señales de atención conjunta iniciadas por otra persona. Esto implica que un interlocutor puede seguir la dirección del punto de atención de otra persona hacia un objeto o evento de interés (Mundy and Newell, 2007). Ambos conceptos están estrechamente vinculados con la cognición social, que se refiere al conjunto de procesos mentales que nos permiten percibir, interpretar, comprender y responder adecuadamente a las señales sociales provenientes de nuestro entorno y de otras personas (Beaudoin and Beauchamp, 2020). La cognición social incluye la capacidad de comprender las intenciones, emociones y estados mentales de los demás, así como la habilidad para interactuar de manera efectiva en contextos sociales, lo cual es fundamental para la atención compartida y, por ende, para el desarrollo de las habilidades de comunicación y socialización.

Por su parte, la robótica social tiene como objetivo establecer relaciones a largo plazo con las personas y emular la complejidad de las interacciones humano-humano. Esta necesidad impulsa el estudio de la interacción humano-robot (HRI) (Murphy et al., 2010). En este sentido, la integración de sistemas de atención compartida que otorguen a los robots la capacidad de comprender y responder adecuadamente a las señales sociales de los usuarios permite que la interacción se desarrolle con fluidez y naturalidad, lo que podría afectar positivamente a la aceptación de los robots en la sociedad.

Existen numerosos estudios que integran sistemas de atención compartida en robots sociales. En el estudio de Dağlarlı et al. (2017) se propone una arquitectura cognitiva inspirada en el sistema límbico humano para mejorar la interacción entre un robot humanoide y preescolares, centrándose en la atención conjunta durante un juego de turnos. El estudio sugiere que este modelo puede ser útil para abordar problemas de atención en niños con TDAH, mostrando mejoras significativas en la atención y el compromiso de los niños. Del mismo modo, en el trabajo de Pereira et al. (2019) se presenta un sistema que utiliza percepción multimodal para modelar mecanismos de AC en robots con el objetivo de imitar cómo los humanos dirigen su atención de manera coordinada. Los resultados indican que este enfoque mejora la percepción de la presencia social del robot durante una tarea de resolución de problemas. El seguimiento de la mirada y la interpretación de gestos, como las indicaciones con las manos, juegan un papel crucial en la facilitación de la RAC. Skantze et al. (2014) analizan cómo un robot puede guiar a un humano en la tarea de trazar una ruta en un mapa. Se concluye que la mirada del robot tiene un impacto significativo en el comportamiento de turnos de los usuarios y en su percepción de la interacción social. Estudios recientes han demostrado el potencial de las intervenciones basadas en robots para mejorar la atención conjunta en niños con autismo, resaltando el valor de la robótica en contextos terapéuticos y educativos

(Sani-Bozkurt and Bozkus-Genc, 2023). Además, Prajod et al. (2023) han explorado cómo los humanos utilizan la mirada para iniciar y facilitar la colaboración con robots colaborativos en entornos industriales, lo que subraya la importancia de interpretar correctamente las señales sociales para una cooperación efectiva.

La mayoría de estos avances tienen en cuenta el seguimiento de la mirada y la detección de los usuarios, pero existe una brecha notable en el estudio de la interpretación y seguimiento de las indicaciones con las manos en el contexto de la robótica social y la atención compartida. Nuestro trabajo aborda este reto presentando un algoritmo capaz de estimar el foco de atención hacia el cual un usuario está apuntando. Dicho algoritmo se combina y compara con otros métodos tradicionales para la obtención de la región de atención a partir de dicho foco de atención. Esta capacidad permite mejorar la RAC dentro de los mecanismos de interacción, enriqueciendo la comunicación bidireccional. El algoritmo presentado se integra dentro del sistema de atención compartida del robot para permitir que éste gestione a qué eventos de entre los detectados (la cara del usuario, o hacia donde apunta), preste atención de una manera natural.

Este artículo se estructura de la siguiente manera: en la sección 2 se describe la plataforma robótica sobre la que se ha realizado el trabajo. En la sección 3 se explica el algoritmo desarrollado para la estimación de la región a la que apunta el usuario. A continuación, en la sección 4 se define la implementación del algoritmo dentro del robot social. Finalmente, la sección 5 expone las principales conclusiones y líneas futuras del trabajo realizado.

2. Plataforma robótica

Este trabajo se ha integrado en el robot social Mini desarrollado en la Universidad Carlos III de Madrid (Salichs et al., 2020). Diseñado como un robot de sobremesa, Mini tiene el objetivo principal de brindar asistencia y entretenimiento a personas mayores. Este robot incorpora una serie de aplicaciones interactivas y juegos diseñados específicamente para este fin, incluyendo la capacidad de mostrar imágenes y vídeos, narrar noticias y ofrecer entretenimiento. La apariencia externa de Mini se ha diseñado para que parezca amigable y cercano, con un revestimiento de peluche personalizable, lo que facilita así una mayor conexión con los usuarios.

Mini destaca por su capacidad para expresar emociones mediante sus ojos expresivos, latidos de corazón simulados, mejillas y movimientos de brazos, cabeza y base. A través de la comunicación multimodal —combinando elementos verbales, visuales y táctiles—, Mini puede interactuar de manera intuitiva y adaptativa. Equipado con cámaras RGBD y RGB, en la tripa y barbilla, este robot está diseñado para una captar información del usuario y entorno, permitiéndole responder de manera contextual y relevante. La inclusión de aceleradores gráficos Google Coral TPU e Intel Movidius NCS2, le otorga la capacidad de ejecutar localmente modelos de inteligencia artificial.

La arquitectura *software* de Mini está implementada en ROS (Quigley et al., 2009) y se divide en cinco módulos prin-

¹En este trabajo, la región de atención se asocia al punto donde el usuario pone su interés (también conocido como foco de atención).

cipales (ver Figura 1). Estos módulos son necesarios para monitorizar y realizar las actividades del robot. El *sistema de percepción* (SP) se encarga de obtener y procesar la información del entorno y del usuario con el que el robot interactúa. En este trabajo se utiliza el detector de caras, el detector de esqueleto y el detector presentado para estimar la región de atención. El *sistema de toma de decisiones* (STD) ejecuta y controla las habilidades del robot. Las *habilidades* son las capacidades y aplicaciones que tiene el robot. El *sistema de interacción humano-robot* (SIHR) gestiona la información del sistema de percepción y genera expresiones multimodales para comunicarse con el usuario. El *sistema de actuación* controla los periféricos del robot y posiciona las articulaciones en las posiciones correctas.

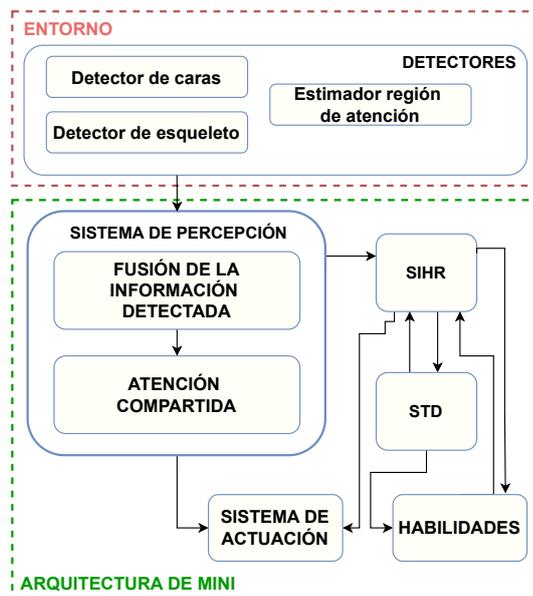


Figura 1: Arquitectura software del robot Mini.

3. Estimación de la región de atención en atención compartida

El sistema propuesto es capaz de calcular dónde está señalando un usuario para estimar la región de interés u objeto señalado. Para ello, se van a probar e integrar tres algoritmos: un algoritmo propio para estimar la región de atención, un algoritmo basado en crecimiento de regiones (Hojjatoleslami and Kittler, 1998) y otro basado en búsqueda de contornos (Arbelaez et al., 2010). Los dos últimos algoritmos reciben como entrada el foco de atención proporcionado por nuestra propuesta.

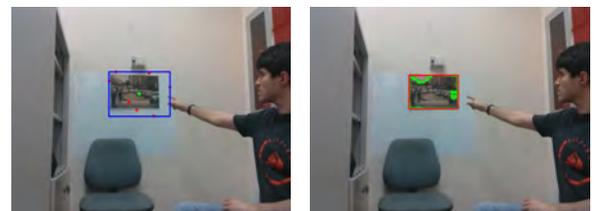
3.1. Detección de los brazos del usuario

Para la detección de los brazos del usuario se utiliza PoseNet (Kendall et al., 2015), un modelo de visión por computador desarrollado para la detección de la posición del cuerpo humano en imágenes y vídeos en tiempo real. Utilizando redes neuronales es capaz de identificar partes clave del cuerpo humano, como brazos, piernas y cabeza, proporcionando las coordenadas en el espacio de la imagen. Aunque está originalmente diseñado para trabajar con imágenes RGB, nuestro sistema combina la información 2D los datos de profundidad capturados por

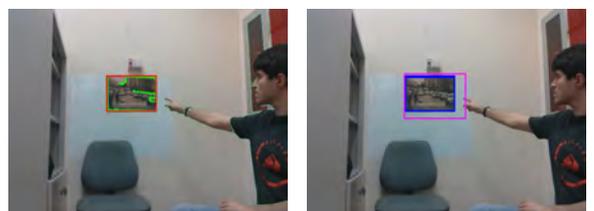
la cámara para obtener medidas tridimensionales. En el contexto de este trabajo, una vez que PoseNet detecta el esqueleto del usuario, se filtran las coordenadas de los brazos para determinar la dirección en la que el usuario señala, sirviendo como entrada para nuestro algoritmo de estimación de la región de interés. En la Figura 2(a) se muestra el resultado de la detección del brazo derecho del usuario.



(a) Detección del esqueleto del brazo del usuario. (b) Representación tridimensional del cono proyectado sobre la nube de puntos.



(c) Foco de atención estimado (d) Crecimiento de regiones (con-punto verde). La región de in-terés aparece representada por los puntos de intersección (puntos rectángulo rojo).



(e) Detección de contornos. El (f) Fusión de regiones de interés contorno más cercano al foco de (rectángulo violeta). atención aparece marcado con un rectángulo rojo.

Figura 2: Algoritmos para la estimación de la región de atención.

3.2. Estimación de la región de atención a partir del esqueleto del usuario

El algoritmo propuesto para la estimación de la región de interés (ver Figura 3 (recuadro rojo)) opera en un entorno tridimensional y calcula la intersección entre la recta dirigida por el brazo del usuario, ($br1$ y $br2$), y la nube de puntos capturada por la cámara RGBD del robot (pc). Inicialmente, se realiza un submuestreo aleatorio sobre la nube de puntos con el objetivo de reducir el tiempo de cálculo. Además, se define un umbral de tolerancia (th) para determinar la máxima distancia a la que se considera válida la intersección entre la recta y la nube de puntos.

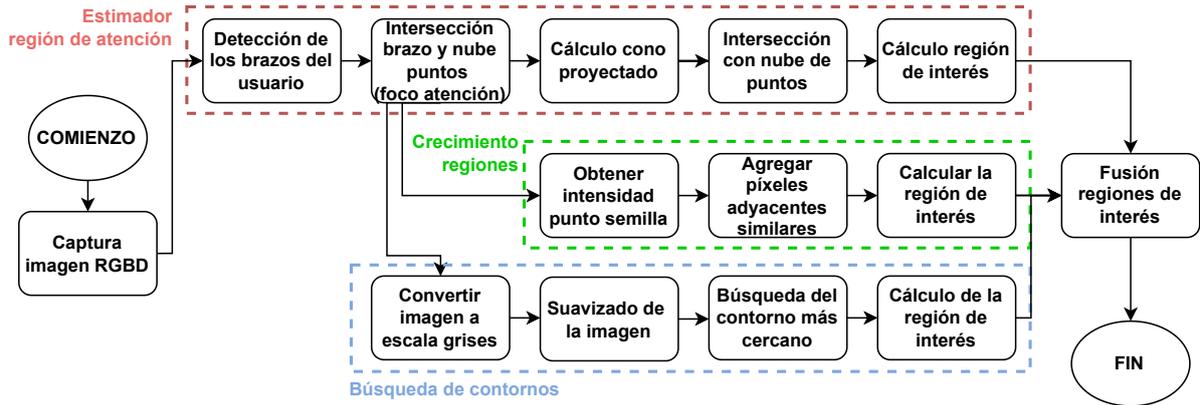


Figura 3: Diagrama de flujo de los algoritmos integrados para la estimación de la región de atención.

Algoritmo 1 Estimador región de atención

```

1: Procedimiento ESTIMADORREGATENCION( $br1, br2, pc, th$ )
2:   #Calcular dirección de la recta a partir del brazo:
3:    $direccion \leftarrow br2 - br1$ 
4:    $direccion\_unitaria \leftarrow \frac{direccion}{\|direccion\|}$ 
5:   #Encontrar intersección con nube de puntos:
6:    $pto\_interseccion \leftarrow null$ 
7:    $distancia\_a\_pto \leftarrow \infty$ 
8:   para cada  $pto$  en  $pc$  hacer
9:     #Calcular distancia entre punto y recta:
10:     $distancia \leftarrow \|(pto - br1) \times direccion\_unitaria\|$ 
11:    si  $distancia < th$  entonces
12:       $pto\_interseccion \leftarrow pto$ 
13:       $distancia\_a\_pto \leftarrow \|br1 - pto\_interseccion\|$ 
14:    romper
15:  fin si
16: fin para
17: #Calcular altura del cono:
18:  $altura\_cono \leftarrow distancia\_a\_pto$ 
19: #Generar puntos en la base del cono:
20:  $ptos\_base \leftarrow calcular\_ptos\_base(radio, num\_pts)$ 
21: #Proyectar y estimar región de interés:
22:  $region\_de\_interes \leftarrow proyectar\_2D(ptos\_base)$ 
23: devolver  $region\_de\_interes$ 
24: fin Procedimiento

```

Atendiendo al pseudocódigo mostrado en el Algoritmo 1, inicialmente el sistema calcula la dirección de la recta formada por los puntos del brazo del usuario ($br1$ y $br2$). Y posteriormente se calcula el vector unitario a partir de la dirección ($direccion_unitaria$). Esta recta sirve para determinar la trayectoria con la que señala el usuario. A continuación, se calcula la intersección entre esta recta y la nube de puntos. Este proceso implica calcular la distancia mínima entre cada punto de la nube y la recta, utilizando el umbral de tolerancia th , ajustado en nuestro caso a quince centímetros, valor con el cual hemos obtenido mejores resultados, para identificar el punto estimado de intersección ($distancia < th$). Una vez identificado el punto de intersección, se proyecta un cono tridimensional que parte desde el extremo del brazo del usuario ($br2$) sobre la nube de puntos (pc) como se aprecia en la Figura 2(b). La altura del cono es equivalente a la distancia entre el extremo del brazo y la intersección ($altura_cono_1 = distancia_a_pto$). Des-

pués, utilizando los puntos de la base del cono (definido como un parámetro num_pts , equivalente a diez en nuestro caso) y la nube de puntos se busca el punto de intersección más cercano ($ptos_base = calcular_ptos_base(radio, num_pts)$) obteniendo los puntos finales de intersección.

A partir de los puntos tridimensionales resultantes, donde el foco de atención se corresponde con el punto de intersección, y el resto de puntos con la intersección de la base del cono proyectado con la nube de puntos, se busca su equivalencia en coordenadas X,Y en la imagen. La envolvente convexa es calculada a partir de dichos puntos, y posteriormente la región de interés que engloba dicho contorno ($region_de_interes = proyectar_2D(ptos_base)$) permitiendo definir la región de atención (ver Figura 2(c)).

3.3. Estimación de la región de atención con crecimiento de regiones

El algoritmo de crecimiento de regiones es una técnica de segmentación que identifica áreas con características similares en una imagen (Pal and Pal, 1993). Atendiendo a la Figura 3 (recuadro verde), el algoritmo arranca a partir de un punto de inicio o *semilla* y evalúa los píxeles adyacentes para determinar si deben ser incluidos en la región en crecimiento, utilizando para ello un criterio de homogeneidad que se basa en la similitud de intensidad o color. En nuestro caso, el punto de inicio es el foco de atención calculado previamente (ver sección 3.2). Es un proceso iterativo en el que se agrupan los píxeles con características similares y que finaliza cuando no hay vecinos adyacentes que cumplan con el criterio de homogeneidad o cuando se complete la imagen. Después, se detecta el contorno que contiene dicha agrupación de píxeles. A partir de este contorno se calcula la región de interés. En la Figura 2(d) se observa resaltado en un recuadro rojo el resultado de este algoritmo aplicado sobre la imagen. En este caso la región estimada coincide con la superficie del cuadro colgado en la pared.

3.4. Estimación de la región de atención mediante el contorno más cercano

La segmentación por contornos se utiliza para encontrar contornos cerrados en una imagen 2D. En la Figura 3 (recuadro azul) se observan las operaciones de procesamiento de la

imagen realizadas. Se comienza convirtiendo la imagen de entrada a escala de grises y se aplica un filtro de suavizado para reducir el ruido y mejorar la detección de bordes. Aplicando un filtro *Canny* se resaltan los bordes de los objetos, lo que facilita la identificación de contornos. Sobre este filtro se aplica una operación de cierre morfológicos para cerrar pequeños huecos en los contornos, mejorando así la detección de contornos completos. Una vez aplicados estos filtros se buscan contornos en la imagen. Al igual que en los algoritmos anteriores, partiendo foco de atención se busca el contorno más cercano al mismo. Sobre dicho contorno se calcula el recuadro delimitador. En la Figura 2(e) se puede observar el recuadro delimitador obtenido a partir de este algoritmo, coincidente en este caso con el cuadro colgado en la pared.

3.5. Fusión de las regiones detectadas

Para obtener una estimación más robusta y precisa de la región final donde el usuario está señalando se realiza la fusión de las regiones de atención generadas por los tres algoritmos. Cada algoritmo se basa en una técnica diferente para la detección de regiones, y al combinarlas, se minimizan las debilidades inherentes a cualquier método individual.

El proceso de fusión comienza con un filtrado inicial, donde se descartan aquellas regiones que ocupen una superficie superior a un umbral de tamaño, fijado en nuestro caso a la mitad de la imagen. Esto ayuda a eliminar regiones demasiado grandes que podrían ser fruto de un mal resultado del algoritmo. Posteriormente, se realiza la fusión de las regiones que han pasado este filtrado. Esto implica calcular un recuadro delimitador común que englobe todas las regiones de atención. El resultado es una región compuesta que refleja la integración de las contribuciones de cada algoritmo individual, asegurando que el área de atención es representativa de todos los métodos utilizados, tal como se ilustra en la Figura 2(f).

4. Integración en el robot social

La arquitectura del robot Mini considera desde la adquisición de información del entorno y del usuario hasta la actuación del robot. Este trabajo se integra principalmente en el SP, donde se combina la información percibida a través de los detectores. Se utiliza un modelo de detección de caras para detectar la presencia del usuario delante del robot y un detector del esqueleto para estimar dónde apunta el usuario (ver sección 3).

La información detectada se fusiona realizando una agregación temporal y se envía al *sistema de atención compartida* (SAC). Este sistema es el encargado de priorizar la respuesta del robot, ajustando su expresividad según la posición de la cara del usuario, o donde esté apuntando (ver Figura 4(a)). El SAC se encarga de determinar cual de los dos detectores tiene mayor importancia en cada momento atendiendo al parámetro de prioridad asociado a cada detector: en caso de detectar la presencia del usuario en la imagen, utilizando el detector de caras, mirará al usuario; en caso de que el usuario esté señalando en una dirección, se activará el estimador de la región de atención al cual se le ha dotado de mayor prioridad. La información de la prioridad de cada detector se representa en un mapa de atención (ver Figura 4(b)).

Para ello, a partir de las coordenadas de la región en el mundo real, el controlador del robot calcula la cinemática inversa y ajusta la orientación de Mini adecuadamente. Las detecciones pierden prioridad en caso de no recibir nueva información a lo largo del tiempo, para ello hemos replicado el mecanismo de inhibición de retorno (Klein, 2000). El sistema reduce la prioridad sobre los focos de atención que ya han sido previamente atendidos. Este proceso asegura que el robot alterne su atención entre el usuario y otros elementos de interés, adaptando su comportamiento para mantener una interacción dinámica, natural y dependiente del entorno.



(a) Detección de la cara, brazos y estimación de la región de atención. (b) Mapa de atención. Aparece resaltada la cara del usuario y el foco de atención donde apunta.

Figura 4: Información de los detectores utilizados (izquierda). Mapa de atención del robot (derecha).

En el caso de uso objeto de este trabajo, un usuario se sienta frente al robot Mini, que inicia la interacción saludándolo. El robot le pregunta si algo ha capturado su interés, invitándolo posteriormente a señalar hacia el objeto de atención. El usuario apunta hacia un cuadro situado detrás de él, y tras estimar la dirección indicada, el robot comenta sobre el interés que despierta el cuadro, demostrando su capacidad para seguir la atención del usuario y generar un comportamiento contextual acorde. La interacción continúa con el usuario señalando un extintor, lo que lleva al robot a recalcular la región de atención y ajustar su comportamiento. Este ciclo de señalamiento y respuesta refleja la habilidad del robot para mantener una interacción dinámica hasta que el usuario decide centrar su atención de nuevo en el robot, concluyendo la demostración. El vídeo completo de este caso de uso está disponible en el siguiente [enlace](#), ofreciendo una vista detallada de las capacidades interactivas del robot Mini.

5. Conclusiones

En el presente trabajo se ha presentado un algoritmo para identificar eventos de atención compartida en los que el usuario señala con los brazos hacia un objeto o región de atención. Este algoritmo capacita al robot para reconocer el foco de atención, orientándose hacia él. Implementado en el robot social Mini, este comportamiento bio-inspirado facilita una actuación más natural del robot, apuntando a mejorar la interacción con el usuario.

Las ventajas de nuestro algoritmo frente a las técnicas tradicionales son que emplea información de profundidad, lo que permite por un lado definir con mayor precisión la intersección, permitiendo modelar objetos y regiones complejas que no son

apreciables utilizando únicamente información 2D. Además, el crecimiento de regiones, si bien es útil para identificar áreas con características homogéneas, su rendimiento puede variar dependiendo de la ubicación del punto inicial y las propiedades de los píxeles adyacentes que forman el objeto en la imagen. Por otro lado, en cuanto al algoritmo de detección de contornos, su eficacia está directamente influenciada por la calidad de la imagen y puede fallar en reconocer contornos que no estén completamente cerrados en situaciones en las que hay contraste.

El proceso de muestreo para simplificar la nube de puntos, aunque reduce el tiempo de computo de nuestro algoritmo, introduce un margen de inexactitud en la localización de la intersección inicial. La combinación de los tres algoritmos busca conseguir una mejora de la robustez en la estimación de la región de atención, adaptándose a las limitaciones de cada técnica individual. Esta integración permite una delimitación más efectiva de la región de atención, excluyendo áreas no pertinentes. En trabajos futuros se hará una validación de los métodos implementados y su fusión.

Agradecimientos

Estos resultados han sido financiados por los proyectos PID2021-123941OA-I00, financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y por ERDF A way of making Europe; TED2021-132079B-I00 financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y por la Unión Europea Next-GenerationEU/PRTR; Mejora del nivel de madurez tecnológica del robot Mini (MeNiR) financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033. 13039/501100011033 y por la Unión Europea NextGenerationEU/PRTR; Robot social portable con alto grado de vinculación (PoSoRo) PID2022-140345OB-I00 financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y ERDF A way of making Europe.

Referencias

- Arbelaez, P., Maire, M., Fowlkes, C., Malik, J., 2010. Contour detection and hierarchical image segmentation. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence* 33 (5), 898–916.
- Beaudoin, C., Beauchamp, M. H., 2020. Social cognition. In: *Handbook of clinical neurology*. Vol. 173. Elsevier, pp. 255–264.
- Dağlarlı, E., Dağlarlı, S. F., Günel, G. Ö., Köse, H., 2017. Improving human-robot interaction based on joint attention. *Applied Intelligence* 47, 62–82.
- Hojjatolleslami, S., Kittler, J., 1998. Region growing: a new approach. *IEEE Transactions on Image processing* 7 (7), 1079–1084.
- Kendall, A., Grimes, M., Cipolla, R., 2015. Posenet: A convolutional network for real-time 6-dof camera relocalization. In: *Proceedings of the IEEE international conference on computer vision*. pp. 2938–2946.
- Klein, R. M., 2000. Inhibition of return. *Trends in cognitive sciences* 4 (4), 138–147.
- Moore, C., Dunham, P. J., Dunham, P., 2014. *Joint attention: Its origins and role in development*. Psychology Press.
- Mundy, P., Newell, L., 2007. Attention, joint attention, and social cognition. *Current directions in psychological science* 16 (5), 269–274.
- Murphy, R. R., Nomura, T., Billard, A., Burke, J. L., 2010. Human–robot interaction. *IEEE robotics & automation magazine* 17 (2), 85–89.
- Pal, N. R., Pal, S. K., 1993. A review on image segmentation techniques. *Pattern Recognition* 26 (9), 1277–1294.
- Pereira, A., Oertel, C., Fermoselle, L., Mendelson, J., Gustafson, J., 2019. Responsive joint attention in human-robot interaction. In: *2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. IEEE, pp. 1080–1087.
- Prajod, P., Nicora, M. L., Mondellini, M., Tauro, G., Vertechy, R., Malosio, M., André, E., 2023. Gaze detection and analysis for initiating joint activity in industrial human-robot collaboration. *arXiv preprint arXiv:2312.06643*.
- Quigley, M., Conley, K., Gerkey, B., Faust, J., Foote, T., Leibs, J., Wheeler, R., Ng, A. Y., et al., 2009. Ros: an open-source robot operating system. In: *ICRA workshop on open source software*. Vol. 3. Kobe, Japan, p. 5.
- Salichs, M. A., Castro-González, Á., Salichs, E., Fernández-Rodicio, E., Maroto-Gómez, M., Gamba-Montero, J. J., Marques-Villarroya, S., Castillo, J. C., Alonso-Martín, F., Malfaz, M., 2020. Mini: a new social robot for the elderly. *International Journal of Social Robotics* 12, 1231–1249.
- Sani-Bozkurt, S., Bozkus-Genc, G., 2023. Social robots for joint attention development in autism spectrum disorder: A systematic review. *International Journal of Disability, Development and Education* 70 (5), 625–643.
- Skantze, G., Hjalmarsson, A., Oertel, C., 2014. Turn-taking, feedback and joint attention in situated human–robot interaction. *Speech Communication* 65, 50–66.
- Yoder, P. J., McDuffie, A. S., Charman, T., Stone, W., 2006. Treatment of responding to and initiating joint attention. *Social and communication development in autism spectrum disorders: Early identification, diagnosis, and intervention*, 117–142.



Simposio de Robótica, Bioingeniería y Visión por Computador 2024



Diseño y fabricación de microrrobot propulsado por campos magnéticos y plataforma experimental.

Mancha-Sánchez, E.^{a,*}, Serrano-Balbontín, A.J.^a, Tejado, I.^a, Vinagre, B.M.^a

^aUniversidad de Extremadura, Escuela de Ingenierías Industriales, Avda. de Elvas, s/n, 06006, Badajoz, España.

Resumen

La microrrobótica es un campo en crecimiento de la robótica. En el ámbito de la medicina, los microrrobots permiten realizar intervenciones de manera mínimamente invasiva, liberar fármacos o ser usado como biosensores. El objetivo de este trabajo es desarrollar un microrrobot con flagelo pasivo movido por campos magnéticos, así como fabricar una plataforma de experimentación. El microrrobot se creó usando PDMS y un pequeño imán situado en su cabeza. La plataforma está formada por dos bobinas enfrentadas, una tubería, un sistema de engranajes que permiten el giro de las bobinas sobre la tubería, y un raíl por el que el sistema de bobinas se desplaza. Se probó uno de los microrrobots fabricados en la plataforma, observando que el microrrobot generaba el movimiento oscilatorio deseado. Del mismo modo, y debido al movimiento del flagelo, se producía un desplazamiento neto del microrrobot sobre la tubería.

Palabras clave: Tecnología robótica, Simulación, Robot bioinspirado, Campo magnético, Microrrobot .

Design and manufacture of magnetic field propelled microrobot and experimental platform

Abstract

Microrobotics is a growing field of robotics. In the field of medicine, microrobots make possible to perform minimally invasive interventions, to release drugs, or act like biosensors. The aim of this work is to develop a microrobot with a passive flagellum moved by magnetic fields, as well as to build an experimental platform. The microrobot was created using PDMS and a small magnet placed in its head. The platform consists of two coils facing each other in a pipe, a system of gears that allow the coils to rotate on the pipe, and a rail along which the coil system moves. One of the developed microrobots was tested on the platform, observing that the microrobot generated the desired oscillatory movement. In the same way, and due to the movement of the flagellum, a net displacement of the microrobot on the pipe was produced.

Keywords: Robotics technology, Simulation, Bio-inspired Robotics, Magnetic fields, Microrobot .

1. Introducción

La robótica se encuentra en todos los campos de nuestra vida diaria, sin embargo, existen todavía fronteras en las que esta disciplina está comenzando a desarrollarse. El ámbito de la robótica médica es un campo en plena expansión. Mientras que ya se utilizan robots para cirugía de manera más extendida, existen otros áreas donde estos robots debido a su tamaño, de momento no se han expandido. Estos robots de pequeño tamaño son denominados como microrrobots. Los microrrobots son robots de pequeña escala que pueden operar en pequeños espacios y realizar tareas que los robots convencionales no pueden. Tienen muchas aplicaciones en diversos campos, no sólo

en el ámbito médico sino en la ingeniería ambiental, la nanotecnología o la seguridad. Los microrrobots aplicados a la salud pueden realizar diversas tareas tales como la cirugía mínimamente invasiva, la liberación de fármacos de forma controlada, o su uso como sensores para la monitorización de enfermedades o parámetros sanitarios, entre otros (Li et al., 2017) .

Esta disciplina, la microrrobótica aplicada al ámbito médico, ha visto reducido su uso en un mayor porcentaje debido a los desafíos a los que se enfrenta su desarrollo. El tamaño reducido hace que estos dispositivos se relacionen con el medio de una manera diferente a como lo hacen los dispositivos de mayor tamaño. Esto es debido a que las fuerzas inerciales se

*Autor para correspondencia: emancha@unex.es

hacen insignificantes, siendo de este modo las fuerzas viscosas las que toman relevancia. Estos desafíos incluyen el diseño, los materiales, la fuente de energía, la localización, el control y la comunicación. (Yang et al., 2019)

Uno de los desafíos más importantes es la manera de alimentar al microrrobot. Existen dos estrategias diferentes para conseguir llevar energía al microrrobot, aplicando la energía de forma externa, denominados no autónomos, o utilizando energía almacenada de manera interna o del propio medio en el que se encuentren, conocidos como autónomos. Existen multitud de alternativas para aplicar energía externa a un microrrobot y que éste pueda desplazarse. Lo más utilizado es la aplicación de campos externos, como pueden ser campos eléctricos, ópticos, acústicos, o magnéticos (Choi et al., 2021). La aplicación de campos magnéticos es uno de los más usados dentro de este grupo (Celi et al., 2021). Esto es debido a sus ventajas, como la penetración profunda, la baja atenuación, la fácil generación y la alta precisión. Los microrrobots magnéticos pueden ser fabricados con materiales magnéticos o no magnéticos, dependiendo de si el campo magnético se utiliza para generar fuerzas o torques sobre el microrrobot. Los microrrobots magnéticos pueden realizar diversos modos de locomoción.

La inspiración biológica es una fuente importante para el diseño y la optimización de los microrrobots magnéticos, ya que los organismos vivos han desarrollado diversas formas de locomoción eficientes y adaptativas en la naturaleza. Entre los organismos vivos, los microorganismos o células flageladas (Singh et al., 2020) y los peces son especialmente interesantes para el estudio de los microrrobots magnéticos, ya que pueden nadar con gran agilidad y versatilidad en medios acuosos, que son los más comunes para las aplicaciones biomédicas de los microrrobots (Heo et al., 2007). El movimiento ondulatorio de estos organismos puede ser imitado por los microrrobots magnéticos mediante el uso de materiales blandos y campos magnéticos oscilantes.

El objetivo de este trabajo es desarrollar, fabricar y estudiar el comportamiento de microrrobots magnéticos en un campo magnético, realizar simulaciones computacionales iniciales y diseñar y fabricar una plataforma de experimentación.

2. Fabricación microrrobots

Esta sección detalla las diferentes alternativas realizadas para desarrollar y fabricar los microrrobots que puedan ser actuados mediante campos magnéticos.

2.1. Microrrobot con cabeza recubierta

Se desarrolló un microrrobot siguiendo un principio similar al descrito por (Wang et al., 2021). En ese artículo se utiliza una estructura semicilíndrica en forma de balancín con la base truncada con un recubrimiento metálico de Níquel (Figura 1a). Esta estructura es excitada mediante campos magnéticos para generar un movimiento de balanceo. Este balanceo, junto con la base truncada le permite desplazarse alternado el campo magnético aplicado. Se propone utilizar este movimiento oscilatorio para impulsar un microrrobot. La adición de un flagelo en la cara con el recubrimiento metálico de la estructura, nos permitirá usar el movimiento oscilatorio de la cabeza para proporcionar la propulsión del microrrobot

Las diferencias entre la estructura presentada en el artículo de (Wang et al., 2021)(Figura 1a) y la realizada por nosotros (Figura 1b) sugieren que replicar exactamente el movimiento descrito en el artículo podría presentar desafíos. La diferencia más notable es el tamaño: mientras que la cabeza en el artículo mide $100 \times 113 \times 36 \mu\text{m}$, la nuestra es aproximadamente cuarenta veces más grande, con dimensiones de $4 \times 3 \times 2 \text{ mm}$. Además, el grosor de la capa que recubre la cara plana de la estructura en el artículo es de 300 nm , en contraste con los 100 nm de nuestra estructura, lo que corresponde a un tercio del grosor original. Estas diferencias podrían corregirse utilizando un recubrimiento metálico de mayor grosor. Por otro lado, y debido a la naturaleza del movimiento deseado, la cabeza fabricada por nosotros es un semicilindro y no presenta la forma del semicilindro truncada de (Wang et al., 2021). Para comprobar si se podía generar un movimiento oscilatorio se realizaron una serie de experimentos con imanes. En ellos, se comprobó que esta estructura poseía el ferromagnetismo propio del Ni, no así magnetismo propio o inducido.

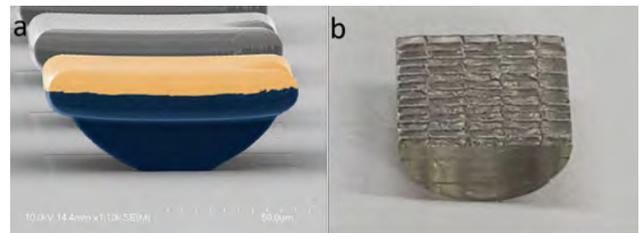


Figura 1: a. Imagen de microscopía de la estructura desarrollada en (Wang et al., 2021). b. Fotografía de nuestra estructura de resina con la capa de Ni

Para comprobar si el movimiento obtenido con la cabeza era suficiente para poder desplazar un microrrobot en un fluido se fabricó un microrrobot con un molde de plástico flexible. Este molde se rellenó con PDMS y se le introdujo la estructura semicilíndrica con el recubrimiento de Ni. Del mismo modo que con la cabeza desnuda se comprobaron las propiedades magnéticas de la cabeza con el flagelo de PDMS. Así se observó que la respuesta al campo magnético quedaba aún más reducida, haciéndolo imposible de utilizar con las bobinas existentes.

2.2. Microrrobots con imanes

Se fabricó una alternativa al microrrobot con la cabeza recubierta. En este caso el microrrobot se fabricó introduciendo un imán en un molde realizado con silicona que se rellenó de PDMS (Figura 2) Se realizaron diferentes prototipos con imanes en su interior. Para ello, se utilizaron imanes cilíndricos de $1 \times 1 \text{ mm}$ que se introdujeron en diferentes microrrobots fabricados de PDMS.

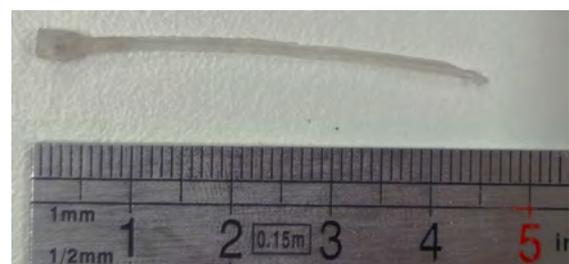


Figura 2: Imagen con uno de los microrrobots con imán en la cabeza

3. Simulación

Para poder entender cómo es el campo magnético generado por las bobinas, así como cómo se comporta el microrrobot frente a esos campos es necesario primero realizar simulaciones computacionales. Para realizar estas simulaciones se utilizó COMSOL Multiphysics.

Se realizó una simulación en el aire de una pareja de bobinas entre las cuales se situaba una cabeza de un material magnético. Para poder realizar una simulación de campo magnético con un elemento móvil (en nuestro caso la cabeza del microrrobot) es necesario confinar la estructura en un volumen amplio. Por esto se introdujeron todos los elementos en una esfera de gran tamaño. Los parámetros establecidos para la geometría aparecen en la tabla 1.

Tabla 1: Parámetros de la geometría del modelo del modelo

Elemento	Tamaño (cm)
Esfera	20
Elipsoide	1x2x1 (semieje-a-b-c)
Bobina (x2)	5x2,5 (b-h)

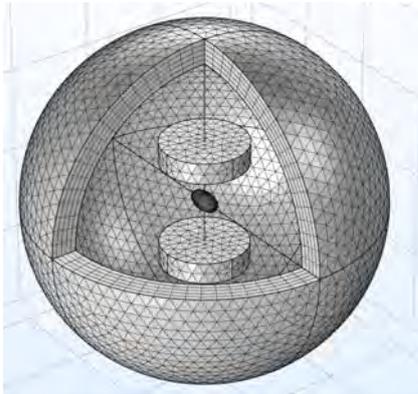


Figura 3: Imagen del modelo con su malla.

Posteriormente se empleó el Módulo AC/DC para modelar la generación de campos magnéticos, más concretamente la física de “Campos magnéticos sin corrientes”. Las paredes de la esfera, para evitar interacciones con el campo magnético generado por las bobinas, se caracterizaron como “elementos infinitos”. Para poder calcular el campo magnético (B) de un elemento que posee magnetismo intrínseco (M) se aplica la siguiente fórmula:

$$B = \mu_0(H + M) \quad (1)$$

donde, B es el campo magnético generado, μ_0 la permeabilidad magnética del material, H la intensidad de campo magnético (externo) y M la magnetización del material. En nuestro caso $H = 0$ en ambas bobinas, por lo tanto B será el resultado de la magnetización interna del material. De este modo a cada una de las bobinas se le aplicó una magnetización periódica correspondiente a una función seno a una de las bobinas y coseno a la otra. A la bobina 1 se le aplicó $1,1e^5 \cos(20\pi t)$ A/m, mientras que a la otra $1,1e^5 \sin(20\pi t)$ A/m. La representación del campo magnético generado puede verse en la figura 4. En cuanto a la

elipsoide, correspondiente a la cabeza, se le calculó un movimiento provocado por la fuerza generada según su material por el campo magnético resultante. Utilizando la componente x de la fuerza generada por el campo magnético y dividiendo por la masa de la elipsoide, se obtiene la aceleración producida en la cabeza:

$$\frac{\delta v}{\delta t} = F_z/m \quad (2)$$

donde $\frac{\delta v}{\delta t}$ es la aceleración, F_z la fuerza en la componente z y m la masa de la elipsoide. Finalmente integrando la aceleración y posteriormente la velocidad se obtiene el desplazamiento del cuerpo.

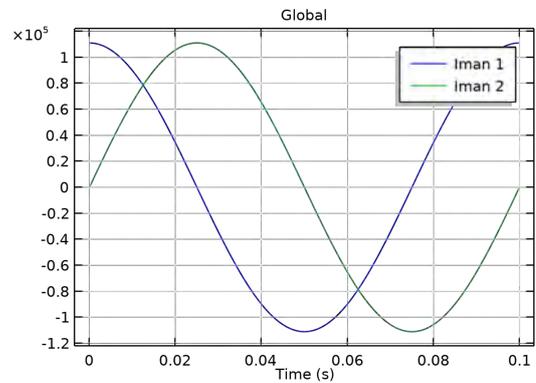


Figura 4: Gráfica del campo magnético generado por cada una de las bobinas

Por otro lado, para permitir que la elipsoide se mueva dentro del volumen se le aplicó la física de “Malla móvil”. Aplicando por el contrario la física de “Malla fija.” El resto de componentes. Dentro de la malla móvil de la elipsoide, se le prescribió un desplazamiento para permitir que su malla se desplazara con la misma velocidad que lo hacía el cuerpo, evitando problemas posteriores en la simulación. Este desplazamiento fue el mismo que el calculado según las fuerzas aplicadas. Posteriormente, se generaron las mallas de todos los elementos, teniendo especial cuidado a la hora de generarla en las inmediaciones de la elipsoide. El resultado del mallado puede observarse en la figura 3. Finalmente se realizó la simulación. El tiempo de computación se marcó en 0.1 s. La duración final de esta simulación fue de 3 h y 26 min. Los resultados del campo magnético derivado de la activación periódica de ambas bobinas pueden verse en la figura 5. En esta figura se observa cómo la segunda bobina no está activa en $t = 0$ mientras que la primera se encuentra en su máximo. Posteriormente, en $t = 0,012$, ambas bobinas se encuentran generando el mismo campo magnético. Siguiendo el proceso, en $t = 0,025$ la segunda bobina se encuentra en su máximo de activación, generando el máximo de campo magnético, mientras que la primera está desactivada ($B = 0$). Por último, en $t = 0,05$, la primera bobina ha cambiado la dirección de magnetización con respecto a $t = 0$, mientras que la segunda se encuentra con $B = 0$.

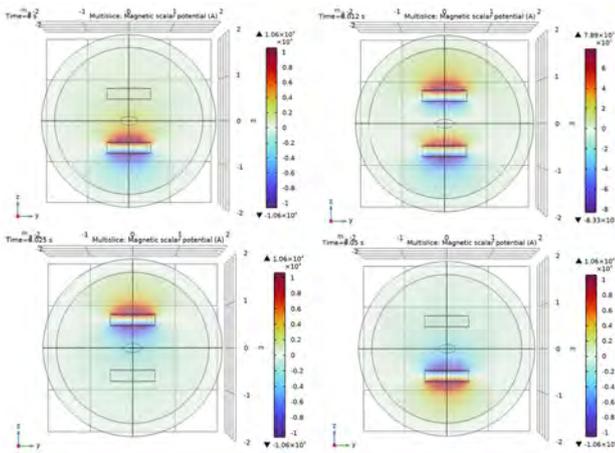


Figura 5: Resultados de la aplicación de los campos magnéticos por las bobinas a tiempos $t = 0, t = 0,012, t = 0,025$ y $t = 0,05$

Los resultados del desplazamiento y la aceleración de la elipsoide se pueden observar en la Figura 6. Como se muestra en la figura, la cabeza comienza moviéndose a una velocidad que disminuye progresivamente a medida que se activa la bobina opuesta. La velocidad oscila alrededor de cero, pero con un ligero *offset*. Esto, al igual que en el caso del desplazamiento, se debe a la falta de control sobre la activación y desactivación de las bobinas. Cuando una de las bobinas se activa primero, la activación de la segunda bobina solo logra compensar parcialmente la fuerza ejercida por la primera. De manera similar a la velocidad, el elipsoide se mueve hacia arriba y hacia abajo, oscilando en torno a un valor que gradualmente disminuye, acercándose siempre a la bobina que se activó primero.

Esta simulación es un punto de partida inicial para observar los campos magnéticos generados por dos bobinas enfrentadas y su interacción con una partícula situada entre ellas.

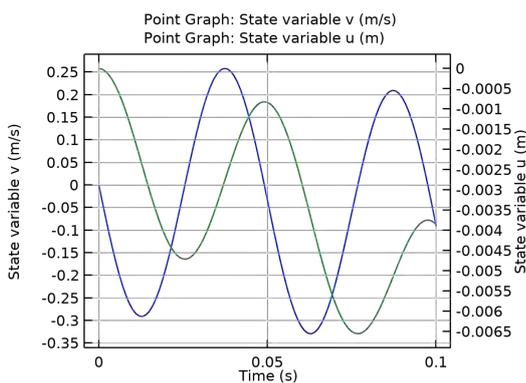


Figura 6: Gráfica del desplazamiento y la velocidad de la elipsoide, donde u (en azul) es el desplazamiento y v (en verde) la velocidad.

4. Plataforma de experimentación

En esta sección se describe la plataforma experimental diseñada para realizar los experimentos con microrrobots y sistemas de actuación magnéticos. Esta plataforma ha sido concebida para ofrecer versatilidad y servir como base para diferentes experimentos tanto de diseño de microrrobots en fluido, como

para sistemas de navegación en tres dimensiones o para actuación magnética. Esta plataforma tiene como finalidad proporcionar un sistema que permita el movimiento de microrrobots. Estos robots se colocan dentro de una tubería. Fuera de esta tubería, cerca de sus paredes, hay dos bobinas enfrentadas dispuestas a lo largo de su eje que pueden girar, creando un campo magnético. Este campo magnético es el que impulsa y dirige el movimiento de los microrrobots. Todo el sistema de bobinas se mueve a lo largo de la tubería gracias a un raíl.

4.1. Visión general de la plataforma

La plataforma está compuesta por tres elementos principales: El elemento que rota las bobinas, la tubería por la que se desplaza el microrrobot y el raíl que permite el movimiento del vehículo a lo largo de la tubería (figura 7).

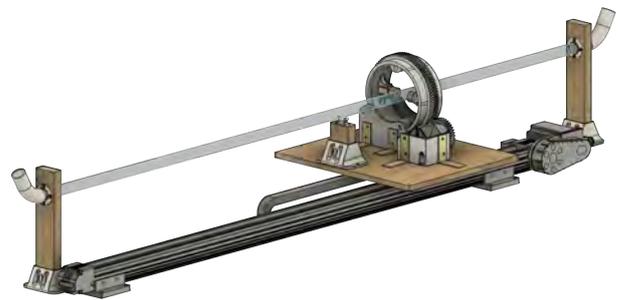


Figura 7: Diseño CAD del sistema completo

El primer elemento es el lugar donde se encuentran las bobinas y su sistema de giro. Está formado por un engranaje grande, donde se encuentran las bobinas, un soporte con rodamientos que permite el giro controlado y un engranaje más pequeño que posibilita la transmisión de la rotación desde el sistema de bobinas. El engranaje de mayor tamaño es un engranaje de espiga de 148,66 mm de diámetro, un módulo de 1,6 mm y 93 dientes. Por otro lado, el motor que proporciona el giro a la pieza de las bobinas es un motor paso a paso NEMA 17 que posee un engranaje pequeño y una carcasa que permite anclarlo a la plataforma. El engranaje de menor tamaño, situado en el eje del motor, es un engranaje en espiga. Tiene 57,42 mm de diámetro, un módulo de 1,6 y 36 dientes.

La tubería es el lugar por el que el microrrobot se introduce. Esta tubería de 1,5 m de largo, 18 mm de diámetro interior y plástico transparente se llena de agua para que los microrrobots se desplacen dentro de ella. Para sostener la tubería se colocan unos soportes de madera que la tubería atraviesa. Estos soportes permiten ajustar la tubería a distintas alturas y permiten que el agua dentro de ellas no se vierta. A una longitud determinada se coloca un anillo de deslizamiento que permite que los cables de las bobinas puedan girar libremente sin enrollarse en la tubería.

Por último, el raíl permite que el sistema de bobinas pueda desplazarse a lo largo de la tubería. Este raíl está formado por una plataforma deslizante y un motor paso a paso del sistema Dobot Magician que se controla mediante Python.

4.2. Fabricación y montaje

La mayoría de las piezas se fabricaron mediante impresión 3D por FDM. Se escogió PETG como el material a utilizar de-

bido a que proporciona una mejor resistencia mecánica, poco desgaste y alta precisión dimensional. Un reducido número de piezas se fabricaron en madera, como son los soportes de la tubería y la base del sistema de actuación. Finalmente las escuadras que se utilizaron para anclar los soportes de las bobinas y el soporte del motor son de acero galvanizado. El sistema final montado se observa en la Figura 8



Figura 8: Montaje final

4.3. Electrónica

Todo el sistema electrónico de control de las bobinas y rotación se realiza a través de un Arduino Uno. El sistema de las dos bobinas se controla con un módulo L298N y el motor paso a paso con un driver A4988. (figura 9). El driver L298N es un controlador de motores que permite encender y controlar dos motores desde Arduino, en nuestro caso con este controlador se modula el voltaje que pasa a cada una de las bobinas de manera independiente. Este driver tiene una entrada de tensión que proporciona el voltaje a las bobinas, dos salidas A y B que se conectan a cada una de las bobinas y controlan la intensidad mediante una señal PWM, y seis pines de entrada que controlan la intensidad, modificando el sentido del campo magnético de la salida A y B respectivamente. El voltaje con el que se alimenta a la placa es de 12 V. El driver A4988 es un controlador de motor paso a paso integrado. Permite controlar el motor paso a paso bipolar. El A4988 se conecta al motor paso a paso y al Arduino. Se utilizaron 1/16 micropasos. Por su parte, el raíl se puede controlar mediante la aplicación DOBOT Studio utilizando los controles preprogramados o a través de Python. En nuestro caso, se utilizó la API propia de Python para controlar el raíl. Para poder observar el microrrobot se colocó una webcam conectada a un ordenador. Esta webcam permitirá realizar el seguimiento del microrrobot, y mediante segmentación

de imagen a través de Python realizar el control de las bobinas y raíl.

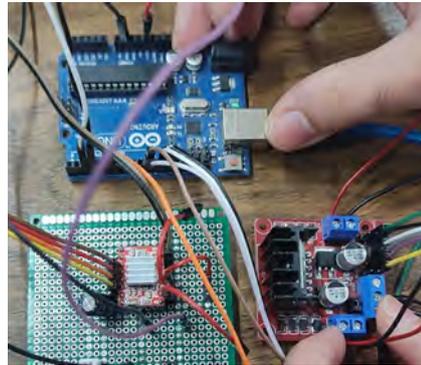


Figura 9: Imagen del cableado de los elementos electrónicos

5. Experimentos

Se realizaron diferentes experimentos con la pareja de bobinas. En el primero, se colocó una piscina con agua entre dos bobinas enfrentadas. Mediante una webcam colocada enfocando al microrrobot se realizó una segmentación de la imagen a través de Python con la que se podía conocer su posición. Utilizando este dato se hizo una realimentación de la posición a las bobinas. De este modo el microrrobot se pudo mantener realizando un movimiento oscilatorio. En la figura 10 se puede observar el setup del experimento, así como el desplazamiento total del microrrobot. El desplazamiento viene dado por la aplicación de un campo magnético alterno entre las dos bobinas. Este campo hace que la cabeza del microrrobot se gire hacia una u otra de las bobinas, dependiendo de cuál genere el campo, haciendo que el flagelo genere un movimiento oscilatorio. Con el movimiento generado por el flagelo se produce un desplazamiento neto del microrrobot.

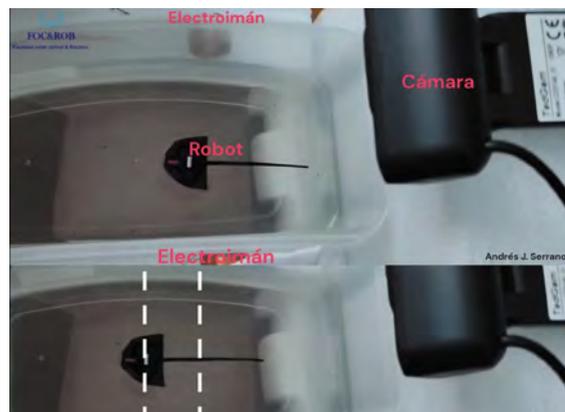


Figura 10: Secuencia de imágenes del experimento realizado con las dos bobinas y la cámara, donde se observa el desplazamiento neto del microrrobot (tiempo total 20 segundos)

Los experimentos realizados con la plataforma de pruebas diseñada y fabricada en la sección anterior, proporcionan un punto de partida en cuanto al desarrollo de microrrobots nadadores magnéticos y su ensayo.

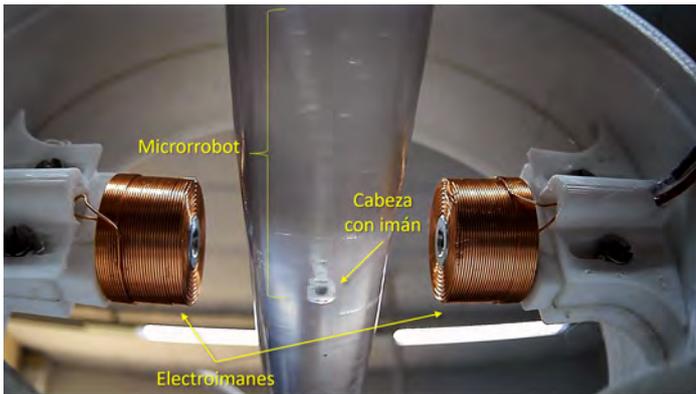


Figura 11: Detalle del sistema de bobinas activas con un microrrobot dentro en movimiento.

En el siguiente experimento se introdujo uno de los microrrobots en el interior de la tubería con agua, concretamente el que posee el imán en la cabeza. Se activaron de manera alterna las bobinas con el microrrobot dentro de la tubería a distintas frecuencias (figura 11). En la figura 12 se observan capturas en una de las frecuencias probadas para hacer mover al microrrobot. En este caso a 2 Hz se observa la forma de la onda del flagelo. Además se observa como se desplaza la cabeza hacia la bobina que en ese momento se está activando. En la figura 13, por el contrario, se puede observar uno de los experimentos realizados a una frecuencia mayor (20 Hz). En este experimento no se observa tan fácilmente la forma de la onda, ya que a mayor frecuencia la forma de la onda es menos acentuada debido a que la cabeza no tiene tanto tiempo para desplazarse de una a la otra bobina. Sí se puede observar cómo se produce un desplazamiento del microrrobot al completo por la tubería. Esto es debido al impulso que genera la cola al moverse generando una onda.

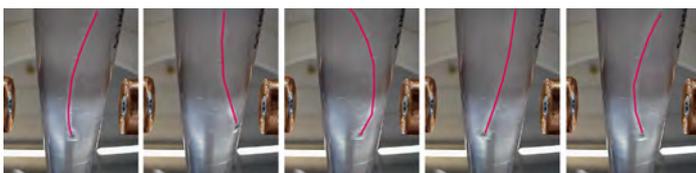


Figura 12: Secuencia de imágenes mostrando el movimiento del microrrobot con una frecuencia de activación de las bobinas de 2 Hz)

6. Conclusiones

En este trabajo se ha logrado fabricar microrrobots capaces de actuar eficazmente bajo campos magnéticos, utilizando inspiración biológica para optimizar su locomoción. Se ha utilizado simulación computacional como herramienta para modelar y evaluar el campo magnético y el movimiento de los microrrobots, lo que nos permite optimizar el diseño del sistema. Además, la plataforma experimental desarrollada nos proporciona un medio versátil para probar diferentes configuraciones de microrrobots, así como para la actuación magnética. A través de los experimentos, se ha podido observar el comportamiento de los microrrobots bajo diversas condiciones.

Para posibles mejoras en el futuro destacan varias. Explorar diferentes materiales y diseños para los microrrobots. Se podrían implementar simulaciones más complejas que incorporen físicas adicionales, como interacciones fluido-estructura y campos magnéticos más variados. Podrían añadirse distintos componentes electrónicos y sensores para mejorar el análisis y la detección de la navegación de los microrrobots. Por último, realizar pruebas en diferentes fluidos, como aceite de silicona permitiría evaluar en mayor medida la eficacia del sistema de actuación.

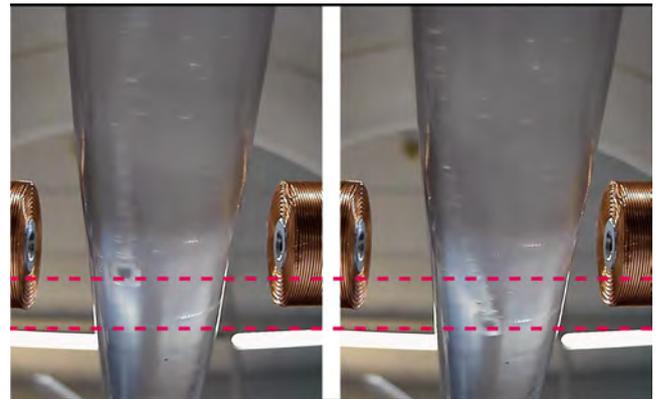


Figura 13: Secuencia de imágenes mostrando el movimiento del microrrobot con una frecuencia de activación de las bobinas de 20 Hz. La línea roja señala el inicio y el final del desplazamiento ($t=1.5$ s)

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por los proyectos PID2022-141409OBC22 y PID2019111278RB-C22, a través de MCI-N/AEI/10.13039/501100011033/FEDER, EU

Referencias

- Celi, N., Gong, D., Cai, J., 2021. Artificial flexible sperm-like nanorobot based on self-assembly and its bidirectional propulsion in precessing magnetic fields. *Scientific Reports* 11 (1), 1–11. DOI: 10.1038/s41598-021-00902-6
- Choi, H., Yi, J., Cho, S. H., Hahn, S. K., 2021. Multifunctional micro/nanomotors as an emerging platform for smart healthcare applications. *Biomaterials* 279 (March), 121201. DOI: 10.1016/j.biomaterials.2021.121201
- Heo, S., Wiguna, T., Park, H. C., Goo, N. S., 2007. Effect of an Artificial Caudal Fin on the Performance of a Biomimetic Fish Robot Propelled by Piezoelectric Actuators. *Journal of Bionic Engineering* 4 (3), 151–158. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1672-6529\(07\)60027-4](https://doi.org/10.1016/S1672-6529(07)60027-4)
- Li, J., Esteban-Fernández de Ávila, B., Gao, W., Zhang, L., Wang, J., mar 2017. Micro/nanorobots for biomedicine: Delivery, surgery, sensing, and detoxification. *Science Robotics* 2 (4), 1–10. DOI: 10.1126/scirobotics.aam6431
- Singh, A. V., Ansari, M. H. D., Mahajan, M., Srivastava, S., Kashyap, S., Dwivedi, P., Pandit, V., Katha, U., 2020. Sperm cell driven microrobots: Emerging opportunities and challenges for biologically inspired robotic design. *Micromachines* 11 (4). DOI: 10.3390/MI11040448
- Wang, T., Kim, D. G., Shi, Y., Hao, Z., Ansari, A., 2021. Bidirectional microscale rocker robots controlled via neutral position offset. *Journal of Micro-Bio Robotics* 17 (2), 103–114. DOI: 10.1007/s12213-022-00149-y
- Yang, J., Zhang, C., Wang, X. D., Wang, W. X., Xi, N., Liu, L. Q., 2019. Development of micro- and nanorobots: A review. *Science China Technological Sciences* 62 (1), 1–20. DOI: 10.1007/s11431-018-9339-8



Simposio de Robótica, Bioingeniería y Visión por Computador 2024



El advenimiento de la robótica a escalas nano y micro

Vinagre, B. M., Tejado, I., Serrano, A., Mancha, E.

Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Extremadura, Avda. de Elvas, s/n, 06006, Badajoz, España.

Resumen

Uno de los empeños de la robótica ha sido imitar a la naturaleza animada, en sus acciones, en sus funciones y en sus capacidades. El descubrimiento de la vida a escala muy pequeña, de los microorganismos o de las llamadas máquinas moleculares, unido a un enfoque cibernético para entender la vida misma, han hecho que, una vez desarrollada la capacidad de miniaturización en dispositivos electrónicos y mecánicos, el campo de la robótica se haya ampliado así como el de sus aplicaciones. En este trabajo se recoge un breve recorrido por los hitos que marcaron el nacimiento de la robótica a escalas nano y micro.

Palabras clave: Sistemas Micro y Nano Mecatrónicos, Tecnología robótica, Robots móviles, Estimación y control en sistemas biológicos, Control de micro y nanosistemas, Modelado cinético y control de sistemas biológicos.

The advent of robotics at nano and micro scales

Abstract

One of the efforts of robotics has been to imitate animated nature, in its actions, its functions and its capabilities. The discovery of life on a very small scale, of microorganisms or the so-called molecular machines, together with a cybernetic approach to understanding life itself, has meant that, once the capacity for miniaturization in electronic and mechanical devices has been developed, the field of robotics has expanded as well as its applications. This work provides a brief overview of the milestones that marked the birth of robotics at nano and micro scales.

Keywords: Micro and Nano Mechatronic Systems, Robotics technology, Mobile robots, Estimation and control in biological systems, Control of micro- and nano-systems, Kinetic modeling and control of biological systems.

1. Introducción

En un artículo que Arturo Rosenbleuth, Norbert Wiener y Julian Bigelow publicaron en 1943, fruto de la colaboración entre la Harvard Medical School y el Massachusetts Institute of Technology, un artículo de lectura muy recomendable para aquellos que se adentran en el mundo del control realimentado y la robótica (Rosenbleuth et al., 1943), los autores hacían una clasificación del comportamiento de los organismos vivos y de las máquinas en la que el nivel más alto lo ocupaba el que caracterizaban como activo, con propósito, teleológico (es decir, con realimentación o autorregulado) y predictivo. Hablando de este último nivel, comentaban que si un ingeniero diseñara un robot para que tuviera un comportamiento similar al de un organismo animal, probablemente lo construiría con partes metálicas, dieléctricos y tubos de vacío, pero que tal vez en el futuro los ingenieros podrían diseñar robots no solo con el comportamiento, sino también con una estructura similar a la de los organismos vivos. Porque, escribían, «el modelo final de un gato es por supuesto otro gato, haya nacido de un tercer gato o sintetizado en un laboratorio». Los robots muy pequeños, como buena parte de

sus hermanos mayores, tratan de imitar la vida; pero una vida a escala tan diminuta que, aunque hace tiempo que supimos de su existencia, solo recientemente hemos podido intentar emularla.

En lo que sigue, se hace un breve repaso de los hitos que han marcado el advenimiento de la micro y la nanorrobótica, desde las primeras especulaciones filosóficas hasta el nacimiento efectivo de dichas disciplinas.

2. Especulaciones filosóficas y descubrimiento del inframundo

2.1. Especulaciones filosóficas

Ya los atomistas del siglo V a.C. trataron de explicar la realidad física apelando solo a lo que hoy podríamos llamar ciencia, y formularon la conjetura de que los elementos que la constituyen «únicas realidades verdaderas, eran diminutos cuerpos sólidos, demasiado pequeños para ser percibidos por los sentidos, que chocan entre sí y se rechazan en un movimiento incesante en un espacio ilimitado» (Guthrie, 1985, cap. III). Estos *átomos* eran iguales en sustancia y sus diferencias en tamaño y forma y sus posiciones relativas servían para explicar

la infinita diversidad de lo que existe obedeciendo al *azar* y la *necesidad*. Por otra parte, desde Aristóteles al menos solemos distinguir entre lo que es *por naturaleza* (natural o *secundum naturam*) y lo que es producido *por la técnica* (artificial o *contra naturam*). Los organismos, que se mueven por sí mismos, pertenecerían a la primera clase, mientras que los mecanismos, que se mueven por otro, pertenecerían a la segunda. A su vez, trescientos años antes del artículo de Rosenbleuth, Descartes en sus *Principios de la filosofía* había hecho una comparación entre máquinas y organismos y, salvando al ser humano gracias a una intervención divina, confesaba no reconocer (Descartes, 2002, IV, 203): «... diferencia alguna entre las máquinas que construyen los artesanos y los cuerpos que la naturaleza por sí misma ha formado; la única diferencia reside en que los efectos de las máquinas sólo dependen de la disposición de ciertos tubos, resortes u otros instrumentos, que, debiendo mantener una cierta proporción con las dimensiones de las manos de las personas que los construyen, son siempre tan grandes que sus figuras y movimientos se pueden ver, mientras que los tubos o resortes que causan los efectos de los cuerpos naturales son por lo general muy pequeños para llegar a ser percibidos por nuestros sentidos». Todo esto parecían ser metáforas, o como mucho hipótesis de una ciencia ingenua.

2.2. Descubrimiento del inframundo

Antoni van Leeuwenhoek, ciudadano de Delft, había abandonado el mundo textil por su pasión de pulir y esmerilar lentes, y durante veinte años pasó muchas horas observando con ellas todo lo que tenía a mano –fibras musculares de ballena, escamas de su propia piel, ojos y pelo de animales, la cabeza de una mosca, semillas, el aguijón de una pulga o las patas de un piojo– maravillándose de la perfección y elegancia de las estructuras que observaba (de Kruif, 2021). En su constante empeño, un día de agosto de 1674 está «mirando por un objeto alargado de unos siete centímetros de longitud. En el centro de ese objeto hay una pequeña cuenta de cristal hecha por él (...). Unida a la parte de atrás del extraño instrumento hay una delgada varilla metálica que sostiene un pequeño tubo de cristal que contiene una gota de agua.» Y mirándola a través de la cuenta de cristal (ver Figura 1) descubre un mundo en la gota de agua del Berckelse Mere, un lago a pocos kilómetros de Delft, y anota (Snyder, 2017, pp. 9–10): «El movimiento de [...] estos animálculos [*sic*] en el agua era tan rápido y tan variado, hacia abajo y en círculo, que he de confesar que no pude por menos que maravillarme de ello».

Unos ciento cincuenta años más tarde, en 1827, también en verano, un botánico escocés llamado Robert Brown observa en su microscopio otra gota de agua. Esta vez contiene polen de hada rosa (*Clarkia pulchella*, ver Figura 2) y Brown quiere saber cómo funciona la polinización, cómo esas pequeñas partículas diseminan el mensaje de la vida; y espera ver una «suspensión de partículas calma y sin movimiento». Pero observa, para su sorpresa, que esas partículas ‘bailan’, y lo hacen sin parar, como si estuvieran ‘vivas’. Su informe sobre las observaciones de ese verano tiene un largo título que termina con las palabras «... sobre la existencia general de moléculas activas en cuerpos orgánicos e inorgánicos», y fue el primer paso para el descubrimiento de que hay un mundo que comparten células, ADN y virus, con moléculas de sustancias inorgánicas

en razón de su tamaño, un *mundo intermedio* cuyos habitantes nunca están quietos (How, 2007).

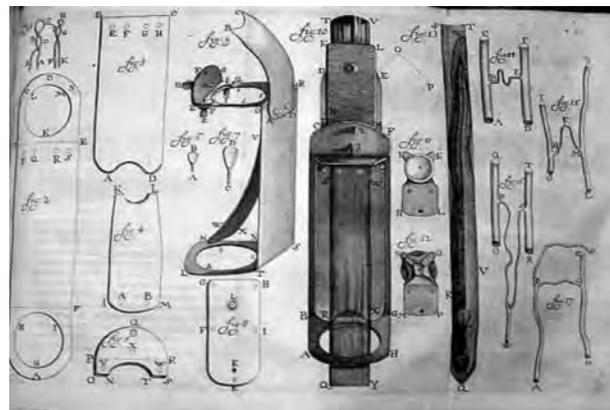


Figura 1: Dibujo de los microscopios de van Leeuwenhoek realizado por Henry Baker, Dominio público, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=4805546>.



Figura 2: Contenido de polen de *Clarkia pulchella* antes de la dehiscencia, dos fotografías superpuestas tomadas con 1 minuto de diferencia. Fuente: (Pearle et al., 2010).

En 1907 el físico irlandés Edmund Edward Fournier d’Albe, que el año anterior había publicado una nueva teoría sobre la electricidad y el magnetismo, publicó *Dos nuevos mundos*. La hipótesis que plantea en la obra es que, «construidos sobre un patrón no muy diferente al nuestro», se hallaban el mundo que tiende a lo infinitesimal y el que tiende a lo infinito (d’Albe, 1907). Al primero lo denomina *inframundo* o mundo de abajo, podríamos decir, y empieza a hablar de él observando otra gota de agua. Escribe: «Hay algo inquietante en el pensamiento de que una gota de rocío pueda contener miles de pequeños animales que comen, y luchan, y aman, y mueren, y cuyo lapso de vida, a juzgar por su intensa actividad, está probablemente lleno de tantos eventos como el nuestro». En los capítulos dedicados a este mundo, D’Albe estudia las fuerzas que lo rigen, cómo son su mecánica, su física y su química, y cómo se relacionan en él materia y vida.

3. Algoritmos y cibernética

La observación y el análisis muchas veces no son suficientes para alumbrar un nuevo campo, y es necesario un enfoque diferente, un cambio de paradigma. En 1859 Charles Darwin vino a sacarnos de la postura ingenua y cómoda que mantenía separados los mundos natural y artificial. Según Daniel Dennett, el esquema conceptual de la teoría de Darwin se podría definir hoy con la palabra *algoritmo*, pues cumple sus características esenciales (Dennett, 1999, pp. 72–73): a) *sustrato de neutralidad*: su poder se debe a su estructura lógica y no a los elementos utilizados para su realización; b) *estupidez subyacente*: por brillante que sea el diseño global, cada paso, así como las transiciones entre estos, es simple; c) *garantía de resultados*: haga lo que haga, siempre lo hace si es correctamente ejecutado. Así, escribe Dennett (Dennett, 1999, p. 301), «La gran visión de Darwin fue que todos los diseños de la biosfera podrían ser los productos de un proceso (...) tan paciente como insensato, una ‘automática’ y gradual ‘elevación’ en el espacio del diseño».

Esta terminología es moderna, y para llegar a ella hemos tenido que pasar, entre otras cumbres, por la *Cibernética* de Norbert Wiener y la *Teoría de la Información* de Claude Shannon. Y por Richard P. Feynman que, en su famosa conferencia de diciembre de 1959 en la American Physical Society en Pasadena (Feynman, 1960), estaba recogiendo una larga tradición — desde el título, *There’s Plenty of Room at the Bottom*, que tiene claras resonancias del *inframundo*, el mundo de ahí abajo (bottom), de Fournier D’Albe —. Sus propuestas estimularon profundamente la investigación de las posibilidades de lo muy pequeño, es cierto, y en su conferencia menciona la ‘idea loca’ de un amigo de sumo interés para nosotros: «Un amigo mío (Albert R. Hibbs) sugiere una posibilidad muy interesante para máquinas relativamente pequeñas. Dice que, aunque sea una idea muy loca, sería interesante en cirugía que te pudieras tragar al cirujano. Pones el cirujano mecánico en los vasos sanguíneos y va hasta el corazón, entra y mira alrededor. (Por supuesto, la información ha de ser transmitida al exterior.) Encuentra qué válvula es la que falla y coge un pequeño bisturí y corta. Otras máquinas pequeñas pueden incorporarse permanentemente al interior del cuerpo para asistir a cualquier órgano que no funcione adecuadamente».

Y así, un siglo después de Darwin, el biólogo y premio Nobel Jacques Monod expone en su obra más popular, titulada precisamente *El azar y la necesidad*, dos ideas muy pertinentes para nuestro asunto: la dificultad de distinguir entre objetos naturales y objetos artificiales, incluso a nivel microscópico, basándonos en criterios simples con los que parece evidente identificar a los últimos, como son la regularidad en la estructura, la repetición de individualidades o su carácter proyectivo, de estar destinados a cumplir una función (Monod, 1971, I); y, al tratar de ese mundo intermedio al que nos referíamos más arriba, no duda en hablar de ‘cibernética microscópica’ al referirse a sus modos de funcionamiento (Monod, 1971, IV).

Con esta mirada, una enzima que se mueve a lo largo de un par de hebras de ADN, revisando, reparando y copiando para después trasladarse a otro nivel y repetir el proceso, es una imagen perfecta de un autómata microscópico y una realización de la máquina de Turing. De igual manera, una secuencia unidimensional de aminoácidos que determina la identidad de una

proteína pero se pliega solo en una de muchas formas posibles, y es esa forma tridimensional la que la hace construir estructuras, combatir antígenos o regular el desarrollo, es una máquina que cumple una función, es un robot origami cuya estructura final, y por tanto su función, depende de las condiciones iniciales y del medio ambiente. Estas maquinatas y algoritmos serían las piezas fundamentales para entender la evolución, la reproducción, la morfogénesis y el metabolismo, focos de atención de la *Vida Artificial*; pero también la percepción, la cognición y la acción, asuntos de los que se ocupa la *Inteligencia Artificial* (Brooks, 2001). Tal vez «Un pequeño fragmento de máquina molecular, impersonal, irreflexiva, robótica, insensata es, en último término, la base de toda la *acción* y, en consecuencia, del significado y, en consecuencia, de la conciencia en el universo» (Dennett, 1999, pp. 326–327).

4. Dinámica en los mundos nano y micro

Para analizar y diseñar la dinámica de los robots a escala macro, incluso si están inmersos en un fluido, suelen ser suficientes las herramientas que nos proporcionó Newton. No es el caso de los robots muy pequeños, y ello es debido a que el balance de fuerzas que determinan su movimiento es diferente: las fuerzas inerciales dejan de ser las más importantes y entran en juego otras como las viscosas, las intermoleculares o las debidas al ruido térmico.

4.1. Nano

Cuando Robert Brown estudiaba el polen de la *Clarkia Pulchella* observó que los granos eyectaban diminutas partículas que se movían de forma agitada. En su honor, el movimiento posteriormente estudiado, que no observado por Brown, se ha llamado *browniano* y su importancia va mucho más allá de la anécdota de su descubrimiento. Aunque la primera teoría dinámica del movimiento browniano era que las partículas estaban vivas, una observación más atenta y sin prejuicios ha dado lugar a teorías y modelos puramente físicos que relacionan el movimiento con el bombardeo molecular o el ruido térmico, eliminando la confusión con los movimientos voluntarios de los organismos. Se puede considerar que los dos fundadores de la teoría del movimiento browniano fueron Albert Einstein y Marian Smoluchowski (ver, e.g., (Nelson, 2011)).

Consideremos el caso simple de una partícula de masa m suspendida en un fluido y estudiemos el movimiento de la misma paralelo al eje x (ver, e.g., (Fitzpatrick, 2021; Nelson, 2011)). La partícula está sometida a dos tipos de fuerzas, unas de carácter impulsivo debidas al bombardeo molecular, y una que se opone al movimiento y que es proporcional a la velocidad de la partícula. Así, la ecuación de movimiento es de tipo estocástico, y la podemos formular como sigue:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = \xi(t) - a \frac{dx}{dt}, \quad (1)$$

donde $\xi(t)$ es la resultante de las fuerzas impulsivas antes mencionadas. Tomando promedios, se puede obtener la expresión

$$m \frac{d}{dt} \left\langle \left(x \frac{dx}{dt} \right) \right\rangle - m \left\langle \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 \right\rangle = \langle x \xi \rangle - \frac{a}{2} \frac{d \langle x^2 \rangle}{dt}. \quad (2)$$

Teniendo en cuenta x y ξ , y y dx/dt son variables aleatorias incorreladas de media 0, resulta

$$m \left\langle \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 \right\rangle = \frac{a}{2} \frac{d \langle x^2 \rangle}{dt}, \quad (3)$$

y, por el *teorema de equipartición*, que relaciona la temperatura de un sistema con su energía media, se sabe que

$$m \left\langle \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 \right\rangle = k_B T, \quad (4)$$

donde T es la temperatura del fluido y k_B la constante de Boltzmann. Sustituyendo e integrando podemos obtener la expresión

$$\langle x^2 \rangle = \frac{2k_B T}{a} t, \quad (5)$$

que nos dice que el bombardeo molecular hace que la partícula ejecute un movimiento de *paseo aleatorio (random walk)* con coeficiente de difusión $D = k_B T/a$. En el caso de una partícula de radio r y de una oposición al movimiento debida a la viscosidad, de acuerdo con la *ley de Stokes*, $a = 6\pi\eta r$, donde η es la viscosidad dinámica del fluido.

Cuando se considera que la partícula se mueve en campo de fuerzas externo, a la dinámica arriba descrita hay que añadirle la acción de éste, generalmente como un término $-V'(x)$ siendo $V(x)$ un potencial periódico con asimetría espacial también llamado *potencial de trinquete*. En la Figura 3 se muestra una ilustración de esta dinámica conocida como *trinquete Feynman-Smoluchowski*. El dispositivo consta de un trinquete (una rueda dentada que gira libremente en un sentido pero no en el contrario debido al gatillo) sumergido en un fluido a temperatura T_2 , conectado por un eje a una rueda de paletas sumergida en un fluido a temperatura T_1 . Las moléculas del fluido constituyen un baño térmico y están sometidas a un movimiento browniano con una energía cinética media que depende de la temperatura. Se supone que el dispositivo es lo suficientemente pequeño como para que el impulso de una única colisión molecular pueda hacer girar las aspas. Aunque tales colisiones tenderían a hacer girar el eje en ambas direcciones con la misma probabilidad, el trinquete sólo le permite girar en una. El movimiento unidireccional del dispositivo se puede utilizar para realizar algún trabajo, como levantar un peso contra la gravedad. Esta es la dinámica considerada en los llamados *motores brownianos* (Hänggi et al., 2005). En muchos casos, dado el tamaño del sistema considerado y las condiciones del entorno, el término inercial desaparece de la ecuación (1) dando lugar a un modelo sobreamortiguado conocido como ecuación de Langevin:

$$a\dot{x}(t) = -V'(x(t)) + \xi(t). \quad (6)$$

Relacionados con estos motores brownianos están las llamadas *máquinas moleculares*, utilizadas por la naturaleza en procesos de transporte intracelular. En particular, el adenosín trifosfato (ATP) funciona en muchos casos como combustible de los *motores moleculares*, capaces de viajar a lo largo de filamentos poliméricos intracelulares. Otros tipos de máquinas son las bombas moleculares, enzimas que utilizan la energía de la catálisis de la ATP para crear o mantener gradientes de concentración a través de las membranas. Para estudiar estas máquinas, y para sintetizar máquinas artificiales que funcionen como

ellas (*nanorobots*), se emplean, en un marco bioquímico, modelos de estado continuos, discretos y estocásticos, como el de la ecuación (6) (Reimann, 2002).

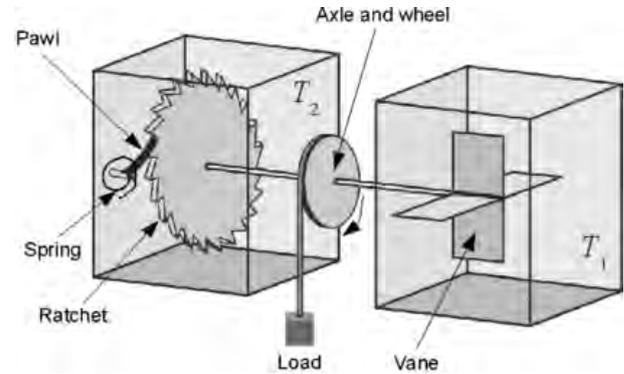


Figura 3: Trinquete de Feynman-Smoluchowski (Fuente: (Reimann, 2002)).

4.2. Micro

Para que un robot sea considerado *micro* su dimensión debe ser inferior al milímetro. Si no es así, simplemente es 'muy pequeño'. La diferenciación no es caprichosa pues, como sus parientes nano, están sometidos a un balance de fuerzas diferente que hace que, podríamos decir, siempre estén en un entorno fluido, sea el fluido líquido o gaseoso. En este entorno y con este tamaño, las fuerzas viscosas dominan sobre las inerciales, y por tanto el número de Reynolds es bajo, típicamente menor que 1: para volar los robots pueden utilizar la viscosidad del aire en lugar del principio de Bernoulli para elevarse; para nadar necesitan ejecutar un movimiento no recíproco, como el de un remo flexible o el de un sacacorchos. Como hemos dicho, los robots, por su tamaño, tienen la necesidad de navegar en un flujo de Stokes o laminar con bajos valores del número de Reynolds, lo que da lugar a una perfecta reversibilidad en el tiempo: no existe la flecha del tiempo. Como afirmó E. M. Purcell «El tiempo, de hecho, no hace ninguna diferencia – sólo la configuración» (Purcell, 1977). Esto hace que los mecanismos de propulsión macroscópicos, que utilizan el movimiento recíproco (como el de un remo rígido) sean ineficaces: debido a la importancia de las fuerzas viscosas, no existe ningún deslizamiento que aproveche las fuerzas de inercia para desplazarse. Luego tenemos que emular algún tipo de potencial de trinquete a lo largo de la marcha e imitar, nuevamente, a la naturaleza y movernos como se mueven las bacterias (ver Figura 4).

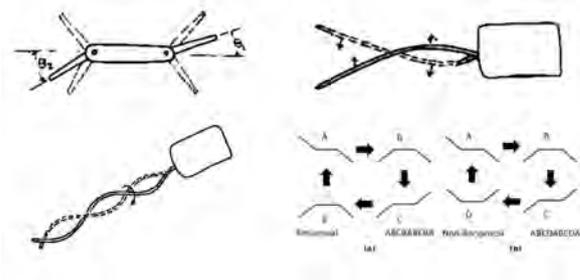


Figura 4: El nadador de Purcell, formas de movimiento (remo flexible y sacacorchos) y esquema de movimiento recíproco/no recíproco. (Fuente: (Purcell, 1977)).

5. Conclusiones

En este trabajo se ha querido repasar brevemente el advenimiento de la robótica a escala nano y micro, desde sus orígenes filosóficos y científicos con la formulación de ideas o el descubrimiento de la existencia de lo muy pequeño hasta las teorías matemáticas para su tratamiento, pasando por el cambio de paradigma que supone pasar de lo orgánico a lo cibernético. Desde luego, otros muchos agentes han contribuido al nacimiento de la robótica diminuta: la llegada de los semiconductores, los circuitos integrados y las técnicas de miniaturización en las últimas décadas del siglo XX. Ahora, recordando a Descartes, ya tenemos artesanos con las manos muy pequeñas y sabemos ponerlos a trabajar con método; ahora ya los ingenieros pueden diseñar robots con una estructura similar a la de los organismos vivos, como anunciaban Rosenbleuth, Wiener y Bigelow. Y así, la disciplina que trata de las máquinas muy pequeñas, artificiales, autónomas, y autorreguladas, de los robots diminutos, desde finales del siglo pasado ha empezado a escribir su historia.

Agradecimientos

Este trabajo se enmarca en el proyecto de referencia PID2022-141409OB-C22, financiado por MCI-N/AEI/10.13039/501100011033/FEDER, EU.

Referencias

- Brooks, R., 2001. The relationship between matter and life. *Nature* 409 (18), 409–411.
- d'Albe, E. E. F., 1907. *Two New Worlds*. Longsman, Green and Co.
- de Kruif, P., 2021. *Cazadores de microbios*. Capitán Swing.
- Dennett, D. C., 1999. *La peligrosa idea de Darwin*. Galaxia Gutenberg - Círculo de Lectores.
- Descartes, R., 2002. *Los principios de la filosofía*. RBA.
- Feynman, R. P., 1960. There's plenty of room at the bottom. *Engineering and Science Caltech Magazine*, 22–36.
- Fitzpatrick, R., 2021. Intermediate College Physics–Kinetic Theory (Brownian Motion). <https://farside.ph.utexas.edu/teaching/355/Surveyhtml/Surveyhtml.html>, [Online; acceso 1-abril-2024].
- Guthrie, W. C. K., 1985. *Los filósofos griegos*. Fondo de Cultura Económica.
- Hänggi, P., Maschesoni, F., Nori, F., 2005. Brownian motors. *Ann. Phys.* 14 (1–3), 51–70.
- How, M., 2007. *Middle World. The restless heart of matter and life*. Macmillan.
- Monod, J., 1971. *El azar y la necesidad*. Barral.
- Nelson, E., 2011. *Dynamic Theories of Brownian Motion*. Princeton University Press.
URL: www.math.princeton.edu/~nelson/books.html
- Pearle, P., Collett, B., Bart, K., Bilderback, D., Newman, D., Samuels, S., 2010. What Brown saw and you can too. *American Journal of Physics* 78 (12), 1278–1289.
- Purcell, E. M., 1977. Life at low Reynolds number. *American Journal of Physics*.
- Reimann, P., 2002. Brownian motors: noisy transport far from equilibrium. *Physics Reports* 361, 57–265.
- Rosenbleuth, A., Wiener, N., Bigelow, J., 1943. Behavior, purpose and teleology. *Philosophy of Science* 10 (1), 18–24.
- Snyder, L., 2017. *El ojo del observador*. Acatilado.



Simposio de Robótica, Bioingeniería y Visión por Computador 2024



RL-based control methodologies for exoskeletons: a summary

Chavarrías, Andrés^{a,*}, Rodríguez-Cianca, David^b, Lanillos, Pablo^a

^aCentro Internacional de Neurociencia Cajal. Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

^bBioRobotics group. Centro de Automática y Robótica (CAR), Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC).

Resumen

La robótica vestible ha emergido en los últimos años como una herramienta de gran utilidad y potencial en las terapias de rehabilitación de pacientes con diferentes afecciones motoras. Asimismo, el auge de la Inteligencia Artificial y en concreto las técnicas de aprendizaje por refuerzo (RL) hacen posible el diseño de algoritmos avanzados capaces de llevar a cabo adaptaciones en tiempo real a las necesidades del usuario, generalmente mediante el reconocimiento de la intención de movimiento. El presente trabajo pretende reunir el estado del arte actual sobre los métodos de control basados en RL aplicados al campo de los exoesqueletos para rehabilitación de la marcha. Para ello se ha realizado una revisión de la literatura, seleccionando y presentando las metodologías más novedosas y prometedoras, así como los problemas encontrados, sensorización excesiva, falta de modelos realistas o gemelos digitales, el desarrollo de modelos de control adaptativo o la dificultad y falta de despliegue de los modelos fuera del entorno de simulación, planteándolos como retos a los que la comunidad y grupos de investigación basados en RL deben enfrentarse en los próximos años.

Palabras clave: Bioingeniería, Exoskeletons, Reinforcement learning, Deep Reinforcement Learning, Control, Rehabilitation, Wearable Robotics.

RL-based control methodologies for exoskeletons: a summary

Abstract

Wearable robotics has emerged in recent years as a instrument of great utility and potential in rehabilitation therapies for patients with different motor conditions. In addition, the rise of Artificial Intelligence and specifically Reinforcement Learning (RL) techniques make possible the design of advanced algorithms capable of carrying out real-time adaptations to the user's needs, generally through the movement intention recognition. This paper aims to unify the current state of the art on RL-based control methods for gait rehabilitation exoskeletons. For this purpose, a literature review has been carried out, selecting and presenting the most novel and promising methodologies, as well as the problems encountered, sensorization, realistic models or digital twins, the development of adaptive control models or the difficulty of the models deployment outside the simulation, proposing them as challenges that the community and research groups based on RL must face in the coming years.

Keywords: Bio-engineering, Exoskeletons, Reinforcement learning, Deep Reinforcement Learning, Control, Rehabilitation, Wearable Robotics.

1. Introduction

Wearable robots (WRs), e.g., exoskeletons, appeared as a very helpful asset for the human therapist in rehabilitation and assistive applications. But these robotic devices are not only thought for the healthcare domain but for the industry preventing physical deterioration and augmenting capacities and even for final consumers to do sports or assist at home in the presen-

ce of mobility disabilities (e.g., elderly population). In essence, WRs are body extensions that can assist, substitute and augment physical capabilities to maintain quality of life in terms of mobility. However, this endeavor still presents several challenges due to the complex triadic physical interaction between the robot, the human body and the environment, which differs from other autonomous robotic solutions. Thus, actuation and

*Autor para correspondencia: andreschavarriasanchez@gmail.com

control should adhere to very particular requirements of safety and compliance with the human body (Bessler et al., 2021). Furthermore, the WR must adapt to different users and different applications and contexts. These particularities have prevented achieving the full potential of WRs in usability and generalization.

The use of Artificial Intelligence (AI) and machine learning in WRs has raised an opportunity for improving their usability in several aspects. For instance, the design of new tools to improve the supervision and quality of therapies, as therapeutic adjuncts to facilitate clinical practice. Its effectiveness has been shown for patients suffering from neurological impairments such as stroke and spinal cord injuries increasing the independence and mobility of patients (Coser et al., 2024; Holzinger et al., 2019). AI state of the art in WRs can be found in several reviews, such as (Kober et al., 2022; Ai et al., 2023; Prakash et al., 2018; Coser et al., 2024). Medical and rehabilitation publications focus separately on the lower and upper limbs. WRs for upper limbs are more feasible due to a constant reference point (shoulder axis). For instance, Ai et al. (2023) surveyed the application of machine learning techniques in robot-assisted upper limb rehabilitation. They analysed movement intention recognition methods (physical and physiological signals) and human-robot interactive control (based on neural networks (NN) and (RL). However, the majority of the research works focused on the lower limbs given their relevance on human gait. Prakash et al. (2018) explored the role of machine learning in gait analysis, identifying Support Vector Machine (SVM) as a prominent classifier based on an analysis of 43 distinct studies. Coser et al. (2024) studies the application of machine learning techniques for rehabilitation robots for lower limbs grouped into four categories according to the AI methodology adopted, RL, NNs, SVMs, and Decision Trees.

Despite these large recent literature, in terms of smooth shared control between the user and the robot, there is a large room for improvement. Nowadays, PID control techniques with open-loop trajectory generation prevail. For instance, the walking trajectory profile is given by the designer, and the movement of the leg is triggered by timing or through muscle activation patterns detection using EMG sensors (Carvalho et al., 2023). More advanced model predictive control techniques are also under research mainly in prosthetic applications (Sartori et al., 2018).

Surprisingly, data-driven learning applied to control methods, such as Deep Reinforcement Learning (DeepRL), which is revolutionizing sophisticated and hard-to-engineer robotics behaviours allowing adaptation in different situations (e.g., drones flight (Kaufmann et al., 2023) and quadruped walking (Hwangbo et al., 2019)), is still in a very early stage in the WR field (Kober et al., 2022).

RL techniques applied in the field of robotics appeared in 1992 with (Sutton and Barto, 1992) but it is in 2010 when the first studies in WRs started to be published, experiencing an exponential growth and doubling the number of publications in 2020, this growth is expected to continue in the coming years (Figure 1). Despite its potential, the reasons for this slowdown in RL technology adoption in the WR field may be the strong safety requirements of an actuated robot attached to a human body, the complexity of the interaction, which needs to be mo-

delled or captured in the training data, and the diversity of body shapes (personalization) and applications (generalization).



Figure 1: Publications per year on WR control based RL with a moving average since 2010. Obtained from Scopus

A generally agreed definition of RL is: a computational approach for learning from the environment interaction focused on goal-directed learning by maximizing an expected future reward function (Sutton and Barto, 1992). Applied to the WR field, the exoskeleton observes the environment (e.g., human-exo interactions, experiment area) and chooses the best action, which generates the desired trajectory, over a pull of potential actions based on the current state of the system and environment observation. This value selection process is governed by a priority guide called policy (originally state-action pair). Solving the RL problem is to find a policy that optimizes the long term sum of rewards (optimal policy) via policy improvement techniques (Figure 2).

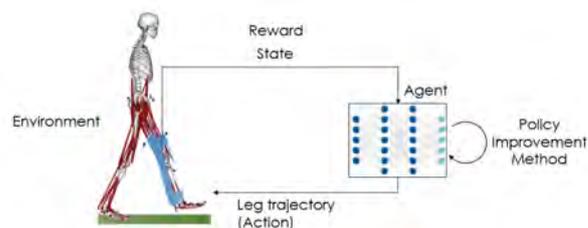


Figure 2: RL selection process scheme in WRs

From the range of applications of RL to robotic devices, such as parameter tuning (Wen et al., 2020; Gao et al., 2020), compliance adaptation (Khan et al., 2019; Bingjing et al., 2019), and control, we are interested in learning methods to control the WR. The robot learns through data to generate and adapt its behaviour according to the task and the user's intention. Hence, this survey focuses on: 1) showcasing current RL or DeepRL methods for WRs applied for rehabilitation, 2) describing the current landscape of approaches, and 3) identifying challenges to unlock the full potential of RL in the WR field.

2. Survey methodology

A comprehensive literature search is performed, updated until May 2024, across Scopus, Web of Science and Google Scholar databases. The following keywords were used to guide our search: *(Reinforcement Learning OR Deep Reinforcement Learning) AND (Exoskeleton OR Wearable Robot OR Rehabilitation)*. Inclusion criteria and PRISMA flowchart of our search (Figure 3) are summarized as follows:

- The publication date of the study should be after 2020, published in reputable journals or international conferences to ensure the validity and reliability of the works considered for inclusion in the analysis.
- The study should focus on the application of a RL or DeepRL method based on improvement policy for rehabilitation exoskeleton control avoid tuning and compliance applications.
- The study should be a practical implementation (simulation or real) of a lower or upper limbs exoskeleton, discarding theoretical approaches of new learning methods.
- The working conditions, hyperparameters and features should be clearly stated for replicating the training process and implementing the proposed approach to consider the study eligible.

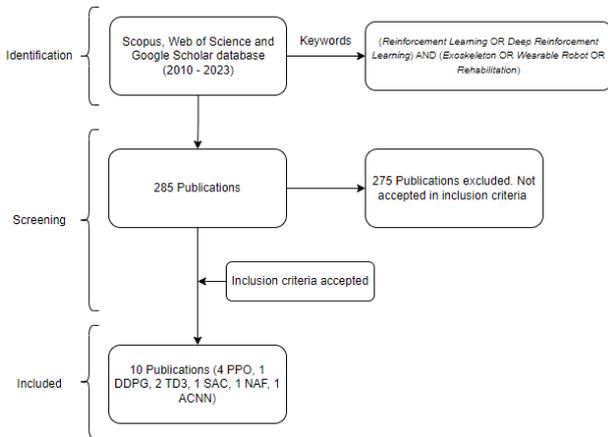


Figura 3: PRISMA flowchart diagram of the search and identification process.

3. Deep RL methods for WRs

To maximize the sum of expected reward of continuous variables within RL, a policy improvement technique is needed. Table 1 presents the most common policies used in the selected papers. This includes Proximal Policy Optimization (PPO) (Luo et al., 2021, 2023; Liu et al., 2021), Distributed Proximal Policy Optimization (DPPO) (Wang et al., 2021), Deep Deterministic Policy Gradient (DDPG) (Rose et al., 2022), Twin Delayed Deep Deterministic Policy Gradient (TD3) (Oghogho et al., 2022; Zheng et al., 2023), Normalized Advantage Function (NAF) (Xu et al., 2020), Soft-Actor-Critic (SAC) (Han et al., 2022) and a modify Actor-Critic Neural Network (ACNN) (Peng et al., 2020).

3.1. Proximal Policy Optimization (PPO)

Proximal Policy Optimization (PPO) is a model-free policy gradient algorithm that samples data through interaction with the environment and optimizes a “surrogate” objective function. It utilizes a trust region constraint to force the control policy update and ensure that the new policy is not too far away from the old policy (Schulman et al., 2017).

Luo et al. (2021) proposes a motion controller reinforcement learning-based for a lower extremity rehabilitation exoskeleton focused on collaborative squatting exercises. The used rehabilitation exoskeleton has ankle actuation on sagittal and front planes and is equipped with multiple foot force sensors. This proposed motion controller estimates Center of Pressure (CoP), an important indicator of system balance, and incorporates it in the state input of the control policy network and the reward function. Dynamics randomization and adversary force perturbations are used during the training to further improve control robustness. This training is realized using a model free control policy network PPO and connected Multi-Layer Perception (MLP) neural network with the agent of RL algorithm. RL algorithm selects according to its policy the desired joint position at each moment and a Proportional Derivative (PD) motor controller obtains smooth motions and actions. To evaluate the effectiveness of the learning controller, results are shown for 3 cases; Case 1, without external perturbation achieving an average joint angle tracking error of 1.22 degrees compared with the target squatting motion, Case 2, simulation of perturbation forces resulting in an average joint angle tracking error of 2.64 degrees and Case 3, human-exoskeleton interactions without muscle contraction, considering the user as a Spinal Cord Injury (SCI) or stroke patient with very limited or no muscle control, obtaining an average joint angle tracking error of 2.49 degrees.

Luo et al. (2023) presents a robust controller for a lower limb rehabilitation exoskeleton, this time for walking assisting in users with different disabilities as quadriplegic, muscle weakness or hemiplegic conditions without any control parameter tuning based on a decoupled offline human-exoskeleton simulation training with three independent networks. These networks are muscle coordination network, motion imitation network and interaction network. The last two have been trained by PPO learning method. The proposed method enables the trained control policy to use only proprioceptive information (joints encoder data) of the exoskeleton regardless of the uncertain human-exoskeleton interaction forces, although there is no physical implementation, they state that this approach allows for easier deployment. Results have been obtained in 200 simulated environments with different dynamics, measuring an RMSE of joint tracking accuracy below 5 degrees and predicted joint torques less than 100 Nm operating at about 9.3 A DC current.

Liu et al. (2021) is developing a so-called cyber-physical walking system (CPWS) for SCI paralyzed patients consists of a functional neuromuscular stimulation system and a powered lower-limb exoskeleton. The model has a total of 12 degrees of freedom (DOF), 6 DOF on each leg, and torso is assumed fixed by the exoskeleton corset brace. Liu et al. (2021) designs two different methods called local and global method for exoskeleton control. Local method is composed by different neural networks separated for each action control task, foot placement controller and stance leg controller, the aim of this method is to facilitate the optimization task as compared to the optimization of a single more complex control system. Global method consists of a unique neural network responsible for controlling both systems. The training algorithm used in this work is PPO because they maintain that it is efficient compared to other on-policy stochastic policy gradient methods and it is straightforward to implement. Torque forces of torso and way-points are

Tabla 1: Selected papers.

Feature	Representative work	Model	Subjects
RL control for squat assistance	Luo et al. (2021)	PPO	Sim
Deep-RL for gait control	Luo et al. (2023)	PPO	Sim
RL control for stabilize walking	Liu et al. (2021)	PPO	Sim
Deep-RL control for gait trajectory plannig	Wang et al. (2021)	DPPO	Sim
Deep-RL for gait control	Rose et al. (2022)	DDPG	Sim
Deep-RL for EMG control exoskeleton	Oghogho et al. (2022)	TD3	Sim
Deep-RL for gait control	Zheng et al. (2023)	TD3	Sim
RL control for mirror therapy	Xu et al. (2020)	NAF	5 Hemiplegic patient
Deep-RL control for ankle exoskeleton	Han et al. (2022)	SAC	Sim
Deep-RL for walking assistance control	Peng et al. (2020)	ACNN	3 Healthy

used as input of reward function. The simulated results (local method) obtained for biped walks at a steady pace in a range of 0.7 to 1.3 m/s are a way-point following precision of 0.3m with a disturbance below to 400 N in torso. These tests were done for human models of different statures from 1.4 to 2.2 m tall without any control parameters changes.

The focus of Wang et al. (2021) is to show the improvement of use DPPO method over conventional DeepRL in continuous space such as Asynchronous Advantage Actors (AC3) to increase the convergence and learning rate during RL training. To demonstrate this approach proposes two dense reward functions based on DeepRL methods for an upper-limb rehabilitation exoskeleton trajectory planning. In this approach the DDPG method is restricted for a long experience replay and proposes and Distribute PPO (DPPO) introducing a penalty term to reduce the impact of unreasonable learning rate by providing a more reasonable update proportion. Each reward function has different objectives, the most interesting, the azimuth reward, provides a global guidance and reasonable constraints in the exploration and aspiration reward capable of accelerating the exploration process and avoid locally optimal solution. Results show that the use of both reward functions are able to accelerate the convergence rate by 38.4 % using DPPO over AC3 method. Also the mean of convergence increases by 9.5 % and the percentage of standard deviation decreases by 21.2 % to 23.3 %.

3.2. Deep Deterministic Policy Gradient (DDPG)

DDPG is an off-policy, model-free, actor-critic DeepRL technique adding on Deep Deterministic Gradient technique a neural network Q function approximators which uses batch learning for stability (Lillicrap et al., 2019). However, this approach has a notably limitation: as with most model-free reinforcement approaches, DDPG requires a large number of training episodes to find solutions.

Rose et al. (2022) presents a new model-free DeepRL method for end-to-end learning of desired gait patterns for over-ground gait rehabilitation with an exoskeleton without requiring a predefined dynamics model. Their approach is the first one using DDPG algorithm to exoskeleton control composed of an actor and critic neural networks. The Exoskeleton used is H2 from Technaid with hip, knee and ankle actuators paired with musculoskeletal model generated in Opensim. In each time step of training the observations are composed by torque and velocity of the exoskeleton actuators, joint angles, velocities and

accelerations of the musculoskeletal (MK) model and the current error for each joint based on the desired joint angles for all three joints of the MK model. Their simulated results during a gait cycle have a Mean absolute error for all joint falls below 0.5 degrees, with a Standar deviation below 0.2 degrees.

3.3. Twin-Delayed DDPG (TD3)

TD3 is an DDPG improvement developed to reduce the growth of convergence errors due to the reward overestimation, improving the stability conditions, and regularizing the action noise (Fujimoto et al., 2018).

Oghogho et al. (2022) proposes a DeepRL method to control the assistance level of an upper-limb exoskeleton in real-time based on the electromyographic (EMG) activity of human muscles. The proposed autonomous assistive device would enhance the force exertion capability of individuals identifying scaling factors for personalized amplification of their effort without lengthy offline training. A TD3 method for rapid learning of the appropriate controller's gain values and delivering personalized assistive torques is employing based on a non-linear reward function defined by the observation of the motion response, the human EMG activity and the angle deviation from the destination point to minimize the muscle effort and maximize the positioning accuracy simultaneously. The proposed DeepRL method is able to identify the appropriate assistive gain for each joint of the exoskeleton in real-time. On simulated experiments with a 4 kg weight handling task, they obtained optimal handling with less than 15 % of the muscle contraction level (EMG activity).

Zheng et al. (2023) proposes an end-to-end controller for a lower-limb exoskeleton for human performance augmentation. It is the only paper using exoskeletons as rehabilitation robots based on DeepRL. Contains two control levels: a high-level control based on DeepRL and a low control level for motion tracking by joint PD controllers. The high control level uses a TD3 agent as learning algorithm which contains one actor network and two twin delayed critic networks that share the same architecture but have separate learnable weight and bias parameters. This controller is responsible for human motion intention recognition tacking into account the exoskeleton state signals, the human-exoskeleton interaction, the joints force signals (generated by deep neural network predictor). The deep neural network predictor deletes complex kinematic calculations required in conventional human motion intention recognition

methods. A passive mode (all joints remain unpowered) is introduced as a performance assessment for comparison purposes and proposed method based on Human-Exo Interactions (HEI) forces. On the simulated results the global ratio of the HEI forces for a gait experiment using the DeepRL controller mode compared to passive mode is low as 0.65.

3.4. Normalized Advantage Function (NAF)

The main idea of NAF consists in the approximation of the Q-function with quadratic functions. NAF representation allows to apply Q-learning with experience replay to continuous tasks, and substantially improves performance on a set of simulated robotic control tasks (Gu et al., 2016).

In Xu et al. (2020) a robotic framework is proposed for hemiparesis rehabilitation based on mirror therapy applied to transfer the patient's healthy limb movements to the impaired limb. The healthy limb joints motions are mimicked by the impaired limb with the assistance of a wearable robot, stimulating and strengthening the injured muscles. The system proposed in this research is a master-slave robotic system and the reinforcement learning algorithm is responsible of the human-robot interaction control improving rehabilitation efficacy and safety. The inputs and sensed information of the environment are joints motion trajectory, muscle activation via EMG and user's emotion via facial expression recognition. The reinforcement learning approach for assisted robot is realized by a model free and continuous domain NAF algorithm. The proposed method has a physical implementation on five, post-stroke, hemiplegic patients obtaining results in position tracking below to 2,86 degrees of mean error and 0.33 rad/s of angular joint velocity mean error.

3.5. Soft-Actor-Critic (SAC)

Is a policy improvement method for data-expensive environments where the agent has to interact with a real-world. In contrast to other optimization methods, SAC modifies the policy objective by augmenting rewards with additional policy entropy (Haarnoja et al., 2018).

(Han et al., 2022) presents a robotic orthosis controller considering physical human-robot interaction via dynamic simulation based on two-stage policy training framework DeepRL. First a policy responsible to generating human healthy gaits based imitation learning, and second, for human models in which the right soleus muscle is weakened due to a certain severity modified from first model. A robotic orthosis is paired to the right ankle of these models. The orthosis policy that assists walking with optimal torque is then trained on these models. For human policy reward the joint angle, angular velocity and muscular activation via EMG are tacking account and for orthosis policy reward are joint angle, angular velocity and joint torque. (Han et al., 2022) has a physical implementation measuring muscle activation during gait, with integrated EMG of the gastrocnemius, and obtaining a reduction of 9.12 % compared to the case without assistance.

3.6. Actor-Critic Neural Network (ACNN)

A Data-Driven Reinforcement Learning (DDRL) control proposed in Peng et al. (2020) as a strategy to gait assistance

for different hemiplegic patients with unpredictable disturbances. The interaction between exoskeleton lower limbs and the legs of a hemiplegic patient are modelled as a slave-master framework. The approach is transforming the walking assistance control problem into an optimal control problem learning by a policy iteration algorithm. To achieve a high level of adaptation control for different patients, an Actor Critic Neural Network (ACNN) technology for the DeepRL algorithm is employed. The inputs of the reward function are the angle and torque for hip and knee exoskeleton joints and the joint angle collected from human via IMU. The experiments were realized on a simulation environment and on AIDER real system.

4. Challenges

While the application of RL and DeepRL for wearable robotics is expected to revolutionise the field in the coming years, a number of scientific and technological challenges are still needed to be addressed:

Sensorization. Control methods based on DeepRL, especially model-free approaches, are data-driven learning methods through information obtained from the user (or musculoskeletal model in simulation) and the WR. This requires the WR to feature multiple sensors, which adds considerable weight and increases the complexity of the system, as well as sensors to the human (usually EMG) that greatly hinders the mobility, adaptation and quality of the therapies performed with real pathological patients (Massardi et al., 2022). Therefore, an important research topic is to derive the minimal number and type of sensors required to apply RL-based control algorithms in WRs. The developed exoskeleton should be able to train with different DeepRL algorithms obtaining an optimal policy only using the data obtained from the device (e.g. joint angle or position, angular velocity, joint torque and pressure sensors).

Advanced control. The reviewed papers focus on the development of control algorithms for specific problems, insufficient for the total of actions or activities that the user must be able to perform to develop an optimal quality of life. Thus, a current challenge is the design of an algorithm including more than one possible motion policy capable to adapt it to more complex tasks and user interactions. Some authors proposed to investigate the implementation of neural networks for high-level control, abstracting the AI problem to a higher level, allowing to choose among several optimal policies depending on the activity performed. However, one of the most important challenges is to provide adaptive force/torque control to the WR. The methods reviewed only address position control.

Digital twins. We identified that the challenges are not only focused on the development of RL algorithms. The design of realistic simulation environments and reliable human and WR digital twins presents notable problems on the human-exoskeleton interactions modeling. Currently, physical interactions and behaviours modeling are mathematical simplifications of the problem. This difficulty is encountered on the literature, finding that most of publications reviewed and presented in this study are focused on model-free (80 %), improving their policy based on raw data without taking into account or developing a realistic simulation environment (digital twin).

Physical deployment and Safety. PPO is the most frequently reinforcement learning method used in the WR field. However, none of these studies (40 % of total) presented a real implementation of the algorithm in a real WR, being limited to demonstrations in simulation. In fact, the implementation rate of RL in real WRs based on our review is only of 20 %. Consequently it is estimated that an enormous difficulty is currently being encountered in the transition from simulated experiments to physical prototypes interacting with real users. Therefore, one of the major challenges the exoskeleton DeepRL community will face in the coming years will be to show the efficacy and performance of simulation-based trained algorithms into real WR prototypes that are able to interact with humans while prioritizing on safety and comfort under all working conditions.

Acknowledgements

AC is funded by the CSIC Ramon y Cajal attraction talent funds under the BRAIN-RL-EXO project. DR and PL are funded by the Ministry of Science, Innovation and Universities.

Referencias

- Ai, Q., Liu, Z., Meng, W., Liu, Q., Xie, S. Q., Dec. 2023. Machine Learning in Robot-Assisted Upper Limb Rehabilitation: A Focused Review. *IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems* 15 (4), 2053–2063. DOI: 10.1109/TCDS.2021.3098350
- Bessler, J., Prange-Lasonder, G. B., Schaake, L., Saenz, J. F., Bidard, C., Fassi, L., Valori, M., Lassen, A. B., Buurke, J. H., Mar. 2021. Safety Assessment of Rehabilitation Robots: A Review Identifying Safety Skills and Current Knowledge Gaps. *Frontiers in Robotics and AI* 8, 602878. DOI: 10.3389/frobt.2021.602878
- Bingjing, G., Jianhai, H., Xiangpan, L., Lin, Y., Mar. 2019. Human–robot interactive control based on reinforcement learning for gait rehabilitation training robot. *International Journal of Advanced Robotic Systems* 16 (2), 172988141983958. DOI: 10.1177/1729881419839584
- Carvalho, C. R., Fernández, J. M., Del-Ama, A. J., Oliveira Barroso, F., Moreno, J. C., 2023. Review of electromyography onset detection methods for real-time control of robotic exoskeletons. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation* 20 (1), 141.
- Coser, O., Tamantini, C., Soda, P., Zollo, L., Feb. 2024. AI-based methodologies for exoskeleton-assisted rehabilitation of the lower limb: a review. *Frontiers in Robotics and AI* 11, 1341580. DOI: 10.3389/frobt.2024.1341580
- Fujimoto, S., van Hoof, H., Meger, D., Oct. 2018. Addressing Function Approximation Error in Actor-Critic Methods. ArXiv:1802.09477 [cs, stat].
- Gao, X., Si, J., Wen, Y., Li, M., Huang, H. H., May 2020. Knowledge-Guided Reinforcement Learning Control for Robotic Lower Limb Prosthesis. In: 2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, Paris, France, pp. 754–760. DOI: 10.1109/ICRA40945.2020.9196749
- Gu, S., Lillicrap, T., Sutskever, I., Levine, S., Mar. 2016. Continuous Deep Q-Learning with Model-based Acceleration. ArXiv:1603.00748 [cs].
- Haarnoja, T., Zhou, A., Abbeel, P., Levine, S., Aug. 2018. Soft Actor-Critic: Off-Policy Maximum Entropy Deep Reinforcement Learning with a Stochastic Actor. ArXiv:1801.01290 [cs, stat].
- Han, J. I., Lee, J.-H., Choi, H. S., Kim, J.-H., Choi, J., 2022. Policy Design for an Ankle-Foot Orthosis Using Simulated Physical Human–Robot Interaction via Deep Reinforcement Learning. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering* 30, 2186–2197. DOI: 10.1109/TNSRE.2022.3196468
- Holzinger, A., Langs, G., Denk, H., Zatloukal, K., Müller, H., Jul. 2019. Causability and explainability of artificial intelligence in medicine. *WIREs Data Mining and Knowledge Discovery* 9 (4), e1312. DOI: 10.1002/widm.1312
- Hwangbo, J., Lee, J., Dosovitskiy, A., Bellicoso, D., Tsounis, V., Koltun, V., Hutter, M., 2019. Learning agile and dynamic motor skills for legged robots. *Science Robotics* 4 (26), eaau5872.
- Kaufmann, E., Bauersfeld, L., Loquercio, A., Müller, M., Koltun, V., Scaramuzza, D., 2023. Champion-level drone racing using deep reinforcement learning. *Nature* 620 (7976), 982–987.
- Khan, S. G., Tufail, M., Shah, S. H., Ullah, I., Dec. 2019. Reinforcement learning based compliance control of a robotic walk assist device. *Advanced Robotics* 33 (24), 1281–1292. DOI: 10.1080/01691864.2019.1690574
- Kober, J., Bagnell, J. A., Peters, J., 2022. Reinforcement Learning in Robotics: A Survey.
- Lillicrap, T. P., Hunt, J. J., Pritzel, A., Heess, N., Erez, T., Tassa, Y., Silver, D., Wierstra, D., Jul. 2019. Continuous control with deep reinforcement learning. ArXiv:1509.02971 [cs, stat].
- Liu, C., Audu, M. L., Triolo, R. J., Quinn, R. D., Aug. 2021. Neural Networks Trained via Reinforcement Learning Stabilize Walking of a Three-Dimensional Biped Model With Exoskeleton Applications. *Frontiers in Robotics and AI* 8, 710999. DOI: 10.3389/frobt.2021.710999
- Luo, S., Androwis, G., Adamovich, S., Nunez, E., Su, H., Zhou, X., Mar. 2023. Robust walking control of a lower limb rehabilitation exoskeleton coupled with a musculoskeletal model via deep reinforcement learning. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation* 20 (1), 34. DOI: 10.1186/s12984-023-01147-2
- Luo, S., Androwis, G., Adamovich, S., Su, H., Nunez, E., Zhou, X., Jul. 2021. Reinforcement Learning and Control of a Lower Extremity Exoskeleton for Squat Assistance. *Frontiers in Robotics and AI* 8, 702845. DOI: 10.3389/frobt.2021.702845
- Massardi, S., Rodriguez-Cianca, D., Pinto-Fernandez, D., Moreno, J. C., Lancini, M., Torricelli, D., 2022. Characterization and evaluation of human–exoskeleton interaction dynamics: a review. *Sensors* 22 (11), 3993.
- Oghogho, M., Sharifi, M., Vukadin, M., Chin, C., Mushahwar, V. K., Tavakoli, M., Apr. 2022. Deep Reinforcement Learning for EMG-based Control of Assistance Level in Upper-limb Exoskeletons. In: 2022 International Symposium on Medical Robotics (ISMR). IEEE, GA, USA, pp. 1–7. DOI: 10.1109/ISMR48347.2022.9807562
- Peng, Z., Luo, R., Huang, R., Hu, J., Shi, K., Cheng, H., Ghosh, B. K., May 2020. Data-Driven Reinforcement Learning for Walking Assistance Control of a Lower Limb Exoskeleton with Hemiplegic Patients. In: 2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, Paris, France, pp. 9065–9071. DOI: 10.1109/ICRA40945.2020.9197229
- Prakash, C., Kumar, R., Mittal, N., Jan. 2018. Recent developments in human gait research: parameters, approaches, applications, machine learning techniques, datasets and challenges. *Artificial Intelligence Review* 49 (1), 1–40. DOI: 10.1007/s10462-016-9514-6
- Rose, L., Bazzocchi, M. C. F., Nejat, G., Jul. 2022. A model-free deep reinforcement learning approach for control of exoskeleton gait patterns. *Robotica* 40 (7), 2189–2214. DOI: 10.1017/S0263574721001600
- Sartori, M., Durandau, G., Došen, S., Farina, D., 2018. Robust simultaneous myoelectric control of multiple degrees of freedom in wrist-hand prostheses by real-time neuromusculoskeletal modeling. *Journal of neural engineering* 15 (6), 066026.
- Schulman, J., Wolski, F., Dhariwal, P., Radford, A., Klimov, O., Aug. 2017. Proximal Policy Optimization Algorithms. ArXiv:1707.06347 [cs].
- Sutton, R. S., Barto, A. G., 1992. Reinforcement learning: an introduction, second edition Edition. Adaptive computation and machine learning series. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts.
- Wang, X., Xie, J., Guo, S., Li, Y., Sun, P., Gan, Z., Dec. 2021. Deep reinforcement learning-based rehabilitation robot trajectory planning with optimized reward functions. *Advances in Mechanical Engineering* 13 (12), 168781402110670. DOI: 10.1177/16878140211067011
- Wen, Y., Si, J., Brandt, A., Gao, X., Huang, H. H., Jun. 2020. Online Reinforcement Learning Control for the Personalization of a Robotic Knee Prosthesis. *IEEE Transactions on Cybernetics* 50 (6), 2346–2356. DOI: 10.1109/TCYB.2019.2890974
- Xu, J., Xu, L., Li, Y., Cheng, G., Shi, J., Liu, J., Chen, S., Oct. 2020. A Multi-Channel Reinforcement Learning Framework for Robotic Mirror Therapy. *IEEE Robotics and Automation Letters* 5 (4), 5385–5392. DOI: 10.1109/LRA.2020.3007408
- Zheng, R., Yu, Z., Liu, H., Chen, J., Zhao, Z., Jia, L., 2023. End-to-End High-Level Control of Lower-Limb Exoskeleton for Human Performance Augmentation Based on Deep Reinforcement Learning. *IEEE Access* 11, 102340–102351. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3317183



Simposio de Robótica, Bioingeniería y Visión por Computador 2024



Sesión: Bioingeniería

Estabilidad de la marcha: estado del arte de las métricas actuales

Torres-Pardo, A.^{a,b*}, Mummolo, C.^c, Rodríguez-Cianca, D.^a, Gómez-García, JA.^a, Moreno, JC.^a, Torricelli, D.^a

^a BioRobotics Group, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), Centro de Automática y Robótica (CAR), Carr. Campo Real, km 0, 200, 28500 Arganda del Rey, Madrid.

^b E.T.S. Ingenieros de Telecomunicación, Universidad Politécnica de Madrid, Av. Complutense, 30, Moncloa - Aravaca, 28040 Madrid, Spain.

^c Departamento de Mecánica, Matemáticas y Gestión, Politecnico di Bari, Via Edoardo Orabona, 4, 70125 Bari, Italia.

To cite this article: Torres-Pardo, A., Mummolo, C., Rodríguez-Cianca, D., Gómez-García, JA., Moreno, JC., Torricelli, D. 2024. Gait stability: State of the art of current metrics. Simposio de Robótica, Bioingeniería y Visión por Computador 2024.

Resumen

La estabilidad de la marcha es un aspecto primordial de la locomoción humana. La falta o deterioro de ésta puede causar inseguridad y caídas, con sus correspondientes consecuencias. Los trastornos del equilibrio, el envejecimiento y ciertas enfermedades, como la enfermedad de Párkinson (EP), deterioran la estabilidad de la marcha de los pacientes. En la clínica, este aspecto de la locomoción es normalmente pasado por alto o evaluado mediante escalas subjetivas, resultando en un diagnóstico y seguimiento pobre. En el presente estudio se ha realizado un análisis de la literatura, el cual resume la metodología existente para cuantificar la estabilidad de la marcha con el objetivo de encontrar una forma de evaluar la estabilidad de la marcha de forma objetiva en el entorno clínico.

Palabras clave: Estabilidad, Equilibrio, Marcha, Locomoción, Estandarización.

Gait stability: State of the art of current metrics

Abstract

Gait stability is a fundamental aspect of human locomotion. Its lack or deterioration can cause insecurity and falls, with their corresponding consequences. Balance disorders, aging, and certain diseases, such as Parkinson's disease (PD), impair patients' gait stability. In the clinical setting, this aspect of locomotion is usually overlooked or assessed using subjective scales, resulting in poor diagnosis and follow-up. In the present study, a literature review has been performed, which summarizes the existing methodology for quantifying gait stability to find a way to objectively assess gait stability in the clinical setting.

Keywords: Stability, Balance, Gait, Locomotion, Standardization.

1. Introducción

Las caídas son un problema de salud generalizado en las personas mayores (Terrier & Reynard, 2015). No solo ponen en peligro a estas personas, sino que también suponen una carga significativa para la sociedad, tanto emocional como económicamente (Lockhart & Liu, 2008). Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), cada año se producen 37,3 millones de caídas que requieren atención médica. De estas, 684 mil resultan en el fallecimiento del paciente.

La marcha es la tarea durante la cual se producen la mayoría de las caídas (Kang & Dingwell, 2009), las cuales suelen ser causadas por una pérdida de equilibrio. Esta pérdida de equilibrio se debe principalmente a la degeneración de las habilidades motoras que aparece en el proceso natural del envejecimiento, o debido a algunas enfermedades, como la enfermedad de Párkinson (EP) (Lockhart & Liu, 2008).

Las personas que sufren trastornos del equilibrio experimentan una disminución de su calidad de vida, lo que les obliga a utilizar dispositivos de ayuda técnica, a ser asistidos por alguien o incluso a permanecer en una silla de ruedas. Este

*Autor para correspondencia: adriana.torres@csic.es

hecho conduce inevitablemente a una vida más sedentaria, con todas sus consecuencias para la salud física y mental.

Sin embargo, no es habitual la evaluación del equilibrio de los pacientes en entornos clínicos. Por lo general, se evalúa solo cuando existe un diagnóstico de trastornos relacionados con el equilibrio, como la EP. En tales casos, la evaluación depende en gran medida de la experiencia de los médicos. Una de las razones por lo que esto ocurre es que aún no existe una forma objetiva y estandarizada de evaluar la estabilidad de la marcha.

Cuantificar la estabilidad de la locomoción puede ayudar a prevenir caídas, objetivar el diagnóstico clínico y mejorar el seguimiento, lo que supone un incremento de la calidad de vida de las personas que sufren problemas de equilibrio y mejora la atención clínica (Lockhart & Liu, 2008). Además, también será útil en el campo de la robótica, especialmente la vestible, donde la estabilidad de los dispositivos sigue siendo un reto.

En este trabajo se presenta una extensa revisión bibliográfica de estudios científicos relacionados con las métricas de estabilidad de la locomoción humana. Como resultado, se presentan las métricas, los protocolos y los sistemas de medición utilizados para evaluar la estabilidad de la marcha. Esta revisión pretende resumir las formas existentes de cuantificar la estabilidad de la marcha, con el objetivo de encontrar cuestiones abiertas que deben estudiarse más a fondo, facilitar la elección de una métrica para evaluar la estabilidad de la marcha en nuevos estudios y encontrar una manera de evaluar clínicamente la estabilidad de la locomoción de forma objetiva.

2. Materiales y métodos

El objetivo de esta revisión era responder a dos preguntas:

- ¿Qué métricas se utilizan para evaluar la estabilidad de la marcha?
- ¿Qué protocolos experimentales y sistemas de medición se utilizan para hacerlo?

Realizamos una búsqueda en la base de datos científica Scopus en diciembre de 2021. Las palabras clave utilizadas para hacerlo fueron las siguientes:

TITLE-ABS-KEY (STATIC OR DYNAMIC* AND STABILITY and HUMAN AND POSTURE OR GAIT OR WALK OR BIPED* AND METRIC* OR INDICAT* OR EVALUAT*) AND TITLE (STABILITY AND NOT POSTUR*)

La búsqueda arrojó 259 documentos. Además, incluimos un estudio de la lista de referencias de uno de estos artículos.

En primer lugar, filtramos los artículos por títulos y resúmenes, excluyendo aquellos no relacionados con la locomoción humana. El resto de los estudios se leyeron íntegramente, excluyendo aquellos que cumplían alguno de los siguientes criterios:

- Artículos que no calculan la estabilidad durante la ejecución de una tarea dinámica.
- Artículos que no calculan la estabilidad de todo el cuerpo.
- Artículos no enfocados a la tarea de caminar, Time-Up and Go (TUG) o correr.
- Artículos que realizan simulaciones en lugar de experimentos reales.
- Artículos no escritos en inglés.

Finalmente, se revisaron 126 (48,5%) artículos y se excluyeron 134 (51,5%).

3. Resultados

La investigación sobre la estabilidad de la marcha humana ha estado activa desde 2010. Aunque se presentarán los resultados de todos los artículos revisados, por razones de limitación de espacio y legibilidad, a partir de esta sección, solo se citarán los artículos publicados en los últimos seis años (2018-2024).

Los objetivos de estos estudios son variados. Algunos artículos investigaron los efectos de la tarea dual o de las diferentes características de la marcha, como la velocidad o la longitud del paso, en la estabilidad de la marcha. Otros se centraron en el envejecimiento o en diferentes enfermedades como la EP (Fino et al., 2018; Mazumder et al., 2019; Robb & Perry, 2020), la esclerosis múltiple (Arpan et al., 2020; Caronni et al., 2020; Müller et al., 2021; Tajali et al., 2019), la parálisis cerebral (Harvey et al., 2021), el ictus (Devetak et al., 2019), la ataxia cerebelosa, la obesidad (Gonzalez et al., 2020), la hipofunción vestibular, la demencia, amputaciones (Rodríguez et al., 2019, 2021), la conmoción cerebral o la lesión medular (Van Dijksseldonk et al., 2018). Otros artículos se centraron en el estudio de la fiabilidad de las métricas de estabilidad durante y entre sesiones.

Todos los estudios considerados en esta revisión se centraron en caminar, excepto tres, que estudiaron la carrera (Hoenig et al., 2019) y la prueba TUG.

3.1. Aspectos metodológicos

Las características de los sujetos involucrados en los estudios revisados son las siguientes:

- El número de sujetos que participaron en estos estudios varió de 2 a 143.
- La mayoría de los estudios incluyeron sujetos de ambos géneros, excepto seis. Tres de ellos incluyeron solo hombres, y los otros tres solo mujeres (Gao et al., 2021; Lehnen et al., 2020).
- La edad de los participantes fluctuó entre 18 y 90 años. Dos estudios se centraron en niños.
- La altura y el peso de los sujetos coincidieron con el promedio asociado con su edad, excepto en 2 estudios, centrados en personas obesas (Gonzalez et al., 2020).
- The control subjects included in the studies involving patients were age-matched healthy individuals.
- Los sujetos control incluidos en los estudios con pacientes fueron individuos sanos pareados en edad.

El protocolo experimental fue similar en todos los estudios, con ligeras diferencias debido a la amplia gama de objetivos. La estructura principal se puede resumir en tres etapas:

Etapas 1. El sujeto es instrumentado con el sistema de medición elegido.

Etapas 2. Se le pide al sujeto que camine varias veces. Dependiendo del objetivo del artículo, estas caminatas se repiten en las diferentes condiciones cubiertas en el estudio.

Etapas 3. Se retira la instrumentación del sujeto y el experimento finaliza.

En cuanto a las métricas, 69 estudios calcularon el Exponente de Lyapunov (LE, , por sus siglas en inglés) (Arpan

et al., 2020; Bannwart et al., 2020; Bizovska et al., 2018; Caronni et al., 2020; Fathizadeh et al., 2018; Fino et al., 2018; Gonzalez et al., 2020; Hamacher, et al., 2018; Hamacher, Schley, et al., 2018; Hill & Nantel, 2019; Hoenig et al., 2019; Kao et al., 2018; Kibushi et al., 2019; Kim et al., 2018; König Ignasiak et al., 2019; Lehen et al., 2020; Loverro et al., 2019; Magnani et al., 2020; Moradi et al., 2020; Müller et al., 2021; Park et al., 2021; Rodrigues et al., 2019; Speedtsberg et al., 2018; Tajali et al., 2019; Walsh et al., 2018; Wu et al., 2019), 29 el margen de estabilidad (MOS, por sus siglas en inglés) (Bannwart et al., 2020; Buurke et al., 2019; Buurke & Den Otter, 2021; De Jong et al., 2020; Epro et al., 2018; Harvey et al., 2021; He et al., 2018; Kao et al., 2018; König Ignasiak et al., 2019; Rodrigues et al., 2021; Van Dijsseldonk et al., 2018), 11 los multiplicadores máximos de Floquet (Moradi et al., 2020), 7 la relación armónica (HR, por sus siglas en inglés), 7 los mapas de Poincaré (Fathizadeh et al., 2018), 7 la raíz cuadrática media (RMS, por sus siglas en inglés) (Speedtsberg et al., 2018), 5 la entropía de la muestra (SEn, por

sus siglas en inglés), 3 la separación máxima entre el centro de masa (COM, por sus siglas en inglés) y el centro de presión (COP, por sus siglas en inglés) (De Jong et al., 2020; Magnani et al., 2020), 3 la velocidad del COM (Gao et al., 2019, 2021), 2 el COP, 2 la medida dinámica de la marcha (DGM, por sus siglas en inglés), 2 la región de estabilidad de la velocidad/aceleración (Gao et al., 2019; Gao et al., 2021), 1 el índice de estabilidad (fuerza estabilizadora/fuerza desestabilizadora), 1 el análisis de fluctuación sin tendencia (DFA, por sus siglas en inglés), 1 el centro de gravedad (COG, por sus siglas en inglés), 1 la relación de estabilidad de la marcha (GSR = cadencia/velocidad), 1 el índice de estabilidad del paso, 1 la fuerza de reacción vertical del suelo (Robb & Perry, 2020), 1 la integral de riesgo de caída (TRI, por sus siglas en inglés), 1 el rango de movimiento del pie, 1 la transformada rápida de Fourier (FFT, por sus siglas en inglés), 1 la variabilidad lineal (Rodrigues et al., 2019), y 2 desarrollaron sus propias métricas (Mazumder et al., 2019). La Figura 1 refleja estas cifras.

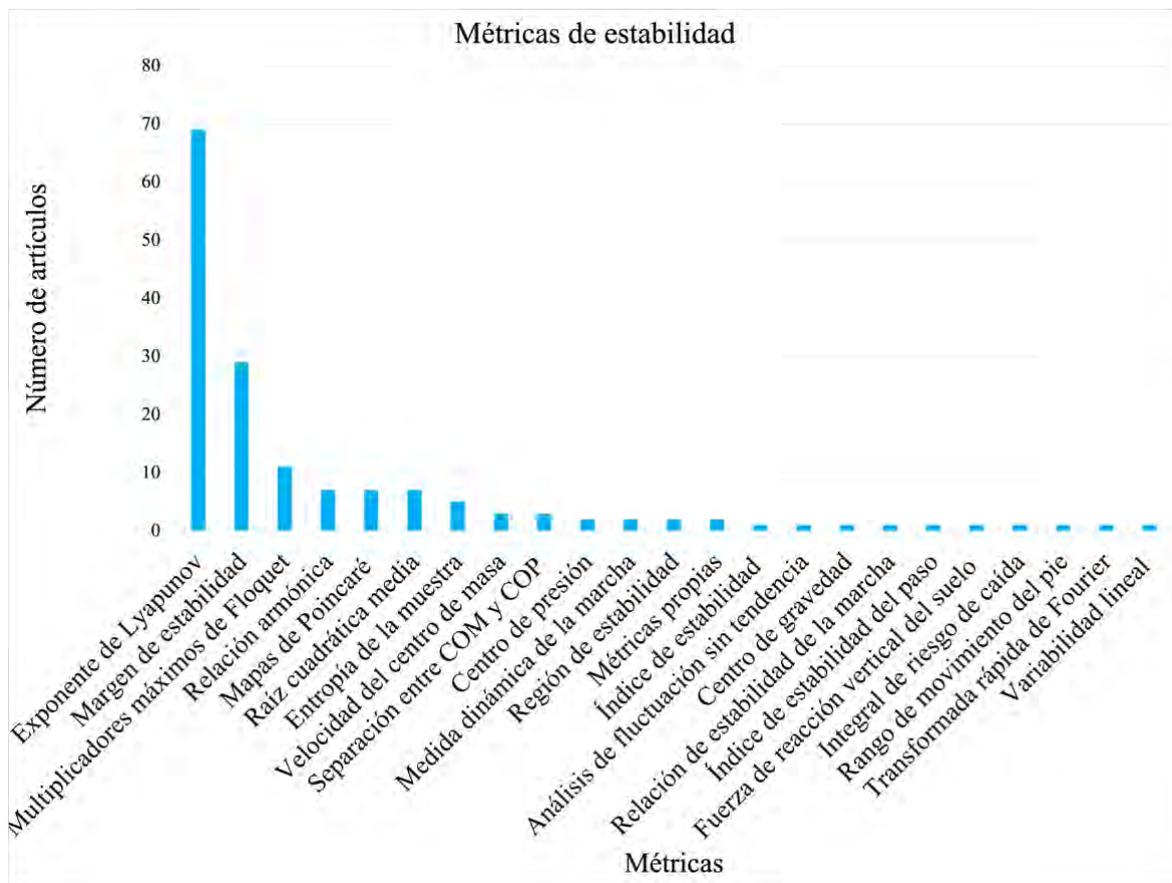


Figura 1. Resumen de las métricas de estabilidad utilizadas en los estudios revisados en el estado del arte.

Los sensores utilizados para la recolección de los datos fueron principalmente sistemas de captura de movimiento, plataformas de fuerza y acelerómetros: 60 estudios utilizaron un sistema de fotogrametría (Bannwart et al., 2020; Epro et al., 2018; Gao et al., 2019, 2021; Gonzalez et al., 2020; Hill & Nantel, 2019; Lehen et al., 2020; Loverro et al., 2019; Magnani et al., 2020; Nakano et al., 2015; Park et al., 2021; Rodrigues et al., 2019, 2021; Tajali et al., 2019; Walsh et al., 2018; Wu et al., 2019), 23 un acelerómetro (Bizovska et al., 2018; Kim et al., 2018; Moradi et al., 2020; Speedtsberg et al.,

2018), 20 un sistema de medición inercial (IMU, por sus siglas en inglés) (Arpan et al., 2020; Caronni et al., 2020; Fino et al., 2018; Hamacher, et al., 2018; Hamacher, Schley, et al., 2018; Hoenig et al., 2019; Müller et al., 2021), 10 un sistema optoelectrónico junto con plataformas de fuerza (De Jong et al., 2020; Gao et al., 2021; He et al., 2018), 2 plataformas de fuerza (Buurke et al., 2019; Buurke & Den Otter, 2021), 2 sensores de presión (Gao et al., 2021), 1 electrogoniómetro, y 1 pantalón textil. Estos números se resumen en la Figura 2.

Los estudios que calcularon una métrica diferente a la LE y utilizaron sistemas optoelectrónicos colocaron los marcadores siguiendo el modelo biomecánico propio del fabricante y utilizaron todos ellos para analizar los datos. Los artículos que calcularon el LE y utilizaron sistemas optoelectrónicos solo utilizaron un marcador para calcular esta métrica. La localización de las IMUs, los acelerómetros y los marcadores en el caso de los estudios que calcularon la LE y utilizaron sistemas optoelectrónicos, fue principalmente en el tronco y la pelvis: 51 estudios los ubicaron en el tronco (Arpan et al., 2020; Bizovska et al., 2018; Caronni et al., 2020; Fino et al., 2018; Gonzalez et al., 2020; Hill & Nantel, 2019; Hoening et al., 2019; Kao et al., 2018; Lehnen et al., 2020; Loverro et al., 2019; Magnani et al., 2020; Moradi et al., 2020; Müller et al., 2021; Rodrigues et al., 2019; Speedtsberg et al., 2018; Tajali et al., 2019; Walsh et al., 2018; Wu et al., 2019), 15 en la pelvis (Arpan et al., 2020; Hoening et al., 2019; Müller et al., 2021; Park et al., 2021), cuatro en la cabeza, nueve en el tobillo (Arpan et al., 2020; Hamacher, Schley, et al., 2018; Hoening et al., 2019; Kim et al., 2018; Müller et al., 2021; Park et al., 2021), uno en la rodilla (Park et al., 2021), siete en otros lugares como el COM o la COG (Bannwart et al., 2020; König Ignasiak et al., 2019) y siete no especificaron la región donde se colocó el sensor (Kibushi et al., 2019).

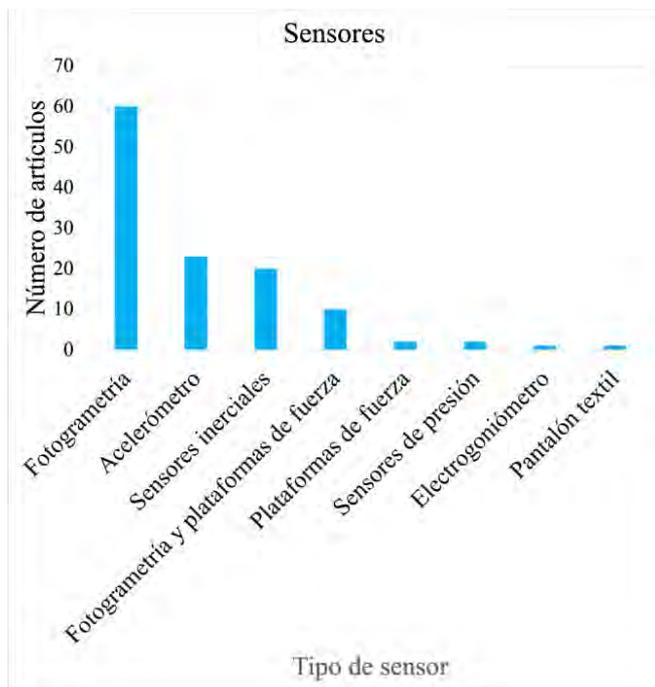


Figura 2. Resumen de los sensores utilizados en los estudios revisados en el estado del arte.

4. Discusión

La presente revisión sistemática recopiló y analizó la metodología aplicada en el estudio de la estabilidad de la marcha. El conocimiento extraído de esta revisión facilitará la elección de una métrica para cuantificar la estabilidad de la marcha en futuros estudios, encontrará las preguntas de investigación abiertas en el campo y ayudará a los médicos a encontrar una manera de evaluar la estabilidad en su consulta.

Aunque todos los artículos examinaron la estabilidad de la marcha, sólo una minoría de ellos proporcionó una definición

adecuada de estabilidad (Hoening et al., 2019). Además, existe una tendencia a utilizar el término estabilidad y equilibrio como sinónimos, por lo que concluimos que aún no se ha determinado una definición clara de estabilidad. Este hecho puede ser el primer problema a la hora de cuantificarla.

A pesar de la aparente existencia de suficientes métricas para evaluar la estabilidad durante la ejecución de tareas como caminar, faltan estudios que validen su efectividad.

De los artículos revisados, solo diez abordaron el tema de la validación (Müller et al., 2021), mientras que los otros 107 estudios se limitaron a utilizar las métricas disponibles, sin validarlas. Cinco artículos desarrollaron nuevas métricas, que necesitarán ser validadas antes de comenzar a usarse (Buurke et al., 2019; Mazumder et al., 2019). La falta de validación de métricas puede ser una de las razones por las que no hay consenso sobre cómo cuantificar la estabilidad de la marcha.

Los parámetros espacio-temporales de la marcha, como la longitud del paso, la anchura del paso, la velocidad de la marcha, la cadencia y la duración del paso, y su variabilidad, han sido la forma convencional de evaluar la estabilidad de la marcha (Hill & Nantel, 2019; Rodrigues et al., 2019; Walsh et al., 2018). Sin embargo, la marcha es un proceso compuesto por varias zancadas, que se ha demostrado que están relacionadas entre sí en el tiempo. Por lo tanto, debemos tener en cuenta el proceso completo en lugar de pequeñas ventanas a la hora de evaluar la estabilidad de la marcha. Los parámetros espaciotemporales asumen que los pasos son independientes y los tratan como unidades individuales, omitiendo las relaciones entre ellos, es decir, perdiendo información sobre la marcha (Toebes et al., 2012). Recientemente, a medida que aumenta la necesidad de cuantificar la estabilidad de la marcha, se han desarrollado otras métricas como el LE, MOS y COM. Sin embargo, también tienen sus inconvenientes. Por ejemplo, el LE depende de las condiciones iniciales (Bask, 1996; Z. Liu, 2010) y puede ser poco fiable si el conjunto de datos es pequeño (Rosenstein et al., 1993). Este último problema se puede resolver fácilmente utilizando una cinta de correr, lo que también es un inconveniente porque los patrones de marcha son alterados sobre este dispositivo (Dingwell & Cusumano, 2000).

Otro punto a destacar es el amplio uso de sistemas de fotogrametría en estos estudios. Esto complica la experimentación, ya que la instrumentación del sujeto es tediosa y las condiciones de la sala, como la luz y la temperatura, deben controlarse para evitar la aparición de reflejos y la caída de marcadores. Teniendo en cuenta el alto costo económico de estos sistemas, las limitaciones de espacio, el tiempo disponible por paciente en las consultas médicas y la relevancia de los trastornos del equilibrio en los pacientes, estos sistemas no son factibles en el entorno clínico. La disponibilidad de sensores inerciales o acelerómetros facilitará la experimentación y extenderá su uso al entorno clínico, mejorando el diagnóstico y seguimiento médico de estos pacientes.

Por último, en cuanto a los protocolos utilizados, están suficientemente estandarizados ya que la mayoría de los estudios siguen los mismos pasos. La existencia de un consenso sobre el protocolo para evaluar la estabilidad de la marcha es una ventaja significativa a la hora de comparar resultados entre diferentes estudios y permite que nuevas investigaciones generen datos comparables. Sin embargo, la

metodología para calcular cada métrica aún difiere dentro de diferentes estudios, lo que obliga a recalcular las métricas para hacer una comparación precisa.

5. Conclusión

Dadas las graves consecuencias de una pérdida de estabilidad, existe un creciente interés en evaluar la estabilidad de la marcha humana. En la presente revisión sistemática se ha explorado la metodología empleada en la literatura para evaluar la capacidad de los seres humanos de mantener el equilibrio durante la marcha humana. Se han resumido los protocolos, sistemas de medición y métricas utilizadas por la comunidad.

Las métricas más utilizadas en la literatura para evaluar la estabilidad de la marcha son el LE y el MOS. Los sistemas de fotogrametría y los acelerómetros son los sensores más comúnmente usados para la grabación de datos.

Esta revisión sistemática revela la falta de una definición adecuada de estabilidad y de un conjunto de métricas capaces de cuantificarla con precisión. Por lo tanto, se debe hacer un esfuerzo para encontrar una definición de estabilidad adecuada y explorar la mejor manera de cuantificarla.

Tener la posibilidad de evaluar la estabilidad humana durante las tareas dinámicas facilitaría la comprensión de cómo funciona la estabilidad humana, aumentaría la precisión del diagnóstico médico y aumentaría la calidad de vida de las personas que sufren una pérdida de equilibrio, facilitando la prevención de caídas y sus consecuencias. Además, también sería relevante en el campo de la robótica, en particular en la robótica vestible, donde la estabilidad de los dispositivos sigue siendo un reto.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado bajo el marco del proyecto NEUROMARK (PID2020-120491RA-I00) financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033.

Este trabajo ha sido realizado bajo el marco del proyecto AI4HealthyAging con referencia MIA.2021.M02.0007 financiada por el "Ministerio de Economía y Transformación Digital" y por la "Unión Europea NextGenerationEU/PRTR".

Referencias

Arpan, I., Fino, P. C., Fling, B. W., & Horak, F. (2020). Local dynamic stability during long-fatiguing walks in people with multiple sclerosis. *Gait & Posture*, 76, 122-127. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2019.10.032>

Bannwart, M., Bayer, S. L., König Ignasiak, N., Bolliger, M., Rauter, G., & Easthope, C. A. (2020). Mediolateral damping of an overhead body weight support system assists stability during treadmill walking. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 17(1), 108. <https://doi.org/10.1186/s12984-020-00735-w>

Bask, M. (1996). Dimensions and Lyapunov exponents from exchange rate series. *Chaos, Solitons & Fractals*, 7(12), 2199-2214.

Bizovska, L., Svoboda, Z., Janura, M., Bisi, M. C., & Vuillerme, N. (2018). Local dynamic stability during gait for predicting falls in elderly people: A one-year prospective study. *PLOS ONE*, 13(5), e0197091. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0197091>

Buurke, T. J. W., & Den Otter, R. (2021). The relationship between the anteroposterior and mediolateral margins of stability in able-bodied human walking. *Gait & Posture*, 90, 80-85. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2021.08.008>

Buurke, T. J. W., Lamoth, C. J. C., Van Der Woude, L. H. V., Hof, A. L., & Den Otter, R. (2019). Bilateral temporal control determines mediolateral margins of stability in symmetric and asymmetric human walking. *Scientific Reports*, 9(1), 12494. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-49033-z>

Caronni, A., Gervasoni, E., Ferrarin, M., Anastasi, D., Brichetto, G., Confalonieri, P., Di Giovanni, R., Prosperini, L., Tacchino, A., Solaro, C., Rovaris, M., Cattaneo, D., & Carpinella, I. (2020). Local Dynamic Stability of Gait in People With Early Multiple Sclerosis and No-to-Mild Neurological Impairment. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 28(6), 1389-1396. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2020.2991636>

De Jong, L. A. F., Van Dijsseldonk, R. B., Keijsers, N. L. W., & Groen, B. E. (2020). Test-retest reliability of stability outcome measures during treadmill walking in patients with balance problems and healthy controls. *Gait & Posture*, 76, 92-97. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2019.10.033>

Devetak, G. F., Bohrer, R. C. D., Rodacki, A. L. F., & Manfira, E. F. (2019). Center of mass in analysis of dynamic stability during gait following stroke: A systematic review. *Gait & Posture*, 72, 154-166. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2019.06.006>

Dingwell, J. B., & Cusumano, J. P. (2000). Nonlinear time series analysis of normal and pathological human walking. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 10(4), 848-863.

Epro, G., McCrum, C., Mierau, A., Leyendecker, M., Brüggemann, G.-P., & Karamanidis, K. (2018). Effects of triceps surae muscle strength and tendon stiffness on the reactive dynamic stability and adaptability of older female adults during perturbed walking. *Journal of Applied Physiology*, 124(6), 1541-1549. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00545.2017>

Fino, P. C., Mancini, M., Curtze, C., Nutt, J. G., & Horak, F. B. (2018). Gait Stability Has Phase-Dependent Dual-Task Costs in Parkinson's Disease. *Frontiers in Neurology*, 9, 373. <https://doi.org/10.3389/fneur.2018.00373>

Gao, X., Shen, F., Wang, L., Ma, Y., Niu, H., & Fan, Y. (2021). Two-dimensional dynamic walking stability of elderly females with a history of falls. *Medical & Biological Engineering & Computing*, 59(7-8), 1575-1583. <https://doi.org/10.1007/s11517-021-02410-1>

Gao, X., Wang, L., Shen, F., Ma, Y., Fan, Y., & Niu, H. (2019). Dynamic walking stability of elderly people with various BMIs. *Gait & Posture*, 68, 168-173. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2018.11.027>

Gonzalez, M., Gates, D. H., & Rosenblatt, N. J. (2020). The impact of obesity on gait stability in older adults. *Journal of Biomechanics*, 100, 109585. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2019.109585>

Hamacher, D., Hamacher, D., Hohnbaum, M., Gerth, K., Schega, L., & Zech, A. (2018). Effects of physical exhaustion on local dynamic stability and automaticity of walking. *Gait & Posture*, 66, 135-138. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2018.08.031>

Hamacher, D., Schley, F., Hollander, K., & Zech, A. (2018). Effects of manipulated auditory information on local dynamic gait stability. *Human Movement Science*, 58, 219-223. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2018.02.010>

Harvey, T. A., Conner, B. C., & Lerner, Z. F. (2021). Does Ankle Exoskeleton Assistance Impair Stability During Walking in Individuals with Cerebral Palsy? *Annals of Biomedical Engineering*, 49(9), 2522-2532. <https://doi.org/10.1007/s10439-021-02822-y>

He, C., Xu, R., Zhao, M., Guo, Y., Jiang, S., He, F., & Ming, D. (2018). Dynamic stability and spatiotemporal parameters during turning in healthy young adults. *BioMedical Engineering OnLine*, 17(1), 127. <https://doi.org/10.1186/s12938-018-0558-5>

Hill, A., & Nantel, J. (2019). The effects of arm swing amplitude and lower-limb asymmetry on gait stability. *PLOS ONE*, 14(12), e0218644. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0218644>

Hoening, T., Hamacher, D., Braumann, K., Zech, A., & Hollander, K. (2019). Analysis of running stability during 5000 m running *. *European Journal of Sport Science*, 19(4), 413-421. <https://doi.org/10.1080/17461391.2018.1519040>

Kang, H. G., & Dingwell, J. B. (2009). Dynamics and stability of muscle activations during walking in healthy young and older adults. *Journal of Biomechanics*, 42(14), 2231-2237. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2009.06.038>

Kao, P.-C., Pierro, M. A., & Booras, K. (2018). Effects of motor fatigue on walking stability and variability during concurrent cognitive challenges. *PLOS ONE*, 13(7), e0201433. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0201433>

Kibushi, B., Moritani, T., & Kouzaki, M. (2019). Local dynamic stability in temporal pattern of intersegmental coordination during various stride time and stride length combinations. *Experimental Brain Research*, 237(1), 257-271. <https://doi.org/10.1007/s00221-018-5422-0>

- Kim, H., Ahn, C. R., Stentz, T. L., & Jebelli, H. (2018). Assessing the effects of slippery steel beam coatings to ironworkers' gait stability. *Applied Ergonomics*, 68, 72-79. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2017.11.003>
- König Ignasiak, N., Ravi, D. K., Orter, S., Hosseini Nasab, S. H., Taylor, W. R., & Singh, N. B. (2019). Does variability of footfall kinematics correlate with dynamic stability of the centre of mass during walking? *PLOS ONE*, 14(5), e0217460. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0217460>
- Lehnen, G. C. S., Rodrigues, F. B., Galvão, J. M. A., Andrade, A. O., & Vieira, M. F. (2020). Effects of triceps surae fatigue and weight training level on gait variability and local stability in young adults. *Medical & Biological Engineering & Computing*, 58(8), 1791-1802. <https://doi.org/10.1007/s11517-020-02196-8>
- Liu, Z. (2010). Chaotic Time Series Analysis. *Mathematical Problems in Engineering*, 2010, 1-31. <https://doi.org/10.1155/2010/720190>
- Lockhart, T. E., & Liu, J. (2008). Differentiating fall-prone and healthy adults using local dynamic stability. *Ergonomics*, 51(12), 1860-1872. <https://doi.org/10.1080/00140130802567079>
- Loverro, K. L., Khuu, A., Kao, P.-C., & Lewis, C. L. (2019). Kinematic variability and local dynamic stability of gait in individuals with hip pain and a history of developmental dysplasia. *Gait & Posture*, 68, 545-554. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2019.01.007>
- Magnani, R. M., Bruijn, S. M., Van Dieën, J. H., & Vieira, M. F. (2020). Head orientation and gait stability in young adults, dancers and older adults. *Gait & Posture*, 80, 68-73. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2020.05.035>
- Mazumder, O., Gavas, R., & Sinha, A. (2019). Mediolateral stability index as a biomarker for Parkinson's disease progression: A graph connectivity based approach. 2019 41st Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 5063-5067. <https://doi.org/10.1109/EMBC.2019.8857224>
- Moradi, V., Sanjari, M. A., Saeedi, H., & Hajiaghaei, B. (2020). Experimental study of prosthesis modifications based on passive dynamic walking model: A limit cycle stability analysis. *Journal of Biomechanics*, 104, 109743. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2020.109743>
- Müller, R., Schreff, L., Koch, L.-E., Oschmann, P., & Hamacher, D. (2021). Measuring Gait Stability in People with Multiple Sclerosis Using Different Sensor Locations and Time Scales. *Sensors*, 21(12), 4001. <https://doi.org/10.3390/s21124001>
- Park, C., Kang, N., Jeon, K., & Park, K. (2021). Quantifying the Dynamic Stability of Gait Patterns in People with Hallux Valgus. *Applied Bionics and Biomechanics*, 2021, 1-7. <https://doi.org/10.1155/2021/5543704>
- Robb, K. A., & Perry, S. D. (2020). Textured Foot Orthotics on Dynamic Stability and Turning Performance in Parkinson's Disease. *Journal of Motor Behavior*, 52(4), 396-403. <https://doi.org/10.1080/00222895.2019.1639609>
- Rodrigues, F. B., Andrade, A. O., & Vieira, M. F. (2019). Effects of inclined surfaces on gait variability and stability in unilateral lower limb amputees. *Medical & Biological Engineering & Computing*, 57(11), 2337-2346. <https://doi.org/10.1007/s11517-019-02042-6>
- Rodrigues, F. B., De Sá E Souza, G. S., De Mendonça Mesquita, E., De Sousa Gomide, R., Baptista, R. R., Pereira, A. A., Andrade, A. O., & Vieira, M. F. (2021). Margins of stability of persons with transtibial or transfemoral amputations walking on sloped surfaces. *Journal of Biomechanics*, 123, 110453. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2021.110453>
- Rosenstein, M. T., Collins, J. J., & De Luca, C. J. (1993). A practical method for calculating largest Lyapunov exponents from small data sets. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 65(1-2), 117-134.
- Speedtsberg, M. B., Christensen, S. B., Stenum, J., Kallemose, T., Bencke, J., Curtis, D. J., & Jensen, B. R. (2018). Local dynamic stability during treadmill walking can detect children with developmental coordination disorder. *Gait & Posture*, 59, 99-103. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2017.09.035>
- Tajali, S., Mehravar, M., Negahban, H., Van Dieën, J. H., Shaterzadeh-Yazdi, M.-J., & Mofateh, R. (2019). Impaired local dynamic stability during treadmill walking predicts future falls in patients with multiple sclerosis: A prospective cohort study. *Clinical Biomechanics*, 67, 197-201. <https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2019.05.013>
- Terrier, P., & Reynard, F. (2015). Effect of age on the variability and stability of gait: A cross-sectional treadmill study in healthy individuals between 20 and 69 years of age. *Gait & Posture*, 41(1), 170-174. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2014.09.024>
- Toebes, M. J. P., Hoozemans, M. J. M., Furrer, R., Dekker, J., & Van Dieën, J. H. (2012). Local dynamic stability and variability of gait are associated with fall history in elderly subjects. *Gait & Posture*, 36(3), 527-531. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2012.05.016>
- Van Dijsseldonk, R. B., De Jong, L. A. F., Groen, B. E., Vos-van Der Hulst, M., Geurts, A. C. H., & Keijsers, N. L. W. (2018). Gait Stability Training in a Virtual Environment Improves Gait and Dynamic Balance Capacity in Incomplete Spinal Cord Injury Patients. *Frontiers in Neurology*, 9, 963. <https://doi.org/10.3389/fneur.2018.00963>
- Walsh, G. S., Low, D. C., & Arkesteijn, M. (2018). Effect of stable and unstable load carriage on walking gait variability, dynamic stability and muscle activity of older adults. *Journal of Biomechanics*, 73, 18-23. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2018.03.018>
- Wu, Y., Liu, A., Dai, K.-R., & Gu, D.-Y. (2019). Local Dynamic Stability of the Locomotion of Lower Extremity Joints and Trunk During Backward Upslope Walking. *Journal of Motor Behavior*, 51(6), 587-599. <https://doi.org/10.1080/00222895.2018.1538096>



Simposio de Robótica, Bioingeniería y Visión por Computador 2024



Estudio de usabilidad de inGAIT-VSO: una órtesis de tobillo con modulación intrínseca de la rigidez para personalización de la asistencia

van Noort, L.^{a,b}, Van Crey, N.^c, Rouse, E.^c, Martínez-Caballero, I.^d, van Asseldonk, E.^b, Bayón, C.^{a,b,*}

^aBioRobotics group, Centro de Automática y Robótica, CAR-CSIC-UPM, Ctra. Campo Real, km 0.200, 28500 Arganda del Rey, Madrid, España.

^bDepartment of Biomechanical Engineering, University of Twente, Enschede, Países Bajos.

^cNeurobionics lab, University of Michigan, Michigan, Estados Unidos de América.

^dHospital Infantil Universitario Niño Jesús, Madrid, España.

Resumen

Las órtesis de tobillo-pie (AFO) son uno de los dispositivos de movilidad más prescritos para niños con parálisis cerebral (PC). Sin embargo, la mayoría de las AFO pediátricas comerciales son pasivas, carecen de ajuste de rigidez y no replican la relación biomimética del tobillo humano. Aunque los exoesqueletos accionados se ofrecen como alternativa, estos presentan problemas de fiabilidad, masa y coste. Además, hay pocas evidencias de la seguridad y viabilidad de estos en la población afectada. Nuestro objetivo aquí es presentar una adaptación pediátrica de un AFO robótico pasivo con personalización de rigidez, así como la validación de su viabilidad con participantes pediátricos. Evaluamos los efectos de los diferentes niveles de rigidez en la cinemática, el rendimiento y la usabilidad de los participantes. Nuestro dispositivo fue fácil de utilizar por nuestros participantes y tiene potencial para servir como herramienta para informar en la toma de decisiones clínicas sobre métricas objetivas de rendimiento.

Palabras clave: Órtesis de tobillo, Usabilidad, Parálisis Cerebral, Rehabilitación.

Usability study of inGAIT-VSO: an ankle-foot orthosis with intrinsic stiffness modulation for assistance personalization

Abstract

Ankle foot orthoses (AFOs) are one of the most prescribed mobility devices for children with cerebral palsy (CP). However, most commercial pediatric AFOs are passive, cannot modulate the stiffness and cannot replicate a biomimetic, nonlinear torque-angle relationship. While actuated exoskeletons appeared as alternatives, they encounter challenges regarding reliability, mass, and cost. Moreover, there is limited evidence of the safety and feasibility of using these in the affected population. Our goal here is to introduce a pediatric version of a passive robotic AFO with variable-stiffness and its feasibility validation with pediatric participants. We assessed the effects of different stiffness levels on participants' kinematics, performance and usability scores. Our device was easy to use and has potential as a tool for aiding clinical decision-making based on objective performance metrics.

Keywords: Ankle-foot orthosis, Usability, Cerebral Palsy, Rehabilitation.

1. Introducción

La parálisis cerebral (PC) es la principal causa de discapacidad física en la infancia, derivando en trastornos como las limitaciones en la marcha (Novak, 2017), (Novak, 2017). Según la Fundación para la Investigación de la Alianza contra la Parálisis Cerebral (CPARF, 2021), 18 millones de personas viven con PC en todo el mundo, con un coste estimado de los cuidados de alrededor de 1 millón de euros por individuo a lo largo de su vida. Esto supone un impacto real en el individuo, y una verdade-

ra carga económica para las familias en particular y la sociedad en general (Tonmukayakul et al., 2018), (Bayón et al., 2023).

La mejora de la capacidad de caminar se considera uno de los objetivos principales para permitir un estilo de vida más activo e independiente en la PC (Armand et al., 2016), (Conner et al., 2022). Junto con otras intervenciones médicas, quirúrgicas y terapéuticas, los dispositivos de asistencia son esenciales en el manejo de la marcha y la movilidad de estos pacientes (Conner et al., 2022), (Rodda and Graham, 2001).

Debido al papel de la articulación del tobillo en la mar-

*Autor para correspondencia: c.bayon@csic.es

cha (Conner et al., 2022) y la mayor disfunción de los músculos distales de las extremidades inferiores en la PC (Wakeling et al., 2007) (Fowler et al., 2010), las órtesis tobillo-pie (AFO) son el tipo de dispositivo de asistencia más utilizado (Conner et al., 2022), (Rodda and Graham, 2001), (Meyns et al., 2020), (Wright and DiBello, 2020). Los avances tecnológicos de las últimas décadas han dado lugar al desarrollo de diseños de órtesis de tobillo-pie para PC (Lora-Millan et al., 2023), que normalmente se prescriben en función de (1) el patrón de marcha patológico y (2) las capacidades funcionales (nivel del Sistema de Clasificación de la Función Motora Gruesa, GMFCS) del niño (Rodda and Graham, 2001), (Bayón et al., 2023).

Normalmente, los sujetos con PC utilizan AFOs de plástico rígido que resultan incómodos de llevar, ya que raramente imitan la dinámica, el ciclo de energía, la impedancia y la rigidez de la articulación de tobillo de niños con desarrollo típico (DT). En su lugar, estos dispositivos se limitan a bloquear el tobillo con el fin de evitar la caída del pie por debilidad dorsal y garantizar que cada zancada comience con un golpe de talón en lugar de con el pie plano. Por lo tanto, estos dispositivos ortésicos son aparatos pasivos que no imitan la forma no lineal de la curva par-ángulo de tobillo durante la fase de apoyo de la marcha (Waters and Mulroy, 1999).

Para que las AFO resulten prácticas en la vida diaria, es importante que sean ligeras y fáciles de usar, al tiempo que siguen proporcionando al usuario la asistencia necesaria en la curva par-ángulo. En este sentido, han surgido algunos avances con los AFOs sin motor, entendidos como aquellos dispositivos que se basan en elementos pasivos para almacenar y liberar energía durante la marcha (Lora-Millan et al., 2023). Las soluciones sin motor tienen la principal ventaja frente a las soluciones con motor de prescindir de actuadores, grandes engranajes o baterías, lo que les permite ser más ligeros y ser mejor adoptados (visual y auditivamente) por la sociedad.

El objetivo general de este estudio es introducir y validar con usuarios un nuevo diseño de AFO de tobillo (*inGAIT-VSO*), que siendo un dispositivo pasivo, presenta una función intrínseca de modulación de la rigidez con el fin de personalizar la asistencia a las necesidades del paciente. En el estudio de usabilidad con este dispositivo se evalúa la aceptación de niños con PC a usar *inGAIT-VSO*, así como los efectos agudos (inmediatos) que la órtesis aporta al ser utilizada por primera vez.

2. Métodos

2.1. Prototipo

El diseño de *inGAIT-VSO* (Figura 1-A) es una versión modificada de la órtesis de rigidez variable desarrollada por Van Crey et al. (Crey et al., 2023), la cual adaptamos para ajustarla a los requisitos del proyecto *inGAIT* (Bayón, 2021), (van Noort, 2024). El elemento pasivo responsable del almacenamiento y la liberación de energía consiste en una transmisión resorte de ballesta-leva diseñada a medida. Cuando el tobillo gira, el perfil de la leva deforma el resorte de ballesta y así realiza el almacenamiento de energía, proporcionando un par de restauración en la articulación del tobillo. Este diseño ofrece una notable ventaja sobre otras alternativas, ya que permite modular la rigidez de la ballesta sin necesidad de sustituir ningún componente.

Además, el efecto de esta rigidez actúa tanto en la fase de balanceo como en la de apoyo, impidiendo la caída del pie y soportando el peso corporal, respectivamente, con un par restaurador que contribuye al empuje del tobillo.

Las fuerzas de reacción con el usuario se transmiten a través de una espinillera y una suela de zapato reforzada con aluminio 7075. La espinillera se sujeta a la pantorrilla del usuario mediante una correa QuickFit (Click Medical, CO, EE.UU.) que rodea la pierna. El dispositivo se adapta a diversas medidas antropométricas del usuario gracias a la disponibilidad de cinco tamaños de fijaciones para el calzado, cada una de las cuales incluye un módulo para la alineación de la altura del tobillo. La gama de usuarios a los que puede adaptarse *inGAIT-VSO* abarca de 1,1 a 1,75 m de altura corporal.

Con dos grados de libertad, *inGAIT-VSO* permite ajustar la amplitud de movimiento del tobillo para la flexión dorsal y plantar (DF, PF) y la inversión-eversión del tobillo (AI, AE) mediante topes mecánicos, cubriendo un máximo de 35 grados DF, 30 grados PF, 15 grados AI y 75 grados AE. Su peso oscila entre 0,5 y 1 kg (incluido el zapato), en función del tamaño de la versión.

El prototipo *inGAIT-VSO* integra un encoder magnético (AS5048b, AMS-OSRAM AG, Premstaetten, Austria) para monitorizar el rango de movimiento del tobillo en el plano sagital, y dos sensores de presión dentro de la plantilla (FlexiForce A502, Tekscan Inc, MA, EE.UU.) para estimar las fuerzas ejercidas por los pies en dos localizaciones (talón y metatarso) y detectar eventos de la marcha. Se desarrolló una interfaz gráfica de usuario en Python para facilitar el registro de datos de los sensores (van Noort, 2024). Todos los componentes electrónicos utilizados funcionan con bajo voltaje (5 V como máximo).

2.1.1. Modelado y caracterización del elemento pasivo:

En la transmisión de *inGAIT-VSO*, el perfil de la leva dicta la relación no lineal par-ángulo en el tobillo. Para permitir un ajuste variable de la rigidez, un deslizador situado detrás del resorte de ballesta puede reposicionarse (manualmente) mediante un tornillo sinfin, que alarga o acorta la longitud efectiva de la palanca (Figura 1-A). El modelado del diseño del resorte junto con el perfil de la leva siguió las directrices descritas en (Shepherd and Rouse, 2017), teniendo en cuenta al mismo tiempo las limitaciones especificadas en el proyecto *inGAIT* (Bayón, 2021). El posterior análisis iterativo por elementos finitos garantizó una resistencia adecuada del conjunto en toda la gama de posiciones del deslizador, evitando que la rigidez de la relación par-ángulo superara la rigidez del conjunto (chasis y fijaciones). En base a esto, la órtesis puede generar con seguridad hasta 35 Nm en el pico de DF del tobillo.

Para caracterizar la transmisión de resorte y leva, las relaciones de par-ángulo se verificaron empíricamente con un dinamómetro rotatorio personalizado Crey et al. (2023). Se examinaron once niveles de rigidez, desde la configuración menos rígida (0 %, deslizador más alejado de la articulación leva/tobillo) hasta la configuración más rígida (100 %, deslizador más cercano a la articulación leva/tobillo), con incrementos de diez por ciento. Para cada condición, el dinamómetro hizo girar la plataforma tanto en DF como en PF a una velocidad angular media de 5 °/s (Figura 1-B).

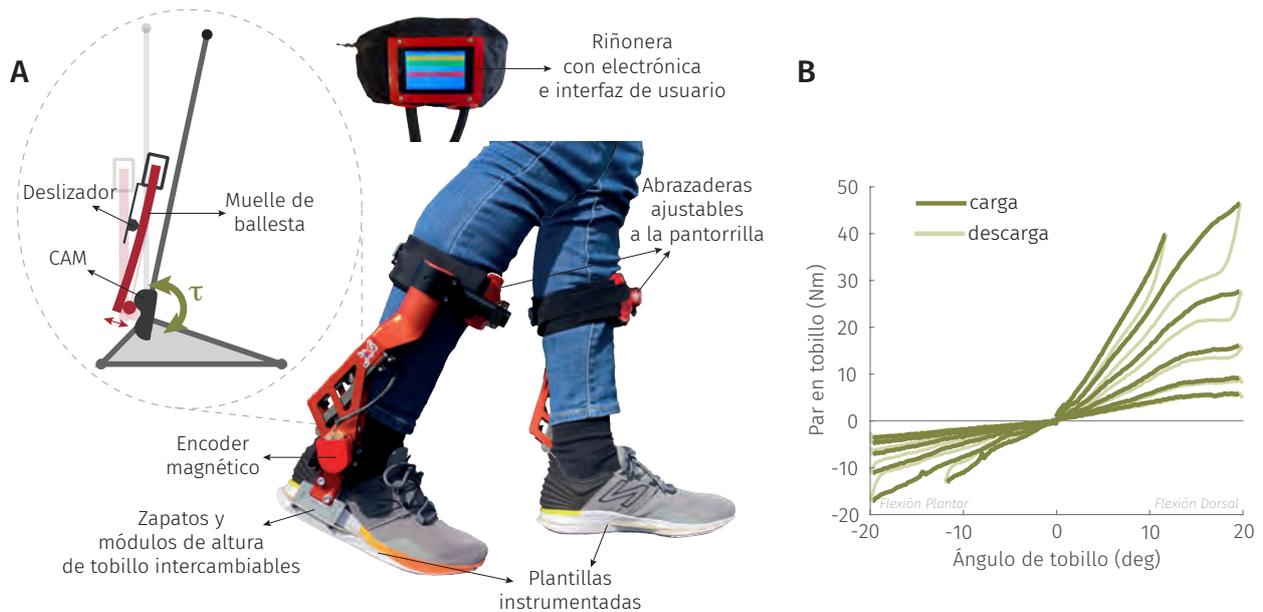


Figura 1: A) Prototipo inGAIT-VSO y principio de funcionamiento. B) Curvas de caracterización de la rigidez.

2.2. Diseño del estudio

2.2.1. Protocolo experimental

Se realizó un estudio experimental descriptivo sin intervención terapéutica *in situ* para evaluar la aceptación y el efecto (agudo) en participantes pediátricos usando el *inGAIT-VSO* sin entrenamiento previo. El Comité Ético Local del Hospital Infantil Universitario Niño Jesús (HNJ) aprobó el estudio (R-0064/23) y garantizó su conformidad con la Declaración de Helsinki. Se informó a todos los participantes y a sus familias, y se obtuvo el consentimiento de los padres antes de la participación.

El estudio de usabilidad constó de dos sesiones, que tuvieron lugar en dos días distintos en el HNJ (Figura 2). En la primera sesión se ayudó a los participantes a colocarse el *inGAIT-VSO* y tuvieron la oportunidad de intentar dar unos pasos con ella para sentir la órtesis e informar de cualquier molestia. Después de esto, se realizó el test de los dos minutos (2mwt) (Pin and Choi, 2018) en cinco condiciones diferentes: llevando inGAIT con (1) rigidez baja (0.2 Nm/kg), (2) rigidez media (0.4 Nm/kg), y (3) rigidez alta (0.6 Nm/kg), (4) llevando su propio AFO no asistivo (si usaban uno), y (5) sin ningún AFO. Los valores del par restaurador con *inGAIT-VSO* se seleccionaron para que fueran coherentes y estuvieran en el rango de la bibliografía Collins et al. (2015); Yandell et al. (2019), correspondiéndose los 12 grados de DF aproximadamente a la DF máxima durante la fase de apoyo en una marcha sana. La posición neutra (torsión cero) se fijó con el pie y la pantorrilla perpendiculares. El orden de estas condiciones fue aleatorio entre los participantes, y después de cada 2mwt los participantes pudieron descansar el tiempo necesario antes de pasar a la siguiente condición. Para cada condición, se midieron la distancia caminada y la frecuencia cardíaca, así como los datos de los sensores de *inGAIT-VSO* (si se llevaba). Además, los participantes informaron del esfuerzo percibido utilizando la escala de Borg (Borg, 1982) y reportaron cualquier dolor o molestia utilizando la escala VAS. Por último, los participantes cumplieron el cuestionario OPUS

en su módulo de “Satisfacción con el dispositivo” (Heinemann et al., 2003) para informar de su experiencia, aceptación y otras sensaciones relacionadas con el uso del *inGAIT-VSO*.

Al final de la primera sesión, se realizó una selección de la rigidez óptima con el *inGAIT-VSO* evaluando tres variables: distancia caminada, índice de coste fisiológico (PCI) (Butler et al., 1984), (Tollerz et al., 2011), y escala de Borg reportada. A cada variable se le asignó una puntuación numérica (1, 2 o 3) basada en el rendimiento, con puntuaciones más altas indicando resultados mayores para la distancia caminada y resultados más bajos para PCI y la escala de Borg. La selección final se determinó aplicando la fórmula $0,1 \cdot D + 0,6 \cdot PCI + 0,3 \cdot B$, donde D , PCI y B representan las puntuaciones de distancia, PCI y escala de Borg, respectivamente.

La segunda sesión del estudio también constó de cuatro fases (Figura 2). Durante la preparación y el calentamiento, se dio a los participantes la oportunidad de realizar algunos pasos con *inGAIT-VSO* configurado con el nivel óptimo de rigidez seleccionado tras la primera sesión.

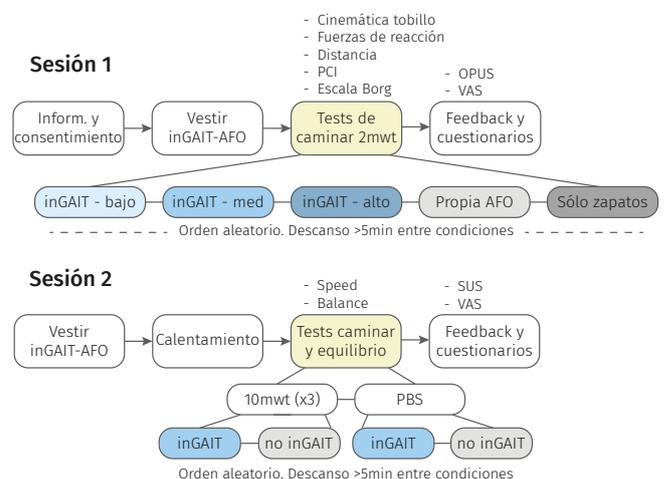


Figura 2: Esquema del protocolo experimental.

A continuación, se les pidió que realizaran la prueba de diez metros (10mwt) (Pirpiris et al., 2003) siguiendo dos condiciones: con el *inGAIT-VSO* en la configuración óptima seleccionada y con su propia AFO no asistiva si utilizaban una, o sin ninguna AFO en caso contrario. El orden de estas condiciones se aleatorizó entre los participantes. Posteriormente, la escala de equilibrio pediátrica (PBS) (Franjoine et al., 2003; ling Chen et al., 2013) fue evaluada con y sin *inGAIT-VSO*, siendo valorada por dos investigadores implicados en el estudio. La media de los resultados reportados por ambos investigadores individualmente se tomó como puntuación final para cada tarea del PBS. Por último, los participantes cumplieron la Encuesta de Usabilidad del Sistema (SUS) (Brooke, 1996).

2.2.2. Participantes

Nueve participantes (3 DT, 6 PC) fueron reclutados en el estudio (edad 9.67 ± 1.63 años, peso 29.44 ± 4.60 kg, altura 1.37 ± 0.06 m) (Tabla 1). Se incluyeron participantes con DT para realizar una prueba piloto con *inGAIT-VSO* antes de probarlo con PC, y para evaluar los efectos del dispositivo en niños sanos. Los DT realizaron el protocolo completo excepto las pruebas PBS en la sesión 2, ya que asumimos que esas tareas eran bastante sencillas para este grupo. Los criterios de inclusión para el reclutamiento de los participantes fueron los siguientes:

- Participantes con PC: (i) Niños con diagnóstico de PC (predominantemente) espástica uni/bilateral; (ii) Edad entre 5 y 17 años; (iii) GMFCS niveles I-III; (iv) Habilidades cognitivas suficientes: capaces de seguir instrucciones simples; (v) Capaces de aguantar caminando por el tiempo requerido en el protocolo; (vi) Presencia de deformidades equinas flexibles en el plano sagital de la articulación del tobillo y/o presencia de pie caído debido a insuficiencia dorsiflexora; (vii) Escala de Ashworth entre 1 y 3.
- Participantes con DT: (i) Edad entre 5-17 años; (ii) Mostrando un DT; (iii) Capaces de aguantar caminando por el tiempo requerido en el protocolo.

Se excluyó de la participación en el estudio a sujetos que cumplieran alguno de los siguientes criterios: (i) Cirugía funcional en huesos y/o tejidos blandos de las piernas en los últimos 6 meses; (ii) Inyección de toxina botulínica A en los miembros inferiores en los últimos 3 meses; (iii) Deformidades musculoesqueléticas o lesiones cutáneas no cicatrizadas en los miembros inferiores que pudieran impedir el uso del dispositivo; (iv) Acortamiento del gastrocnemio (más de 10 grados de contractura PF); (v) Déficit visual que dificultase la capacidad de realizar el protocolo; (vi) Problemas de comportamiento que pudieran impedir la cooperación normal del sujeto; (vii) Comorbilidades que afectaran a la marcha o a las capacidades visuales o cognitivas (por ejemplo, epilepsia frecuente) hasta el punto de incapacitar a los sujetos a participar; (viii) predominio discinético; (ix) otros problemas musculoesqueléticos de las extremidades inferiores no especificados anteriormente.

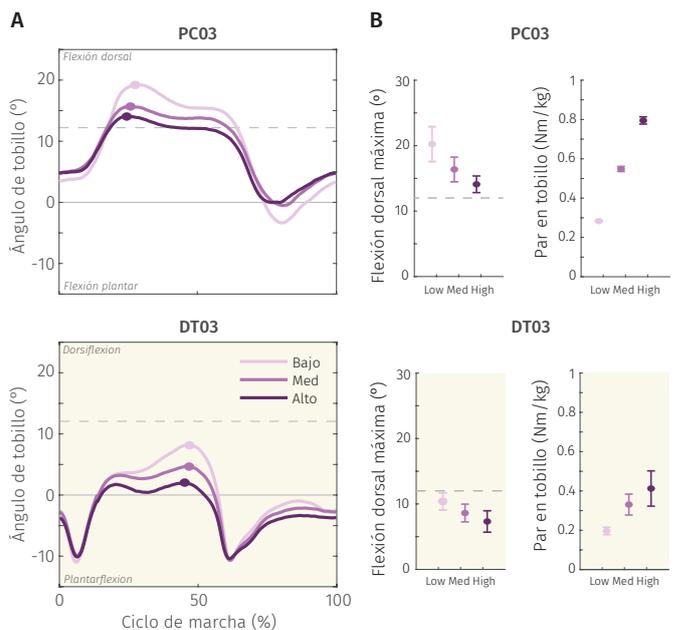


Figura 3: A) Ejemplo de la cinemática del tobillo izquierdo para las tres condiciones de rigidez de *inGAIT-VSO* en un participante con PC (arriba) y un participante con DT (abajo). Los datos corresponden a la media de todos los ciclos de marcha realizados durante el 2mwt. B) Máximos niveles de DF y par restaurador asociados al panel A de la figura.

3. Resultados y discusión

3.1. Efectos agudos de *inGAIT-VSO* en la cinemática del tobillo

Las métricas extraídas de los sensores de *inGAIT-VSO* fueron útiles para obtener resultados objetivos relacionados con los efectos de la rigidez de la órtesis sobre la cinemática del tobillo, la DF máxima y la PF máxima alcanzadas en las condiciones ejecutadas en el test 2mwt. Por ejemplo, la información recogida revela el considerable nivel de “marcha agachada” (mayor DF del tobillo durante todo el ciclo de la marcha) que los participantes con PC muestran con frecuencia en comparación con aquellos con DT (Figura 3-A).

La cinemática del tobillo medida en el plano sagital se vio afectada por los niveles de asistencia proporcionada, tanto en los participantes con PC como con DT (Figura 3-A). De acuerdo con nuestra hipótesis, la rigidez del dispositivo estuvo inversamente relacionada con la DF máxima alcanzada por los participantes durante la fase de apoyo (Figura 3-B). Sin embargo, aunque las condiciones más rígidas condujeron a una reducción de la DF, esta reducción se vio compensada por la cantidad de par restaurador recibido (Figura 3-B). Por lo tanto, al aumentar la rigidez no sólo se corrigió el patrón cinemático del tobillo (menos DF -marcha más erguida- durante la fase de apoyo), sino que los participantes también recibieron la asistencia prevista al utilizar *inGAIT-VSO*. La PF durante la fase de balanceo también se vio afectada, pero en menor medida debido al diseño de la CAM.

3.2. Efectos agudos de *inGAIT-VSO* en el rendimiento del usuario

El uso sin entrenamiento previo de *inGAIT-VSO* no afectó negativamente al rendimiento de la marcha de los participantes

Tabla 1: Descripción de los participantes del estudio.

ID del participante	Edad (años)	Peso (kg)	Altura (m)	Talla zapato (EU)	Patología	Sexo	Propia AFO	Ayuda externa
DT01	12	39	1.51	38	-	Masculino	-	-
DT02	7	24	1.30	32	-	Femenino	-	-
DT03	10	31	1.37	35	-	Femenino	-	-
PC01	8	30	1.32	33	Hemiparesia (izquierda)	Masculino	Sí	-
PC02	11	25	1.34	36	Diplegia espástica	Femenino	Sí	-
PC03	9	25	1.35	32	Diplegia espástica	Femenino	No	-
PC04	11	27	1.37	35	Diplegia espástica	Masculino	Sí	Andador
PC05	11	34	1.41	37	Hemiparesia (derecha)	Masculino	Sí	-
PC06	9	30	1.34	35	Hemiparesia (izquierda)	Masculino	No	-

en comparación con su “condición normal” (es decir, con respecto al uso de su propia AFO o sólo con sus zapatos según el caso). De media, para los 2mwt, los participantes con PC caminaron distancias similares con cualquier nivel de rigidez de *inGAIT-VSO* y con su “condición normal” (Figura 4-A). Incluso para los sujetos con DT, aunque caminaron más distancia con sus propios zapatos, el uso de *inGAIT-VSO* no perturbó demasiado el resultado en comparación con no usar el prototipo (Figura 4-A).

Curiosamente, aunque las distancias medias de marcha en los 2mwt fueron similares entre condiciones, sí que fue relevante la diferencia media de PCI (Figura 4-B). Este contraste fue más acusado para el grupo PC, si comparamos la condición ‘rigidez media’ de *inGAIT-VSO* con la condición en la que utilizaron su propio AFO (Figura 4-B). Sin embargo, parece que estos participantes no percibieron este menor PCI con el *inGAIT-VSO*, ya que en el esfuerzo reportado con Borg muestra un valor inferior (menor esfuerzo) con el uso de su propia AFO (Figura 4-C). En general, los valores de esfuerzo percibido comunicados en las distintas condiciones de la prueba de 2 mwt se situaron entre “muy, muy leve” y “bastante leve” (Borg, 1982), siendo el esfuerzo percibido curiosamente mayor para participantes con DT que para participantes con PC en las mismas condiciones de marcha (Figura 4-C).

Respecto a las pruebas realizadas en la segunda sesión del estudio, no hubo diferencias significativas dentro de los grupos (PC y DT) para la velocidad de marcha con y sin *inGAIT-VSO* evaluada durante los 10mwt, ni tampoco para la prueba PBS realizada por los participantes con PC con y sin *inGAIT-VSO*.

3.3. Nivel de aceptación de los usuarios

En general, los participantes con PC se mostraron satisfechos con su primer uso de *inGAIT-VSO*, ya que sus respuestas a las diferentes características del cuestionario OPUS fueron mayormente positivas (Figura 5). No obstante, el peso del AFO y la comodidad son características que podrían mejorarse en futuros rediseños.

En lo que respecta a la escala SUS, dos participantes con PC puntuaron la facilidad de uso del *inGAIT-VSO* como “excelente”, tres con PC como “buena”, y uno con PC como “pobre” (véase la Tabla 2).

4. Conclusiones

Este estudio presentó el diseño y la valoración de usabilidad de una nueva y ligera AFO de asistencia de tobillo. Nuestro dispositivo fue utilizado sin dificultad por niños con PC de tan

solo 25 kg. Además, el dispositivo aporta información de métricas de la marcha que podría ser relevante para profesionales de la salud a la hora de tomar decisiones clínicas. La valoración de usabilidad por parte de los participantes fue mayoritariamente positiva. El trabajo futuro continuará explorando la eficacia de la asistencia adaptable de *inGAIT-VSO* en más participantes con el fin de conseguir efectos en la marcha a largo plazo.

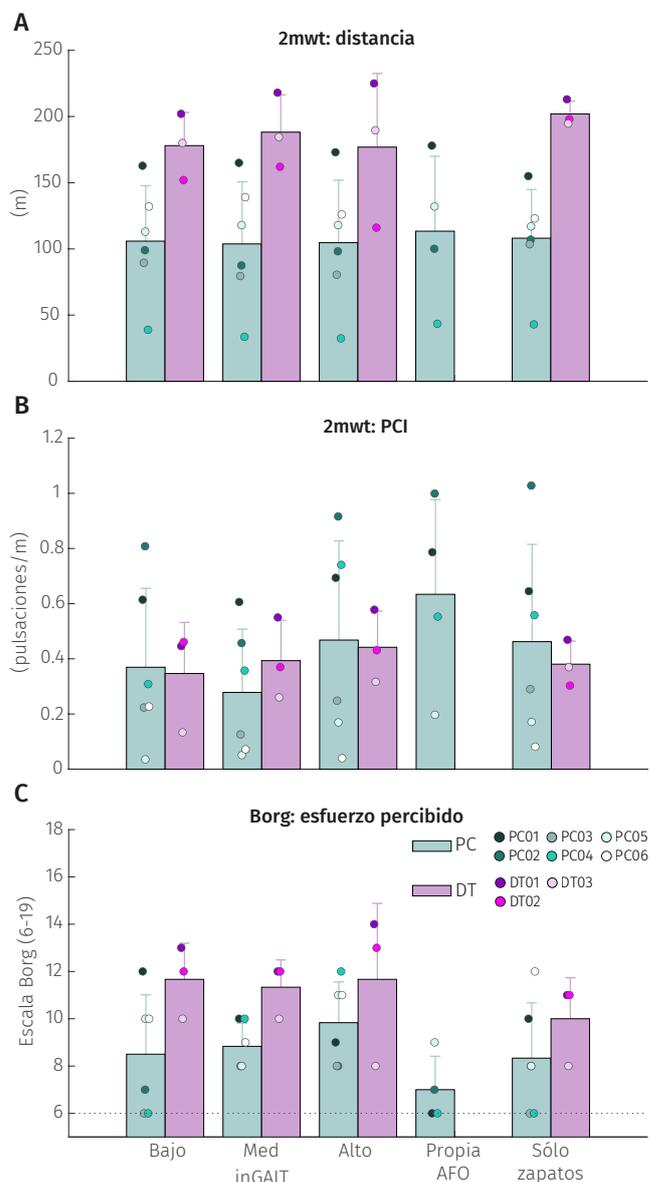


Figura 4: Media de las métricas recogidas durante la sesión 1 para los grupos de PC y DT: A) distancia caminada, B) coste fisiológico, C) esfuerzo percibido.

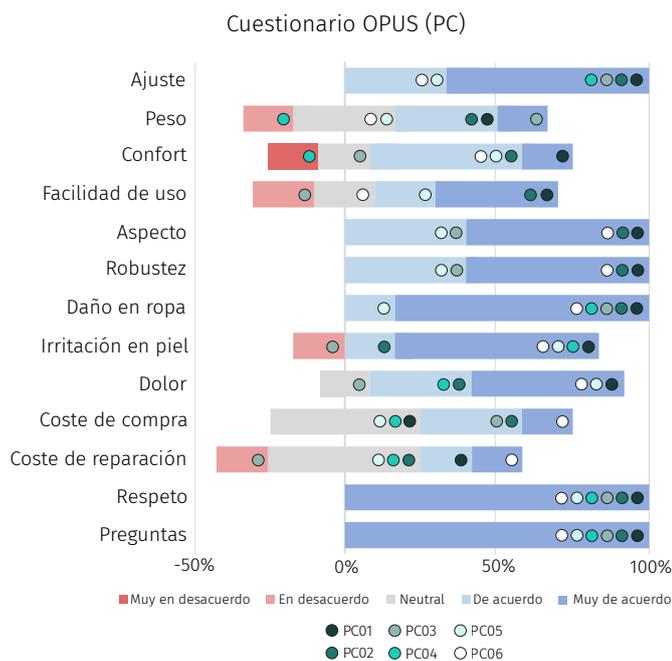


Figura 5: Respuestas de los participantes con PC al cuestionario OPUS.

Tabla 2: Interpretación de las puntuaciones SUS de los participantes con PC

ID del participante	Puntaje SUS	Interpretación
PC01	82.50	Excelente
PC02	69.44	Bueno
PC03	57.14	Bueno
PC04	22.22	Pobre
PC05	78.13	Excelente
PC06	72.50	Bueno

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado con el apoyo financiero del Consejo de Investigación Neerlandés (NWO), bajo la subvención Veni-TTW-2020 con número de referencia 18079.

Referencias

Armand, S., Decoulon, G., Bonnefoy-Mazure, A., 2016. Gait analysis in children with cerebral palsy. *EFORT Open Reviews* 1 (12), 448–460.

Bayón, C., 2021. inGAIT: propelling pediatric gait from clinical settings to home-use. <https://ingait.wordpress.com/>.

Bayón, C., van Hoorn, M., Barrientos, A., Rocon, E., Trost, J. P., van Asseldonk, E. H. F., apr 2023. Perspectives on ankle-foot technology for improving gait performance of children with Cerebral Palsy in daily-life: requirements, needs and wishes. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation* 20 (44).
DOI: 10.1186/s12984-023-01162-3

Borg, G., 1982. Psychophysical bases of perceived exertion. *Med. Science Sports Exerc.* 14 (5), 377–81.

Brooke, J., 6 1996. SUS – a quick and dirty usability scale. Taylor & Francis.
DOI: 10.1201/9781498710411

Butler, P., Engelbrecht, M., Major, R. E., Tait, J. H., Stallard, J., Patrick, J. H., 1984. Physiological Cost Index of Walking for Normal Children and Its Use As an Indicator of Physical Handicap. *Developmental Medicine & Child Neurology* 26 (5), 607–612.
DOI: 10.1111/j.1469-8749.1984.tb04499.x

Collins, S. H., Bruce Wiggin, M., Sawicki, G. S., 2015. Reducing the energy cost of human walking using an unpowered exoskeleton. *Nature* 522 (7555), 212–215.
DOI: 10.1038/nature14288

Conner, B. C., Remec, N. M., Michaels, C. M., Wallace, C. W., Andrišević, E., Lerner, Z. F., 2022. Relationship between ankle function and walking ability for children and young adults with cerebral palsy: A systematic review of deficits and targeted interventions. *Gait and Posture* 91 (October 2021), 165–178.
DOI: 10.1016/j.gaitpost.2021.10.024

CPARF, 2021. Cerebral Palsy Alliance Research Foundation - USA.

Crey, N. V., Cavallin, M., Shepherd, M., Rouse, E. J., 2023. Design of a quasi-passive ankle-foot orthosis with customizable, variable stiffness. *IEEE Computer Society*.

Fowler, E. G., Staudt, L. A., Greenberg, M. B., 2010. Lower-extremity selective voluntary motor control in patients with spastic cerebral palsy: increased distal motor impairment. *Developmental Medicine & Child Neurology* 52, 264–269.
DOI: 10.1111/j.1469-8749.2009.03586.x

Franjoine, M. R., Gunther, J. S., Taylor, M. J., 1 2003. Pediatric balance scale: A modified version of the berg balance scale for the school-age child with mild to moderate motor impairment. *Pediatric Physical Therapy* 15, 114–128.

Heinemann, A. W., Bode, R. K., O'Reilly, C., 12 2003. Development and measurement properties of the orthotics and prosthetics users' survey (opus). *Prosthetics & Orthotics International* 27, 191–206.
DOI: 10.1080/03093640308726682

ling Chen, C., huan Shen, I., yao Chen, C., yi Wu, C., Liu, W.-Y., ying Chung, C., 3 2013. Validity, responsiveness, minimal detectable change, and minimal clinically important change of pediatric balance scale in children with cerebral palsy. *Research in Developmental Disabilities* 34, 916–922.

Lora-Millan, J. S., Nabipour, M., van Asseldonk, E., Bayón, C., jul 2023. Advances on mechanical designs for assistive ankle-foot orthoses. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology* 11.
DOI: 10.3389/fbioe.2023.1188685

Meyns, P., Kerkum, Y. L., Brehm, M. A., Becher, J. G., Buizer, A. I., Harlaar, J., 2020. Ankle foot orthoses in cerebral palsy: Effects of ankle stiffness on trunk kinematics, gait stability and energy cost of walking. *European Journal of Paediatric Neurology* 26, 68–74.
DOI: 10.1016/j.ejpn.2020.02.009

Novak, e. a., sep 2017. Early, accurate diagnosis and early intervention in cerebral palsy: Advances in diagnosis and treatment. *JAMA Pediatrics* 171 (9), 897–907.

Pin, T. W., Choi, H. L., 5 2018. Reliability, validity, and norms of the 2-min walk test in children with and without neuromuscular disorders aged 6–12. *Disability and Rehabilitation* 40, 1266–1272.
DOI: 10.1080/09638288.2017.1294208

Pirpiris, M., Wilkinson, A. J., Rodda, J., Nguyen, T. C., Baker, R. J., Nattrass, G. R., Graham, H. K., jan 2003. Walking speed in children and young adults with neuromuscular disease: comparison between two assessment methods. *Journal of pediatric orthopedics* 23 (3), 302–7.

Rodda, J., Graham, H. K., 2001. Classification of gait patterns in spastic hemiplegia and spastic diplegia: A basis for a management algorithm. *European Journal of Neurology* 8, 98–108.

Shepherd, M. K., Rouse, E. J., 2017. The VSPA foot: A quasi-passive ankle-foot prosthesis with continuously variable stiffness. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering* 25 (12), 2375–2386.
DOI: 10.1109/TNSRE.2017.2750113

Tollerz, L. U. B., Olsson, R. M., Forslund, A. H., Norrlin, S. E., 12 2011. Reliability of energy cost calculations in children with cerebral palsy, cystic fibrosis and healthy controls. *Acta Paediatrica* 100, 1616–1620.
DOI: 10.1111/j.1651-2227.2011.02396.x

Tonmukayakul, U., Shih, S. T., Bourke-Taylor, H., Imms, C., Reddihough, D., Cox, L., Carter, R., 2018. Systematic review of the economic impact of cerebral palsy. *Research in Developmental Disabilities* 80 (June), 93–101.
DOI: 10.1016/j.ridd.2018.06.012

van Noort, L., 2024. Sensor framework for pediatric cerebral palsy ankle foot orthosis: Development and technical validation.

Wakeling, J., Delaney, R., Dudkiewicz, I., apr 2007. A method for quantifying dynamic muscle dysfunction in children and young adults with cerebral palsy. *gait & posture* 25 (4), 580–589.

Waters, R. L., Mulroy, S., 1999. The energy expenditure of normal and pathologic gait. *Gait & Posture* 9, 207–231.

Wright, E., DiBello, S. A., 2020. Principles of Ankle-Foot Orthosis Prescription in Ambulatory Bilateral Cerebral Palsy. *Physical Medicine and Rehabilitation Clinics of North America* 31 (1), 69–89.
DOI: 10.1016/j.pmr.2019.09.007

Yandell, M. B., Tacca, J. R., Zelik, K. E., 2019. Design of a Low Profile, Unpowered Ankle Exoskeleton That Fits Under Clothes: Overcoming Practical Barriers to Widespread Societal Adoption. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering* 27 (4), 712–723.



Simposio de Robótica, Bioingeniería y Visión por Computador 2024



Control de un exosuit de asistencia a la marcha basado en sinergias cinemáticas mediante FIS IA

Jayakumar, A.^{a,*}, Bermejo-García, J.¹, Romero-Sánchez, F.¹, Agujetas Ortiz, R.¹, Alonso-Sánchez, F.J.¹

^aDepartamento de Ingeniería Mecánica, Energética y de los Materiales, Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Extremadura, Avda. de Elvas S/N, 06006 Badajoz, Spain

Resumen

Según el estudio más reciente de la Organización de las Naciones Unidas publicado en 2019, la población de mayores de 65 años de edad era de 9 %, una cifra que puede alcanzar el 16 % en el año 2050. El envejecimiento causa problemas de movilidad: los músculos pierden fuerza, las articulaciones se estresan y el cuerpo en general se vuelve más lento que antes. Este trabajo aborda el diseño de un controlador para un exoesqueleto vestible o exosuit, con la intención de ayudar a la marcha del usuario. Los problemas que se abordan son la implementación de sinergias cinemáticas en un exosuit con motores y cables, detección de la marcha, y optimización del esquema total de control. La detección de fase de la marcha es por una IA basado en logica borrosa, que impulsa el motor por corriente (par) con un controlador PI.

Palabras clave: Tecnología asistencial e ingeniería de rehabilitación, Modelización de sistemas hombre-máquina, Sistemas mecatrónicos, Logica borrosa, Sistemas multisensor, Sensores y actuadores

Control of a Kinematic Synergy-Based Gait Assistance Exosuit Using FIS AI

Abstract

According to the most recent report by the United Nations dated 2019, the world population above the age of 65 years was 9 %, a number that was projected to hit 16 % by the year 2050. Ageing tends to give rise to problems in mobility as muscles become weaker, joints become stressed, and the body itself slows down overall. This work describes the design of a controller for a soft exoskeleton otherwise known as an exosuit, with the aim of aiding the mobility of the wearer. The challenges detailed here are the implementation of kinematic synergies in an exosuit driven by motors and cables, detection of gait phases as well as optimizing the total control scheme. The detection is done using a fuzzy inference system, which drives the motor using a PI current (torque) controller.

Keywords: Assistive technology and rehabilitation engineering, Modelling human-machine systems, Mechatronic systems, Fuzzy Logic, Multi-sensor systems, Sensors and actuators

1. Introducción

Aunque los exoesqueletos existen desde hace bastante tiempo Yagin (1890); Kelley (1919); Mosher (1968); Vukobratovic et al. (1974), los exoesqueletos blandos, también conocidos como trajes de asistencia externa o simplemente “exosuits”, son un desarrollo relativamente reciente y pueden ser una opción especialmente interesante a la hora de proporcionar asistencia a personas con problemas relacionados con la marcha, como los pacientes que han sufrido una apoplejía Nuckols et al. (2023); Sutandi and Rahman (2021); Awad et al. (2020); Koch and

Font-Llagunes (2021); Awad et al. (2017).

En este trabajo, se prueba un prototipo funcional para un exosuit de asistencia a la marcha basado en sinergias posturales o cinemáticas, siguiendo un trabajo previo en Jorge et al. (2022); Jayakumar et al. (2023b,a), donde se introdujo un nuevo enfoque de diseño dirigido a una notable reducción del número de actuadores necesarios. El prototipo cuenta con una unidad de actuación formada por un solo motor, capaz de accionar la articulación de la cadera en ambas piernas, aunque podría ampliarse a la actuación de la rodilla y la cadera. El sistema de

*Autor para correspondencia: ashwinj@unex.es

transmisión se compone de cables Bowden y poleas diseñados para replicar lo mejor posible su movimiento durante la marcha, pudiendo accionar también la articulación del tobillo y la rodilla al tiempo que se mantiene con un solo actuador. El sistema global utiliza una IMU por pierna y FSR para la detección de la fase de la marcha, mientras que la unidad de actuación, que pesa unos 5 kg, se encuentra en una mochila. Se espera que el sistema proporcione entre el 15 % y el 30 % del par total de la articulación, centrándose en las fases más exigentes durante la marcha, sin interferir en la cinemática del sujeto. En los próximos capítulos se describen los principios de diseño y las ideas relacionadas con las estrategias de detección y control.

2. Metodología

El diseño del exosuit fue probado experimentalmente mediante pruebas realizadas en Jayakumar et al. (2023b) y Jayakumar et al. (2023a), que describen el prototipo, demostrando que el concepto funciona para ayudar a asistir el movimiento del usuario. A diferencia de los exoesqueletos tradicionales, los exosuits tienen elementos blandos que causan problemas como retrasos en la actuación, backlash, etc. Para superar dichos problemas y proporcionar una asistencia a la marcha útil, es necesario diseñar un sistema de control capaz de compensarlos. Los principales funciones que el controlador de este sistema debería tener son:

- Detección de la fase de la marcha
- Control de actuación
- Compensación de backlash

Para esta aplicación, se diseñó un Sistema de Inferencia Difusa (FIS) utilizando el método Mamdani para la detección primaria de la fase de la marcha Controller (2014). Una ventaja significativa y habitualmente pasada por alto que tienen los sistemas difusos es que si uno de los sensores deja de funcionar, el controlador puede programarse para tener en cuenta esta pérdida, algo mucho más difícil de implementar en otros tipos de controladores de IA, lo cual es de especial importancia para este tipo de aplicaciones en las que un comportamiento impredecible puede provocar fallos en el sistema en el mejor de los casos, o en el peor: lesiones al usuario. Lo mismo se ha implementado en este prototipo para detectar pérdidas de comunicación del controlador del motor, desconexiones de los sensores, etc. Si se detectan tales estados, el exosuit simplemente no actúa hasta que se haya restablecido la comunicación con el controlador del motor o el sensor. El FIS sólo se utilizó para detectar tres fases distintas, mientras que el controlador añadirá condiciones adicionales, en concreto: un indicador (flag) para detectar cuando la pierna está en la fase de flexión real y necesita ser activada, para evitar conflictos de actuación con la condición por defecto para estar de pie, que se superpone. Este indicador también ayuda a identificar la fase de balanceo, lo que significa que el sistema de control global es capaz de distinguir distintas fases de marcha para esta aplicación y sólo actúa cuando se cumplen las condiciones requeridas.

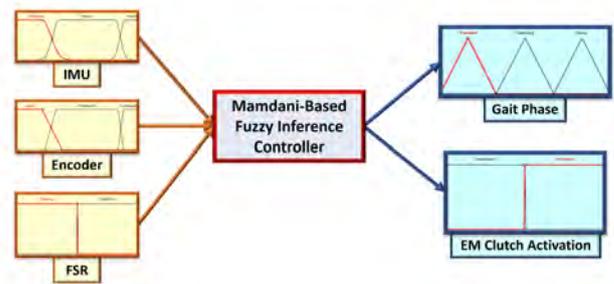


Figura 1: Sistema de Inferencia Difusa (FIS) tipo Mamdani con sus entradas y salidas

El diagrama de bloques del sistema se muestra en la figura 1.

2.1. Detección de la fase de la marcha

En primer lugar, el controlador debe ser capaz de detectar la fase actual de la marcha del usuario para tomar decisiones sobre la actuación. Esto se consigue mediante el detector de la fase de la marcha, que recibe información de la IMU y el FSR. La lectura de la IMU da una idea de la orientación de la pierna del usuario, y los FSR indican si el pie del usuario está en el aire o tocando el suelo. Con esta información, el algoritmo puede estimar la fase de la marcha del usuario en un instante determinado.

En todos los casos en el IMU, se produce un solape entre las funciones miembro debido a que la región entre neutra y extendida no está claramente definida. En concreto, se utilizó el tipo Gaussiano-2 que permite un buen control de la cantidad de solapamiento en comparación con otros tipos, ya que, la intersección entre zonas era diferente.

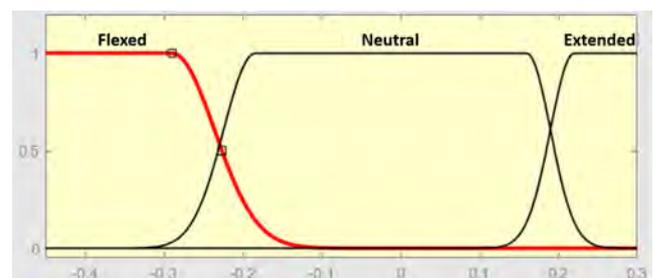


Figura 2: Funciones miembro del detector de fase de marcha: IMU

La salida FSR es un elemento completamente binario, y como tal, no necesita definiciones complejas en comparación con los otros sensores.

2.2. Compensación de backlash

Los exosuits tienen varios elementos blandos, como los tejidos utilizados en los puntos de anclaje o la ropa del usuario, que se estiran y se deforman, lo que provoca retrasos en la actuación. El otro factor importante de este exotraje es la presencia de un embrague electromecánico que desconecta el motor de las poleas. Los cables metálicos están enrollados alrededor de la polea y almacenan energía potencial como un muelle de torsión. Esa energía se libera al desconectar el eje al desembragar, y hace que la polea se desenrolle y cambie de posición

de forma impredecible, provocando holguras. Esto causa la mayoría de los problemas en cuanto a la actuación, ya que requiere el rebobinado de las poleas cada vez que se vuelven a conectar los embragues para tener suficiente tensión para iniciar de nuevo el accionamiento y asistir al usuario. En menor medida, los engranajes también tienen backlash debido a las ligeras tolerancias entre sus dientes, lo que podría causar ligeros retrasos en la actuación.

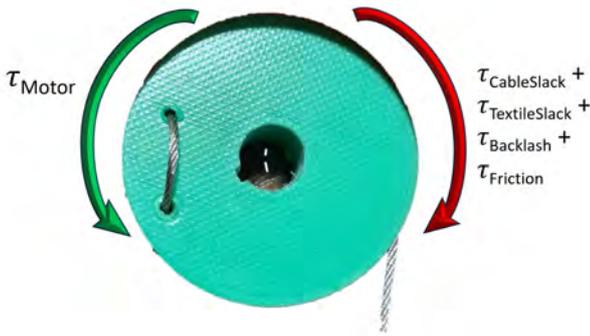


Figura 3: Par total del backlash a compensar

En total, por orden de importancia:

$$\tau_{backlashcompensation} = \tau_{cableslack} + \tau_{textileslack} + \tau_{gearbacklash} + \tau_{friction} \quad (1)$$

Para superarlo, se ha diseñado un compensador de backlash. Cuando se detecta que la pierna del usuario avanza, el compensador de backlash activa los embragues y aplica un par bajo que el usuario no puede detectar, pero que ayuda a reducir significativamente la cantidad de holgura al pretensar los cables, enrollar la polea y asegurarse de que los dientes de los engranajes se acoplan correctamente en previsión de la pisada del usuario en el que comienza la asistencia.

2.3. Control de actuación

Una vez determinada la fase de la marcha, el siguiente paso consiste en asistir al usuario en los puntos adecuados del ciclo de la marcha. En este caso, la asistencia se proporciona durante la flexión de la cadera. El accionamiento se controla de dos maneras: la salida de par del motor y la actuación de los embragues electromecánicos. Para el encoder, las demarcaciones son ligeramente más nítidas, ya que la extensión del cable se mide linealmente por el encoder, aunque sigue existiendo cierto solapamiento entre las regiones figura 4. Se utilizó el tipo trapecoidal para definir todas estas funciones miembro.

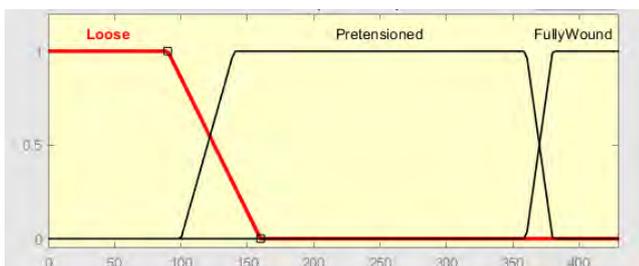


Figura 4: Funciones miembro del controlador de la actuación: Encoder

Dado que el sistema está basado en el control del par, la velocidad de movimiento real variará en función del par que se exija a la pierna del usuario. También se define una velocidad máxima del motor para las diferentes etapas de accionamiento, que se determinó experimentalmente, y evita que el motor supere su velocidad máxima nominal en caso de que un embrague no se acople, el cable de transmisión se desconecte o se produzca algún otro imprevisto que deje el motor sin carga y libre para girar a alta velocidad (16.000-25.000 RPM en vacío en este caso), lo que podría generar un exceso de calor y dañar los cojinetes, los bobinados internos, etc. Por lo tanto, esto significa que si existe alguna holgura en el cable, el motor gira más rápido hasta la velocidad definida como necesaria, hasta que la holgura se compensa y el motor encuentra resistencia. Si el par solicitado es elevado, el motor girará a la velocidad más alta disponible sin superar el par máximo disponible definido anteriormente.

3. Resultados

Para visualizar la salida de un sistema de lógica difusa, un gráfico de superficie en 3D puede mostrar la relación entre las salidas y dos entradas a la vez. Para este sistema, una de las salidas serán las de 5.

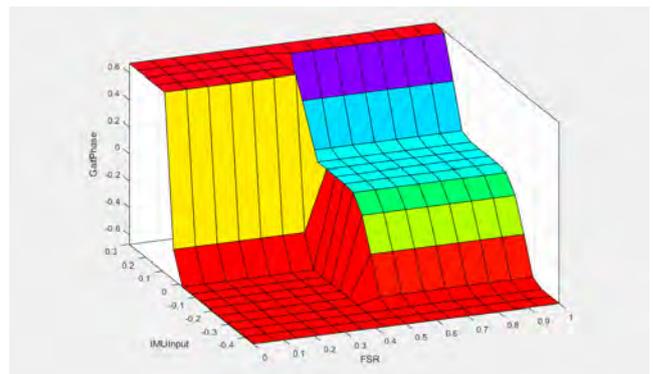


Figura 5: IMU y FSR: Gráfico de superficie de la fase de la marcha

Al comparar el gráfico de superficie del FSR y la IMU en 5, independientemente del valor del FSR, la IMU detecta la pierna en flexión, señalada por el área en rojo en la parte superior del gráfico. Sin embargo, el FSR desempeña un papel crucial a la hora de distinguir entre el usuario que golpea con el talón y el que simplemente extiende la pierna hacia delante. Esto está representado por la región en azul claro comparada con la región en rojo en la parte inferior hacia el origen. Esta diferencia se utiliza para accionar la propia pierna y ayudar a la marcha del usuario.

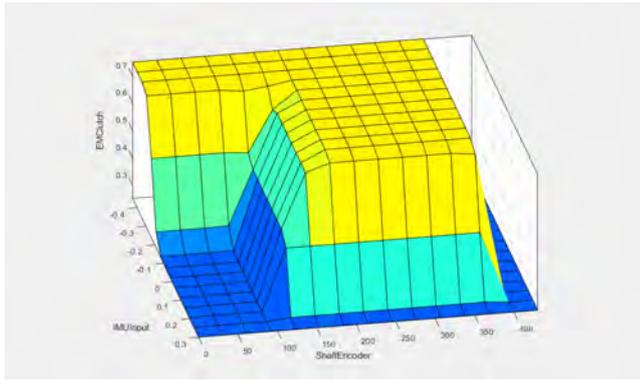


Figura 6: IMU y Encoder: Gráfico de superficie de activación de embrague

Durante la activación del embrague mostrada en 6, el codificador desempeña un papel más importante y anula completamente a la IMU en la zona amarilla. La región azul indica dónde permanece desactivado el embrague, cuando el codificador supera el límite y cuando la IMU indica que la pierna está totalmente extendida.



Figura 7: Compensación de muelle inverso activada que ayuda a mitigar la holgura de cables y textiles, y el backlash.

La figura 7 muestra claramente la compensación de backlash en funcionamiento en la foto, reduciendo notablemente la holgura causada por el cable suelto y los textiles flexibles, manteniendo los cables pretensados en previsión de la pisada cuando comienza la etapa de actuación. Esto es especialmente útil para eliminar los retrasos en la actuación y ha mejorado significativamente la calidad y la capacidad de respuesta de la actuación en el prototipo del exosuit.

Todos estos resultados demuestran la predictibilidad del controlador del sistema de inferencia difusa diseñado. Lee los datos de entrada disponibles y toma decisiones correctas para asistir al usuario en ciclos importantes de la fase de la marcha.

Como muestran los ejemplos completos. En las pruebas realizadas, no mostró ningún comportamiento inesperado.

4. Conclusiones

La capacidad del algoritmo de control FIS para procesar las entradas de los sensores y estimar correctamente la fase de la marcha esta demostrada. La capacidad del controlador de actuación para tomar decisiones sobre si activar o no la asistencia queda claro y funciona correctamente. El controlador también garantiza que la actuación sólo se produzca cuando quede cable suficiente para no dañar el exosuit y, lo que es más importante, garantizar la seguridad del usuario. El algoritmo de compensación de holguras ha demostrado su utilidad para eliminar los retrasos en la actuación y ha mejorado notablemente la calidad y capacidad de respuesta de la actuación en el prototipo de exosuit, reduciendo significativamente la holgura del cable y preparándolo para la fase de actuación. En el futuro se implementarán algoritmos aún más complejos para adaptar y compensar a los usuarios con patologías y proporcionar una mejor asistencia en tareas más avanzadas, como subir escaleras.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado parcialmente gracias al apoyo de del Ministerio de Ciencia e Innovación, Agencia Estatal de Investigación (MICINN/AEI/10.13039/501100011033) a través del proyecto PID2022-137525OB-C21.

Referencias

- Awad, L. N., Bae, J., O'donnell, K., De Rossi, S. M., Hendron, K., Sloot, L. H., Kudzia, P., Allen, S., Holt, K. G., Ellis, T. D., et al., 2017. A soft robotic exosuit improves walking in patients after stroke. *Science translational medicine* 9 (400), eaai9084.
- Awad, L. N., Kudzia, P., Revi, D. A., Ellis, T. D., Walsh, C. J., 2020. Walking faster and farther with a soft robotic exosuit: Implications for post-stroke gait assistance and rehabilitation. *IEEE open journal of engineering in medicine and biology* 1, 108–115.
- Controller, L., 2014. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *Readings in Fuzzy Sets for Intelligent Systems*, 283.
- Jayakumar, A., Bermejo-García, J., Rodríguez Jorge, D., Agujetas, R., Romero-Sánchez, F., Alonso-Sánchez, F. J., 2023a. Design, control, and assessment of a synergy-based exosuit for patients with gait-associated pathologies. *Actuators* 12 (8), 309.
- Jayakumar, A., Rodríguez Jorge, D., Bermejo-García, J., Agujetas, R., Romero-Sánchez, F., 2023b. Sensing and control strategies for a synergy-based, cable-driven exosuit via a modular test bench. *Sensors* 23 (10), 4713.
- Jorge, D. R., Bermejo-García, J., Jayakumar, A., Romero-Sánchez, F., Alonso, F. J., 2022. A synergy-based approach for the design of a lower-limb, cable-driven exosuit. *Journal of Mechanical Design* 144 (10), 103302.
- Kelley, L. C., Jul. 1919. *Pedomotor*. US Patent 1,308,675.
- Koch, M. A., Font-Llagunes, J. M., 2021. Lower-limb exosuits for rehabilitation or assistance of human movement: A systematic review. *Applied Sciences* 11 (18), 8743.
- Mosher, R. S., 1968. Handyman to hardiman. *Sae Transactions*, 588–597.
- Nuckols, R. W., Chang, C.-K., Kim, D., Eckert-Erdheim, A., Orzel, D., Baker, L., Baker, T., Wendel, N. C., Quinlivan, B., Murphy, P., et al., 2023. Design and evaluation of an independent 4-week, exosuit-assisted, post-stroke community walking program. *Annals of the New York Academy of Sciences*.
- Sutandi, A. C., Rahman, S. F., 2021. Robotic exosuit to improve walking and gait rehabilitation for stroke survivors: a review. In: *AIP Conference Proceedings*. Vol. 2344. AIP Publishing LLC, p. 050014.
- Vukobratovic, M., Hristic, D., Stojiljkovic, Z., 1974. Development of active anthropomorphic exoskeletons. *Medical and biological engineering* 12, 66–80.
- Yagin, N., Nov. 1890. *Apparatus for facilitating walking*. US Patent 440,684.



Simposio de Robótica, Bioingeniería y Visión por Computador 2024



ROAD: Plataforma de telerehabilitación para pacientes con daño cerebral y personas mayores

Lledó, L.D.^{a,*}, Martín-Batanero, R.^a, Vales, Y.^a, Blanco-Ivorra, A.^a, Catalán, J.M.^a, García-Aracil, N.^a

^a Grupo investigación de Robótica e Inteligencia Artificial del Instituto de Bioingeniería, Universidad Miguel Hernández, Avda. de la Universidad, 03202, Elche, España.

Resumen

El envejecimiento y la consiguiente disminución de la salud son aspectos cruciales que afectan tanto a la función cognitiva como a las capacidades físicas de las personas mayores. Esta situación puede resultar en una dependencia prematura para llevar a cabo actividades cotidianas. El proyecto ROAD se enfoca en abordar este desafío mediante el desarrollo de una plataforma de salud digital que integra tecnologías robóticas, objetos inteligentes y dispositivos portables para ofrecer terapias personalizadas y eficientes en el hogar. Este artículo propone el diseño inicial de la plataforma ROAD para definir una arquitectura modular, escalar y adaptable que integre elementos de inteligencia artificial, herramientas de gestión y servicios de computación en la nube.

Palabras clave: Ingeniería de rehabilitación y asistencia sanitaria, Tecnología de asistencia e ingeniería de rehabilitación, Tecnología robótica, Interacción multimodal, Control remoto y distribuido.

ROAD: Tele-rehabilitation platform for patients with brain injury and elderly people

Abstract

Aging and the consequent decline in health are crucial aspects that affect both cognitive function and physical capabilities in older adults. This situation can result in premature dependence to carry out daily activities. The ROAD project focuses on addressing this challenge by developing a digital health platform that integrates robotic technologies, smart objects, and wearable devices to offer personalized and efficient therapies at home. This article proposes the initial design of the ROAD platform to define a modular, scalable, and adaptable architecture that integrates elements of artificial intelligence, management tools, and cloud computing services.

Keywords: Rehabilitation engineering and healthcare delivery, Assitive technology and rehabilitation engineering, Robotics technology, Multi-modal interaction, Remote and distributed control.

1. Introducción

El deterioro de salud con la edad se trata de una cuestión importante en el estudio del envejecimiento, afectando en la función cognitiva y en las capacidades físicas. Esta disminución relacionada con la edad se asocia con cambios estructurales en el cerebro (Coelho et al., 2021) y/o con enfermedades (Peters, 2006). Este declive en la salud de las personas mayores puede llevar a una dependencia prematura de la realización de actividades de la vida diaria (AVD). Al mismo tiempo, la mayoría de los mayores prefieren vivir en sus propios hogares durante el mayor tiempo posible en lugar de mudarse a una residencia. La solución para permitir que los mayores

mantengan y continúen gestionando las AVD en su propio hogar a pesar del deterioro de su salud debe ser respaldada por cuidadores informales o formales y/o por nuevos dispositivos tecnológicos y herramientas novedosas para la digitalización de los servicios de salud y atención.

Además, se prevé que el número de personas mayores en todo el mundo se duplique, llegando a más de 1500 millones en 2050, según la Organización Mundial de la Salud. Todas las regiones sufrirán un incremento en el tamaño de la población mayor entre 2020 y 2050. A nivel mundial, se espera que la proporción de la población de 65 años o más aumente del 9.3 % en 2020 a alrededor del 16.0 % en 2050 ((Nations, 2021)). Las

*Autor para correspondencia: lledo@umh.es

personas mayores de 65 años son particularmente propensas a sufrir un daño cerebral traumático o adquirido como un accidente cardiovascular o un ictus, ya que la incidencia relativa de ictus se duplica cada década a partir de los 55 años. El aumento de la población entre 65-90 años, la prevalencia de daño cerebral adquirido en esta población y el declive asociado a la edad incrementarán los costes asociados a su asistencia y consumo de recursos sanitarios, comprometiendo la sostenibilidad a largo plazo de los sistemas sanitarios y sociales.

El objetivo principal del proyecto ROAD es investigar y desarrollar una nueva plataforma de salud digital basada en la combinación de tecnologías robóticas, objetos inteligentes y dispositivos portables que permitan: 1) extraer métricas para la detección de la disminución de la función cognitiva y/o física en mayores; 2) prevenir el declive relacionado con la edad basado en la realización de entrenamientos personalizados utilizando tecnologías robótica, objetos inteligentes y dispositivos portables; 3) ofrecer terapias de rehabilitación en el hogar adaptadas dinámicamente a las necesidades de cada paciente y asistidas por tecnologías robóticas, objetos inteligentes y dispositivos portables; 4) desarrollar un sistema de apoyo a la decisión clínica basado en técnicas de inteligencia artificial y una aplicación de gestor de terapia y actividades para proponer la prescripción de un plan de terapia y analizar los niveles de actividad diaria. En este trabajo se presenta una primera versión de la arquitectura y elementos que formaran parte del diseño de la plataforma final.

2. Materiales y métodos

2.1. Dispositivos robóticos

Los dispositivos de rehabilitación robóticos desempeñan un papel muy importante en este tipo de plataforma al ofrecer asistencia y guía del paciente durante la realización de ejercicios y actividades específicas, al igual que permiten recopilar una amplia variedad de fuentes de datos clave sobre el movimiento y el rendimiento del paciente como pueden ser el rango completo, fuerza, velocidad, distancia, precisión, trayectoria, tiempo y desviaciones de los movimientos de la articulación analizada.

Este proyecto se va a centrar en la rehabilitación de los miembros superiores, por consiguiente las terapias implicarán la necesidad de alcanzar ciertas amplitudes de movimiento o fortaleza muscular a través de movimientos de flexión y extensión del codo y el hombro, la abducción y aducción del hombro. En este caso, la asistencia robótica se realizará con el dispositivo llamado Rubidium (Catalán et al., 2021) que permite abarcar las condiciones establecidas en las especificaciones.

Rubidium (Figura 1) es una plataforma robótica compuesta por un dispositivo portátil de escritorio diseñado para la rehabilitación del miembro superior. Su estructura se basa en un mecanismo paralelogramo articulado impulsado por dos motores eléctricos que ejecutan movimientos en un plano horizontal.

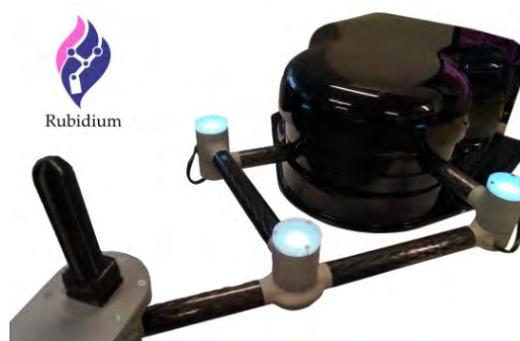


Figura 1: Dispositivo robótico Rubidium.

2.2. Objetos inteligentes

Los objetos inteligentes son dispositivos equipados con tecnología de recopilación en tiempo real de datos relevantes para evaluar y mejorar el progreso del paciente, obteniendo una estimación del desempeño en la movilidad del brazo de los pacientes. Estos dispositivos ofrecen la posibilidad de medir la orientación del paciente durante los ejercicios terapéuticos, para detectar giros o rotaciones de la mano así, como medir la aceleración del movimiento para obtener información sobre la velocidad y la fuerza aplicada en diferentes direcciones, y la rapidez con la que se realizan los ejercicios. Del mismo modo, permite obtener cambios de dirección del movimiento para evaluar la agilidad, evaluar la precisión del agarre y el tiempo de utilización del dispositivo durante una sesión o movimiento. Para este proyecto se están diseñando dispositivos inteligentes utilizando hardware libre que integran sensores de orientación, luces, sonidos y vibración para ofrecer diferentes estímulos en los ejercicios de terapia.

2.3. Dispositivos portables

Los dispositivos portables registran en todo momento las señales fisiológicas y la actividad física del paciente. De esta manera, se puede tener un control continuo del estado del paciente para obtener un registro diario de la actividad, el sueño y el estado fisiológico durante el día con el objetivo de generar una fuente de información objetiva que permita ajustar aún más su terapia de rehabilitación. Para la selección de este elemento se han tenido en cuenta los dispositivos que permiten registrar información como el recuento de pasos, la distancia, las calorías quemadas, los minutos y objetivos de actividad, de la misma manera que ofrece información del esfuerzo o bombeo cardíaco del usuario a lo largo del día.

Otros datos importantes son los datos sobre la calidad y la duración del sueño, incluyendo el tiempo y la frecuencia respiratoria en las diferentes fases del sueño, datos de oxígeno en sangre para determinar la frecuencia máxima u óptima a la que el corazón, los pulmones y los músculos del usuario pueden utilizar eficazmente el oxígeno durante el ejercicio, datos de ritmo cardíaco datos de Electrocardiograma (ECG) y datos de temperatura.

Por otro lado, los dispositivos portables se pueden utilizar de manera integral durante la ejecución de las tareas de rehabilitación, independientemente del tipo de terapia que esté realizando, donde llevan a cabo los ejercicios específicos y se registra una variedad de datos relevantes que incluyen datos de

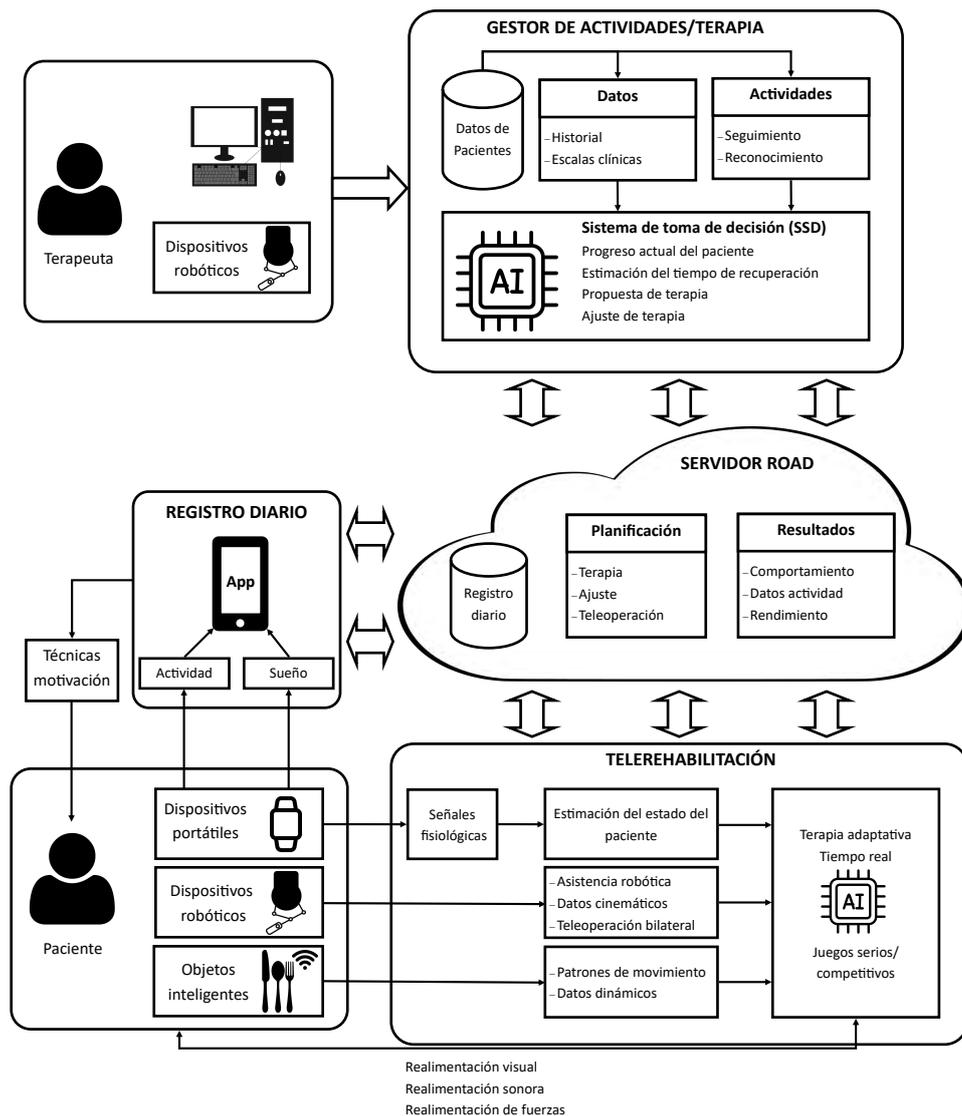


Figura 2: Propuesta de arquitectura del proyecto ROAD.

niveles de estrés, datos de movimiento con detalles sobre el movimiento del brazo del usuario a través de acelerómetros y giroscopios y datos sobre fisiológicas para adaptar la dificultad e intensidad de tareas en tiempo real.

2.4. Juegos serios

Los juegos serios ofrecen actividades de rehabilitación diseñadas específicamente para trabajar en conjunto con los dispositivos robóticos y los objetos inteligentes, y potenciar los diferentes déficits del paciente y proporcionar una terapia más atractiva y motivadora. En el proyecto ROAD se utilizan para obtener una amplia variedad de datos que permita evaluar el rendimiento y el progreso de los pacientes, así como información sobre el cumplimiento de objetivos. Se han diseñado una serie de juegos que registran el desempeño del paciente en la actividad a través puntuaciones, número de intentos necesarios para superar un desafío, errores, la cantidad de objetivos alcanzados, la precisión del movimiento, así como un completo registro de los tiempos que un paciente dedica al

juego puede ayudar a evaluar su compromiso y nivel de interés en el contenido.

3. Resultados y discusiones

El sistema ROAD representa una solución innovadora en el ámbito de la salud y la rehabilitación, brindando un enfoque personalizado y eficiente de terapia altamente sofisticada en el entorno del hogar para la atención de personas mayores y pacientes con daño cerebral adquirido. La arquitectura general del sistema tiene por objetivo ser abierta y escalable para una fácil integración de dispositivos de rehabilitación que se adapta a las diversas necesidades de los usuarios finales y los diferentes escenarios de aplicación. En la Figura 2 se presenta un diagrama de bloques que define la interoperabilidad entre los elementos descritos en la sección anterior para modelar una primera aproximación de lo que será la plataforma ROAD.

En base a la caracterización del sistema, se ha realizado una serie de elecciones arquitectónicas y metodológicas para abarcar cada una de las funcionalidades que dispone el

sistema. Con el propósito de incluir servicios en la nube se ha seleccionado una arquitectura cliente-servidor para una distribución eficiente de la carga entre usuarios. En cuanto al diseño de aplicaciones de gestión, interfaces gráficas e inteligencia artificial se ha optado por seguir el modelo de diseño MVC (Modelo – Vista – Controlador) para una clara separación de la lógica de negocios, la presentación de datos y la interacción de los usuarios.

En el esquema de arquitectura se pueden diferenciar 3 lados de interacción. En el lado del terapeuta, los clínicos pueden utilizar el gestor de actividades y terapias para recopilar, almacenar y gestionar información relevante sobre los pacientes en un entorno médico, al igual que utilizar herramientas de planificación, administración y seguimiento de todas las actividades o terapias de rehabilitación de cada paciente. Este gestor permitirá el diseño de rutinas de actividades de manera personalizada con valores como la duración, esfuerzo o repeticiones de cada actividad, la asignación del orden de realización de cada ejercicio o terapia en un determinado momento, registro del progreso de cada paciente a medida que completan las actividades. Además, contará con herramientas para la monitorización del rendimiento, la adherencia al plan de rehabilitación y cualquier otro dato relevante que permita evaluar el avance del paciente, caracterizar los niveles y tipos de actividades realizadas durante el día, mostrar la interfaz para los dispositivos robóticos, objetos inteligentes y sensores portables, y por último controlar los recordatorios y notificaciones al pacientes.

Sumado a todo esto, integrará un Sistema de Apoyo a la Decisión Clínica (CDSS) que permitirá recopilar los datos de progreso registrados, señales de los dispositivos, el estado y el historial del paciente, para evaluar la eficacia de la terapia administrada, ayudando a los profesionales de la salud a tomar decisiones a través de recomendaciones personalizadas basadas en la evidencia para ajustar la terapia según sea necesario a cada paciente con el objetivo de optimizar los resultados de rehabilitación. Otra funcionalidad será la de predecir escalas médicas a partir del análisis de los datos recopilados por parte de los dispositivos robóticos, objetos inteligentes y dispositivos portables, donde algoritmos calculan las puntuaciones estimadas en función de los resultados de un ejercicio concreto supervisado por el sistema. A parte, permitirá iniciar el proceso de teleoperación a través de la red global entre el paciente y el terapeuta para adaptar perfiles de asistencia personalizados.

En el lado del servidor web se desplegará la comunicación entre el terapeuta y el paciente, donde se intercalará un módulo de servicio *clouding* encargado del almacenamiento, la seguridad, la comunicación, el despliegue de modificaciones y la escalabilidad para respaldar de manera efectiva todas las funcionalidades y componentes del sistema de rehabilitación. De la misma manera, el módulo estará preparado para la gestión de las peticiones de los dispositivos a través una comunicación bidireccional, análisis y transformación de información, así como la gestión las bases de datos para escribir y leer datos de las señales registradas.

Por último, en el lado de paciente se proporcionará un módulo de telerehabilitación con una interfaz integral para llevar cabo las terapias/ejercicios en el entorno del hogar,

encargándose de realizar toda la parte de estimación del estado del usuario a través de la captura y procesamiento de señales fisiológicas por parte de los dispositivos portables, gestionar los algoritmos de control para brindar entrenamiento usando dispositivos robóticos y objetos inteligentes, mostrar los juegos serios competitivos y cooperativos a los pacientes y adaptar la terapia en base a la retroalimentación multimodal.

En cuanto a los dispositivos portables, el paciente siempre llevará puesto el siguiente sistema de registro para recopilar datos relevantes sobre la condición física, sueño y actividades diarias de los pacientes utilizando el siguiente sistema de registro: 1) pulsera portátil para monitorear señales fisiológicas, como, el ritmo de respiración, el nivel de conductancia de la piel, temperatura o el ritmo cardiaco, 2) móvil inteligente emparejado a la pulsera, 3) aplicación con interfaz intuitiva para transmitir datos registrados, de forma inalámbrica, través de una conexión de red hacia el servidor central. Además, este sistema incorporará técnicas de motivación a través de notificaciones del móvil para mantener a los pacientes comprometidos, motivados y enfocados en alcanzar sus objetivos diarios de rehabilitación.

4. Conclusiones

Este trabajo se ha planteado una arquitectura altamente modular para la implementación de un novedoso sistema de salud digital que brindará entrenamientos y terapias sofisticadas, eficientes y personalizadas en el hogar para personas mayores y pacientes con daño cerebral adquirido, a través una integración de tecnologías robótica, objetos inteligentes y dispositivos portables. Este tipo de arquitectura permitirá dividir el sistema de componentes independientes y autónomos que facilitan la escalabilidad, el mantenimiento y la evolución continua del sistema, para cubrir las diferentes necesidades de los diferentes usuarios finales y diferentes escenarios de aplicación.

La plataforma todavía está en fase de desarrollo continuo y activo con el fin de alcanzar un sistema que permita la adaptación de las características tecnológicas y clínicas a cualquier relación coste/beneficio definido por cualquier sistema de salud europeo para brindar servicios de entrenamiento y rehabilitación en el hogar.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por la Unión Europea - Next Generation EU y por el Ministerio de Ciencia e Innovación, perteneciente a la Agencia Estatal de Investigación (AEI) a través del proyecto TED2021-130431B-I00 y por la Generalitat Valenciana a través del programa PROMETEO 2023 para grupos de investigación de excelencia CIPROM/2022/12.

Referencias

- Catalán, J. M., García-Pérez, J. V., Blanco, A., Martínez, D., Lledó, L. D., García-Aracil, N., 2021. Differences in physiological reactions due to a competitive rehabilitation game modality. *Sensors* 21 (11), 3681.
- Coelho, A., Fernandes, H. M., Magalhães, R., Moreira, P. S., Marques, P., Soares, J. M., Amorim, L., Portugal-Nunes, C., Castanho, T., Santos, N. C., et al., 2021. Reorganization of brain structural networks in aging: A longitudinal study. *Journal of Neuroscience Research* 99 (5), 1354–1376.

Nations, U., 2021. World Population Ageing 2020 Highlights: Living Arrangements of Older Persons. Economic & social affairs. UN.
URL: <https://books.google.es/books?id=ApggzgEACAAJ>

Peters, R., 2006. Ageing and the brain: This article is part of a series on ageing edited by professor chris bulbitt. Postgraduate medical journal 82 (964), 84–88.



Simposio de Robótica, Bioingeniería y Visión por Computador 2024



Sesion: *Robótica*

Análisis de la influencia de EEGNET en una BMI basada en máquina de estados para el control de un exoesqueleto de miembro inferior

García-Villalón, J.^{a,b,*}, Ortiz, M.^{a,b}, Soriano-Segura, P.^{a,b}, Iáñez, E.^{a,b}, Azorín, J.M.^{a,b,c}

^aBrain-Machine Interface Systems Lab, Universidad Miguel Hernández de Elche, Avda. de la Universidad s/n, 03202, Elche, España.

^bInstituto de Investigación en Ingeniería de Elche, Universidad Miguel Hernández de Elche, Av/ Universidad, SN, 03202, Elche, España.

^cValencian Graduated School and Research Network of Artificial Intelligence—ValGRAI, 46022 Valencia, España.

To cite this article: García-Villalón, J., Ortiz, M., Soriano-Segura, P., Iáñez, E., Azorín, J.M. 2024. Analysis of the influence of EEGNET on a state machine based BMI for the control of a lower limb exoskeleton. Simposio de Robótica, Bioingeniería y Visión por Computador, 2024, 1-5. <https://doi.org/>

Resumen

En este artículo, se aborda el diseño de una Interfaz Cerebro-Máquina (BMI) no invasiva basada en la red neuronal EEGNET para interactuar con un exoesqueleto de miembro inferior. El objetivo es optimizar la decodificación y clasificación de patrones cerebrales asociados a la imaginación motora. Para ello, se han generado dos modelos basados en dicha red neuronal, uno estático y otro dinámico. Cada uno de ellos se corresponde con los dos estados posibles que el sujeto puede abordar en el uso del exoesqueleto. Es decir que, o bien se encuentre parado y se desee detectar la intención de movimiento, o bien se encuentre en movimiento y se requiera detectar la intención de parada. Se evaluará el uso de técnicas de ajuste fino de la red sobre dos sujetos durante varias sesiones de entrenamiento. Dicha evaluación se comparará con una decodificación basada en FBCSP. Las pruebas experimentales de imaginación motora se realizaron en lazo abierto para ambos modelos.

Palabras clave: Interfaces Hombre-máquina, Modelado de sistemas Hombre-máquina, Toma de decisiones y procesos cognitivos, Interfaces inteligentes, Inteligencia Artificial, Robótica, Análisis e interpretación de bioseñales, Tecnología asistencial e ingeniería de rehabilitación.

Analysis of the influence of EEGNET on a state machine based BMI for the control of a lower limb exoskeleton

Abstract

In this paper, the design of a Brain-Machine Interface (BMI) based on the EEGNET neural network to interact with a lower limb exoskeleton is addressed. Electroencephalographic (EEG) signals obtained by non-invasive scalp electrodes were used. The aim is to optimize the decoding and classification of brain patterns associated with motor imagery. To this end, two models based on this neural network have been generated, one static and the other dynamic. Each of them corresponds to the two possible states that the subject can approach in the use of the exoskeleton. That is, either the subject is stationary and it is desired to detect the intention to move, or the subject is in motion and it is required to detect the intention to stop. The use of fine-tuning techniques of the network will be evaluated on two subjects during several training sessions. This evaluation will be compared with an FBCSP-based decoding. Experimental tests of motor imagery were performed in open-loop for both models.

Keywords: Man-machine interfaces, Modeling of HMS, Decision making and cognitive processes, Intelligent interfaces, Artificial Intelligence, Robotics, Bio-signals analysis and interpretation, Assistive technology and rehabilitation engineering.

*Autor para correspondencia: eianez@umh.es

1. Introducción

En el ámbito de la rehabilitación, los exoesqueletos robóticos han surgido como una solución prometedora. Estos dispositivos, controlados por componentes mecánicos y eléctricos, posibilitan que personas con movilidad limitada puedan llevar a cabo actividades que previamente les eran inaccesibles. Facilitando de esta forma terapias para pacientes con trastornos neurológicos como los accidentes cerebrovasculares y las lesiones de médula espinal (Pons, 2008).

Las Interfaces Cerebro-Máquina (BMI) presentan un enfoque novedoso al permitir una conexión directa entre la actividad cerebral y el control de dispositivos externos. Estos sistemas interpretan los patrones de actividad cerebral para controlar tanto hardware como software. El electroencefalograma (EEG) es la técnica principal para medir la actividad cerebral, categorizando las ondas cerebrales en distintos tipos. La combinación de exoesqueletos y BMI representa un cambio de paradigma en la asistencia a personas con movilidad reducida. Esta aproximación facilita la interacción directa entre la actividad mental, especialmente la imaginación motora, y los movimientos del exoesqueleto (Rao, 2013).

La efectiva implementación de la BMI para controlar exoesqueletos requiere evaluaciones en tiempo real, donde el sistema realiza decisiones periódicas basadas en la clasificación continua de señales EEG asociadas con la imaginación motora y un estado de referencia no especificado. La precisa identificación de patrones de imaginación motora a partir de señales EEG ha sido objeto de una investigación activa (Do et al., 2013).

Los métodos basados en inteligencia artificial, particularmente en aprendizaje profundo, han demostrado ser efectivos en la extracción de características relevantes, lo que apunta hacia una mejora en la precisión de las clasificaciones. Además, el constante desarrollo de nuevas arquitecturas y ajustes de modelos neuronales demuestran ser más eficaces en ciertas tareas. Sin embargo, se enfrentan desafíos como la limitación de datos disponibles en tareas de imaginación motora y la interpretabilidad de los modelos de aprendizaje profundo en la toma de decisiones (Craik, 2019), (Sharma, 2023), (Wang, 2024).

Debido a que el control del exoesqueleto necesita la actuación tanto en periodos estáticos como en movimiento, el análisis de rendimiento de los clasificadores se debe hacer de forma diferenciada para validar la identificación de la imaginación motora. Se reconoce la importancia del ajuste fino con datos de entrenamiento por sesión y/o sujeto para mejorar la robustez. Se ha explorado la combinación de aprendizaje profundo con técnicas de ajuste fino para optimizar la comunicación entre la actividad cerebral y los movimientos de los exoesqueletos. Esta transferencia de aprendizaje implica aprovechar conocimientos previamente adquiridos en una tarea relacionada para mejorar el rendimiento en una tarea específica, como es el caso de la BMI para controlar exoesqueletos (Miao, 2023), (An, 2023), (Wu, 2019), (Ferrero, 2023).

2. Materiales y métodos

2.1. Sujetos

Dos sujetos sanos participaron voluntariamente en los experimentos (U1 y U2) (hombres con edades de 32 y 27 años respectivamente). No contaban con ninguna enfermedad conocida

y firmaron un consentimiento informado. Los procedimientos fueron aprobados por la Oficina de Investigación Responsable de la Universidad Miguel Hernández de Elche.

2.2. Equipamiento

El registro del EEG se realizó con *g.Nautilus Pro* (g.tec medical engineering GmbH, Barcelona, España) con una frecuencia de muestreo de 250 Hz. Los 32 electrodos húmedos no invasivos fueron colocados siguiendo la distribución 10-10 del sistema internacional, cuatro en posición bipolar para la captura de las señales electro-oculares y 28 para la lectura EEG: 'AF3', 'F3', 'FZ', 'FC3', 'FC1', 'FCZ', 'C5', 'C3', 'C1', 'CZ', 'CP3', 'CP1', 'CPZ', 'P3', 'PZ', 'PO3', 'AF4', 'F4', 'FC2', 'FC4', 'C2', 'C4', 'C6', 'CP2', 'CP4', 'P4', 'POZ', 'PO4', 'VU', 'VD', 'HR', 'HL'. Los electrodos de referencia y tierra se colocaron en el lóbulo de la oreja derecha y 'AFZ' respectivamente.

Los sujetos llevaban el *exoesqueleto H3* (Technaid, Madrid, España) y utilizaban muletas como apoyo adicional. El control del exoesqueleto se realizó mediante comandos enviados desde el ordenador portátil a través de Bluetooth. El montaje experimental puede verse en la Figura 1.

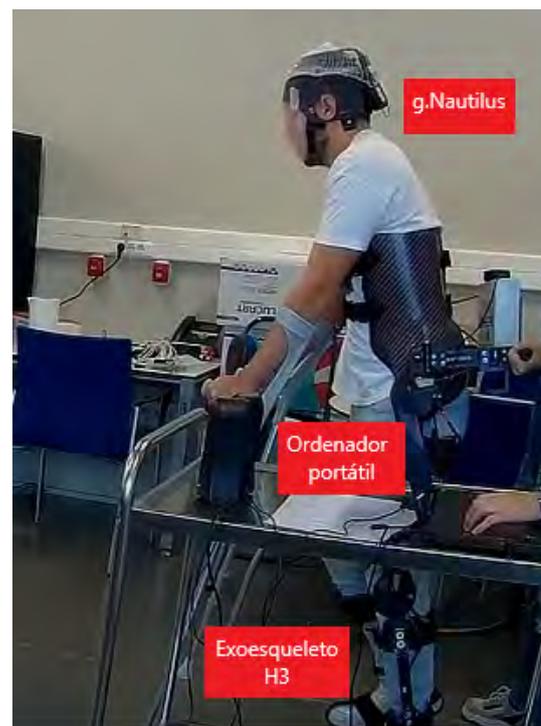


Figura 1: Configuración del equipo. La adquisición del EEG se realizó mediante un gorro *g.Nautilus Pro*. Los datos se registraron y procesaron en un ordenador portátil. El dispositivo externo controlado fue el H3 y el sujeto utilizó muletas para mejorar la estabilidad durante los ensayos de movimiento.

2.3. Diseño experimental

Cada sujeto participó en 5 sesiones a lo largo de una semana. Las sesiones se dividieron en dos partes: entrenamiento y test.

Durante el entrenamiento, se enviaron comandos predefinidas desde el ordenador portátil al exoesqueleto, por lo que éste

se encontraba en control de bucle abierto. Los participantes realizaron 14 *trials* en los que tenían que alternar dos patrones cerebrales: estado basal y MI (imaginación motora) de la marcha o la parada (según el modelo a entrenar). Se parte de dos sonidos distintos que indican el comienzo de cada tarea. Para el estado basal, se pedía a los sujetos que tuviesen pensamientos cotidianos que no implicasen movilidad o imaginación motora en sí. Durante el MI, se les pidió que imaginaran el movimiento de arrancar o efectuar la parada con el exoesqueleto, centrándose únicamente en las piernas y en la sensación asociada al arranque (Imaginación kinestésica). Para la mitad de los *trials*, los participantes estaban de pie con el exoesqueleto parado y para la otra mitad, caminaban asistidos por el exoesqueleto. En ambas condiciones, la secuencia de tareas mentales era similar. De este modo, las tareas cerebrales se realizaron en dos condiciones, de forma que se empleen dos clasificadores, uno para cada situación (en estático y en movimiento). El diseño experimental puede verse en la Figura 2.

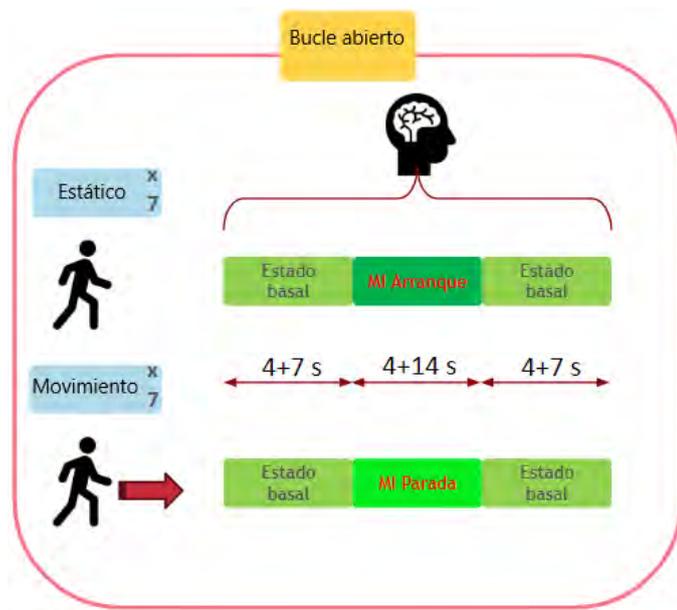


Figura 2: Protocolo de los *trials* experimentales. Al principio de cada tarea hay 4 s que se usan como aviso de la acción al sujeto.

Durante la fase de test, el exoesqueleto se controló mediante órdenes emitidas desde la BMI basadas en los patrones de EEG del sujeto. Para esta investigación sólo se utilizaron datos de la fase de entrenamiento.

2.4. BMI

Para simular un escenario en tiempo real, los registros de EEG se dividieron en ventanas temporales de 2 s (épocas) con un desplazamiento de ventana de 0,5 s. El esquema de la BMI puede verse en la Figura 3.

Se aplicaron dos enfoques diferentes para el paradigma MI. Los primeros pasos del preprocesamiento fueron comunes para ambos. En primer lugar, se aplicó un filtro Notch a 50 Hz para suprimir las interferencias de la línea eléctrica (este filtrado se implementa durante el registro de la señal). A continuación, se aplicó un filtro de paso alto a 1 Hz para eliminar la componente

de continua en la señal. Y para finalizar, se emplearon los registros EOG mediante el filtro *Hinfinity* (Kilicarslan et al., 2016) para eliminar los artefactos oculares detectados en la toma de la señal.

Los sujetos debían alternar entre periodos de MI y del estado basal. En el primer enfoque, para la decodificación, se emplearon *Filter bank common spatial patterns* (FBCSP) para extraer características espaciales en cuatro rangos de frecuencia diferentes en las bandas alfa y beta (Ang et al., 2008).

Las señales se filtraron con cuatro filtros paso-banda a 5-10 Hz, 10-15 Hz, 15-20 Hz y 20-25 Hz. A continuación, se aplicó el algoritmo *common spatial patterns* (CSP) a cada señal filtrada. Este algoritmo calcula una transformación espacial de todos los canales del EEG en nuevas dimensiones que pueden discriminar mejor entre el MI y el estado basal. Una vez obtenido el vector de características, se utilizó el análisis lineal discriminante (LDA) como clasificador de dos clases, MI y estado basal (Ferrero et al., 2022).

Este enfoque de decodificación se empleó a modo de referencia para evaluar los resultados de la implementación del segundo de ellos, basado en la red neuronal EEGnet de aprendizaje profundo y un ajuste fino (*fine-tuning*) de la misma (Lawhern et al., 2018). Como entrada a la red se acotó las señales registradas mediante dos filtrados adicionales, uno inicial con CAR (filtro de referencia promedio común) con el objetivo de eliminar todo aquello común en las múltiples lecturas de los electrodos, y un paso-banda de 8-40 Hz. Esta limitación en bandas frecuenciales sugiere un enfoque más preciso en el ancho de banda de interés, ayudando a mejorar la eficiencia del cómputo y memoria empleada, y conservando una buena precisión en comparación a la no limitación (Dziedzic et al., 2019).

De igual forma que en la decodificación mediante FBCSP solo se usaban los registros de la sesión de entrenamiento del día actual, para el método con EEGnet, los registros actuales y de sesiones previas de dicho sujeto se unieron para formar una pequeña base de datos que conformasen un modelo general de decodificación. Dicho modelo se modificó con la técnica de ajuste fino con los datos diarios, consiguiendo así una clasificación de las clases MI y estado basal ajustadas a la actividad cerebral actual del sujeto. Esta técnica de ajuste fino se implementa mediante el reentrenamiento del modelo general obtenido con EEGnet, modificando los pesos de las capas de la arquitectura en función de los nuevos datos de entrada, de esta forma, la red se particulariza en cierto grado para el sujeto en uso.

3. Resultados y discusión

Como se ha comentado previamente, los sujetos participaron en 5 sesiones y realizaron 7 *trials* en los que estaban en estático con el exoesqueleto y 7 *trials* en los que se encontraban en movimiento. Durante cada *trial*, tuvieron que alternar periodos de estado basal de actividad cerebral e imaginación motora de la marcha o de la parada según el caso.

La precisión se midió como el porcentaje de épocas clasificadas correctamente durante los periodos de MI y estado basal durante los *trials* de lazo abierto o entrenamiento (como se muestra en la Figura 2).

La Tabla 1 muestra los resultados de las dos decodificaciones. En ambos sujetos los resultados fueron superiores con el

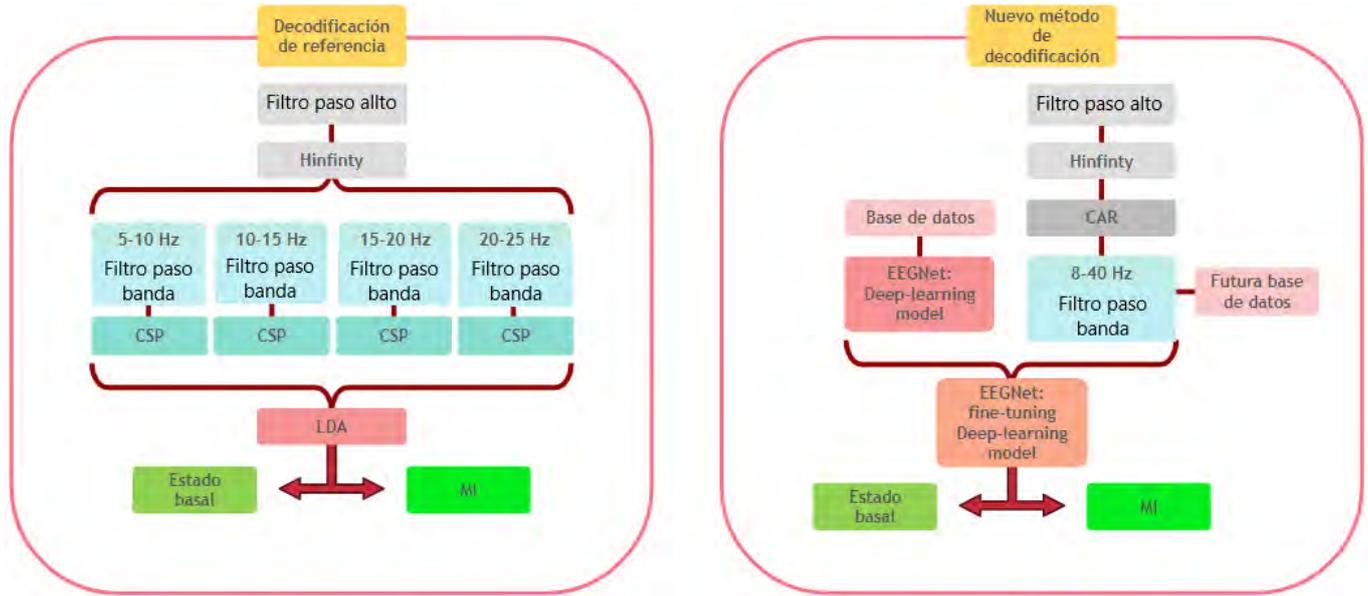


Figura 3: Esquema de decodificación de la BMI. Un primer enfoque mediante la extracción de características con FBCSP a la izquierda, y un segundo enfoque con EEGnet y ajuste fino a la derecha. Una vez registradas las señales de EEG, se preprocesan para aumentar la relación señal-ruido (pasos en gris). A continuación, se extraen las características de los distintos patrones cerebrales (en azul). Por último, se clasifican las señales. Se toma como base de datos para EEGnet los registros actuales y previos del sujeto.

Tabla 1: Comparación de *Accuracy* (%) (media de 5 sesiones)

		Referencia	EEGnet	Incremento
Estático	U1	56.3±9.3	63.5±10.2	+7.2
	U2	55.4±7.2	62.9±13.7	+7,5
	Promedio	55.9±8.3	63.2±12.0	+7,3
Movimiento	U1	55.9±7.0	56.9±10.5	+1.0
	U2	53.9±6.7	62.3±11.6	+8.4
	Promedio	54.9±6.9	59.6±11.1	+4,7

clasificador basado en la red EEGnet y el uso de ajuste fino. Además, esta mejora fue más evidente en los *trials* estáticos que en los de movimiento. Salvo U2 que obtuvo un incremento de precisión mayor en el modelo en movimiento, y fue el que más mejoró sus resultados de forma general.

Las Figuras 4(a), 4(b), 5(a) y 5(b) muestran la evolución del rendimiento de ambos sujetos en cada modelo a lo largo de las sesiones.

Se observa una tendencia positiva con el tiempo y una mejora en la mayoría de sesiones a favor de la decodificación basada en EEGnet. Esta mejora del rendimiento puede atribuirse a la capacidad de la red neural de extraer patrones de las señales de EEG como también de el aumento de particularidad por sesión que aporta el ajuste fino, ya que las señales de EEG poseen un fuerte carácter temporal que puede ser diferente en cada sesión de un mismo sujeto.

Por otro lado, puede apreciarse como en 3 de los 4 modelos (a excepción del estático en U2), la segunda sesión que incorpora el uso de la técnica de ajuste fino en post de la primera, consigue mejorar la precisión inicial que ofrece un único modelo general sin el empleo de esta técnica.

En cuanto a los aspectos menos positivos, se observa un leve incremento de la desviación estándar media en el empleo de EEGnet respecto a la decodificación de referencia, lo que indica un mayor nivel de variabilidad en los modelos obtenidos.

También, aunque se particularice cada sesión mediante el ajuste fino, se marca una tendencia a empeorar los resultados a partir de la segunda o tercera sesión, posiblemente condicionada por el cansancio o desinterés de los sujetos conforme realizan un mayor número de sesiones en días consecutivos.

Para obtener los resultados de *Accuracy* se realizó una validación cruzada en ambos decodificadores. Para el de referencia, al solo usarse los 7 *trials* de la sesión por modelo, se realizó mediante el método *leave-one-out*. En cuanto al uso de EEGnet, el método fue similar a la validación cruzada *leave-one-out*, donde se dejaba un *trial* de la sesión para testeo y con el resto y los de sesiones previas se generaba un modelo general, al cual se le aplicaba un ajuste fino con los 6 *trials* restantes de la sesión actual.

4. Conclusiones

Este artículo presenta un nuevo enfoque para mejorar los sistemas MI-BMI de control de un exoesqueleto de extremidades inferiores basado en la decodificación con modelos generados por aprendizaje profundo y técnicas de ajuste fino.

La inclusión del estado diario de los sujetos en el sistema, mediante el ajuste fino, parece mejorar los resultados de la MI-BMI basada en EEG. Los prometedores resultados mostrados

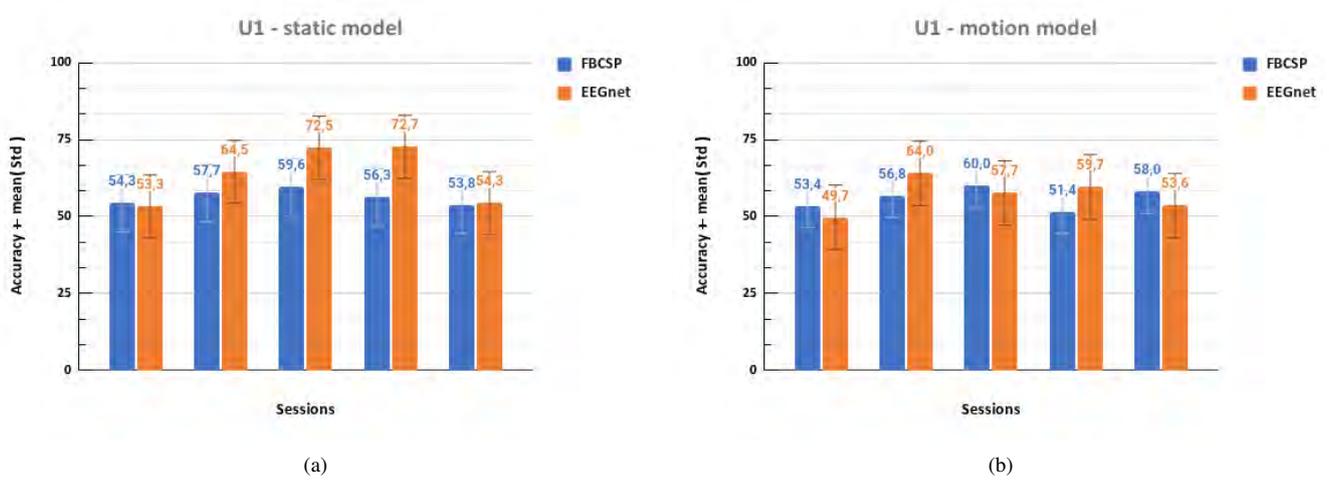


Figura 4: Evolución de la precisión a lo largo de las sesiones de U1 para los *trials* estáticos (a) y dinámicos (b). Compara los resultados del decodificador de referencia con el la red EEGnet y ajuste fino. La sesión 1 no cuenta con ajuste fino al no tener datos previos para formalizar un modelo general.

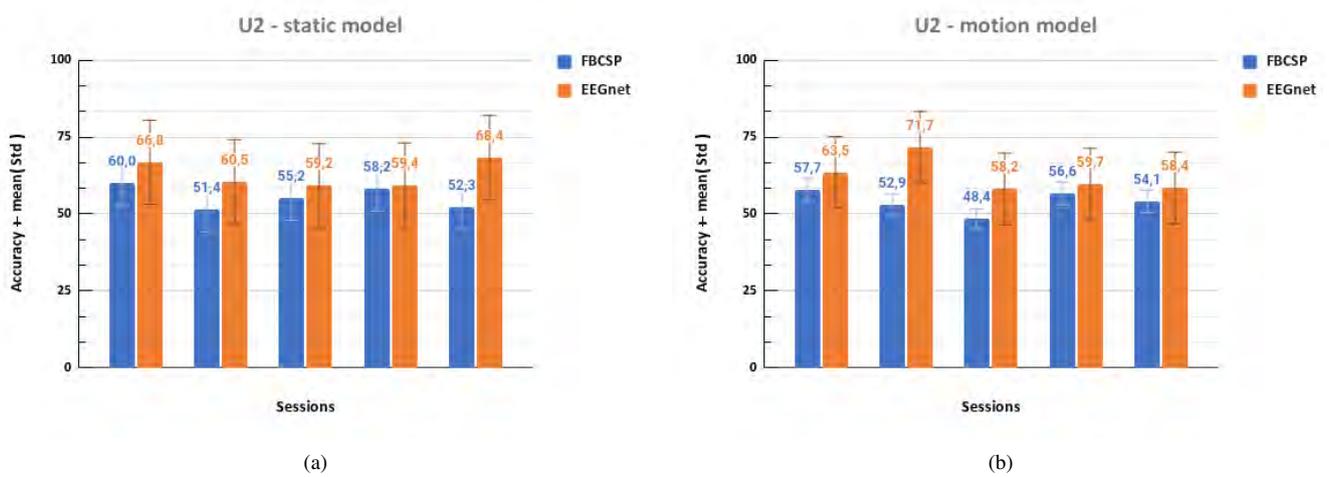


Figura 5: Evolución de la precisión a lo largo de las sesiones de U2 para los *trials* estáticos (a) y dinámicos (b). Compara los resultados del decodificador de referencia con el la red EEGnet y ajuste fino. La sesión 1 no cuenta con ajuste fino al no tener datos previos para formalizar un modelo general.

en el artículo deberían probarse con un mayor número de sujetos, con la idea de ampliar la base de datos disponible para generar un modelo general más robusto en cuanto a la decodificación de la MI respecto a un estado basal.

Aunque existe cierta dependencia del rendimiento del EEG de los distintos sujetos, pueden extraerse algunas conclusiones, como la mejora significativa del método de decodificación propuesto respecto al de referencia, o el efecto de aplicar el ajuste fino en las sesiones de cada sujeto respecto a no aplicarlo en la primera de ellas.

Se ha visto en algunas de las primeras sesiones como la clasificación basada en CSP mejora a la red, pero en las sesiones siguientes esto solo ocurre en dos sesiones aisladas (ambas pertenecientes a un mismo sujeto y modelo), por lo que puede suponerse que la aplicación del ajuste fino refuerza a la red sobre CSP. Salvo alguna sesión concreta, donde CSP es capaz de dar mejores resultados debido a alguna particularidad de los registros de la sesión que la red pueda mitigar al usar datos de varios días dentro del modelo general.

Futuras investigaciones buscarán la optimización de los parámetros de la red, el aumento de tamaño de la base de datos del modelo genérico y una modificación de las bandas de filtrado con el fin de obtener una precisión promedio superior al 70 % en ambos modelos.

Agradecimientos

Esta publicación es parte del proyecto de I+D+i PID2021-124111OB-C31, financiado por MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y por FEDER, UE. Esta investigación también ha sido financiada por Valencian Graduate School and Research Network of Artificial Intelligence (ValgrAI), Generalitat Valenciana y Unión Europea.

Referencias

- An, S. e. a., 2023. Dual attention relation network with fine-tuning for few-shot eeg motor imagery classification. *IEEE transactions on neural networks and learning systems* PP. DOI: 10.1109/TNNLS.2023.3287181
- Ang, K. K., Chin, Z. Y., Zhang, H., Guan, C., 2008. Filter bank common spatial pattern (fbcspp) in brain-computer interface. *Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks* pp. 2390–2397. DOI: 10.1109/IJCNN.2008.4634130
- Craik, A. e. a., 2019. Deep learning for electroencephalogram (eeg) classification tasks: a review. *Journal of neural engineering* 16,3. DOI: 10.1088/1741-2552/ab0ab5
- Do, H., Wang, P. T., King, C. E., Chun, S. N., Nenadic, Z., 2013. Brain-computer interface controlled robotic gait orthosis. *J. Neuroeng. Rehabil.* 111. DOI: 10.1186/1743-0003-10-111
- Dziedzic, A., Paparrizos, J., Krishnan, S., Elmore, A., Franklin, M., 2019. Band-limited training and inference for convolutional neural networks. *International Conference on Machine Learning (ICML)*. DOI: 10.48550/arXiv.1911.09287
- Ferrero, L., Iáñez, E., Quiles, V., Azorín, J. M., Ortiz, M., 2022. Adapting eeg based mi-bmi depending on alertness level for controlling a lower-limb exoskeleton. *IEEE International Conference on Metrology for Extended Reality, Artificial Intelligence and Neural Engineering (MetroXRINE)* pp. DOI: 10.1109/MetroXRINE54828.2022.9967639
- Ferrero, L. e. a., 2023. Transfer learning with cnn models for brain-machine interfaces to command lower-limb exoskeletons: A solution for limited data. *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*. DOI: 10.1109/EMBC40787.2023.10340008
- Kilicarslan, A., Grossman, R. G., Contreras-Vidal, J. L., 2016. A robust adaptive denoising framework for real-time artifact removal in scalp eeg measurements. *Journal of Neural Engineering*. DOI: 10.1088/1741-2560/13/2/026013
- Lawhern, V. J., Solon, A. J., Waytowich, N. R., Gordon, S. M., Hung, C. P., Lance, B. J., 2018. Eegnet: a compact convolutional neural network for eeg-based brain-computer interfaces. *Journal of Neural Engineering*. DOI: 10.1088/1741-2552/aace8c
- Miao, M. e. a., 2023. Explainable cross-task adaptive transfer learning for motor imagery eeg classification. *Journal of neural engineering* 20,6. DOI: 10.1088/1741-2552/ad0c61
- Pons, J. L., 2008. *Wearable Robots: Biomechatronic Exoskeletons*. Wiley.
- Rao, R. P. N., 2013. *Brain computer interfacing: An introduction*. Cambridge University Press.
- Sharma, N. e. a., 2023. Deep temporal networks for eeg-based motor imagery recognition. *Scientific reports* 13,1. DOI: 10.1038/s41598-023-41653-w
- Wang, X. e. a., 2024. An in-depth survey on deep learning-based motor imagery electroencephalogram (eeg) classification. *Artificial intelligence in medicine* 147. DOI: 10.1016/j.artmed.2023.102738
- Wu, H. e. a., 2019. A parallel multiscale filter bank convolutional neural networks for motor imagery eeg classification. *Frontiers in neuroscience* 13. DOI: 10.3389/fnins.2019.01275



Simposio de Robótica, Bioingeniería y Visión por Computador 2024



Sesión: Bioingeniería

Estimación de fatiga muscular usando regresión lineal y HD-EMG

Romero, C.^{a,*}, Durán-Santos, M.^b, Bernat, L.^a, Jara, C. A.^a, Úbeda, A.^a

^aGrupo Human Robotics, Universidad de Alicante, Ctra. de San Vicente del Raspeig S/N, 03690, Alicante, España.

^bUniversidad de las Américas Puebla, Ex-Hacienda Santa Catarina Mártir S/N. Cholula, 72810, Puebla, México.

To cite this article: Romero, C., Durán-Santos, M., Bernat, L., Jara, C. A., Úbeda, A. 2024. Muscle fatigue estimation using linear regression and HD-EMG. Simposio de Robótica, Bioingeniería y Visión por Computador, 2024, 1-5. <https://doi.org/>

Resumen

La fatiga muscular es un factor cotidiano que causa una disminución gradual en la capacidad para realizar actividades físicas. En individuos con lesiones neuromusculares, la fatiga aparece de forma temprana y pronunciada, lo que dificulta las tareas diarias. Tradicionalmente, se han utilizado escalas de percepción de fatiga subjetivas, pero investigaciones recientes utilizan técnicas de electromiografía para evaluar la fatiga de manera cuantitativa. Diversos trabajos emplean aprendizaje automático para clasificar la fatiga en diferentes estados, pero pocos abordan la estimación proporcional de la fatiga. Este estudio propone un algoritmo de Regresión Lineal Múltiple basado en señales de electromiografía de alta densidad para estimar de manera proporcional la fatiga muscular. Los resultados obtenidos permiten comparar la capacidad de predicción de las características MAV y RMS. Asimismo, el uso de validación cruzada con 3 *folds* combinando los datos de múltiples experimentos mejora la generalización del modelo respecto al estado del arte actual.

Palabras clave: Aprendizaje automático, Sistemas lineales, Análisis e interpretación de bioseñales, Tecnología asistencial e ingeniería de rehabilitación, EMG, HD-EMG.

Muscle fatigue estimation using linear regression and HD-EMG

Abstract

Muscle fatigue is an everyday factor that causes a gradual decline in the ability to perform physical activities. In case of individuals with neuromuscular injuries, fatigue appears early and pronounced, making the performance of daily tasks difficult. Traditionally, subjective fatigue perception scales have been used, but recent research uses electromyography techniques to assess fatigue quantitatively. Several works employ Machine Learning to classify fatigue into different states, but few address continuous fatigue estimation. This study proposes a Multiple Linear Regression algorithm based on high-density electromyography signals for continuous and percentage-based estimation of muscle fatigue. The results obtained allow a comparison of the predictive ability of MAV and RMS features. Also, the use of 3-fold Cross-Validation combining data from multiple experiments improves the model's generalisation ability compared to the current state of the art.

Keywords: Machine Learning, Linear systems, Bio-signals analysis and interpretation, Assistive technology and rehabilitation engineering, EMG, HD-EMG.

1. Introducción

La fatiga muscular es un síntoma común en la vida diaria de las personas. Así, la fatiga puede definirse como una disminución gradual en la capacidad de mantenimiento de realización

de una actividad física, por lo que es un fenómeno dependiente de la tarea llevada a cabo. Más concretamente, la fatiga muscular se refiere a la disminución de la capacidad de los músculos para producir fuerza o potencia durante un ejercicio en particular, caracterizándose por una aparición progresiva que ocurre

*Autor para correspondencia: c.romero@ua.es

tras iniciar un esfuerzo físico prolongado, en lugar de tratarse del momento en el que la tarea falla.

Por una parte, se distingue la debilidad, que denota una fuerza máxima inferior y sostenida en el tiempo de manera independiente a la actividad realizada, a diferencia de la fatiga muscular, pues se caracteriza por una disminución cuantificable de la máxima fuerza generable y, por tanto, es dependiente del tipo de ejercicio y su intensidad. Por otra parte, el agotamiento se define como la incapacidad de mantener las contracciones musculares en un nivel de fuerza o intensidad deseado, mientras que en la fatiga muscular existe una correlación entre el tiempo que lleva alcanzar el estado de agotamiento y la disminución de la capacidad de generación de fuerza máxima, es decir, viene determinada por su tiempo de resistencia.

En las personas que han sufrido accidentes neuromusculares, la fatiga muscular cobra aún más relevancia, puesto que se acentúan sus efectos y tiene un impacto considerable en su calidad de vida. En primera instancia, la fatiga muscular tiende a manifestarse de manera más temprana y pronunciada en los accidentes neuromusculares, debido a la disfunción en la comunicación entre el sistema nervioso y los músculos, lo que implica que se experimente una disminución aún más rápida en la capacidad de realización de actividades físicas durante un tiempo prolongado, aumentando la dificultad para llevar a cabo tareas cotidianas.

Por tanto, es fundamental disponer de métodos de determinación del nivel de fatiga muscular para apoyar tanto el diseño de programas de rehabilitación adaptados a las necesidades y capacidades de los pacientes y evaluar la eficacia de las intervenciones terapéuticas.

Las técnicas convencionales de medición de fatiga muscular se basan en escalas de percepción del nivel de fatiga. El Inventario Multidimensional de Fatiga (MFI) (Smets et al., 1995) es un cuestionario de veinte preguntas con un rango de siete puntos, que aborda aspectos generales, físicos y mentales de la fatiga, así como la reducción de la motivación y la actividad. La Escala de Fatiga de Chalder (CFQ 11) (Jackson, 2015) consiste en once preguntas con una escala de calificación de cuatro puntos que evalúa tanto aspectos físicos como fisiológicos de la fatiga. Por último, la Escala de Categorías CR-10 para la Valoración del Esfuerzo Percibido, también conocida como escala de Borg CR-10 (Williams, 2017), es ampliamente utilizada y asigna valores del 0 al 10 para indicar diferentes niveles de esfuerzo, relacionados con el porcentaje de contracción voluntaria máxima (MVC).

No obstante, estas escalas cuentan con un grado de subjetividad inherente relacionada con la percepción individual de la fatiga, lo que puede dificultar su precisión y confiabilidad. Es por ello que la investigación reciente ha incluido alternativas para evaluar la fatiga muscular de forma cuantitativa, mediante el análisis de las señales de electromiografía (EMG) activa durante contracciones musculares que provoquen fatiga.

Uno de los primeros trabajos en este ámbito es el de (Subasi and Kiyimik, 2010), donde se aplica una combinación de la Transformada de Wavelet y una red neuronal de perceptrón multicapa (MLP) con el algoritmo Levenberg-Marquardt como clasificador binario entre los estados de no fatigado y fatigado mientras se realiza un ejercicio de levantamiento de peso, cuya mejor precisión de clasificación es 91 %. En el estudio (Venugo-

pal et al., 2014) se sugiere utilizar múltiples ventanas de tiempo para extraer características en una tarea de contracción semi-isométrica de flexión y extensión de codo, clasificando entre fatiga y no-fatiga utilizando métodos de *Machine Learning* tradicionales como naïve Bayes, máquinas de vectores de soporte (SVM), entre otros obteniendo una precisión máxima de 91 %.

Posteriormente, se han llevado a cabo estudios de categorización en múltiples etiquetas o clases, incorporando un estado intermedio de transición a fatiga. El estudio (Terracina et al., 2019) propone el uso de SVM como enfoque de aprendizaje automático supervisado con el objetivo de realizar una clasificación en las etiquetas o estados de “sin fatiga”, “transición a fatiga” y “fatiga”, alcanzando una precisión del 99 %.

El aprendizaje automático tradicional genera buenos resultados en los numerosos estudios existentes actualmente, aunque el desarrollo de enfoques basados en aprendizaje profundo han sido también aplicados en el análisis de la fatiga muscular. En el caso del trabajo (Dang et al., 2023), se realiza una evaluación de la fatiga mediante diferentes modelos de *Deep Learning* (DL), donde se obtuvo el mejor rendimiento con un modelo de red LSTM basada en atención, adquiriendo una precisión cercana al 93 %.

La mayoría de los estudios se enfocan en clasificar los estados de “fatiga”, “transición a fatiga” y “no fatiga”, pero muy pocas investigaciones abordan la estimación cuantitativa de la fatiga muscular durante toda la actividad. Esta escasez toma especial relevancia para las personas con deficiencias motoras y que hayan sufrido accidentes neuromusculares porque el seguimiento de las mejoras en las sesiones de rehabilitación requiere una comprensión completa de la fatiga muscular.

No obstante, existen trabajos como (González-Zamora et al., 2023) que se aproximan a esta estimación, en el que se implementan regresores lineales por primera vez, recibiendo como entrada la característica de Frecuencia Media (MNF) de la señal EMG, realizando una asunción lineal entre los valores de MNF y el tiempo. Sin embargo, en este caso, no se decodifica un nivel de fatiga continuo, sino que se realiza una clasificación en tres estados, tal y como se venía realizando con anterioridad. Un enfoque más cercano a una estimación continua de la fatiga se propone en otro estudio (Rogers and MacIsaac, 2010) en el que se desarrolla un estimador de fatiga denominado *Generalized Mapping Index* (GMI) conformado por un MLP con cuatro características espacio-temporales como entrada, y con el que se consigue indicar cuándo un músculo se acerca a su nivel máximo de la fatiga, pero sin capacidad para devolver un estado exacto de dicho nivel como un porcentaje.

Del mismo modo, predominan los métodos de estimación de fatiga muscular centrados en una configuración de EMG bipolar para los músculos estudiados, debido a su menor coste, facilidad de uso y amplia disponibilidad en entornos clínicos. Sin embargo, su resolución espacial es limitada, así como su capacidad reducida para detectar patrones sutiles de activación muscular. El uso de HD-EMG mejora estos puntos al utilizar una matriz de electrodos más densa permitiendo una mayor precisión, a pesar de ser necesario paliar el incremento del coste y complejidad.

Así, se propone en el presente trabajo una forma más precisa de calcular el nivel de fatiga muscular mediante un método de análisis de señales HD-EMG usando un modelo de regresión

lineal para decodificar el nivel de fatiga de manera proporcional y continua en un rango porcentual entre 0 y 100 en una Tarea de Contracción Muscular Isométrica (IMCT) de miembro superior.

2. Materiales y métodos

2.1. Setup experimental

Los elementos utilizados para llevar a cabo la adquisición de las señales necesarias para el estudio se encuentran reflejados en el esquema de la Figura 1.

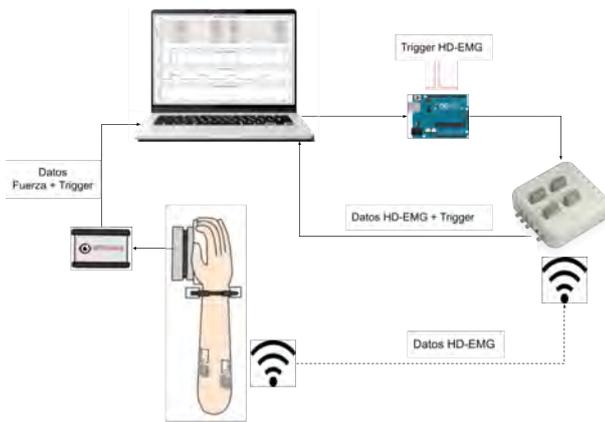


Figura 1: Esquema del *setup* experimental realizado para la captación de señales.

Estos componentes se pueden dividir en dos grandes grupos: la captación de la fuerza y la captación de la actividad muscular.

En el primero de ellos, se cuenta con un sensor de fuerza y par *OptoForce* de 6 ejes para medir la fuerza ejercida por el paciente en cada instante temporal. Para el registro de esta señal, se ha seleccionado una frecuencia de muestreo de 1 kHz y el puerto serie del dispositivo se ha empleado para generar una señal de disparo o *trigger* cada vez que se detecta que el usuario comienza o termina la aplicación de la fuerza. Asimismo, la colocación de este sensor se ha realizado imprimiendo un soporte para la muñeca y el codo con una empuñadura ergonómica para poder aplicar la máxima fuerza evitando tanto el daño a la mano del usuario como al propio sensor de fuerza.

En el segundo grupo, la adquisición de la contracción muscular se lleva a cabo mediante el equipo de electromiografía de alta densidad o HD-EMG *MuoviPro* colocando dos matrices adhesivas de 32 electrodos de 10 mm cada uno, con lo que se mide la señal de los flexores carpo radial y carpo ulnar con una frecuencia de muestreo de 2 kHz. Además, se establece una referencia común colocada en la muñeca del brazo dominante del usuario. La señal adquirida por las matrices de electrodos es transmitida a la base *SyncStation* vía Wi-Fi.

Adicionalmente, con el objetivo de sincronizar la señal HD-EMG con la fuerza, se debe generar una señal de *trigger* adicional al principio y al final de cada tarea de contracción. Para ello, se ha programado una placa *Arduino UNO* para enviar un disparador analógico a la entrada de sincronización de la base del equipo *MuoviPro*, recuperada por medio de un canal de comunicación UDP para lograr dicha sincronización.

2.2. Participantes y protocolo de pruebas

Las pruebas se han llevado a cabo sobre 9 sujetos sanos, los cuales firmaron un consentimiento informado de forma previa a su realización. Este estudio fue aprobado por el Comité de Ética en Investigación de la Universidad de Alicante bajo el número de expediente UA-2023-10-04. Los participantes tienen una edad media (\pm desviación estándar) de 31.33 años (\pm 9.55), siendo 6 sujetos masculinos y 3 femeninos. En el experimento, cada participante se sienta cómodamente en una silla, limpiando y afeitando la zona de los flexores radialis y ulnaris en caso necesario, para posteriormente colocar las matrices adhesivas de electrodos preparadas previamente con pasta conductora. Posteriormente, se colocan las bandas de los sensores HD-EMG y se conectan las matrices a sus respectivas referencias. Finalmente, todo el brazo dominante se apoya sobre un soporte, bloqueando la muñeca y el codo con correas de velcro.

Cada sesión experimental se divide en dos fases. En la **primera fase**, el sujeto aplica su fuerza máxima en la articulación conectada al sensor de fuerza, realizando un movimiento de flexión de la mano dominante. Con ello, se consigue registrar la fuerza de contracción voluntaria máxima (MVC) del usuario.

En la **segunda fase**, cada participante aplica una fuerza continua del 50% de su MVC sobre la misma articulación, con el objetivo de registrar la actividad muscular del IMCT. Cabe destacar que esta tarea se lleva a cabo durante 4 repeticiones, realizando pausas entre cada una de ellas para la recuperación muscular, cuya duración es dependiente de la recuperación de cada usuario en concreto.

Asimismo, tanto en la primera fase como en la segunda, la fuerza medida se utiliza para proporcionar retroalimentación en tiempo real al sujeto a través de una interfaz de usuario. Esto permite al participante visualizar la cantidad de fuerza que está aplicando en todo momento en la articulación estudiada, facilitando así el control y la comprensión de su actividad muscular durante la realización de la tarea.

Es relevante mencionar que todos los registros de señales fueron realizados siguiendo el consenso sobre Normas de Instrumentación de EMG (Tankisi et al., 2020).

2.3. Preprocesamiento de la señal

Una vez realizado el registro y adquisición, las señales de fuerza y HD-EMG con sus correspondientes señales de *trigger* obtienen la forma de la Figura 2, donde se pueden observar claramente ambas fases de la sesión, además de los 4 experimentos de IMCT realizados.

El primer paso de tratamiento de las señales consiste en la división en los experimentos separados, haciendo uso de las señales de *trigger* capturadas, consiguiendo así las cuatro pruebas de cada participante de manera individual e independiente.

La siguiente etapa se centra en la extracción de características de las señales HD-EMG, descartando así la señal de fuerza asociada, cuyo principal cometido es la retroalimentación al participante de la fuerza ejercida durante la realización de las pruebas.

La primera característica a estudiar es la denominada *Mean Absolute Value* (MAV), que se calcula como el promedio de los valores absolutos de la señal en cada ventana de tiempo, según la ecuación 1, donde N es la longitud de la señal EMG y x_i representa el valor de amplitud de la señal en la posición i .

$$\text{MAV} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |x_i| \quad (1)$$

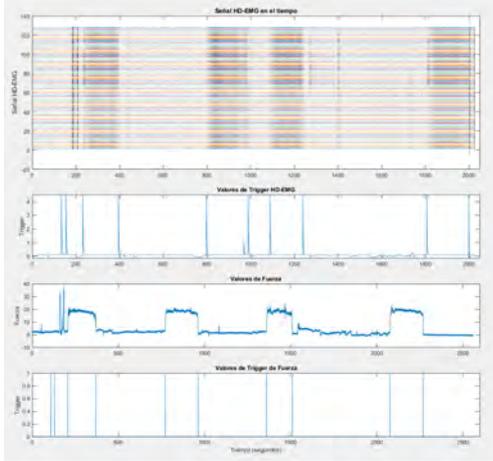


Figura 2: Representación de las señales adquiridas de fuerza y HD-EMG junto con sus correspondientes disparadores.

De esta manera, para cada canal de la matriz de electrodos, se aplica un proceso de rectificación a valores positivos y una envolvente lineal utilizando un filtro de media móvil con una ventana de 2000 puntos. Esta elección se basa en la frecuencia de muestreo de la señal HD-EMG, que es de 2 kHz, lo que permite una correspondencia directa entre la ventana del filtro y la frecuencia de muestreo de la señal con el objetivo de reducir de manera óptima el ruido inherente en la señal. Con ello, se consigue el resultado reflejado en la Figura 3.

Se puede observar la presencia de un pico en la amplitud de la señal al final del experimento, correspondiente al movimiento realizado por el usuario al separar ligeramente el brazo de la empuñadura del *setup* (representada en la Figura 1) una vez alcanzado el estado máximo de fatiga percibido de manera subjetiva. No obstante, la señal fue posteriormente recortada para evitar que pueda afectar al algoritmo de estimación proporcional de fatiga.

Finalmente, se ha extraído la característica *Root Mean Square* (RMS) de las señales HD-EMG rectificadas y divididas en ventanas, calculada como:

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} \quad (2)$$

donde N es la longitud de la señal EMG y x_i representa el valor de amplitud de la señal en la posición i . Cada una de las ventanas o segmentos consecutivos sobre las que se ha extraído el valor de RMS tiene una duración de 1.25 segundos, junto con un solapamiento de 0.25 segundos entre ventanas adyacentes.

En la Figura 4 se recoge la representación de los valores de RMS calculados para los 16 primeros canales de una señal HD-EMG de ejemplo, debido a que la visualización de los 64 canales en una misma imagen lleva a una reducción en la comprensión. De esta manera, se comprueba sin problemas una tendencia ascendente en la mayoría de los canales representados, que viene dada por la activación muscular progresiva durante

la realización de la tarea, de tal manera que este aumento gradual en los valores de RMS indica un mayor nivel de actividad muscular a lo largo del tiempo, sugiriendo una fatiga progresiva durante la tarea de contracción.

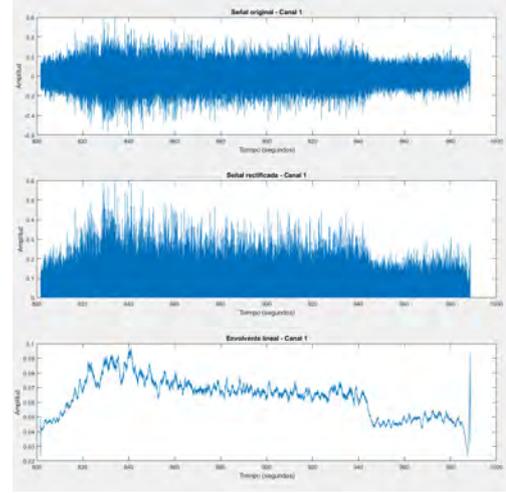


Figura 3: Gráficas de aplicación de las diversas operaciones aplicadas para la extracción de MAV de un único canal de un experimento.

2.4. Algoritmo de estimación proporcional de fatiga

El algoritmo seleccionado para poder estimar un valor numérico de nivel de fatiga muscular es el Regresor Lineal Múltiple (MLR), al ser un modelo adecuado para realizar predicciones continuas en función de diversas variables de entrada, haciéndolo especialmente útil para este tipo de análisis de series temporales.

La ecuación que expresa este algoritmo tiene la forma:

$$y = w_0 + w_1x_1 + w_2x_2 + \dots + w_nx_n \quad (3)$$

En este escenario específico, el modelo MLR permite establecer una suma ponderada de un conjunto de entradas ' x_1, x_2, \dots, x_n ' que puede representar, tanto el valor de la característica MAV como el de la característica RMS para dichos canales. Estas entradas son multiplicadas por los correspondientes pesos o coeficientes de regresión ' w_1, w_2, \dots, w_n ' y que son aprendidos por el modelo, añadiendo además el parámetro ' w_0 ', comúnmente denominado sesgo o intercepto. Finalmente, el parámetro ' y ' representa la variable dependiente que se está prediciendo, correspondiente al nivel de fatiga continuo y proporcional.

En este trabajo, se ha aplicado una asunción de comportamiento lineal de fatiga muscular, es decir, el nivel de fatiga al inicio de la tarea es 0, mientras que el nivel al final de cada repetición es 100. Esto quiere decir que se asume el hecho de que el aumento en las características de las señales HD-EMG se asume como aumento lineal del nivel de fatiga muscular, puesto que el clasificador se basa en la predicción del aumento de dichos valores de las características, lo que implícitamente está relacionado con el porcentaje de fatiga.

Las métricas de evaluación empleadas para estudiar el rendimiento del modelo son el Coeficiente de Correlación de *Pearson* y Coeficiente de Determinación R^2 .

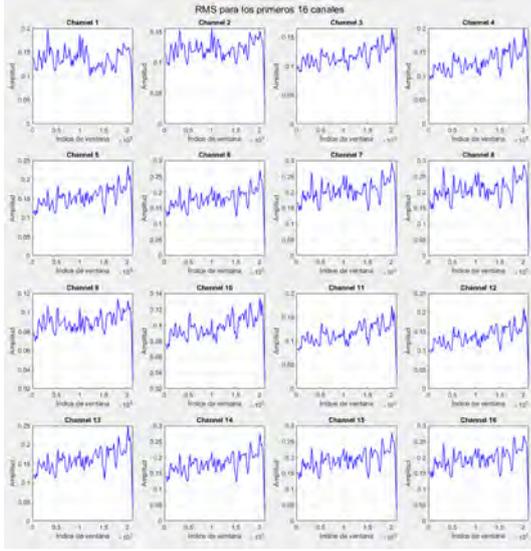


Figura 4: Gráficas de los valores de RMS para los primeros 16 canales de una señal HD-EMG.

El coeficiente de correlación de Pearson, denotado como ‘ r ’, mide la fuerza y la dirección de la relación lineal entre dos variables, variando entre -1 y 1, donde -1 indica una correlación negativa perfecta, 1 indica una correlación positiva perfecta, y 0 indica ausencia de correlación lineal. Su fórmula se define como:

$$r = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{\sqrt{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \sqrt{n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2}} \quad (4)$$

El Coeficiente de Determinación R^2 representa la proporción de la varianza en la variable dependiente que es explicada por el modelo de regresión lineal, calculado como la covarianza entre la entrada X y la salida Y del modelo dividida por las varianzas de X e Y. Un valor de 1 indica una predicción perfecta, mientras que valores más bajos indican una menor capacidad del modelo para explicar la varianza en los datos observados. Esta métrica viene dada por la siguiente ecuación:

$$R^2 = \frac{\sigma_{XY}^2}{\sigma_X^2 \sigma_Y^2} \quad (5)$$

3. Resultados y discusión

Se han empleado diversas configuraciones experimentales para evaluar el modelo MLR, las cuales pueden clasificarse en las siguientes categorías:

■ Datos de entrada:

- Característica MAV calculada para cada canal.
- Característica RMS calculada para cada canal.

■ Evaluación intra-sujeto con validación cruzada de 3 folds:

- *Configuración 1*: Un experimento reservado para la fase de prueba y dos restantes para la fase de entrenamiento.

- *Configuración 2*: Combinación de los datos de los tres experimentos en una única variable sobre la que aplicar la validación cruzada.

Es importante destacar que se ha excluido el primer experimento o prueba de cada participante, ya que este constituye el proceso inicial de adaptación del sujeto a la prueba realizada, lo cual podría distorsionar los resultados de la evaluación.

Los resultados obtenidos con las diversas configuraciones se observan en las Tablas 1 y 2.

Tabla 1: Resultados de las métricas de evaluación usando como entrada los valores de MAV para la señal de HD-EMG.

Participante	Configuración 1		Configuración 2	
	r	R^2	r	R^2
S1	0.6672	0.2733	0.8613	0.7419
S2	0.4879	-0.2445	0.8694	0.7558
S3	0.8922	0.0523	0.9633	0.9279
S4	0.9356	0.8310	0.9542	0.9106
S5	0.8081	0.4707	0.9218	0.8497
S6	0.7649	0.4842	0.9033	0.8159
S7	0.7711	0.5461	0.9226	0.8511
S8	0.7206	-0.0126	0.8779	0.7708
S9	0.8164	0.3936	0.9531	0.9083
Media	0.7627	0.3105	0.8369	0.9141

Tabla 2: Resultados de las métricas de evaluación usando como entrada los valores de RMS para la señal de HD-EMG.

Participante	Configuración 1		Configuración 2	
	r	R^2	r	R^2
S1	0.7226	0.3917	0.8671	0.7488
S2	0.4428	-0.5271	0.8308	0.6500
S3	0.8659	-0.2344	0.9542	0.9075
S4	0.9478	0.7666	0.9539	0.9063
S5	0.8337	0.5134	0.9089	0.8173
S6	0.7769	0.4332	0.8965	0.8004
S7	0.7776	0.5322	0.9156	0.8352
S8	0.6009	-0.9858	0.8272	0.6577
S9	0.7659	-4.2573	0.8664	0.6590
Media	0.7483	-0.3742	0.8911	0.7758

En primera instancia, se puede observar que se obtiene, de manera general, un rendimiento ligeramente superior en las métricas de evaluación de la característica MAV respecto a RMS, sugiriendo que la característica MAV es más efectiva que RMS como entrada para el modelo de regresión, ya que se conserva una mayor cantidad de información relevante en los canales de la señal, permitiendo al modelo capturar patrones más precisos y útiles para la predicción.

Por otra parte, la validación cruzada de 3 folds tiende a obtener resultados más consistentes y mejores métricas de evaluación cuando se combinan los datos de los tres experimentos, en lugar de la división en experimentos de entrenamiento y prueba. Con ello, se demuestra que la combinación de datos de múltiples experimentos mejora la capacidad de generalización del modelo, puesto que se reduce la variabilidad en los conjuntos de datos de entrenamiento y prueba al poder contar con una variedad más amplia de datos.

Asimismo, se observa una consistencia en los sujetos que obtienen el mejor rendimiento en ambas Tablas, lo que indica que ciertos participantes pueden tener características musculares o comportamientos que son más fáciles de predecir utilizando el modelo MLR.

Concretamente, el participante 3 con la configuración 2 obtiene los resultados más elevados en ambas métricas de evaluación. Esto se traduce en que los niveles de fatiga predichos por el modelo sigan una tendencia lineal que aumenta progresivamente, tal y como se observa en las Figuras 5 y 6.

Estos resultados también evidencian una tendencia lineal más marcada, ya que los puntos de predicción muestran una mayor cohesión, como se ilustra principalmente en la figura 6.

Esto contrasta con otros estudios similares, donde el empleo de otras características como MNF como variable de entrada para el regresor lineal resultó en una dispersión más amplia de los datos y, en consecuencia, el ajuste lineal del nivel de fatiga no alcanza la misma precisión.

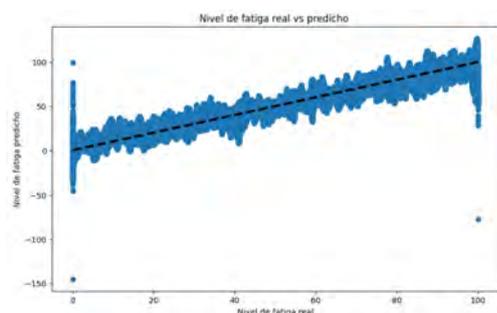


Figura 5: Gráfica comparativa del nivel de fatiga muscular para el participante 3 usando como entrada la característica MAV de la señal HD-EMG.

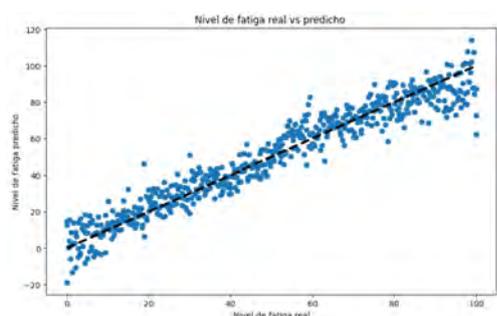


Figura 6: Gráfica comparativa del nivel de fatiga muscular para el participante 3 usando como entrada la característica RMS de la señal HD-EMG.

4. Conclusiones

En este estudio, se ha explorado la novedad del uso de HD-EMG para la estimación de la fatiga muscular, rompiendo con la convención del uso de regresores lineales para múltiples clases, obteniendo resultados prometedores en la predicción del nivel de fatiga muscular. Asimismo, este modelo de estimación proporcional puede ser usado para realizar la predicción en tiempo real tras haber establecido la relación EMG-fatiga, adaptando los pasos de adquisición, procesamiento y extracción

de características y obteniendo los pesos y parámetros aprendidos por el regresor lineal.

Además, se destaca la necesidad de considerar la individualidad de cada sujeto al diseñar programas de entrenamiento o intervenciones relacionadas con la fatiga muscular, al tratarse de un fenómeno dependiente del participante, lo que implica que se requiere una realización obligatoria de la primera fase de obtención del valor de MVC para cada sujeto.

En relación con las metodologías utilizadas, se ha observado que se obtuvieron resultados muy similares para ambas características extraídas, por lo que se plantea para trabajos futuros explorar modelos más complejos con el objetivo de investigar si puede ser factible incluso eliminar la etapa de preprocesamiento y extracción de características para alimentar directamente al modelo la señal en crudo.

Agradecimientos

Este estudio ha sido desarrollado en el marco del proyecto MYOREHAB (PCI2023-143405), financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades y la Agencia Estatal de Investigación MCIN/AEI/10.13039/501100011033.

Referencias

- Dang, Y., Liu, Z., Yang, X., Ge, L., Miao, S., 2023. A fatigue assessment method based on attention mechanism and surface electromyography. *Internet of Things and Cyber-Physical Systems* 3, 112–120. DOI: 10.1016/j.iotcps.2023.03.002
- González-Zamora, P., Benitez, V. H., Pacheco, J., 2023. A feature-based processing framework for real-time implementation of muscle fatigue measurement. *Cluster Computing* 26 (1), 385–394. DOI: 10.1007/s10586-021-03437-7
- Jackson, C., 2015. The chalde fatigue scale (cfq 11). *Occupational medicine* 65 (1), 86–86. DOI: 10.1093/occmed/kqu168
- Rogers, D. R., MacIsaac, D. T., 2010. Training a multivariable myoelectric mapping function to estimate fatigue. *Journal of Electromyography and Kinesiology* 20 (5), 953–960. DOI: 10.1016/j.jelekin.2009.11.001
- Smets, E., Garssen, B., Bonke, B. d., De Haes, J., 1995. The multidimensional fatigue inventory (mfi) psychometric qualities of an instrument to assess fatigue. *Journal of psychosomatic research* 39 (3), 315–325. DOI: 10.1016/0022-3999(94)00125-0
- Subasi, A., Kiyimik, M. K., 2010. Muscle fatigue detection in emg using time-frequency methods, ica and neural networks. *Journal of medical systems* 34, 777–785. DOI: 10.1007/s10916-009-9292-7
- Tankisi, H., Burke, D., Cui, L., de Carvalho, M., Kuwabara, S., Nandedkar, S. D., Rutkove, S., Stålberg, E., van Putten, M. J., Fuglsang-Frederiksen, A., 2020. Standards of instrumentation of emg. *Clinical neurophysiology* 131 (1), 243–258. DOI: 10.1016/j.clinph.2019.07.025
- Terracina, D., Moniri, A., Rodríguez-Manzano, J., Strutton, P. H., Georgiou, P., 2019. Real-time forecasting and classification of trunk muscle fatigue using surface electromyography. In: 2019 IEEE Biomedical Circuits and Systems Conference (BioCAS), pp. 1–4.
- Venugopal, G., Navaneethakrishna, M., Ramakrishnan, S., 2014. Extraction and analysis of multiple time window features associated with muscle fatigue conditions using semg signals. *Expert Systems with Applications* 41 (6), 2652–2659. DOI: 10.1016/j.eswa.2013.11.009
- Williams, N., 2017. The borg rating of perceived exertion (rpe) scale. *Occupational medicine* 67 (5), 404–405. DOI: 10.1093/occmed/kqx063



Simposio de Robótica, Bioingeniería y Visión por Computador 2024



Desarrollo y validación de modelos para la estimación de posiciones angulares en un exotraje a partir de sensores inerciales

Mansilla Navarro, P.^{a,*}, Muñoz, V.^a, Copaci, D.^a, Blanco Rojas, D.^a

^aDepartamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Automática, Universidad Carlos III de Madrid, Avenida de la Universidad 30, 28911, Leganés, Madrid, España.

Resumen

Varios trastornos neurológicos afectan al desarrollo motor de niños pequeños ralentizando su aprendizaje. Estos trastornos pueden ser tratados mediante dispositivos robóticos de rehabilitación basados en tecnologías flexibles, también conocidos como exotrajes; en lugar de exoesqueletos rígidos, debido al alto coste y complejidad asociados. Como consecuencia, surge la necesidad de desarrollar sistemas de medida que no estén basados en mediciones angulares sobre ejes de rotación fijos. A lo largo de este proyecto, se ha diseñado un banco de pruebas que permitiera la validación de la medida obtenida por sensores inerciales colocados directamente sobre el cuerpo del paciente. Como resultado, se ha verificado que la medida era apropiada para la predicción en el caso de los ángulos de la rodilla, pero era altamente imprecisa en el caso del tobillo, donde se ha conseguido una mejora considerable mediante el uso de algoritmos basados en Procesos Gaussianos.

Palabras clave: Neurorrehabilitación, Robótica, Modelado del rendimiento humano, Tecnología de asistencia e Ingeniería de rehabilitación, Inteligencia Artificial.

Development and validation of models for estimating an exosuit angular positions from inertial sensors.

Abstract

Several neurological disorders such as cerebral palsy, epilepsy, autism, and other congenital disorders, affect the motor development of young children. These disorders can be treated using robotic rehabilitation devices based on flexible technologies, also known as exosuits; rather than rigid exoskeletons, due to the high cost and complexity associated. Consequently, there is a growing need to develop measurement systems that are not based on angular measurements taken from fixed structures around the device axes of rotation. Throughout this project, a test bench has been designed to validate the measurements obtained by inertial sensors placed directly on top of the patient's body. As a result, the knee angle measured was proven accurate. However, concerning the ankle flexo-extension, the measurement was highly inaccurate, achieving a considerable improvement through the use of algorithms based on Gaussian Processes.

Keywords: Neurorrehabilitation, Robotics, Modeling of human performance, Assistive technology and rehabilitation engineering, Artificial Intelligence.

1. Introducción

Varios trastornos neurológicos, como la parálisis cerebral, la epilepsia, el autismo y otros trastornos congénitos, afectan al desarrollo motor de niños pequeños (Sontheimer, 2021); retrasando hitos del desarrollo como caminar independientemente, que generalmente se logra entre los 18 y 24 meses (CCDP, 2024). Estos trastornos afectan al sistema nervioso y, en consecuencia, al sistema locomotor, especialmente al desarrollo

muscular (elongación, fuerza y contracción muscular) (Tecglen García et al., 2014). La espasticidad, común en estos pacientes, dificulta la flexo-extensión de la rodilla (Winter, 1983); y puede ser tratada a través de movimientos lentos alrededor de determinados rangos de movilidad (Tecglen García et al., 2014), (Weitzman, 2005), (Helsel et al., 2001).

En el proyecto "Discover2Walk", junto con el Hospital Niño Jesús, y El Consejo Superior de Investigaciones Científi-

*Autor para correspondencia: pamansil@ing.uc3m.es
Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)

cas (CSIC), se propuso el uso de un exoesqueleto para ayudar a este tipo de pacientes pediátricos. El objetivo principal del proyecto era ayudar a niños en las primeras etapas de su desarrollo neurológico y motor, aumentando su fuerza muscular y contribuyendo a su neuroplasticidad al imitar el movimiento angular de rodilla y tobillo durante la marcha (Harvey, 2009), (Silveira-Moriyama, 2017). Debido a la falta de eficacia de las intervenciones manuales actuales, el uso de exoesqueletos podría beneficiar a pacientes y fisioterapeutas (Lerner et al., 2017). Sin embargo, los exoesqueletos existentes tienen ciertas limitaciones asociadas a la edad de los pacientes (Borggraefe et al., 2008), (Sanz-Merodio et al., 2016); y están restringidos a entornos de investigación debido a su alto costo y complejidad (Lee et al., 2020). Además, la falta de flexibilidad y la mala alineación de los exoesqueletos con respecto a las articulaciones biomecánicas puede afectar negativamente a la movilidad de los pacientes. Especialmente en las rodillas, donde el eje de rotación no es fijo, sino que se desplaza en el plano sagital conforme se produce la flexión (Sanjuan Cervero et al., 2005); y en los tobillos, donde la combinación de movimientos no se hace alrededor de un único eje, sino que es el resultado del movimiento alrededor de diferentes estructuras óseas. Pons (2019) destaca la importancia de adoptar arquitecturas más flexibles y biomiméticas, conocidas como exotrajes (Asbeck et al., 2014). Se sugiere entonces el uso de actuadores flexibles, como las Aleaciones con Memoria de Forma (SMA, por sus siglas en inglés) (Mohd Jani et al., 2014). Concretamente, se utilizó una aleación compuesta por Níquel-Titanio (NiTi) para asistir en la flexoextensión de la rodilla y del tobillo. Estos actuadores funcionaban como músculos artificiales, unidos mediante tendones a las zonas de actuación deseadas en un traje completamente flexible; respetando los ejes de rotación naturales (Mansilla Navarro et al., 2024).

Surgió, entonces, la necesidad de utilizar sistemas de sensorización que se adaptaran a la naturaleza flexible de los exotrajes. No era posible la colocación de sensores en el eje de rotación del exoesqueleto, puesto que ya no se disponía de este tipo de estructuras rígidas para guiar el movimiento. En su lugar, se utilizó una combinación de sensores inerciales colocados sobre el cuerpo del paciente que permitían obtener las posiciones angulares de las diferentes articulaciones implicadas (Mansilla Navarro et al., 2024). Por lo tanto, el principal objetivo de este estudio fue utilizar un banco de pruebas que permitiera validar las medidas obtenidas por los sensores inerciales y, en su defecto, entrenar un algoritmo de Inteligencia Artificial (IA) que pudiera mejorar estas predicciones.

2. Metodología

A lo largo de esta sección se describe la metodología utilizada para el desarrollo del proyecto. Para empezar, se explica el banco de pruebas utilizado, así como los sensores embebidos en el mismo. A continuación, se realiza una breve explicación del algoritmo de medida utilizado para la medida de los sensores inerciales. Finalmente, se explica brevemente el algoritmo de Inteligencia Artificial utilizado para mejorar las predicciones. Todos estos sistemas arrojan un resultado en términos de posiciones angulares.

Estas medidas articulares se incorporan posteriormente como realimentación a un lazo de control cuya entrada es una referencia del ciclo de la marcha. Para adecuar estas referencias a diferentes individuos y velocidades de la marcha se utilizaron fuentes de la literatura (Koopman et al., 2014), que proporcionan las referencias angulares en cada uno de los ejes del espacio. Como la asistencia se realizó en la flexoextensión de la rodilla y del tobillo, las referencias seleccionadas fueron las relativas a la rodilla y al tobillo en el plano sagital.

Cabe destacar que los rangos angulares que se desean medir son aquellos involucrados en la actuación del exotraje, que coinciden con aquellas presentes en el ciclo de la marcha. En este caso, se han recogido en la Tabla 1. Es importante destacar, entonces, que se ha hecho un estudio de precisión para estos rangos concretos, quedando fuera del objeto de estudio la verificación y validación de otros rangos articulares.

Tabla 1: Ángulos Máximos y Funcionales durante el ciclo de la marcha

Movimineto	Rodilla	Tobillo
Flexión Funcional(°)	60	20
Extensión Funcional (°)	0	15

2.1. Banco de Pruebas

El banco de pruebas utilizado se basa en un desarrollo llevado a cabo por el equipo de investigación. Se trata de una pierna que imita las medidas antropométricas de un individuo de 3 años de edad (ver Tabla 2)

Tabla 2: Dimensiones del Banco de Pruebas

Segmento	Longitud [cm]	Diámetro Máximo [cm]
Muslo	22.5	7.3
Pierna	17.8	5.1
Pie	14.2	3

Este banco de pruebas está sensorizado. Para ello, se incorporaron sensores absolutos de rotación tanto en flexo-extensión de la rodilla, como en flexión plantar y dorsal del tobillo. Además, el grado de libertad de prono-supinación del tobillo también fue replicado (aunque no sensorizado) para imitar un movimineto más natural del tobillo y tomar las medidas teniendo en cuenta este movimiento.

El sensor utilizado fue el ams OSRAM AS5045-SS-EK-DB, un sensor de rotación basado en el Efecto Hall, con una precisión de 0.0879 grados por paso y un límite en la frecuencia de medida de 36.6 rpm o $219.6 \text{ }^\circ \cdot \text{s}^{-1}$.

La lectura y sincronización de los datos se realizó a partir de una tarjeta Discovery STM-32F407, que contiene un microcontrolador STM32F407VGT6. Como el sensor de posición angular es un sensor absoluto, no depende del punto en el que se inicie la lectura. De esta forma, la calibración fue muy sencilla. Solo fue necesario realizar una calibración estática en una posición que se consideraba inicial, obteniendo el offset. A continuación, se restaba el valor del offset a la lectura en cada posición. Esta calibración se puede realizar para diferentes posiciones iniciales. La comunicación con la tarjeta STM-32F407 se realizó a partir de un puerto serial mediante una NVIDIA Jetson Nano.

2.2. Sensores Inerciales

En el caso de los sensores inerciales, se utilizó el modelo Bosch SensorTec BNO-055. Para poder medir los ángulos de la rodilla y el tobillo, hicieron falta tres sensores. Se colocó uno en el muslo, uno sobre la tibia y el último en el empeine del antepié. Para la medida de la posición angular de la rodilla en el plano sagital se utilizó el sensor sobre el muslo como referencia, y el sensor en la tibia como variable. En el caso del ángulo del tobillo, se utilizó el sensor sobre la tibia como referencia, y el sensor sobre el tobillo como variable. La lectura se hizo a partir de los valores de los cuaternios (q_0, q_1, q_2 y q_3), que fueron convertidos en ángulos de vuelo (Yaw, Pitch, Roll) a partir de (1), (2) y (3). Como se analizó únicamente la posición angular en el plano sagital, y debido a la colocación de los sensores en el traje, se aisló la medida en Pitch para analizar la respuesta.

$$Roll = \tan^{-1} \left(\frac{2q_0q_1 + 2q_2q_3}{1 - 2(q_1^2 + q_2^2)} \right); \quad (1)$$

$$Pitch = \sin^{-1} (2q_0q_2 - 2q_3q_1); \quad (2)$$

$$Yaw = \tan^{-1} \left(\frac{2q_0q_3 + 2q_1q_2}{1 - 2(q_2^2 + q_3^2)} \right); \quad (3)$$

La lectura y sincronización de los datos se realizó de la misma manera, a partir de una tarjeta Discovery STM-32F407. En este caso, la calibración se realizó de manera relativa. Se seleccionó como posición angular inicial para rodilla y tobillo una posición erguida del paciente. Debido al balanceo asociado a esta postura erguida, ambos offset se calcularon como un valor medio, que compense estos balanceos. Estos offset tenían en cuenta la posición de cada sensor en el espacio con respecto a la gravedad; y la posición relativa entre ellos en el momento de la calibración. La posición obtenida se nombrará en adelante como posición estimada a partir de BNO-055.

El esquema de las conexiones y colocación de los sensores está recogido en la Figura 1. Los sensores inerciales de la pierna derecha utilizaban puertos I²C, que en el desarrollo completo del exotraje, comparten con los sensores inerciales de la pierna izquierda.

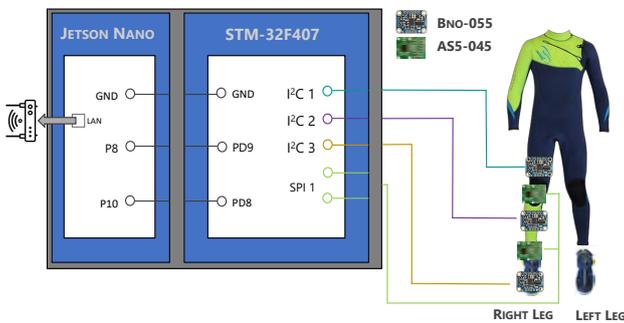


Figura 1: Electronic and hardware scheme.

2.3. Predicción Usando Procesos Gaussianos

Los Procesos Gaussianos (GP) proporcionan un enfoque bayesiano para modelar funciones complejas y no lineales sin imponer una estructura fija. En lugar de aprender parámetros explícitos, buscan una función óptima que relacione los datos de entrada con los de salida, considerando el ruido. Esto permite modelar la incertidumbre inherente como una distribución

de probabilidad sobre funciones, en lugar de un único mapeo determinístico. Además de estimaciones puntuales, los Procesos Gaussianos ofrecen medidas de incertidumbre basadas en la desviación estándar, lo que los hace valiosos para tareas que requieren predicción confiable. En lugar de los Procesos Gaussianos Exactos (GPE), se prefieren los Procesos Gaussianos Aproximados (GPA), que abordan limitaciones computacionales utilizando puntos de inducción para reducir la complejidad temporal y de memoria (Ballester et al., 2024).

En este caso concreto, se entrenaron dos modelos diferentes. Uno para predicción del ángulo en tobillo, y otro para predicción del ángulo en rodilla. En ambos casos, los valores de entrada al sistema fueron los valores de Yaw, Pitch y Roll; tanto para el sensor de referencia, como para el sensor variable. Estos valores fueron calibrados para los mismos instantes de tiempo que los valores procedentes de los sensores absolutos de posición. Como valor de salida se le proporcionaron ambas lecturas de los sensores de posición absolutos respectivamente que, debido a su alta precisión, se consideraron valores fiables y precisos. Además, también se obtuvieron las predicciones obtenidas directamente de los sensores inerciales de forma simultánea, para su posterior comparación. En el caso de la rodilla, el modelo fue entrenado con alrededor de 35 000 datos, mientras que en el caso del tobillo, se utilizaron cerca de 90 000 datos. Esta diferencia en la toma de datos viene dada por la mayor incertidumbre asociada a las medidas del tobillo. La rodilla únicamente tiene movimiento en el plano sagital. Aunque es cierto que tiene una cierta movilidad en los otros dos ejes del espacio, esta es mínima y, aunque el banco de pruebas tiene también cierta movilidad en estos ejes debido a las tolerancias en la impresión del mismo, sus efectos no son tan llamativos en la toma de datos. Además, las medidas se tomaron para diferentes medidas de calibración y para diferentes alturas en la posición del sensor respecto al eje longitudinal de cada segmento. Una parte del datasheet utilizado se dejó al margen para testear y comparar modelos. La posición obtenida se nombrará en adelante como posición estimada a partir de GPA.

3. Resultados

A lo largo de esta sección se van a evaluar los resultados obtenidos para las medidas realizadas en el tobillo y en la rodilla.

La capacidad de predicción, tanto de las posiciones estimadas directamente a partir de las medidas de los sensores inerciales, como a partir de los modelos basados en GPA obtenidos; se evalúa utilizando tres métricas: el Error Absoluto (AE, (4)) para cada instante de tiempo, el Error Cuadrático Medio (RMSE, (5)) y el Coeficiente de Determinación (R^2 , (6)). Donde n es el número total de observaciones o muestras; y_i , las posiciones reales obtenidas mediante los sensores de posición absolutos; e \hat{y}_i , las posiciones estimadas a partir de los BNO-055 y de GPA.

$$AE_i = |y_i - \hat{y}_i| \quad (4)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (5)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (6)$$

Tanto para la rodilla, como para el tobillo, los errores del cálculo obtenido directamente a partir de las medidas de los sensores inerciales fueron evaluados en primer lugar. A continuación, se analizaron las mismas métricas para los modelos basados en GPA obtenidos.

3.1. Rodilla

Los resultados obtenidos para los ángulos medidos de manera directa en rodilla pueden observarse en la Figura 2.

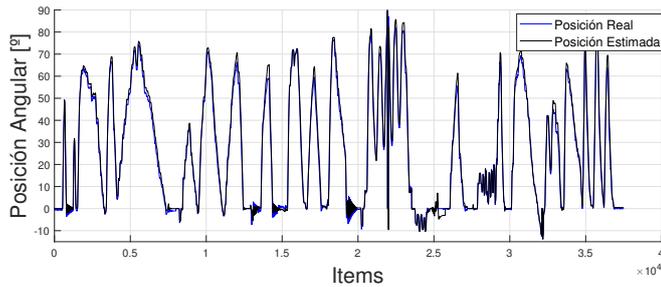


Figura 2: Comparación entre las posiciones obtenidas para la rodilla. Azul. Posición real. Negro. Posición estimada a partir de BNO-055.

Si se hace zoom sobre una de los ciclos de subida y bajada de la posición angular (flexo-extensión de la rodilla, Figura 3), se puede observar cómo los errores son más pequeños conforme más cercanos están al punto de calibración. Además, se puede observar que el error no crece a lo largo del tiempo, sino que alrededor de los puntos de calibración el error suele tender a cero. De hecho, si se observa el Error Absoluto (EA) en estos mismos puntos del espacio, se puede apreciar esta subida conforme se alejan del punto de calibración, y esta bajada cuando vuelve a valores cercanos.

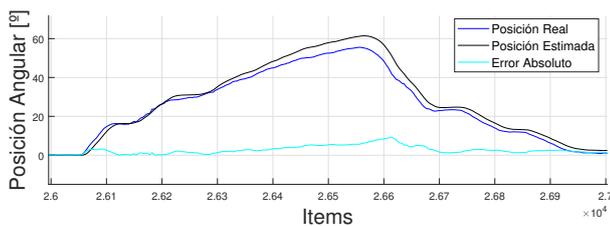


Figura 3: Comparación entre las posiciones obtenidas para la rodilla. Azul. Posición real. Negro. Posición estimada a partir de BNO-055. Azul cian. EA.

Analizando su Coeficiente de Determinación ($R^2 = 0,9873$), se reitera esta baja incertidumbre asociada a las medidas. Sin embargo, atendiendo al Error Cuadrático Medio ($RMS E = 2,8^\circ$), se valoró la posibilidad de encontrar algún modelo que mejorase las medidas manteniendo esta incertidumbre en valores aceptables. Para ello, se creó un modelo basado en GPA atendiendo a los valores de Yaw, Pitch y Roll de cada uno de los sensores inerciales. El resultado de los valores de $R^2 = 0,9593$ y $RMS E = 0,01456^\circ$, consigue arrojar mejores resultados en términos de error medio, aunque el valor del coeficiente de determinación se reduzca en pocas unidades (0,0280), es decir, menos del 3 %.

3.2. Tobillo

Los resultados obtenidos para los ángulos medidos de manera directa en el tobillo pueden observarse en la Figura 4.

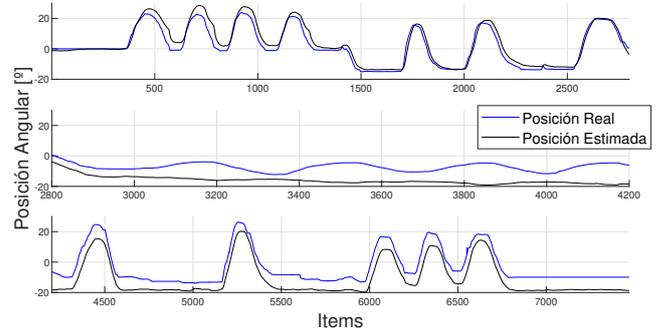


Figura 4: Comparación entre las posiciones obtenidas para el tobillo. Azul. Posición real. Negro. Posición estimada a partir de BNO-055. Gráfica de arriba: Movimiento del tobillo sin pronosupinación y sin movimiento de rodilla. Gráfica del medio: Movimiento del tobillo con pronosupinación. Gráfica de abajo: Movimiento de tobillo con flexión extensión de rodilla.

Se ha separado la graficación en tres momentos diferentes. La primera representa el movimiento del tobillo sin pronosupinación y sin movimiento de rodilla; la segunda, el movimiento del tobillo con pronosupinación simultánea; y la última, el movimiento de tobillo mientras se produce flexión extensión de rodilla. El valor de las medidas propuestas para la evaluación del rendimiento es $RMS E = 6,9^\circ$ y $R^2 = 0,63$. Lo que traduce la elevada incertidumbre prevista y genera un error demasiado elevado, sobre todo en el reducido rango de trabajo en que se flexoextiende el tobillo durante la marcha. Si se analizan las métricas para cada una de estas graficaciones, se puede observar como $RMS E_a = 3,3^\circ$ y $R_a^2 = 0,92$; $RMS E_b = 9,1^\circ$ y $R_b^2 = 0$; y $RMS E_c = 7,2^\circ$ y $R_c^2 = 0,7$. Esto permite apreciar que la fuente de variabilidad no explicada por el modelo parte, mayoritariamente, de esos movimientos de pronosupinación que, debido a la simplificación del modelo alrededor de Pitch, no están incluidas en el sistema. Además, cuando el tobillo se mueve de manera aislada en flexo-extensión, gran parte de la variabilidad está capturada con este ajuste, y el error es bastante menor. Cuando se incorpora la flexoextensión de la rodilla, el error crece considerablemente, aunque la variabilidad no tanto (puesto que, aunque es un movimiento combinado, se produce únicamente en el plano sagital).

Atendiendo a todos estos análisis, es obvio que hace falta un modelo que permita capturar esta variabilidad y pueda arrojar mejores resultados.

Para su cálculo, se tomaron medidas en el tobillo durante más de 20 minutos, consiguiendo una base de datos de cerca de 90 000 observaciones. El entrenamiento del modelo utilizó como datos de entrada los datos de Yaw, Pitch y Roll de cada uno de los sensores inerciales, y como dato de salida el valor conocido de la posición para estos datos. Todos estos valores se normalizaron en torno a sus valores máximos y mínimos para conseguir un aporte uniforme (entre 0 y 1) de cada medida a la base de datos. Para el test, se aisló una parte de la base de datos que el modelo no había visto nunca (8 000 muestras, en torno al 10 % de la muestra total), y se hizo una comparación del valor máximo del Error Absoluto, de RMSE y de R^2 comparando los

datos estimados de forma directa y los datos estimados a partir de GPA. El resultado de esta comparación puede observarse en las Figuras 5 y 6 y en la Tabla 3.

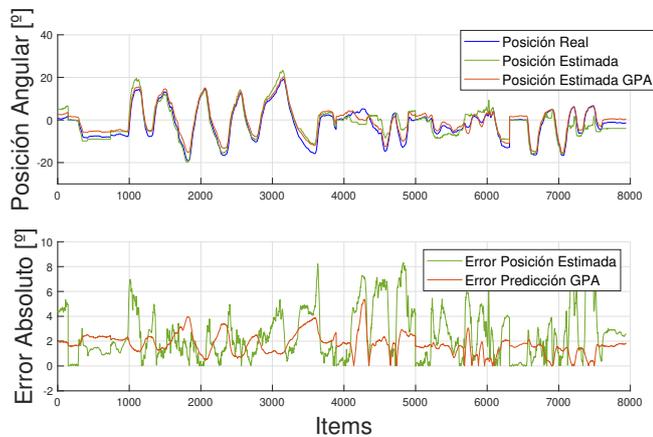


Figura 5: Comparación entre las posiciones obtenidas para el tobillo. Azul. Posición real. Verde. Posición estimada a partir de BNO-055. Naranja. Posición estimada a partir de GPA. Gráfica de Arriba: Posición angular real y de las predicciones. Gráfica abajo: Error Absoluto de cada tipo de medidas.

Analizando la Figura 5, se puede observar como los valores estimados a partir del modelo basado en GPA hacen un seguimiento más preciso de los datos reales. Además, el error absoluto presenta oscilaciones más marcadas en los datos estimados de manera directa, generando valores máximos más elevados.

Tabla 3: Comparación Métricas para las estimaciones realizadas en tobillo

Métrica	Estimación BNO-055	Estimación GPA
EA máximo [°]	9.060	4.7310
RMSE [°]	3.985	3.2259
R ²	0.7201	0.8316

Si ahora se observa la Tabla 3, estas predicciones se confirman; puesto que, aunque el RMSE es similar en ambos casos, en el caso de los GPA se mantiene más bajo y más estable, mientras que en el caso de las estimaciones directas, se producen mayores picos de error. Además, más de un 10 % más de variabilidad es explicada por este nuevo modelo, arrojando datos mucho más adecuados para la aplicación planteada.

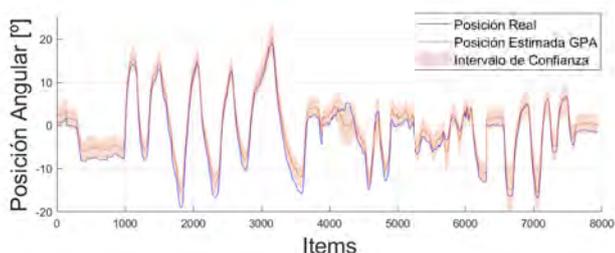


Figura 6: Media de predicciones del GPA junto con su intervalo de confianza. Azul. Posición real. Naranja. Posición estimada a partir de GPA.

Por otro lado, la Figura 6 pone de manifiesto la ventaja mencionada en el apartado 2.3; donde se puede observar, además del valor medio de la predicción propuesta por el modelo, el

intervalo de confianza creado a partir de los valores de la variabilidad de los datos. Cabe destacar que los valores reales caen dentro de esta franja en un 87 % de los casos.

El tiempo necesario para obtener cada predicción en este modelo es de $7,192 \cdot 10^{-4}$ segundos.

4. Discusión

Imitando el esquema del apartado anterior, se han llevado a cabo dos análisis diferenciados con respecto a la evaluación de los resultados obtenidos para la rodilla y para el tobillo.

4.1. Rodilla

Como se puede observar, los valores de R² son muy similares para los valores directamente calculados a partir de los sensores inerciales, como para los valores obtenidos a partir del modelo. Sí que es verdad que los datos de RMSE mejoran cuando se aplica el modelo basado en GPA. El problema es que también afecta al gasto computacional (aproximadamente $7,71 \cdot 10^{-4}$ segundos se tarda en realizar cada predicción). Valorando la aplicación final del dispositivo, una rehabilitación de la marcha alrededor de rangos articulares de forma controlada, y dado el ínfimo error que se produce en el cálculo directo, se podría decir que es más interesante priorizar la rapidez en cuanto a la lectura de los sensores, que la precisión en rangos de 2° de error medio que ofrece el cálculo directo. Analizando otras aplicaciones de este tipo, incluyendo estructuras rígidas con medidas angulares respecto a un eje de rotación; se puede observar que, incluso el simple desplazamiento del miembro inferior alrededor de correas de sujeción, ya daría errores de medida superiores a la media del error obtenida. Además, observando las gráficas, se puede ver cómo estos errores no se acumulan en el tiempo, sino que cuando nos acercamos al punto de calibración, los errores son menores; y conforme nos alejamos, estos crecen por posibles imprecisiones en la medida.

Como se ha discutido anteriormente, los buenos resultados de esta medida directa se deben a la escasez de incertidumbre asociada a este tipo de medidas. En este caso, aunque el conjunto de la pierna puede girar en otros ejes del espacio, la tibia respecto del fémur solo girará alrededor del plano sagital. Especialmente en esta aplicación, donde el giro de cadera también se encuentra acotado al eje sagital Delgado-Oleas et al. (2023). Por lo tanto, se puede concluir que se ha validado el sistema de medida directo a partir de sensores inerciales en la articulación de la rodilla con un $RMS E = 2,8^\circ$ y un $R^2 = 0,9873$.

4.2. Tobillo

Como se puede observar, los valores de EA y R² son muy diferentes para los valores directamente calculados a partir de los sensores inerciales, como para los valores obtenidos a partir del modelo. Los datos mejoran considerablemente cuando se aplica el modelo basado en GPA. Esta mejora también afecta al gasto computacional, ya que el tiempo necesario para elaborar una predicción es de $7,192 \cdot 10^{-4}$ segundos. Valorando la aplicación final del dispositivo, una rehabilitación de la marcha alrededor de rangos articulares de forma controlada; la frecuencia de muestreo utilizada en los sensores (0.01 segundos); y dado el elevado error que se produce en el cálculo directo, se podría decir que es más interesante priorizar la precisión en

cuanto a la lectura de los sensores, frente al gasto computacional en este caso. Esta diferencia de estrategia respecto al caso anterior se debe a que el $RMS E = 3,985^\circ$ que ofrece el cálculo directo es elevado, sobre todo atendiendo a que el valor del Error Absoluto Máximo está en torno a $EA = 9,060^\circ$ y al estrecho rango de medida alrededor de la actuación del tobillo. Además, el valor de $R^2 = 0,7201$ traduce la elevada incertidumbre, que ya se advertía en anteriores apartados; el tobillo, al contrario que la rodilla, tiene movimiento en diferentes ejes del espacio. Además, al contrario que en otras articulaciones, como el hombro o la cadera, el tobillo no tiene forma de bola y gira respecto a una única unión ósea, sino que lo hace alrededor de diferentes estructuras óseas (tibia, peroné, calcáneo, astrágalo, y pequeños huesos que conforman el empeine) dificultando la creación de un modelo de medida sencillo sin limitar el movimiento al plano sagital (impidiendo el movimiento natural del pie durante la marcha).

Los resultados del modelo arrojan valores más adecuados para la aplicación y frecuencia de actuación requeridas, aunque aún generan cierto incertidumbre; con un $RMS E = 3,2259^\circ$, un $R^2 = 0,8316$, y un 87 % de los datos dentro de la franja de incertidumbre de los GPA.

Es complicado analizar los resultados respecto a otras aplicaciones similares, puesto que pocos dispositivos de rehabilitación incluyen actuación en el tobillo. Además, no se suelen incluir estimaciones del error obtenido en los sistemas de medida, dado que suelen realizarse mediante estructuras rígidas. Sin embargo, estas medidas rígidas, también pueden traducirse en errores, ya que miden la actuación del exoesqueleto en sí, no de los segmentos de cada usuario, pudiendo producirse desplazamientos y desajustes que afecten a esta medida.

5. Conclusiones

Atendiendo a los resultados, se han recogido los puntos clave que resumen las aportaciones obtenidas en la investigación.

En el caso de la rodilla, la estimación directa realizada a partir de los sensores inerciales genera valores adecuados en cuanto al error obtenido y al coeficiente de determinación. Esto se debe a que hay poca incertidumbre asociada a este tipo de medidas, ya que la rodilla se flexiona y extiende en el plano sagital. El modelo obtenido mediante Procesos Gaussianos, aunque mejora el Error Cuadrático Medio reduciéndolo a valores prácticamente irrelevantes, no supone una mejora considerable para la aplicación teniendo en cuenta el coste computacional añadido. Por lo tanto, se ha decidido prescindir de modelos auxiliares para esta medida.

En el caso del tobillo, la estimación directa realizada a partir de los sensores inerciales genera valores que demuestran la elevada incertidumbre presente en la articulación. Dicha incertidumbre resulta del movimiento del tobillo en diferentes ejes del espacio. El modelo obtenido a partir de GPA genera mejores resultados, sobre todo atendiendo a valores máximos del Error Absoluto, reduciéndolo a valores que podrían considerarse apropiados, con un gasto computacional viable dada la frecuencia de muestreo utilizada.

Finalmente, la comparación de los resultados obtenidos con la literatura es complicada, ya que pocos dispositivos de rehabilitación incluyen actuación en el tobillo. Además, no se suelen incluir estimaciones del error obtenido, dado que suelen las

medidas se toman sobre estructuras rígidas, obviando el desplazamiento entre el dispositivo y el usuario.

Agradecimientos

Esta investigación ha recibido financiación de Discover2Walk (PID2019-105110RB-C32), financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y de STRIDE-UC3M (PDC2022-133898-C32) financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y por la Unión Europea NextGenerationEU/PRTR.

Referencias

- Asbeck, A., De Rossi, S. M. M., Galiana, I., Ding, Y., Walsh, C. J., 2014. Stronger, smarter, softer: Next-generation wearable robots. *IEEE Robot. Autom.* 21 (4), 22–33.
- Ballester, C., Muñoz, V., Copaci, D., Moreno, L., Blanco, D., 2024. Design of a soft sensor based on silver-coated polyamide threads and stress-strain modeling via gaussian processes. *Sensors and Actuators A: Physical* 367, 115058.
- Borggraefe, I., Meyer-Heim, A., Kumar, A., Schaefer, J. S., Berweck, S., Heinen, F., 2008. Improved gait parameters after robotic-assisted locomotor treadmill therapy in a 6-year-old child with cerebral palsy. *Movement Disorders* 23 (2), 280–283. DOI: 10.1002/mds.21802
- CCDP, 2024. Developmental milestones. Centre for Control Disease and Prevention, USA <https://www.cdc.gov/ncbddd/actearly/milestones/index.html>.
- Delgado-Oleas, G., Romero-Sorozabal, P., Lora-Millan, J., Gutierrez, A., Roncon, E., 2023. Bioinspired hierarchical electronic architecture for robotic locomotion assistance: Application in exoskeletons. *IEEE Access* 11, 131610–131622.
- Harvey, R. L., 2009. Improving poststroke recovery: Neuroplasticity and task-oriented training. *Current Treatment Options in Cardiovascular Medicine* 11 (3), 251–259.
- Helsel, P., McGee, J., Graveline, C., 2001. Physical management of spasticity. *Journal of Child Neurology* 16 (1), 24–30.
- Koopman, B., van Asseldonk, E. H., Van der Kooij, H., 2014. Speed-dependent reference joint trajectory generation for robotic gait support. *Journal of Biomechanics* 47 (6), 1447–1458. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2014.01.037
- Lee, H., Ferguson, P. W., Rosen, J., 2020. Lower limb exoskeleton systems—overview. *Wearable Robotics*, 207–229.
- Lerner, Z. F., Damiano, D. L., Park, H. S., Gravunder, A. J., Bulea, T. C., 2017. A Robotic Exoskeleton for Treatment of Crouch Gait in Children with Cerebral Palsy: Design and Initial Application. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering* 25 (6), 650–659. DOI: 10.1109/TNSRE.2016.2595501
- Mansilla Navarro, P., Copaci, D., Blanco Rojas, D., 2024. Design and control of a soft knee exoskeleton for pediatric patients at early stages of the walking learning process. *Bioengineering* 11 (2), 188.
- Mohd Jani, J., Leary, M., Subic, A., Gibson, M. A., 2014. A review of shape memory alloy research, applications and opportunities. *Materials and Design* 56, 1078–1113. DOI: 10.1016/j.matdes.2013.11.084
- Pons, J., 2019. Witnessing a wearables transition. *Science* 365 (6454), 636–637.
- Sanjuan Cervero, R., Jiménez Honrado, P. J., Gil Monzo, E., Sanchez Rodriguez, R., Fenollosa Gomez, J., 2005. Biomecánica de la rodilla *Biomechanics of the knee. Patología del aparato locomotor* 3 (3), 189–200.
- Sanz-Merodio, D., Plaza, A., Cestari, M., Sancho-Pérez, J., García, E., 2016. Mechanical description of atlas 2020, a 10-dof paediatric exoskeleton. 19th International Conference on Climbing and Walking Robots, (September), 12–14.
- Silveira-Moriyama, L., 2017. Neuroplasticity and neuromodulation in children. *European Journal of Paediatric Neurology* 21 (1), 3. DOI: 10.1016/j.ejpn.2016.11.011
- Sontheimer, H., 2021. *Diseases of the nervous system*. Elsevier.
- Tecglen García, C., et al., 2014. Guía para las personas que conviven con la Espasticidad. Universidad Nacional de Educación a Distancia.
- Weitzman, M., 2005. Terapias de rehabilitación en niños con o en riesgo de parálisis cerebral. *Rev Ped Elec* 2 (1), 47–51.
- Winter, D. A., 1983. Biomechanical motor patterns in normal walking. *Journal of motor behavior* 15 (4), 302–330.



Simposio de Robótica, Bioingeniería y Visión por Computador 2024



Sistema de visión por computador para análisis de la marcha

González-García, M.^{a,*}, Romero-Sorozábal, P., Delgado-Oleas, G., Rocon, E.

^a Centro de Automática y Robótica, CSIC-UPM, Ctra. Campo Real km 0.200, 28500 Madrid, España.

Resumen

La parálisis cerebral (PC) es una de las principales causas de discapacidad motora en niños. Su tratamiento se enfoca en la mejora de la funcionalidad e independencia del niño, siendo crucial una intervención temprana para la mejora del desarrollo motor, especialmente para la capacidad de caminar. El proyecto Discover2Walk (D2W) busca ayudar a estos niños a aprender a caminar mediante una plataforma robótica. En el marco de este proyecto se ha llevado a cabo este trabajo, en el que se ha desarrollado un sistema de visión por computador económico para el análisis de la marcha. La solución propuesta, desarrollada en un entorno ROS2, utiliza dos cámaras y la detección de la postura en 2D (mediante MediaPipe Pose) para generar una reconstrucción tridimensional de la postura. Además, el programa realiza un análisis cinemático en el plano sagital. Para su validación, se comparó el sistema propuesto con el software Kinovea® (ya utilizado en entornos clínicos). Los resultados demostraron una alta correlación entre ambos sistemas, en particular para cadera y rodilla.

Palabras clave: Ingeniería de Rehabilitación; Análisis e interpretación de bioseñales; Modelado, Simulación y Visualización de Sistemas Biomédicos; Procesamiento de Imágenes y Sistemas Biomédicos y Médicos; Visión estereoscópica

Paper Title in English, Bold Style

Abstract

Cerebral Palsy (CP) is one of the leading causes of motor disability in children. Its treatment focuses on improving the functionality and independence of the child, with early intervention being crucial for motor development, especially for the ability to walk. The Discover2Walk (D2W) project aims to assist these children in learning to walk using a robotic platform. Within the framework of this project, this work has been carried out, in which an affordable computer vision system for gait analysis was developed. The proposed solution in this paper, operating within a ROS2 environment, uses a calibrated two camera system and 2D pose detection (performed by MediaPipe Pose) to generate a 3D pose reconstruction. Furthermore, the program conducts a kinematic analysis in the sagittal plane. For its validation, a comparison between the proposed system and Kinovea® (a software already used in clinical settings) was performed. The results obtained showed a high correlation between both systems.

Keywords: Rehabilitation engineering and healthcare delivery; Bio-signals analysis and interpretation; Biomedical system modeling, simulation, and visualization; Biomedical and medical image processing and systems; Stereo Vision

1. Introducción

Los primeros años de vida juegan un papel fundamental en el desarrollo adecuado de habilidades motoras. En este contexto, aprender a caminar es clave para alcanzar autonomía y para la implicación en actividades sociales, las cuales ejercen una influencia positiva en el crecimiento tanto motor como cognitivo (Begnoche et al., 2016). Sin embargo, los niños con parálisis cerebral (PC) generalmente se encuentran privados de esta experiencia debido a las limitaciones en su desarrollo motor desde una edad temprana (Meyer-Heim et al., 2009). Alrededor del 90% de los pacientes con PC tienen dificultades

para caminar y presentan anomalías en la marcha (Llamas-Ramos et al., 2022)

Con la creciente evidencia de la neuroplasticidad y el desarrollo de la teoría del aprendizaje motor, las terapias para tratar los trastornos motores de la parálisis cerebral se han inclinado a intervenciones tempranas que fomenten terapias físicas con ejercicios repetitivos, intensivos y orientados a tareas específicas (Llamas-Ramos et al., 2022). Este tipo de terapias han demostrado tener resultados efectivos, incrementando las habilidades motoras en niños con PC (Meyer-Heim et al., 2009).

Tradicionalmente, el tratamiento para mejorar la marcha de pacientes con PC se basaba en fisioterapia e inyecciones de

*Autor para correspondencia: marta.gonzalez.garcia@csic.es

toxina botulínica para reducir la espasticidad (Llamas-Ramos et al., 2022). Sin embargo, las terapias de asistencia robótica para la marcha (RAGT, por sus siglas en inglés) se han establecido como alternativas a terapias tradicionales demostrando su efectividad en la mejora de la marcha y la calidad de vida de los pacientes (De Luca et al., 2022; Meyer-Heim et al., 2009). Actualmente existen varias plataformas robóticas utilizadas en ambientes clínicos para la rehabilitación de la marcha: Lokomat® (Riener et al., 2010), LOPES (Veneman et al., 2007) o el CPWalker (desarrollado por nuestro grupo) (Bayón et al., 2018).

Durante los procesos de rehabilitación, el estudio de la marcha o análisis de la marcha desempeña un papel clave en la identificación y diagnóstico de patologías y el diseño y desarrollo de terapias físicas para su tratamiento (Davids & Bagley, 2014). El análisis de la marcha en pacientes con PC es crucial a la hora de identificar irregularidades, guiar el desarrollo de intervenciones y cuantificar el progreso e impacto de los tratamientos.

Tradicionalmente, la evaluación de la marcha ha sido subjetiva, basándose en las observaciones y evaluaciones de los terapeutas (Muro-de-la-Herran et al., 2014). El continuo desarrollo de nuevas tecnologías ha permitido un análisis cuantitativo de la marcha y que este área siga teniendo una investigación activa. El método de análisis de marcha de referencia consiste en sistemas ópticos de captura de movimiento (MoCap) en 3D que utilizan cámaras y marcadores infrarrojos en laboratorios de marcha. Algunos ejemplos de esos sistemas MoCap son OptiTrack o VICON (Zhang et al., 2017). A pesar de que este tipo de evaluaciones cuantitativas han demostrado ser más efectivas, el análisis observacional de la marcha sigue siendo predominante debido a ciertos inconvenientes presentes en estos sistemas: el alto coste, la necesidad de un ambiente controlado, la dependencia de profesionales especializados en la colocación de los marcadores, la calibración de los sistemas, el procesamiento de los datos, etc. (Hellsten et al., 2021). Frente a estas limitaciones, los sistemas basados en sensores vestibles (*wearable*) han surgido como una alternativa menos costosa a los sistemas MoCap, aunque todavía presentan ciertas desventajas inherentes a cualquier sistema que dependa de marcadores.

Recientemente, algoritmos de aprendizaje profundo aplicados a visión por computador han conseguido avances significativos, especialmente algoritmos de estimación de posición sin marcadores. Esta tecnología es prometedora, puesto que podría convertirse en un método preciso para cuantificar y monitorear la marcha utilizando recursos mínimos y superando las limitaciones que oponen los sistemas que hacen uso de marcadores (Rupprechter et al., 2021). Es necesario seguir investigando para que estas tecnologías logren una precisión suficiente para poder ser aplicadas en entornos clínicos (El Kaid & Baña, 2023).

En este artículo se presenta un sistema de visión por computador sin marcadores diseñado para el análisis de la marcha en tiempo real, tanto en 2D como en 3D. Para ello se emplean dos cámaras RGB, dispuestas en una configuración triangular, para la reconstrucción tridimensional de la posición del paciente a partir de las estimaciones de posición 2D de ambas cámaras. Adicionalmente a la estimación de posición tridimensional, el sistema realiza un análisis cinemático en el

plano sagital de los perfiles angulares de la cadera, rodilla y tobillo. Para la validación preliminar del sistema, se estudió su desempeño en condiciones óptimas (marcha sana; N1) y en un entorno clínico durante sesiones de terapia de rehabilitación de la marcha de dos niños con PC (N2 y N3) con el apoyo del sistema robótico D2W.

2. Materiales y Métodos

2.1. Diseño del sistema

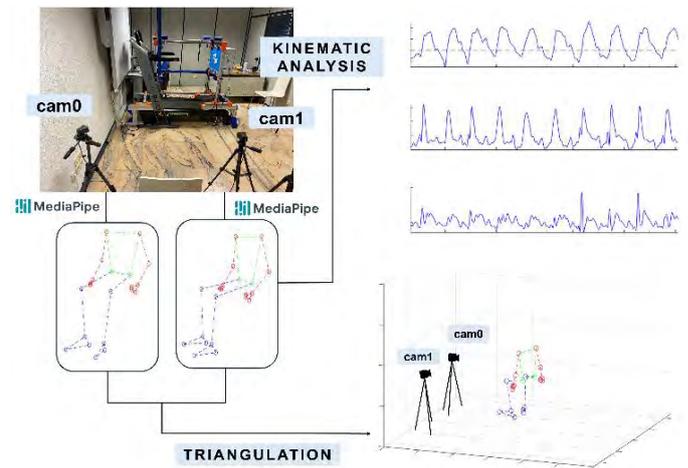


Figura 1. Diseño del sistema.

El sistema desarrollado, cuyo flujo de trabajo se ilustra en la Figura 1, utiliza dos cámaras StreamCam (Logitech, Suiza) con calidad de captura full HD 1080p y una frecuencia máxima de 60 fps. Para su funcionamiento, se empleó un portátil MSI Prestige 15 A12UD equipado con un procesador 12th Gen Intel(R) Core (TM) i7-1280P CPU @ 2.00 GHz y un sistema operativo Windows 11 Pro v: 22H2.

El programa se ha desarrollado en Python 3.8.2 y se ejecuta en un entorno de ROS2 Foxy como un nodo publicador. Utiliza MediaPipe Pose, una IA desarrollada por Google, que emplea el modelo BlazePose para extraer 33 puntos de referencia de las articulaciones del cuerpo humano para definir su postura (Lugaresi et al., 2019).

Para la evaluación del sistema se utilizó la plataforma robótica Discover2Walk (D2W) (Palomino-Díaz et al., 2021). Este robot está orientado a proporcionar terapia de rehabilitación de marcha a niños con PC durante sus primeros años de vida, permitiéndoles descubrir y experimentar cómo se camina mientras mejoran sus habilidades cognitivas y motoras. El diseño del D2W permite al niño caminar, generando patrones de marcha tridimensionales con una serie de cables motorizados mientras descarga parte de su peso en una cadera ortopédica.

2.2. Estimación de la postura con MediaPipe Pose

El proceso de estimación de postura consiste en la predicción de la posición de las articulaciones u otros puntos clave del cuerpo humano a partir de una imagen o vídeo. Los sistemas de estimación de postura sin marcadores pueden dividirse en cuatro componentes: el sistema de cámaras, el modelo del cuerpo humano, las características de la imagen para la captura del movimiento y los algoritmos para

determinar la forma, postura y ubicación del modelo (Colyer et al., 2018).

En este trabajo se utiliza la API para Python de MediaPipe Pose (MPP) junto con la librería OpenCV para extraer la posición de 22 de los 33 puntos de referencia en 2D. MPP ha mostrado resultados prometedores como herramienta para el análisis de la marcha (Gupta et al., 2023; Tony Hii et al., 2022).

Dado que el sistema desarrollado se enfoca en operar en tiempo real y para facilitar su integración, el programa se ejecuta como un nodo publicador en ROS2 Foxy. Esto posibilita la publicación en tiempo real de los resultados obtenidos. De esta manera, los resultados pueden ser visualizados en una interfaz o utilizados para animar el movimiento de un avatar en un entorno de realidad virtual o aumentada. Se ha observado que la inclusión de videojuegos en terapias de rehabilitación puede mejorar tanto la adherencia (Llamas-Ramos et al., 2022) como las capacidades motoras (Roberts et al., 2020), especialmente en terapias enfocadas a niños.

2.3. Estimación de posiciones 3D

Aunque MediaPipe Pose ha demostrado ser eficaz en la estimación de posiciones en dos dimensiones, su capacidad para determinar la profundidad usando una sola cámara presenta inconsistencias (Kim et al., 2023). Por esta razón, se adoptó un enfoque estéreo, utilizando dos cámaras, para obtener mediciones de profundidad más fiables y mejorar la estimación de la posición en 3D. Para asegurar el correcto funcionamiento del sistema estéreo, es esencial su calibración, obteniendo sus parámetros intrínsecos (propios de cada cámara) y extrínsecos (definen las posiciones relativas entre las cámaras). La Figura 3 muestra cómo estos parámetros definen la geometría del sistema y relacionan los diferentes sistemas de coordenadas.

Aunque la posición de las cámaras es un parámetro modificable, por motivos de espacio, en este trabajo las cámaras se colocaron formando 45° entre sí, con una de ellas posicionada perpendicularmente al movimiento para capturar el plano sagital (cam1).

2.3.1. Obtención de parámetros intrínsecos y extrínsecos

Para calibrar el sistema, primero se lleva a cabo una calibración individual de cada cámara para estimar los coeficientes de distorsión y los parámetros intrínsecos, representados en la matriz K, que incluyen la distancia focal (f_x, f_y) y el centro óptico de la cámara (c_x, c_y). Este proceso se realiza utilizando la librería OpenCV y se basa en el método de calibración de Zhang (Li et al., 2014). Este método implica la detección de un patrón de calibración plano de dimensiones conocidas, en este caso, un tablero de ajedrez, desde diferentes posiciones y orientaciones.

Para estimar los parámetros extrínsecos del sistema es necesario realizar una calibración estéreo. El proceso es similar a la calibración individual de cada cámara: se toman varias capturas al mismo tiempo con ambas cámaras del patrón de calibración en distintas posiciones y orientaciones. La Figura 2 muestra dos pares de imágenes del proceso de calibración del sistema. El resultado de este proceso es una matriz de rotación

R y un vector de traslación t que relaciona el origen de coordenadas de una cámara con otra, situando de esta manera el origen de coordenadas del mundo real, en este trabajo, en la cámara izquierda (cam0). Cuanto más precisa sea la calibración del sistema, más precisa será la estimación de los puntos de referencia en coordenadas reales en 3D.

Para asegurar la calidad de la calibración en este trabajo, se utilizó la Computer Vision Toolbox de MATLAB para comparar los resultados obtenidos con el código de calibración desarrollado en el programa. Se utilizó el error de reproyección para analizar la precisión y fiabilidad de la calibración; cuanto menor sea el valor (al menos inferior a un pixel), mayor será la calidad de la calibración.

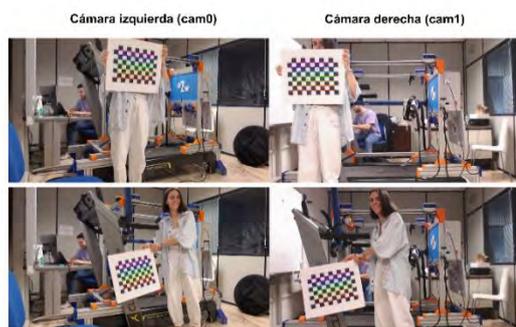


Figura 2. Estéreo calibración: detección de patrón con ambas cámaras.

Una vez se han estimado las matrices que definen la geometría del sistema y se ha calculado la matriz de proyección P, es posible estimar la postura en 3D en coordenadas del mundo real utilizando una Transformación Lineal Directa (DLT) para obtener la coordenada de profundidad. Esto se logra utilizando las correspondencias obtenidas de la estimación de la postura en 2D en las imágenes capturadas por cada cámara.

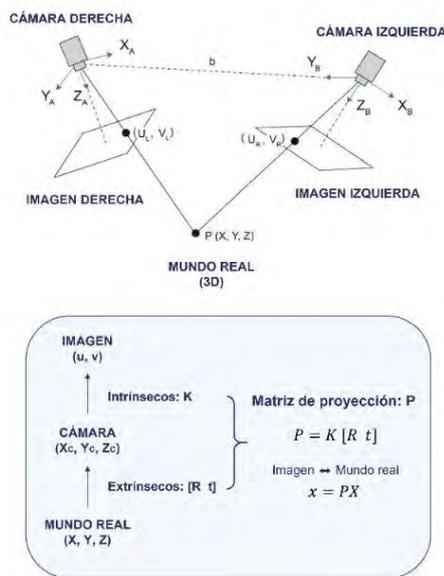


Figura 3. Sistema estéreo con dos cámaras y relación entre los diferentes sistemas de coordenadas a través de los parámetros intrínsecos y extrínsecos. Imagen basada en Tech Briefs (Group, 2012).

2.4. Análisis cinemático

El análisis cinemático del programa se realiza en el plano sagital, calculando los ángulos de rodilla, cadera y tobillo a

partir de las coordenadas estimadas por MPP en las imágenes de la cámara cam1. Para ello, se definen los ángulos siguiendo el modelo mostrado en la Figura 4 y se calculan para cadera, rodilla y tobillo con las Ecuaciones 1a, 1b y 1c, respectivamente.

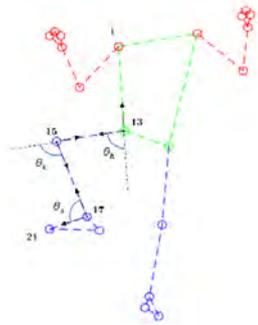


Figura 4. Modelo basado en BlazePose mostrando el ángulo de flexión/extensión de la cadera y rodilla y el ángulo de dorsi/plantar-flexión de tobillo.

$$\theta_c = 180 - \arccos\left(\frac{\overrightarrow{P_{13}P_1} \cdot \overrightarrow{P_{13}P_{15}}}{|\overrightarrow{P_{13}P_1}| |\overrightarrow{P_{13}P_{15}}|}\right) \quad (1a)$$

$$\theta_r = 180 - \arccos\left(\frac{\overrightarrow{P_{15}P_{13}} \cdot \overrightarrow{P_{15}P_{17}}}{|\overrightarrow{P_{15}P_{13}}| |\overrightarrow{P_{15}P_{17}}|}\right) \quad (1b)$$

$$\theta_t = \arccos\left(\frac{\overrightarrow{P_{17}P_{15}} \cdot \overrightarrow{P_{17}P_{21}}}{|\overrightarrow{P_{17}P_{15}}| |\overrightarrow{P_{17}P_{21}}|}\right) \quad (1c)$$

Los resultados angulares se compararon con los obtenidos por Kinovea®, un software de anotación de vídeo ya utilizado en entornos clínicos y deportivos (Fernández-González et al., 2020). En la Figura 5 se muestra una captura del análisis en este software. Además, se calculó el error cuadrático medio (RMSE) y el coeficiente de correlación de Pearson (r), que toma un valor de -1 cuando existe una relación lineal negativa entre las dos variables y un valor de 1 cuando existe una relación lineal. Ambas métricas se utilizaron para evaluar la precisión del método desarrollado en comparación con Kinovea®.

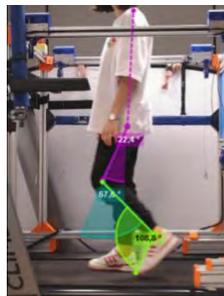


Figura 5. Captura del análisis cinemático en Kinovea®.

3. Resultados

Para evaluar el sistema, se llevó a cabo una evaluación cualitativa de la estimación de la postura en 3D. Además, se realizó un análisis cinemático de la marcha en la plataforma robótica D2W, tanto sin asistencia (NA) como con asistencia (A), comparando los resultados obtenidos con el programa

desarrollado frente a los de Kinovea®. En el entorno clínico, se evaluó el sistema con dos niños (N2 y N3) con parálisis cerebral, de 6 años y nivel 1 según la *Gross Motor Function Classification System* (GMFCS), durante unas pruebas en el Hospital Niño Jesús de Madrid.

3.1. Resultados del sistema estéreo

Los algoritmos para la estimación 3D de la postura fueron evaluados en dos entornos: marcha sana sobre suelo y condiciones de iluminación favorables (N1) y en entorno clínico con dos niños con PC (N2 y N3). Las estimaciones de MPP se muestran en la Figura 6a y los resultados de la reconstrucción 3D se ilustran en la Figura 6b y 6c.

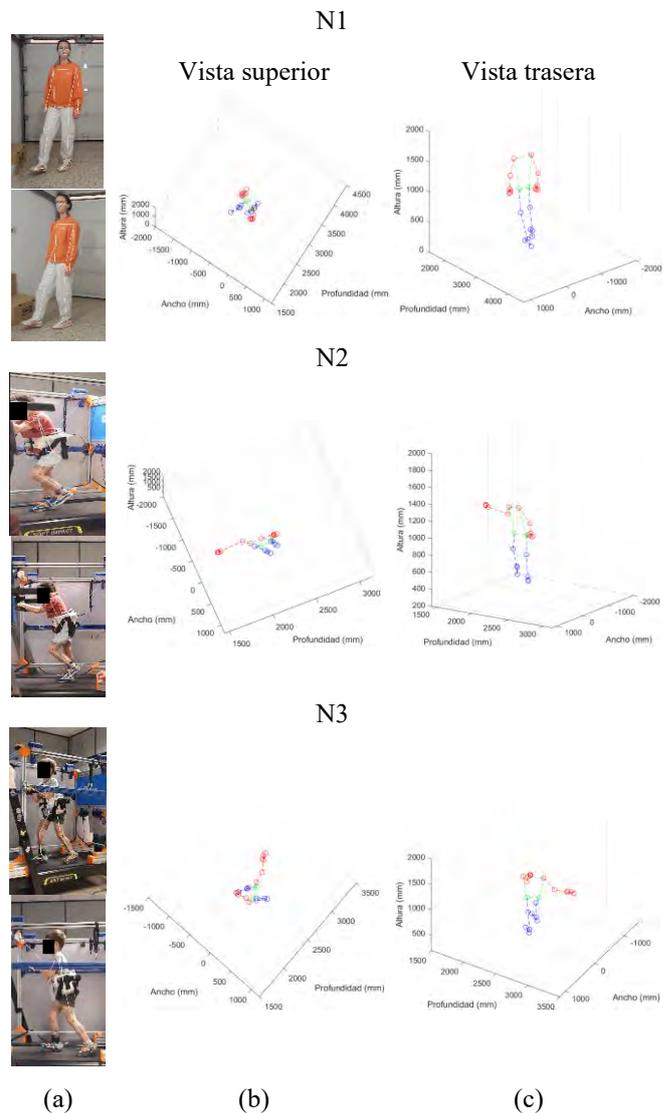


Figura 6. Reconstrucción de la postura 3D en coordenadas del mundo real en un entorno óptimo (N1) y un entorno clínico (N2 Y N3): (a) Captura desde las cámaras, (b) Vista superior y (c) Vista trasera de la reconstrucción.

3.2. Resultados de análisis cinemático

Los resultados del análisis cinemático de N1, N2 y N3 sin asistencia y con asistencia utilizando el D2W se ilustran en la Figura 7. Las gráficas muestran un ciclo de la marcha de las

mediciones del sistema representado en línea continua y de Kinovea® en línea discontinua, ambos para la configuración sin asistencia (rojo) y con asistencia (azul).

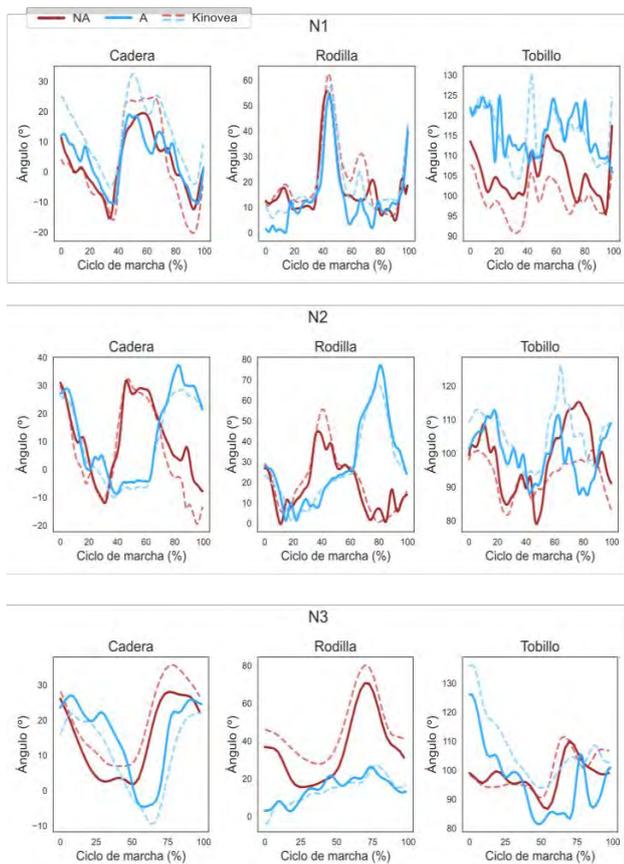


Figura 7. Gráficas angulares de cadera, rodilla y tobillo para los tres pacientes con Kinovea® (discontinuo) y el sistema desarrollado (continuo) para una marcha sin asistencia NA (rojo) y con asistencia A (azul).

Tabla 1: RMSE y r del análisis angular N1, N2 y N3 sin asistencia (NA) y con asistencia (A) entre Kinovea® y el sistema desarrollado.

		Cadera	Rodilla	Tobillo
N1-NA	RMSE (°)	6.963	7.634	6.715
	r	0.926	0.883	0.826
N1-A	RMSE (°)	8.836	6.223	5.920
	r	0.968	0.959	0.481
N2-NA	RMSE (°)	7.325	5.519	8.367
	r	0.931	0.947	0.795
N2-A	RMSE (°)	3.589	4.635	7.992
	r	0.986	0.984	0.731
N3-NA	RMSE (°)	5.619	11.639	4.528
	r	0.981	0.985	0.710
N3-A	RMSE (°)	6.077	3.199	12.138
	r	0.965	0.900	0.883

La Tabla 1 muestra los errores cuadráticos medios y la correlación entre las mediciones de Kinovea® y el sistema desarrollado para los tres pacientes sin asistencia y con asistencia.

4. Discusión

4.1. Estimación de la postura

La evaluación de la estimación de la postura se basó en criterios subjetivos debido a la ausencia de un sistema MoCap de referencia que permitiera cuantificar el error de la estimación. La implementación estéreo en el sistema mejora cualitativamente la estimación de profundidad realizada por MediaPipe Pose en un entorno controlado y óptimo. Sin embargo, en la evaluación en un entorno clínico se evidenciaron limitaciones del sistema. La estimación en 3D requiere una persona única con su rostro visible capturado por ambas cámaras; además, si algunos puntos de referencia quedan ocultos, la precisión de la estimación se ve comprometida y la profundidad no se estima correctamente. Estos factores son más frecuentes en este segundo entorno, resultando en una estimación de profundidad menos precisa, como se evidencia en la Figura 6. Aunque los resultados del sistema pueden no ser lo suficientemente precisos para un análisis clínico de la marcha, podrían ser adecuados para su implementación en un videojuego u otras aplicaciones que no requieran alta precisión. Por ejemplo, en el contexto del D2W, podría utilizarse como referencia de cuán bien la persona sigue la trayectoria generada por el robot. Sin embargo, es necesario realizar una evaluación cuantitativa utilizando un sistema de referencia MoCap como VICON, que permita estudiar el error de estimación.

4.2. Análisis cinemático

La precisión del análisis cinemático depende directamente de la precisión de la estimación de MPP, viéndose afectado por oclusiones de los puntos de referencia.

En los resultados obtenidos para N1, destacan altos valores de correlación (superiores a 0.80) entre el sistema desarrollado y Kinovea® para la rodilla y la cadera, tanto con asistencia como sin ella. Sin embargo, la correlación para el tobillo es menor con asistencia debido a la oclusión del pie por una barra en la plataforma robótica. Al retirarla y medir sin asistencia se obtuvo una correlación mayor, de $r = 0.82$.

En cuanto a N2 y N3, al igual que para la marcha sana, se obtuvieron valores de correlación altos, de nuevo, especialmente para cadera y rodilla, demostrando que el sistema funciona de manera similar a Kinovea®. La discusión se centra principalmente en los valores de correlación, puesto que los valores obtenidos para RMSE dependen de la amplitud de las señales. El tobillo muestra consistentemente correlaciones más bajas, posiblemente debido a su complejidad anatómica y patrón de movimiento, lo que dificulta la detección de los puntos de referencia por MPP.

Para N2, se observa una ligera mejora en la correlación con asistencia, sugiriendo que la estimación de la postura podría ser más precisa cuando el patrón de marcha se asemeja más a un patrón sano. Cuando se utiliza el D2W, el patrón de marcha se asemeja más a una marcha sana, facilitando la detección de los puntos de referencia y mejorando por ende los resultados.

Al igual que para la estimación de la postura tridimensional, el análisis cinemático se debe comparar con el

realizado por un sistema de referencia para análisis de marcha en una muestra más amplia.

5. Conclusiones y trabajo futuro

El sistema desarrollado estima y extrae las coordenadas de los puntos de referencia de la postura, siempre y cuando no haya oclusiones en ninguno de los vídeos de cada cámara y solo una persona en el encuadre. La evaluación de la estimación en 3D ha sido meramente cualitativa, por lo que es necesario hacer una comparación con un sistema MoCap como VICON u OptiTrack.

En cuanto a la comparación con Kinovea® en el análisis angular, MPP ha demostrado una alta correlación en las tres articulaciones estudiadas, especialmente en la cadera y la rodilla. Además, MPP presenta varias ventajas sobre Kinovea®: es capaz de realizar un análisis en tiempo real, no requiere el uso de marcadores pasivos y es completamente automático. A diferencia de Kinovea®, MPP no necesita supervisión constante para verificar la posición de los marcadores, lo cual podría considerarse en ocasiones una desventaja, ya que el usuario no puede corregir la estimación de la postura realizada por MPP en caso de error.

Además de la evaluación cuantitativa del sistema, se propone como posible línea futura la implementación de un análisis espaciotemporal o el desarrollo de una interfaz de usuario para mostrar los resultados en tiempo real al personal clínico.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado en el marco de los proyectos STRIDE “Validación técnica y económica de la plataforma Discover2Walk para el entorno clínico” (PDC2022-133898-C31) y Discover2Walk “Desarrollo de una plataforma robótica para ayudar a niños con Parálisis Cerebral a descubrir cómo caminar” (PID2019-105110RB-C31), financiados por el Ministerio de Ciencia e Innovación.

Referencias

- Bayón, C., Martín-Lorenzo, T., Moral-Saiz, B., Ramírez, Ó., Pérez-Somarrriba, Á., Lerma-Lara, S., Martínez, I., & Rocon, E. (2018). A robot-based gait training therapy for pediatric population with cerebral palsy: Goal setting, proposal and preliminary clinical implementation. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 15(1), 69. <https://doi.org/10.1186/s12984-018-0412-9>
- Begnoche, D. M., Chiarello, L. A., Palisano, R. J., Gracely, E. J., McCoy, S. W., & Orlin, M. N. (2016). Predictors of independent walking in young children with cerebral palsy. *Physical Therapy*, 96(2), 183-192. <https://doi.org/10.2522/ptj.20140315>
- Colyer, S. L., Evans, M., Cosker, D. P., & Salo, A. I. T. (2018). A review of the evolution of vision-based motion analysis and the integration of advanced computer vision methods towards developing a markerless system. *Sports Medicine - Open*, 4(1), 24. <https://doi.org/10.1186/s40798-018-0139-y>
- Davids, J. R., & Bagley, A. M. (2014). Identification of common gait disruption patterns in children with cerebral palsy. *JAAOS - Journal of the American Academy of Orthopaedic Surgeons*, 22(12), 782. <https://doi.org/10.5435/JAAOS-22-12-782>
- De Luca, R., Bonanno, M., Settimo, C., Muratore, R., & Calabrò, R. S. (2022). Improvement of gait after robotic-assisted training in children with cerebral palsy: Are we heading in the right direction? *Medical Sciences*, 10(4), Article 4. <https://doi.org/10.3390/medsci10040059>
- El Kaid, A., & Baña, K. (2023). A systematic review of recent deep learning approaches for 3D human pose estimation. *Journal of Imaging*, 9(12), Article 12. <https://doi.org/10.3390/jimaging9120275>
- Fernández-González, P., Koutsou, A., Cuesta-Gómez, A., Carratalá-Tejada, M., Miangolarra-Page, J. C., & Molina-Rueda, F. (2020). Reliability of Kinovea® software and agreement with a three-dimensional motion system for gait analysis in healthy subjects. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 20(11), 3154. <https://doi.org/10.3390/s20113154>
- Group, S. M. (2012, octubre 1). A guide to stereovision and 3D imaging. <https://www.techbriefs.com/component/content/article/14925-a-guide-to-stereovision-and-3d-imaging>
- Gupta, A., Shrestha, P. L., Thapa, B., Silwal, R., & Shrestha, R. (2023). Knee flexion/extension angle measurement for gait analysis using machine learning solution “MediaPipe Pose” and its comparison with Kinovea®. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1279(1), 012004. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1279/1/012004>
- Hellsten, T., Karlsson, J., Shamsuzzaman, M., & Pulkkis, G. (2021). The potential of computer vision-based marker-less human motion analysis for rehabilitation. *Rehabilitation Process and Outcome*, 10, 11795727211022330. <https://doi.org/10.1177/11795727211022330>
- Kim, J.-W., Choi, J.-Y., Ha, E.-J., & Choi, J.-H. (2023). Human pose estimation using MediaPipe Pose and optimization method based on a humanoid model. *Applied Sciences*, 13(4), Article 4. <https://doi.org/10.3390/app13042700>
- Li, B., Karpinsky, N., & Zhang, S. (2014). Novel calibration method for structured-light system with an out-of-focus projector. *Applied Optics*, 53(16), 3415-3426. <https://doi.org/10.1364/AO.53.003415>
- Llamas-Ramos, R., Sánchez-González, J. L., & Llamas-Ramos, I. (2022). Robotic systems for the physiotherapy treatment of children with cerebral palsy: A systematic review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(9), Article 9. <https://doi.org/10.3390/ijerph19095116>
- Lugaresi, C., Tang, J., Nash, H., McClanahan, C., Uboweja, E., Hays, M., Zhang, F., Chang, C.-L., Yong, M. G., Lee, J., Chang, W.-T., Hua, W., Georg, M., & Grundmann, M. (2019). MediaPipe: A framework for building perception pipelines (arXiv:1906.08172). [arXiv. https://doi.org/10.48550/arXiv.1906.08172](https://doi.org/10.48550/arXiv.1906.08172)
- Meyer-Heim, A., Ammann-Reiffer, C., Schmartz, A., Schäfer, J., Sennhauser, F. H., Heinen, F., Knecht, B., Dabrowski, E., & Borggraefe, I. (2009). Improvement of walking abilities after robotic-assisted locomotion training in children with cerebral palsy. *Archives of Disease in Childhood*, 94(8), 615-620. <https://doi.org/10.1136/adc.2008.145458>
- Muro-de-la-Herran, A., Garcia-Zapirain, B., & Mendez-Zorrilla, A. (2014). Gait analysis methods: An overview of wearable and non-wearable systems, highlighting clinical applications. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 14(2), 3362-3394. <https://doi.org/10.3390/s140203362>
- Palomino-Díaz, V., Romero-Sorozábal, P., Delgado-Oleas, G., & Martín, C. (2021). Diseño conceptual de una plataforma robótica para ayudar a que los niños con parálisis cerebral descubran cómo caminar. 84-49.
- Riener, R., Lünenburger, L., Maier, I. C., Colombo, G., & Dietz, V. (2010). Locomotor training in subjects with sensori-motor deficits: An overview of the robotic gait orthosis Lokomat. *Journal of Healthcare Engineering*, 1, 197-216. <https://doi.org/10.1260/2040-2295.1.2.197>
- Roberts, H., Shierk, A., Clegg, N. J., Baldwin, D., Smith, L., Yeatts, P., & Delgado, M. R. (2020). Constraint induced movement therapy camp for children with hemiplegic cerebral palsy augmented by use of an exoskeleton to play games in virtual reality. *Physical and Occupational Therapy in Pediatrics*, 41(2), 150-165. <https://doi.org/10.1080/01942638.2020.1812790>
- Rupprechter, S., Morinan, G., Peng, Y., Foltyniec, T., Sibley, K., Weil, R. S., Leyland, L.-A., Baig, F., Morgante, F., Gilron, R., Wilt, R., Starr, P., Hauser, R. A., & O’Keeffe, J. (2021). A clinically interpretable computer-vision based method for quantifying gait in Parkinson’s disease. *Sensors*, 21(16), Article 16. <https://doi.org/10.3390/s21165437>
- Tony Hii, C. S., Gan, K. B., Zainal, N., Ibrahim, N. M., Md. Rani, S. A., & Shattar, N. A. (2022). Marker free gait analysis using pose estimation model. 2022 IEEE 20th Student Conference on Research and Development (SCOREd), 109-113. <https://doi.org/10.1109/SCOREd57082.2022.9974096>
- Veneman, J. F., Kruidhof, R., Hekman, E. E. G., Ekkelenkamp, R., Van Asseldonk, E. H. F., & van der Kooij, H. (2007). Design and evaluation of the LOPES exoskeleton robot for interactive gait rehabilitation. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 15(3), 379-386. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2007.903919>
- Zhang, Y., Wang, M., Awrejcewicz, J., Fekete, G., Ren, F., & Gu, Y. (2017). Using gold-standard gait analysis methods to assess experience effects on lower-limb mechanics during moderate high-heeled jogging and running. *Journal of Visualized Experiments: JoVE*, 127, 55714. <https://doi.org/10.3791/55714>



Simposio de Robótica, Bioingeniería y Visión por Computador 2024



Sesión: Bioingeniería

Comportamiento de un modelo recurrente-transformador para la detección de actividades humanas mediante sensores desplegados en una vivienda

Duque-Domingo, Jaime.^{a,*}, Gómez-Ramos, Raúl.^b, Zalama, Eduardo.^{a,b}, Gómez-García-Bermejo, Jaime.^{a,b}

^aITAP-DISA, Universidad de Valladolid, 47002 Valladolid, España.

^bCentro Tecnológico CARTIF, Boecillo, 47151 Valladolid, España.

Resumen

En los últimos años se ha producido una revolución en el uso de modelos transformadores para la implementación de sistemas de diálogo. Estos modelos utilizan capas de auto-atención para procesar secuencias de entrada, capturando relaciones entre elementos sin utilizar recurrencia ni convolución, lo que los hace eficientes en tareas de procesamiento de lenguaje natural. Más allá del lenguaje natural, estos modelos sirven para el procesamiento de series temporales de datos, lo que es de especial importancia en los problemas de clasificación de actividades humanas. En este artículo presentamos un modelo transformador aplicado a la base de datos SDHAR-HOME, donde se recogió información de la actividad diaria de dos personas en el hogar durante dos meses. Esta información incluía datos de sensores y de posicionamiento. Los experimentos desarrollados nos permiten comparar estos modelos con trabajos previos probados contra el mismo dataset utilizando redes recurrentes, convolucionales y modelos conjuntos.

Palabras clave: Redes neuronales: Transformers, Reconocimiento de la actividad humana (HAR), Control de supervisión humana, Redes convolucionales, Control biomédico, Integración multisensor, Sistemas domóticos

Behavior of a recurrent-transformer model for the detection of human activities by sensors deployed in a house

Abstract

In recent years there has been a revolution in the use of transformational models for the implementation of dialog systems. These models use self-attenuating layers to process input sequences, capturing relationships between elements without using recurrence or convolution, which makes them efficient in natural language processing tasks. Beyond natural language, these models are useful for processing time series data, which is of particular importance in human activity classification problems. In this paper we present a transformational model applied to the SDHAR-HOME database, where information was collected on the daily activity of two people at home for two months. This information included sensor and positioning data. The developed experiments allow us to compare these models with previous works tested against the same dataset using recurrent networks, convolutional and ensemble models.

Keywords: Neural networks: Transformers, Human Activity Recognition, HAR, Human monitoring control, Convolutional networks, Biomedical control, Multi-sensor integration, Home automation

1. Introducción

El reconocimiento de las actividades que una persona realiza constituye un importante desafío que ayuda, en el caso de gente mayor y dependiente, a ofrecer mecanismos de monitorización, cuidado y prevención de situaciones de riesgo. Dentro de las actividades, las más interesantes de detectar son aquellas que se realizan diariamente y que proporcionan información valiosa sobre hábitos diarios (Espinilla et al., 2018). El reconoci-

miento de actividades, del inglés *Human Activity Recognition* (HAR), es una disciplina que se ha desarrollado utilizando diferentes tipos de tecnologías y algoritmos. Dentro de las tecnologías utilizadas, podemos hablar del uso de sensores domóticos, sensores portátiles o sistemas de visión artificial. Frente a los sistemas de visión artificial, que pueden dar la sensación de invadir la privacidad, los sensores son más aceptados por los usuarios. Así, por ejemplo, muchas personas aceptan llevar un

*Autor para correspondencia: jaime.duque@uva.es
Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)

reloj o móvil con varios sensores, pero son reacios a instalar cámaras dentro de las viviendas. Los sensores domóticos, en el caso de personas mayores o dependientes, son mucho más fáciles de integrar en sistemas de reconocimiento de actividades. Una persona dependiente puede que no esté continuamente pendiente de cargar su reloj o móvil y llevarlo consigo.

Dentro de los algoritmos utilizados en HAR con datos de sensores, en los últimos años casi exclusivamente se utilizan redes neuronales en el caso de sistemas supervisados. Con supervisado nos referimos a que tenemos una base de datos previa con actividades etiquetadas. Las redes neuronales utilizadas son de distinta índole. Así, por ejemplo, las redes recurrentes LSTM (Ramos et al., 2021, 2022; Shi et al., 2022; Xia et al., 2020) han sido algunas de las más utilizadas, aunque también las redes de convolución (Lee and Ahn, 2020; Li et al., 2023; Wan et al., 2020) o las redes con capas GRU (Ramos et al., 2022; Chen et al., 2022).

Los modelos transformadores (Vaswani et al., 2017) se han utilizado durante los últimos años para resolver problemas de traducción de textos y generación de agentes conversacionales. Sin embargo, su utilidad va más allá de ese dominio y su uso se ha extendido a tareas como la clasificación de imágenes mediante los denominados Vision Transformers (Dosovitskiy et al., 2020). Por otro lado, también en los últimos años se ha extendido su uso en la predicción de variables en series temporales de datos. Gracias a los mecanismos de atención que integran los *transformers*, los modelos centran su atención en determinados elementos de la secuencia que son los que más contribuyen a obtener determinadas salidas esperadas. Más recientemente, los modelos transformadores se han empezado a utilizar en el reconocimiento de actividades humanas, tanto en vídeo (Wensel et al., 2023; Yang et al., 2022; Hussain et al., 2022) como utilizando datos de sensores portátiles (Dirgová Luptáková et al., 2022) o sensores desplegados en vivienda (Chen et al., 2022). Estos modelos se pueden integrar a su vez con redes recurrentes que, antes de entrar en el transformador, capturan dependencias locales y globales. Además, contribuyen a una inicialización de la representación de los datos.

Dentro de los modelos transformadores en HAR, algunos autores utilizan directamente capas transformadoras, como (Augustinov et al., 2022) para sensores portátiles o (Huang and Zhang, 2023) en sensores domóticos. Otros autores utilizan cascadas de transformadores con sensores portátiles (Xiao et al., 2022). Respecto a los modelos híbridos, algunos autores han integrado modelos de convolución junto a transformadores (Pang et al., 2024), o modelos recurrentes integrados con transformadores como en (Chen et al., 2022), donde integran capas bidireccionales GRU con transformadores. Finalmente, también hay modelos que integran capas CNN-LSTM con capas de atención en sensores portátiles (Khatun et al., 2022).

Entre las bases de datos de detección de actividades en hogares con múltiples residentes se destacan SDHAR-HOME (Ramos et al., 2022) y las basadas en CASAS (Cook et al., 2012). Aunque CASAS provee datasets con datos de varios residentes, carece de un mecanismo para discernir la ubicación de la persona en la actividad. SDHAR-HOME, en contraste, ofrece información de ubicación, permitiendo identificar 18 actividades manualmente etiquetadas de varios residentes en un hogar. Además, cuenta con un conjunto de datos ampliamente repre-

sentativo tanto en actividades como en registros. Por ejemplo, en un hogar, dos personas registraron datos durante dos meses. Por otro lado, CASAS únicamente permite distinguir 11 actividades.

En este artículo planteamos el uso de un modelo exclusivamente transformador, así como de un modelo recurrente-transformador y convolucional-transformador sobre la base de datos SDHAR-HOME (Ramos et al., 2022). Mostramos una comparativa con modelos basados en GRU y LSTM bidireccionales, uno convolucional y un modelo combinado basado en CVV (Domingo et al., 2022). Es por tanto que nuestra contribución busca mostrar cómo funciona un modelo transformador en una base de datos sensorial multiusuario, que además tiene datos de posicionamiento.

2. Análisis del método

Los modelos transformadores (*transformers*) basan su funcionamiento en los mecanismos de atención (Vaswani et al., 2017). Estos mecanismos de atención buscan diferentes relaciones entre los datos de entrada que no necesariamente tienen que ser secuenciales como en el caso de los modelos recurrentes. Los transformadores utilizan varias “cabezas” de atención, cada una responsable de buscar correlacionar diferentes elementos. Cuantas más cabezas utilicemos, mayor capacidad de extracción de diferentes relaciones tendremos.

Cada cabeza de atención, del inglés *head attention*, se basa en el principio de mapear una consulta (*query*) con un conjunto de pares clave-valor (*key-value*). A partir de una consulta como entrada de la capa de atención (Q), obtendremos una salida que se calcula como la suma ponderada de los valores obtenidos (V).

En la Figura 1 mostramos cómo funciona gráficamente el transformador en nuestro sistema de detección de actividades. SDHAR-HOME se creó utilizando 35 sensores de diferente tipo (PIR, vibración, contacto, consumo, detección de luz, temperatura y humedad), desplegados estratégicamente en varios puntos de la vivienda (por ejemplo, la detección de una persona viendo la televisión se llevaba a cabo con un PIR colocado en el salón, un sensor de consumo en la televisión y un sensor de vibración en el sofá). Además, las dos personas que vivían en la casa llevaban una *smartband* y se utilizaba triangulación sobre balizas Bluetooth para obtener su posición estimada. SDHAR-HOME incluye siete posiciones estimadas para cada persona según los datos de posicionamiento. En total, en cada instante de tiempo se registraron 42 valores. La base de datos se organiza en bloques de 60 instantes de tiempo, cada dos segundos, con las 42 mediciones por instante. Una secuencia de los 60 instantes de tiempo se asocia con una actividad de cada persona. Por otro lado, cada registro incluye la hora y los minutos, los cuales están transformados en coseno para permitir comportamiento cíclico (a las 00:00 el valor es igual que a las 24:00). Nuestro modelo separa inicialmente los datos de entrada en la secuencia de valores de sensores y de posicionamiento, así como la hora y minutos de registro. El modelo desvía la hora y minutos por una rama y procesa los datos sensoriales y de posicionamiento mediante el transformer y los modelos alternativos que explicaremos a continuación.

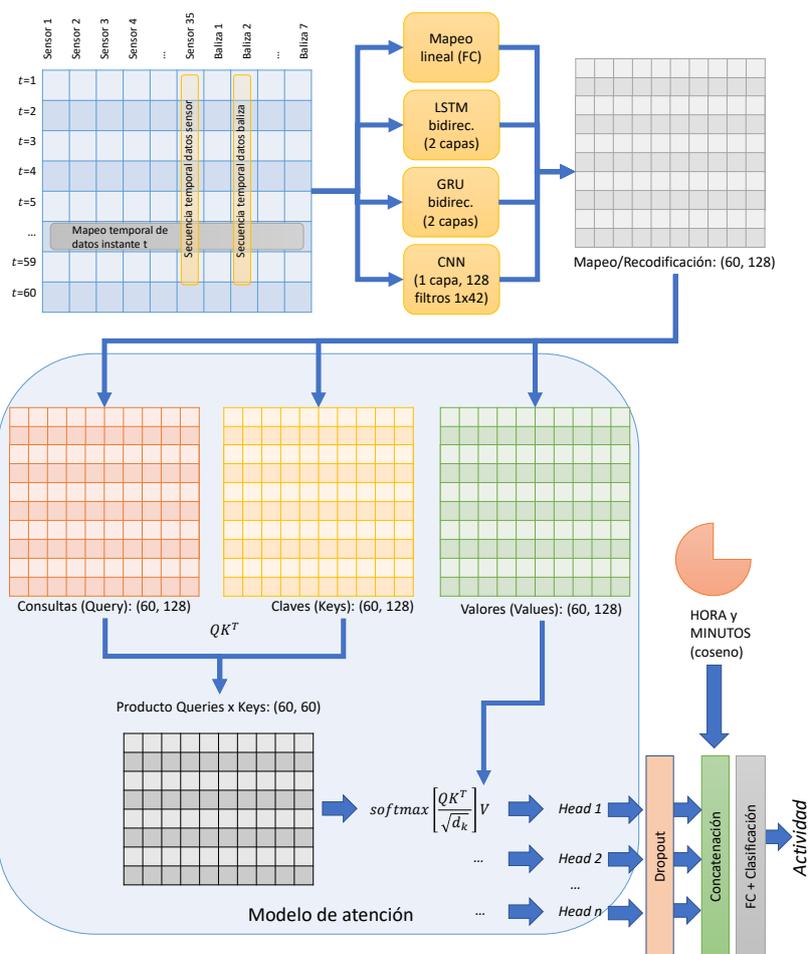


Figura 1: Modelo de transformación basado en Multi-Head Attention.

Si consideramos que cada valor del sensor y/o posición es codificado de una determinada manera, y que la entrada del modelo es una matriz de valores de los sensores y datos de posicionamiento, el primer paso del modelo transformador es la recodificación de la secuencia de valores de los sensores y datos de posición a un espacio de queries (Q), keys (K) y values (V). Las consultas se derivan típicamente aplicando una transformación lineal a los datos de entrada, aunque nosotros hemos probado cuatro configuraciones distintas, incluyendo además del lineal el mapeo mediante recurrencia LSTM y GRU y el uso de convolución. En el contexto de procesamiento de lenguaje natural, por ejemplo, las consultas pueden ser representaciones de palabras en una oración después de ser proyectadas a un espacio de representación específico. En el contexto de la detección de actividades, a partir de datos de sensores, las consultas pueden ser características extraídas de los datos de sensores en cada instante de tiempo. Se produce un vector de *embedding* (incrustación) en cada instante de tiempo que representa la dimensión de la representación de cada sensor/dato de posicionamiento en la secuencia. Esta dimensión es una especie de “espacio” donde los datos de cada sensor son proyectados antes de pasar a través del modelo.

Como hemos comentado, cada conjunto de valores de los sensores y datos de posicionamiento en un instante de tiempo se reconvierte en un nuevo vector de entrada de la capa de atención, equivalente a las queries (Q), keys (K) y values (V).

A continuación, el mecanismo de atención considera que cada uno de los valores matriciales (secuencia temporal x vector de *embedding*) se corresponde con una representación de cada elemento de Q, K y V. Se realiza entonces una multiplicación matricial entre los queries y keys para medir la similitud entre la consulta y cada clave (ver Ecuación 1), lo que permite ponderar la importancia de cada elemento en la secuencia de entrada. Después de la multiplicación entre Q y K, se divide el resultado por la raíz cuadrada de la dimensión de las consultas o las claves, evitando de esa manera que las puntuaciones de atención se vuelvan demasiado grandes o pequeñas, lo que puede afectar negativamente el proceso de atención y la estabilidad del entrenamiento del modelo. Esta multiplicación y división es seguida por una función *softmax*, que normaliza los resultados entre [0, 1] y produce los pesos de atención finales. Estos pesos se utilizan posteriormente para combinar linealmente los valores (values) correspondientes a las claves, dando como resultado la salida final de la capa de atención.

$$Atención(Q, K, V) = softmax \left[\frac{QK^T}{\sqrt{d_k}} \right] V \quad (1)$$

Cuando utilizamos múltiples cabezas (*multi-head attention*), repetimos el proceso anterior para distintos mapeos de Q, K y V. Esto se consigue variando la transformación lineal de entrada con diferentes pesos. Supongamos que tenemos n ca-

bezas. Tendremos Q_1, \dots, Q_n queries, K_1, \dots, K_n keys y V_1, \dots, V_n values. Cada cabeza trabajará con su tripleta (Q_i, K_i, V_i) , donde existirá un conjunto de pesos del mapeo lineal diferente para cada una. Es decir, si la entrada de un sensor a lo largo del tiempo es X , las queries, keys y values serán: $Q_i = X \cdot W_{Q_i}$; $K_i = X \cdot W_{K_i}$; y $V_i = X \cdot W_{V_i}$.

La salida de las capas de atención se concatena y se conecta finalmente con la capa de clasificación, normalmente una capa FC. Cabe destacar que para el mapeo lineal estamos utilizando únicamente una capa FC con 128 neuronas, 128 filtros en el mapeo convolucional, y dos capas bidireccionales con 64 estados ocultos en el mapeo GRU/LSTM. Por otro lado, en todos los modelos estamos utilizando 3 capas de transformers. Para todos, utilizamos 8 cabezas. Al encadenar múltiples capas del transformador, cada capa aprende una representación progresivamente más abstracta y compleja de los datos. Esto puede ayudar al modelo a capturar patrones más sutiles y contextos más largos en los datos de entrada.

3. Experimentación

El dataset SDHAR-HOME contiene 18 actividades (ver Tabla 1) llevadas a cabo por dos personas en una vivienda durante dos meses. SDHAR-HOME tiene 2 033 753 filas de datos de entrenamiento, 225 973 filas de validación y 518 400 filas de prueba. Dado que cada persona tiene sus propios hábitos, los datos de la persona 1 y la persona 2 están separados. Los modelos se han entrenado utilizando un optimizador Adam con una tasa de aprendizaje de 0,001 y la función de pérdida de entropía cruzada categórica. Hemos utilizado mecanismo de *early stopping* para interrumpir el entrenamiento cuando durante un periodo de 10 épocas (paciencia = 10) el accuracy de validación no sube. Aproximadamente, cada entrenamiento se completaba íntegramente en 2 horas, parando sobre la época 30. Los datos se cargaban totalmente en la memoria del servidor, un equipo con dos GPU RTX3090.

Tabla 1: Conjunto de actividades de SDHAR-HOME.

Actividad en el baño	Limpieza hogar
Cocinar	Lavar los platos
Vestirse	Comer
Lavar la Ropa	Hacer Comida Sencilla
Fuera de Casa	Cuidado de Mascotas
Leer	Relajarse
Ducharse	Dormir
Tomar Medicamentos	Ver TV
Trabajar	Actividad no catalogada

El objetivo de los experimentos ha sido evaluar diferentes alternativas del modelo transformador y comparar los resultados con los obtenidos previamente con otros modelos. La Tabla 2 muestra la comparativa de los distintos métodos evaluados. En la evaluación de SDHAR-HOME, se implementó un filtro posterior que permitía determinar si una actividad detectada se había realizado dentro de un intervalo temporal de 10 minutos. Este filtro se diseñó considerando que no es crucial conocer el momento exacto en que una persona realiza una actividad, sino más bien si la ha realizado dentro de un cierto período de tiempo. Por ejemplo, si queremos saber si una persona mayor ha tomado sus medicinas, lo importante según este filtro es determinar si las ha tomado recientemente, no necesariamente en un

momento específico. Hemos aplicado este filtro para comparar los resultados en las mismas condiciones, aunque también presentamos el accuracy del test sin aplicar el filtro.

Las Figuras 2 y 3 muestran las matrices de confusión de las actividades realizadas por la primera y segunda personas, evaluadas según el modelo transformer con 8 “heads” y mapeo lineal. La actividad no catalogada corresponde a períodos en los que el usuario no ha llevado a cabo ninguna otra actividad (definido así en SDHAR-HOME). El modelo con mapeo lineal logra una precisión del 94.08 % en las detecciones de la persona 1 y del 89.85 % en las de la persona 2. Para la persona 2, el mapeo LSTM con transformador obtiene un 91.55 %. Aunque para la primera persona los resultados son ligeramente inferiores a los obtenidos previamente por un modelo convolucional y uno CVV-convolucional, en el caso de la segunda persona se obtienen los mejores resultados hasta la fecha, mostrando el potencial de los transformers. Cabe destacar que, en algunas ocasiones, el modelo no reconoce correctamente la actividad debido a que el usuario no llevaba puesta la pulsera utilizada para registrar su posición. Por otro lado, algunas actividades no se detectan correctamente en alguna de las personas, probablemente debido a que es una actividad desarrollada habitualmente por la otra persona (lavar la ropa, cuidado de la mascota, etc.).

4. Conclusiones

En este artículo se ha presentado la evaluación de varios modelos basados en transformers con la base de datos SDHAR-HOME. Los transformers han sido ampliamente utilizados en tareas de procesamiento del lenguaje natural, análisis de series temporales de datos e incluso visión artificial. El reconocimiento de la actividad humana utilizando sensores es de especial interés en problemas de monitorización y cuidado de personas mayores y dependientes.

Los resultados obtenidos han mostrado que el modelo básico que incluye 3 capas y 8 cabezas de atención se ha comportado mejor que los modelos que mapean los datos inicialmente mediante capas recurrentes o de convolución. Los transformers también parecen ofrecer resultados superiores a modelos exclusivamente basados en capas recurrentes, como GRU o LSTM. El modelo transformador con mapeo lineal está próximo al convolucional y al CVV-convolucional para la persona 1, obteniendo junto al que utiliza mapeo LSTM los mejores resultados de la persona 2 hasta la fecha.

El sistema puede utilizarse en tiempo real y detectar si las actividades se han realizado en un período de tiempo, así como su momento de inicio y final. Una de las limitaciones que encontramos es el uso de dos modelos para dos personas diferentes. Como cada persona refleja diferencias en su comportamiento, los modelos conjuntos suelen empeorar los resultados individuales. Utilizar un modelo por persona requiere obtener datos de dicha persona, lo cual puede ser complicado, y un entrenamiento para cada caso.

A la vista de los resultados obtenidos, como trabajo futuro, exploraremos la integración de indicadores posicionales dentro del modelo transformador, algo que parece funcionar bien en los modelos ViT de visión. Por otro lado, plantearemos su integración en un modelo conjunto CVV-transformers, e incluso un CVV con transformers y convolucionales.

Tabla 2: Comparación de los resultados obtenidos en los experimentos con SDHAR-HOME (%).

Modelo	Test accuracy sin filtro (Persona 1)	Test accuracy con filtro (Persona 1)	Test accuracy sin filtro (Persona 2)	Test accuracy con filtro (Persona 2)
Transformer con 3 capas y mapeo lineal	0.8323	0.9408	0.7128	0.8985
Transformer con 3 capas y mapeo GRU bidireccional (2 capas)	0.7865	0.9102	0.6891	0.8972
Transformer con 3 capas y mapeo LSTM bidireccional (2 capas)	0.7889	0.8965	0.7330	0.9155
Transformer con 3 capas y mapeo CNN (1 capa y 128 filtros)	0.7917	0.9104	0.6716	0.8696
Modelo con GRU (Ramos et al., 2022)	0.7660	0.9091	0.6476	0.8621
Modelo con LSTM Bidireccional (Ramos et al., 2022)	0.7856	0.8963	0.6560	0.8829
Convucional con filtro de (60,1) (Duque-Domingo et al., 2023)	0.8418	0.9623	0.6601	0.8913
CVV-SV con $k = 5$ convolucionales con filtros de (60,1) (Duque-Domingo et al., 2023)	0.8560	0.9576	0.6977	0.8701

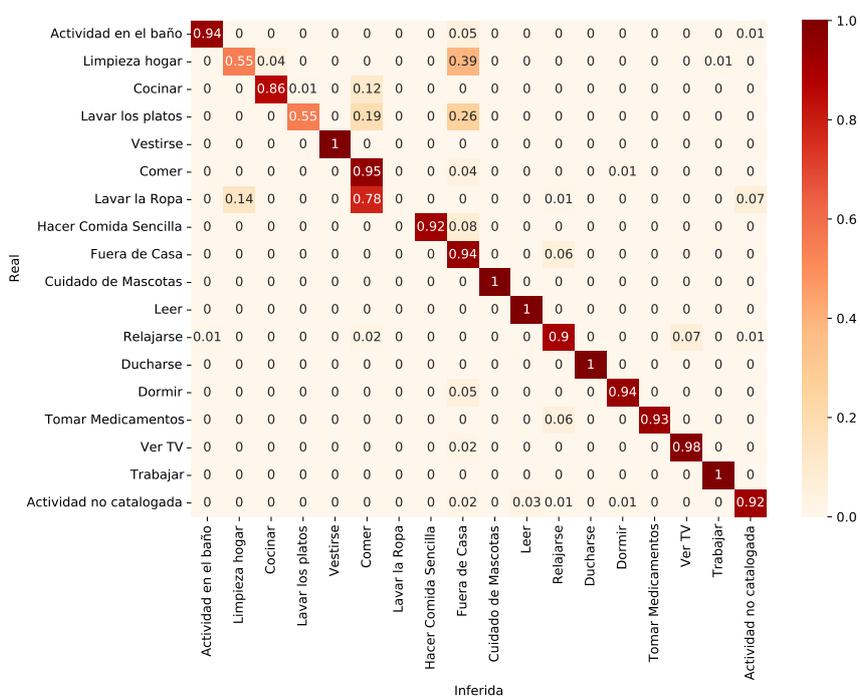


Figura 2: Matriz de confusión de detección de actividad de la primera persona de SDHAR-HOME con un modelo *transformer*

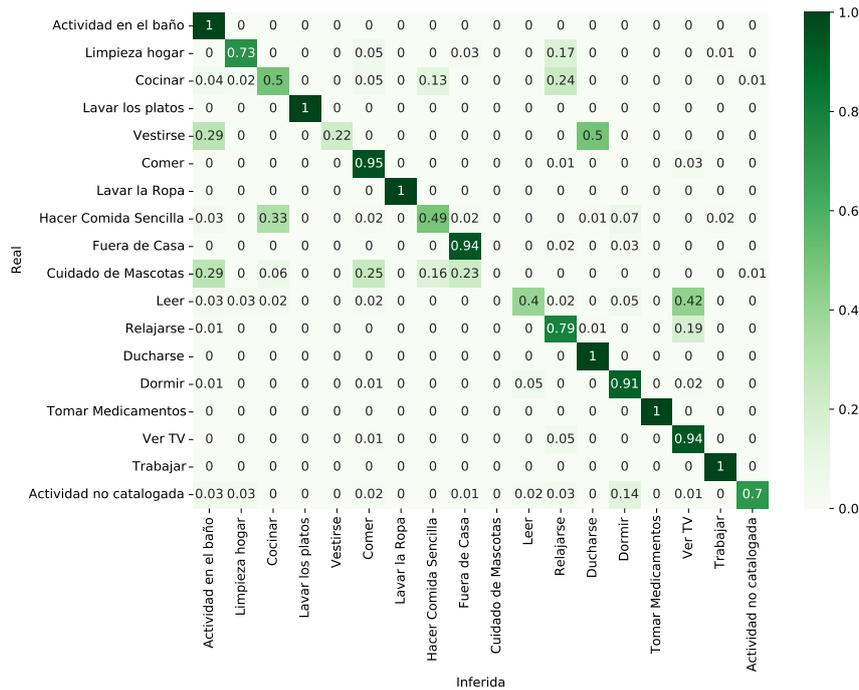


Figura 3: Matriz de confusión de detección de actividad de la segunda persona de SDHAR-HOME con un modelo *transformer*

Agradecimientos

La investigación que se presenta en este trabajo ha recibido financiación del proyecto ROSOGAR (PID2021-123020OB-I00) financiado por MCIN/ AEI / 10.13039/501100011033 / FEDER, UE, y del proyecto EIAROB Financiado por Consejería de Familia de the Junta de Castilla y León - Next Generation EU.

Referencias

- Augustinov, G., Nisar, M. A., Li, F., Tabatabaei, A., Grzegorzec, M., Sohrabi, K., Fudickar, S., 2022. Transformer-based recognition of activities of daily living from wearable sensor data. In: Proceedings of the 7th international workshop on sensor-based activity recognition and artificial intelligence. pp. 1–8.
- Chen, D., Yongchareon, S., Lai, E. M.-K., Yu, J., Sheng, Q. Z., Li, Y., 2022. Transformer with bidirectional gru for nonintrusive, sensor-based activity recognition in a multiresident environment. *IEEE Internet of Things Journal* 9 (23), 23716–23727.
- Cook, D. J., Crandall, A. S., Thomas, B. L., Krishnan, N. C., 2012. Casas: A smart home in a box. *Computer* 46 (7), 62–69.
- Dirgová Luptáková, I., Kubovčík, M., Pospíchal, J., 2022. Wearable sensor-based human activity recognition with transformer model. *Sensors* 22 (5), 1911.
- Domingo, J. D., Aparicio, R. M., Rodrigo, L. M. G., 2022. Cross validation voting for improving cnn classification in grocery products. *IEEE Access* 10, 20913–20925.
- Dosovitskiy, A., Beyer, L., Kolesnikov, A., Weissenborn, D., Zhai, X., Unterthiner, J., 2023. Dehghani, M., Minderer, M., Heigold, G., Gelly, S., et al., 2020. An image is worth 16x16 words: Transformers for image recognition at scale. arXiv preprint arXiv:2010.11929.
- Duque-Domingo, J., Gómez-Ramos, R., Zalama, E., Gómez-García-Bermejo, J., 2023. Mejora en la clasificación de actividades mediante redes de convolución y cvv-sv. JORNADAS NACIONALES DE ROBÓTICA Y BIOINGENIERÍA 2023.
- Espinilla, M., Medina, J., Nugent, C., 2018. Ucam cup. analyzing the uja human activity recognition dataset of activities of daily living. *Multidisciplinary Digital Publishing Institute Proceedings* 2 (19), 1267.
- Huang, X., Zhang, S., 2023. Human activity recognition based on transformer in smart home. In: Proceedings of the 2023 2nd Asia Conference on Algorithms, Computing and Machine Learning. pp. 520–525.
- Hussain, A., Hussain, T., Ullah, W., Baik, S. W., 2022. Vision transformer and deep sequence learning for human activity recognition in surveillance videos. *Computational Intelligence and Neuroscience* 2022.
- Khatun, M. A., Yousuf, M. A., Ahmed, S., Uddin, M. Z., Alyami, S. A., Al-Ashhab, S., Akhdar, H. F., Khan, A., Azad, A., Moni, M. A., 2022. Deep cnn-lstm with self-attention model for human activity recognition using wearable sensor. *IEEE Journal of Translational Engineering in Health and Medicine* 10, 1–16.
- Lee, J., Ahn, B., 2020. Real-time human action recognition with a low-cost rgb camera and mobile robot platform. *Sensors* 20 (10), 2886.
- Li, Y., Yang, G., Su, Z., Li, S., Wang, Y., 2023. Human activity recognition based on multienvironment sensor data. *Information Fusion* 91, 47–63.
- Pang, H., Zheng, L., Fang, H., 2024. Cross-attention enhanced pyramid multi-scale networks for sensor-based human activity recognition. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*.
- Ramos, R. G., Domingo, J. D., Zalama, E., Gómez-García-Bermejo, J., 2021. Daily human activity recognition using non-intrusive sensors. *Sensors* 21 (16), 5270.
- Ramos, R. G., Domingo, J. D., Zalama, E., Gómez-García-Bermejo, J., López, J., 2022. Sdhar-home: A sensor dataset for human activity recognition at home. *Sensors* 22 (21), 8109.
- Shi, J., Peng, D., Peng, Z., Zhang, Z., Goebel, K., Wu, D., 2022. Planetary gearbox fault diagnosis using bidirectional-convolutional lstm networks. *Mechanical Systems and Signal Processing* 162, 107996.
- Vaswani, A., Shazeer, N., Parmar, N., Uszkoreit, J., Jones, L., Gomez, A. N., Kaiser, Ł., Polosukhin, I., 2017. Attention is all you need. *Advances in neural information processing systems* 30.
- Wan, S., Qi, L., Xu, X., Tong, C., Gu, Z., 2020. Deep learning models for real-time human activity recognition with smartphones. *Mobile Networks and Applications* 25 (2), 743–755.
- Wensel, J., Ullah, H., Munir, A., 2023. Vit-ret: Vision and recurrent transformer neural networks for human activity recognition in videos. *IEEE Access*.
- Xia, K., Huang, J., Wang, H., 2020. Lstm-cnn architecture for human activity recognition. *IEEE Access* 8, 56855–56866.
- Xiao, S., Wang, S., Huang, Z., Wang, Y., Jiang, H., 2022. Two-stream transformer network for sensor-based human activity recognition. *Neurocomputing* 512, 253–268.
- Yang, J., Dong, X., Liu, L., Zhang, C., Shen, J., Yu, D., 2022. Recurring the transformer for video action recognition. In: Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. pp. 14063–14073.



Simposio de Robótica, Bioingeniería y Visión por Computador 2024



Validación de un nuevo sistema para la evaluación de la función motora del miembro superior de pacientes con hemiparesia

Vales, Y.^{a,*}, Catalán, J.M.^a, Blanco-Ivorra, A.^a, Martín-Batanero, R.^a, Lledó, L.D.^a, García-Aracil, N.^a

^aGrupo investigación de Robótica e Inteligencia Artificial del Instituto de Bioingeniería, Universidad Miguel Hernández, Avda. de la Universidad, 03202, Elche, España.

Resumen

Habitualmente se emplea el uso de escalas clínicas como herramienta para evaluar la condición y la evolución de la función motora de pacientes con problemas neurológicos para adaptar la terapia a sus necesidades. Con el objetivo de facilitar esta tarea, existen numerosos estudios que plantean el uso de dispositivos y sensores vestibles para desarrollar métodos de evaluación que puedan servir de apoyo a los métodos de evaluación ofrecidos por las escalas clínicas. Este artículo presenta un nuevo sistema de evaluación de la función motora del miembro superior basado en dispositivos vestibles. Este estudio presenta la evaluación de dicho sistema mediante 32 participantes (8 participantes sin deterioro motor y 24 pacientes con daño neurológico). Los resultados demuestran la viabilidad de este método de valoración como un método rápido y más amigable para el usuario, pudiendo utilizarse como un instrumento al que el terapeuta podría recurrir en terapias de telerehabilitación.

Palabras clave: Ensayo clínico, Ingeniería de rehabilitación y asistencia sanitaria, Tecnología de asistencia e ingeniería de rehabilitación, Modelización del rendimiento humano, Tecnología robótica

Validation of a new system for the assessment of upper limb motor function in patients with hemiparesis

Abstract

Typically, clinical scales are used as a tool to assess the status and progression of motor function in patients with neurological problems in order to tailor therapy to their needs. To facilitate this task, numerous studies have proposed the use of wearable devices and sensors to develop assessment methods that can complement the assessment methods provided by clinical scales. This article presents a new system for assessing upper limb motor function based on wearable devices. This study evaluates this system with 32 participants (8 participants without motor impairment and 24 patients with neurological damage). The results demonstrate the feasibility of this assessment method as a quick and user-friendly method that could be used as a tool for therapists in tele-rehabilitation therapies.

Keywords: Clinical trial, Rehabilitation engineering and healthcare delivery, Assistive technology and rehabilitation engineering, Modeling of human performance, Robotics technology

1. Introducción

A nivel mundial, las lesiones neurológicas se encuentran en continuo aumento, llegando a registrarse un 43,1 % de la población mundial, convirtiéndose en la primera causa mundial de discapacidad. Especialmente, se destaca en los adultos el accidente cerebrovascular (ACV) (Steinmetz et al., 2024). Según la Organización Mundial de la Salud (OMS) el ACV afecta a 110 millones de personas en el mundo (Feigin et al., 2022). Además, la afectación motora del miembro superior

es una consecuencia frecuente que afecta al desarrollo de las actividades de la vida diaria (Pollock et al., 2014). Para ello, es necesario estrategias de evaluación y rehabilitación eficaces (Steinmetz et al., 2024).

Habitualmente se emplea el uso de escalas clínicas como herramienta para conocer la situación y la evolución del paciente, y de esta manera poder ofrecer el servicio más adecuado en relación a sus necesidades. Con el objetivo de facilitar esta tarea, existen numerosos estudios que plantean

*Autor para correspondencia: yvales@umh.es

el uso de dispositivos y sensores vestibles para desarrollar métodos de evaluación que puedan servir de apoyo a los métodos de evaluación ofrecidos por las escalas clínicas. Un ejemplo de ello son los métodos basados en el uso de unidades de medida inerciales (IMU) (Maceira-Elvira et al., 2019). Los métodos de evaluación de la función motora basados en este tipo de sensores, se basan en la información de las posiciones articulares, sin embargo, no disponen de la capacidad de valorar la calidad de la trayectoria realizada por el paciente.

En este estudio se presenta la evaluación de el nuevo sistema de valoración de la función motora de los miembros superiores basado en dispositivos MARG (Unidad de Medición Inercial y de Referencia Magnética) desarrollado dentro del proyecto Sivarita (SIVARITA, 2022), el cual dispone de un método de aprendizaje automático con técnicas de alineamiento temporal para medir de forma objetiva la calidad de la trayectoria del paciente en la realización a una serie de ejercicios inspirados en la realización de actividades de la vida diaria. Este artículo recoge los resultados preliminares de una evaluación del sistema realizado con 32 pacientes. El objetivo es evaluar la viabilidad de utilizar este sistema de valoración para realizar una evaluación rápida de la función motora de los pacientes comparando los resultados obtenidos a través de este sistema con los resultados obtenidos mediante la escala clínica FMA-UE (Fugl-Meyer et al., 1975).

2. Material y métodos

2.1. Diseño y población del estudio

El estudio se ha desarrollado el Hospital IMED International Center (La Cala de Villajoyosa, Alicante) y en el Hospital de La Pedrera (Denia, Alicante) con pacientes que acudieron a la unidad de neurorrehabilitación tras sufrir un daño neurológico. Los usuarios fueron derivados por el personal sanitario del área de rehabilitación del hospital, conforme a los criterios de inclusión previamente establecidos. La experimentación del estudio ha sido aprobada por el Comité de Ética con el número de registro *HLP_99_2023*. Previamente a su inicio, todas las personas han sido informados sobre el estudio y han firmado el consentimiento informado. Los participantes fueron seleccionados en base a los siguientes criterios de inclusión: 1) adultos diagnosticado de una alteración o daño neurológico; 2) mantener o haber mantenido una afectación motora o parestia en al menos uno de los miembros superiores, con Fugl-Meyer > 9 puntos; 3) capacidad de agarre manual 4) una adecuada comprensión de las instrucciones de las tareas establecidas. Asimismo, los pacientes excluidos son aquellos usuarios con 1) alto grado de espasticidad, con una puntuación >3 puntos en Escala Modificada de Ashworth (Bohannon and Smith, 1987), 2) incapacidad para mantenerse en sedestación durante la duración de la valoración 3) dolor en el miembro superior que realiza la actividad; 4) presencia de alteraciones visuales como agnosia aperceptiva. Por otra parte, los sujetos sanos han sido seleccionados por el equipo de investigador en el laboratorio de investigación del Instituto de Bioingeniería de la Universidad Miguel Hernández de Elche.

Los pacientes que han acudido a los hospitales, han sido evaluados mediante la escala clínica FMA-UE (Fugl-Meyer

et al., 1975). Se trata de una escala clínica específica de daño cerebral que determina y cuantifica el grado de afectación motora del miembro superior. Esta sección de la escala permite una puntuación máxima de 66 puntos correspondiente a la movilidad óptima (Gladstone et al., 2002).

Los participantes se han clasificado en dos grupos de acuerdo a los resultados obtenidos en la FMA-UE, siguiendo el mismo enfoque en estudios publicados previamente (Veloza and Woodbury, 2011; Fugl-Meyer et al., 1975; See et al., 2013): una puntuación > 50 puntos, son considerados pacientes con deterioro leve; entre 50 y 20 puntos, pacientes con deterioro moderado; < 20 puntos pacientes con deterioro grave. En este estudio se ha descartado el grupo grave, ya que no cumplían los criterios de inclusión al no contar con la movilidad suficiente para realizar los ejercicios propuestos.

La tabla 1 muestra los datos de los 32 participantes del estudio. Estos han sido divididos en tres grupos, El Grupo 1, compuesto por participantes sanas, o sin afectación motora, está compuesto por 8 individuos con edad media 29, 25 ± 5, 15 años, Grupo 2, compuesto por 16 participantes con deterioro leve con 64, 62 ± 14, 12 años, y el Grupo 3 con 8 participantes con deterioro moderado con 56 ± 14, 15 años.

Tabla 1: Datos de los participantes del estudio (n=32).

	Grupo 1. Participantes Sanos	Grupo 2. Participantes Deterioro leve	Grupo 3. Participantes Deterioro moderado	p-Value ¹
Participantes, n(%)	8 (25 %)	16 (50 %)	8 (25 %)	
Sexo, n(%)				
Hombres	5 (62,5 %)	5 (31,2 %)	5 (62,5 %)	
Mujeres	3 (37,5 %)	11 (68,8 %)	3 (37,5 %)	0.208
Edad media (DE)	29,25 (±5, 15)	64,62 (±14, 12)	56 (±14, 15)	<0.01
Fugl-Meyer² mediana (RIQ)	NA ³	66(2)	29,5(15,25)	<0.01

¹**p-Value.** Valor estadísticamente significativo <0.05. Las variables paramétricas se han analizado mediante la prueba estadística ANOVA y las variables no paramétricas a través de Kruskal Wallis. ²**Escala Fugl-Meyer.** Puntuación obtenida en la valoración de Fugl-Meyer de miembro superior. ³**NA,** No Aplicable. al tratarse de participantes sin aectacion motora no se han evaluado con escalas clínicas.

2.2. Sistema inteligente de evaluación de la función motora del miembro superior

El sistema de evaluación inteligente empleado ha sido desarrollado dentro del proyecto Sivarita (SIVARITA, 2022). Este sistema ofrece una plataforma de software diseñada específicamente para la gestión y evaluación de terapias de neurorrehabilitación (Figura 1). Incluye un banco de ejercicios realizados por un avatar 3D como guía visual. Este avatar realiza los movimientos que los pacientes deben imitar durante la terapia. El propósito de este enfoque es ayudar a los pacientes a ejecutar correctamente los ejercicios, proporcionando una referencia visual clara y precisa para cada movimiento.

Este dispositivo está diseñado para su empleo en terapias de telerehabilitación, con el fin de dotar al terapeuta de herramientas para llevar a cabo un correcto seguimiento del usuario en su hogar. Para ello, se procura que la interfaz sea intuitiva y fácil de usar, para que los pacientes lo utilicen sin requerir asistencia especializada (Bertomeu-Motos et al., 2018; Martín-Batanero et al., 2023).

La plataforma software integra un algoritmo de reconstrucción con la capacidad de obtener en tiempo real

la trayectoria articular del miembro superior de los pacientes mediante tres dispositivos MARG inalámbricos.



Figura 1: Capturas de la plataforma software desarrollada en el proyecto Sivarita

2.2.1. Evaluación de los rangos articulares

En este estudio se evalúan cinco rangos de movimiento articulares (ROM) del miembro superior:

- Q1: abducción/ aducción de hombro
- Q2: flexión / extensión de hombro
- Q3: rotación interna/ externa de hombro
- Q4: flexión / extensión de codo
- Q5: pronación/ supinación de antebrazo

Para evaluar el rango de movimiento articular de los participantes, se utilizó la información obtenida mediante un algoritmo de reconstrucción del brazo a través de tres sensores MARG (Bertomeu-Motos et al., 2018) durante la realización de los ejercicios propuestos por el sistema Sivarita.

Para evaluar la calidad de la trayectoria, el sistema Sivarita compara las trayectorias realizadas por los usuarios durante la realización de cada uno de los ejercicios con las trayectorias almacenadas en una base de datos de personas sanas (trayectorias consideradas como ideales). Para ello, el sistema se basa en la información proporcionada por un algoritmo basado en DTW (Dynamic Time Warping) el cual es capaz de medir la distancia entre la trayectoria realizada por el paciente y la considerada ideal. El sistema Sivarita proporciona el porcentaje de predicción del ejercicio realizado, y el valor del DTW. Un valor de porcentaje de predicción alto implica que las trayectorias se aproximan a las consideradas como ideales en la base de datos de Sivarita. De la misma forma, un valor de DTW bajo también implica una trayectoria muy similar a las definidas en la base de datos.

2.3. Montaje experimental

Figura 2 muestra los diferentes elementos del sistema de valoración inteligente del proyecto Sivarita.

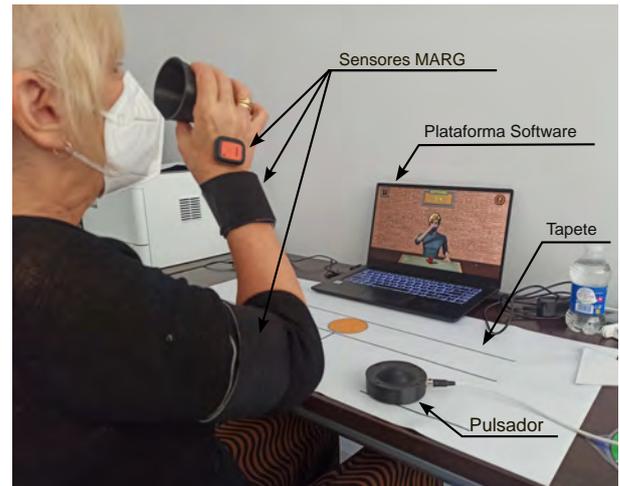


Figura 2: Valoración de una paciente con el dispositivo de evaluación inteligente

Para la correcta utilización del sistema, los participantes deben colocarse correctamente en sedestación frente a una mesa con el tapete marcado con líneas de referencia. Sobre esta mesa se coloca un dispositivo portátil con la plataforma software, la cual mostrará los ejercicios a realizar mediante un avatar 3D.

Antes de iniciar la valoración, se deben colocar tres sensores MARG sobre el miembro evaluado con una posición y orientación específica (Bertomeu-Motos et al., 2018).

Para la realización de los ejercicios es necesario la utilización de ciertos objetos, como un vaso, una botella, una caja de diferentes alturas, y un pulsador, el cual debe presionar el usuario para indicar el inicio de cada movimiento.

2.4. Protocolo del estudio

Todos los participantes han realizado una única sesión de valoración con el sistema inteligente. Tras ser debidamente informados y firmar el consentimiento informado, los participantes han sido evaluados con la escala clínica FMA-UE.

Para llevar a cabo la valoración, los participantes se colocaron correctamente en sedestación frente al tapete, en una distancia y altura determinadas, con la colocación de los tres sensores en el miembro superior evaluado.

Los participantes realizaron cuatro ejercicios compuestos por diferentes actividades. Los participantes ejecutaron dichos ejercicios de forma activa. Se le ha indicado a los participantes que los ejercicios debían ser realizados mediante el uso del movimiento del miembro superior, sin la compensación de otras partes del cuerpo. Cada actividad ha sido repetida en cuatro ocasiones. A continuación se detallan los ejercicios realizados en el orden en el que fueron ejecutados:

■ Beber y llenar

1. En la primera tarea el participante procedió a recoger el vaso desde la posición central del tapete y acercarlo a la boca simulando la acción de beber.
2. En la tarea de llenado, el participante alcanzó una botella de agua colocada en la posición inicial de la mano que realiza el movimiento, procediendo a simular el vertido del líquido en el vaso ubicado en la posición central mediante un movimiento de pronosupinación.

■ Desplazamiento de objeto

1. En la primera tarea el usuario alcanzó el vaso colocado delante de su mano y lo ha colocado encima de una caja situada en la posición central del tapete.
2. El usuario recogió el elemento situado delante de su mano, lo eleva y desplaza hacia el lado contralateral, sorteando la caja en la posición central.
3. Desplazamiento horizontal del objeto situado delante de su mano hacia el lado opuesto.

■ Dibujar

El usuario dibujó sobre la mesa con la palma de la mano sobre la línea media o posición central del tapete tres figuras geométricas: 1) Triángulo 2) Cuadrado 3) Círculo.

■ Tocar diferentes partes del cuerpo

Para este ejercicio, se alejó la silla del usuario de la mesa unos centímetros, para que el participante pudiera mover libremente el miembro superior sin tocar la mesa.

En este caso, en la posición inicial, el usuario ha situado su mano sobre la parte superior del muslo ipsilateral y tendría que tocar las siguientes partes del cuerpo: 1) Hombro contralateral 2) Rodilla contralateral 3) Zona superior de la cabeza 4) Nariz.

2.5. Análisis estadístico

Para el análisis de la información recogida por el sistema de valoración inteligente, y su comparación con los resultados obtenidos de la escala clínica FMA-UE, se ha llevado a cabo un análisis estadístico, con un nivel de significancia establecido en $p < 0.05$.

Se ha comprobado la normalidad de las variables con el test Shapiro Will. Las variables paramétricas (ROM Q1, ROM Q5, y porcentaje de predicción) han sido analizadas mediante la prueba estadística ANOVA, mientras que las variables no paramétricas (ROM Q2, ROMQ3, ROMQ4 y media DTW) han sido analizadas con el test Kruskal Wallis. Cuando hubo un efecto de interacción significativa entre la diferencia de los grupos, se aplicó mediante una comparación post- hoc por pares con el ajuste de Holm Bonferroni, el test T- student para variables paramétricas y U de Mann-Whitney para variables no paramétricas.

3. Resultados

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2: Datos de los participantes del estudio (n=32).

	Grupo 1. Participantes Sanos	Grupo 2. Participantes Deterioro leve	Grupo 3. Participantes Deterioro moderado	p-Value ¹
ROM Q1, mediana (RI ²)	117.41(30.93)	103.20(33.03)	71.08(20.43)	0.09
ROM Q2, mediana (RI ²)	60.40 (5.22)	62.23 (9.20)	58.89 (4.40)	0.13
ROM Q3, mediana (RI ²)	130.01 (30.72)	142.52 (45.04)	67.06 (17.43)	0.009
ROM Q4, mediana (RI ²)	77.68 (7.59)	74.76 (14.98)	62.83 (20.71)	0.051
ROM Q5, mediana (RI ²)	119.90 (7.48)	116.14(31.66)	121.69 (44.39)	0.992
Porcentaje de predicción (%)	69.11	42.90	22.22	<0.01
Distancia DTW, median (RI ²)	6.21 (1.11)	9.34 (1.85)	11.72 (5.16)	<0.01

¹p-Value. Valor estadísticamente significativo < 0.05 . Las variables paramétricas se han analizado mediante la prueba estadística ANOVA y las variables no paramétricas a través de Kruskal Wallis. ² Rango intercuartílico.

3.1. Rangos articulares

Se ha obtenido en los rangos de movimiento articular pertenecientes a Q1, Q2 ,Q4 y Q5 un p-value > 0.05 , excepto en el ROM Q3, p-value = 0.009. En la revisión por post hoc del ROM Q3, se obtiene un valor < 0.05 entre los grupos 1 y 2 con el grupo 3. Entre los grupos leve y sano $p = 0.490$.

3.2. Distancia de trayectoria y porcentaje de éxito

El porcentaje de éxito en la predicción del sistema alcanza un 69,11 % en el Grupo 1 (participantes sanos), un 42.90 % en el Grupo 2 (participantes con deterioro motor leve) y un 22.22 % en el Grupo 3 (participantes con deterioro motor moderado), con un p-value < 0.01 . En cuanto a la distancia media DTW se obtiene un p-value < 0.01 , con un valor de la mediana en el grupo 1 de 6.21 (1.11), grupo 2 de 9.34 (1.85) y el grupo 3 de 11.72 (5.16). En ambos casos, el análisis post hoc ha sido $p < 0.05$ entre todos los grupos de participantes.

La relación entre el porcentaje de predicción del sistema y la media de DTW, se ha analizado más profundamente con el test de correlación de Spearman, en el que se obtiene un resultado con el primero $cor=0.64$, y con la media DTW $cor= -0.71$.

4. Discusión

En los resultados obtenidos, se puede observar que el sistema determina diferencias entre los tres grupos de valoración determinados en base a los resultados de la escala clínica FMA-UE.

Los datos de los rangos articulares obtenidos muestran mayores rangos de movimiento en los sujetos con mayor movilidad, aunque no constan diferencias significativas. Esto puede deberse a que el método de evaluación diseñado no fuerza a mover el grado de movimiento máximo en ninguna articulación. Por lo que los ROM obtenidos hacen referencia a los ROM que los usuarios han empleado para la correcta realización de las diferentes tareas, y no tanto a los ROM máximos de los participantes como si evaluamos en la escala FMA-UE. Únicamente se obtienen diferencias significativas en el ROM Q3 (rotación interna/externa del hombro), ya que este movimiento sí ha estado correctamente marcado en los ejercicios propuestos, como en la actividad de desplazamiento de objeto y la de dibujar figuras geométricas.

Los resultados muestran diferencias significativas entre el Grupo 1 y el Grupo 3, y entre el Grupo 2 y el Grupo 3, pero no entre el grupo 1 y 2, como cabía de esperar. Esto es debido a que el grupo con deterioro motor leve, mantiene una puntuación

muy alta en FMA-UE 66 (2), indicando que mantiene buena movilidad en su miembro superior. Por lo que era esperable que en términos de movilidad articular obtuviéramos unos valores similares a los del Grupo 1.

En cuanto al ROM Q1 y ROM Q2, los resultados muestran mayores rangos articulares en los grupos 1 y 2, sin embargo, no se alcanza a obtener una diferencia estadísticamente significativa en la abducción y flexión de hombro. Los ejercicios fueron diseñados para que todos los usuarios pudiesen alcanzar todos los objetivos, por ello, los objetos necesarios para la realización de las actividades son recogidos próximos a la mano evaluada del participante y no se encuentran alejados lateralmente. Además, para evaluar la flexión de hombro, la caja con diferentes alturas pudo no resultar suficiente para distinguir los rangos articulares.

En relación al ROM Q5, en el movimiento destinado a la pronosupinación del antebrazo, a penas existen diferencias entre los grupos, mostrando incluso mayores grados de movimiento en el Grupo 3. Esto puede deberse a la compensación de otras partes del cuerpo para realizar la actividad, en concreto, vaciar la botella de agua en el vaso.

Por otro lado, en la Tabla 2 existe una diferencia aproximada entre el porcentaje de predicción entre los grupos de un 20 % y una diferencia de 2.38 y 3.13 en la distancia media DTW, obteniendo una diferencia significativa entre grupos en cuanto a la calidad de las trayectorias en comparación con las trayectorias consideradas como ideales por el sistema Sivarita.

En cuanto a la relación entre el porcentaje de predicción de los grupos y la puntuación obtenida en la escala FMA-UE, se ha observado una correlación positiva moderada, es decir, a medida que aumenta la puntuación de la escala clínica, aumenta el porcentaje de predicción; mientras que con la distancia DTW se ha obtenido una correlación fuerte (> 70) y negativa. Esto se trata de algo relevante, ya que la información proporcionada por el algoritmo DTW, es capaz de distinguir entre los grupos de afectación motora de miembro superior definidos por la evaluación FMA-UE. De esta manera, el sistema parece ofrecer una valoración objetiva, rápida y más amigable para el usuario, aunque con menos información que la proporcionada por la escala FMA-UE. Por otro lado, este sistema de evaluación podría utilizarse como un instrumento al que el terapeuta podría recurrir para realizar un seguimiento del usuario de forma remota desde su domicilio.

En base a los resultados obtenidos, ha sido posible detectar posibles deficiencias a la hora de medir los ROM articulares debidos en parte al diseño de las actividades propuestas por el sistema Sivarita. Es importante tener en cuenta que realizar una mejor adaptación de estos ejercicios podrían mejorar considerablemente los resultados obtenidos.

5. Conclusiones

En este artículo se presenta el análisis de los datos obtenidos de un sistema de evaluación novedoso inteligente de miembro superior en relación a los resultados de la escala clínica FMA-UE de 32 participantes, un grupo de participantes sin afectación motora (Grupo 1); un grupo de participantes con daño neurológico con deterioro motor en el miembro superior

leve (Grupo 2) y un grupo con deterioro motor moderado (Grupo 3).

El sistema ha demostrado la capacidad de categorizar a los participantes definidos por FMA-UE en función de la calidad del movimiento registrado. Por ello, puede tratarse de un instrumento que aporta información objetiva a la escala clínica, aunque actualmente, no podría sustituirla.

De esta manera, se sugiere que puede tratarse de un sistema apropiado, rápido y eficaz para apoyar al terapeuta a realizar un seguimiento del paciente en el ámbito hospitalario o en su hogar.

A pesar de ello, es importante realizar adaptaciones en el diseño de las actividades de los ejercicios del sistema de valoración del sistema para mejorar la información recogida.

Agradecimientos

Agradecemos la colaboración del personal sanitario del Hospital IMED International Center (La Cala de Villajoyosa, Alicante) y al Hospital de La Pedrera (Denia, Alicante). Este trabajo ha sido financiado por la Agencia Valenciana de la Innovación, perteneciente a la Generalitat Valenciana, a través del proyecto INNVA1/2021/76 y por la Unión Europea - Next Generation EU, por el Ministerio de Ciencia e Innovación, perteneciente a la Agencia Estatal de Investigación (AEI) a través del proyecto TED2021-130431B-I00, por la Agencia Estatal de Investigación (AEI) a través del proyecto PID2022-139957OB-I00 y por la Generalitat Valenciana a través del programa PROMETEO 2023 para grupos de investigación de excelencia CIPROM/2022/12.

Referencias

- Bertomeu-Motos, A., Blanco, A., Badesa, F. J., Barrios, J. A., Zollo, L., Garcia-Aracil, N., 2018. Human arm joints reconstruction algorithm in rehabilitation therapies assisted by end-effector robotic devices. *Journal of neuroengineering and rehabilitation* 15, 1–11.
- Bohannon, R. W., Smith, M. B., 1987. Interrater reliability of a modified ashworth scale of muscle spasticity. *Physical therapy* 67 (2), 206–207.
- Feigin, V. L., Brainin, M., Norrving, B., Martins, S., Sacco, R. L., Hacke, W., Fisher, M., Pandian, J., Lindsay, P., 2022. World stroke organization (wso): global stroke fact sheet 2022. *International Journal of Stroke* 17 (1), 18–29.
- Fugl-Meyer, A. R., Jääskö, L., Leyman, I., Olsson, S., Steglind, S., 1975. The post-stroke hemiplegic patient. 1. a method for evaluation of physical performance. *Scandinavian journal of rehabilitation medicine* 7 (1), 13–31.
- Gladstone, D. J., Danells, C. J., Black, S. E., 2002. The fugl-meyer assessment of motor recovery after stroke: a critical review of its measurement properties. *Neurorehabilitation and neural repair* 16 (3), 232–240.
- Maceira-Elvira, P., Popa, T., Schmid, A.-C., Hummel, F. C., 2019. Wearable technology in stroke rehabilitation: towards improved diagnosis and treatment of upper-limb motor impairment. *Journal of neuroengineering and rehabilitation* 16, 1–18.
- Martín-Batanero, R., Vales, Y., García Pérez, J. V., Catalán Orts, J. M., Ledó Pérez, L. D., García Aracil, N., 2023. Sistema inteligente para la evaluación de la función motora del miembro superior de pacientes con hemiparesia. In: XLIV Jornadas de Automática. Universidade da Coruña. Servicio de Publicacións, pp. 71–76.
- Pollock, A., Farmer, S. E., Brady, M. C., Langhorne, P., Mead, G. E., Mehrholz, J., van Wijck, F., 2014. Interventions for improving upper limb function after stroke. *Cochrane Database of Systematic Reviews* (11).
- See, J., Dodakian, L., Chou, C., Chan, V., McKenzie, A., Reinkensmeyer, D. J., Cramer, S. C., 2013. A standardized approach to the fugl-meyer assessment and its implications for clinical trials. *Neurorehabilitation and neural repair* 27 (8), 732–741.

SIVARITA, 2022. Sistema Inteligente para la Evaluación de Movimientos Articulares en Rehabilitación Motora y Cognitiva Basado en Wearables con Aplicaciones a Servicios de Telerehabilitación. <https://www.proyecto-sivarita.es/>, [Online; accessed 3-July-2023].

Steinmetz, J. D., Seeher, K. M., Schiess, N., Nichols, E., Cao, B., Servili, C., Cavallera, V., Cousin, E., Hagins, H., Moberg, M. E., et al., 2024. Global, regional, and national burden of disorders affecting the nervous system,

1990–2021: a systematic analysis for the global burden of disease study 2021. *The Lancet Neurology* 23 (4), 344–381.

Veloza, C. A., Woodbury, M. L., 2011. Translating measurement findings into rehabilitation practice: an example using fugl-meyer assessment-upper extremity with patients following stroke. *Journal of Rehabilitation Research & Development* 48 (10).



Simposio de Robótica, Bioingeniería y Visión por Computador 2024



Uso de serious games para evaluación funcional automatizada de la extremidad superior basada en escalas clínicas

Oña, E.D.^{a,*}, Martín Liébana, C.^a, Balaguer, C.^a, Jardón, A.^a

^aUniversidad Carlos III de Madrid, Avda. de la Universidad, 30, 28911 Leganés, Madrid, España.

Resumen

La evaluación funcional de la extremidad superior en procesos de rehabilitación se caracteriza por ser laboriosa, con poca digitalización de resultados, y una reducida adaptabilidad a las necesidades particulares de los pacientes. Este artículo presenta una reciente línea de investigación enfocada a la automatización de escalas clínicas de evaluación funcional de la extremidad superior utilizando “serious games” y realidad virtual (RV). El documento describe el proceso de automatización usando RV de una escala clínica como el “Wolf Motor Function Test” (WMFT), la cual es ampliamente usada para medir el nivel de funcionalidad motora y la evolución de pacientes en neurorehabilitación.

Palabras clave: Realidad virtual, Rehabilitación, Extremidad superior, Función motora, Automatización.

Using serious games for automated assessment of upper limb motor functionality based on traditional outcome measures

Abstract

Functional evaluation of the upper extremity in rehabilitation processes is characterized by being laborious, with little digitalization of results, and reduced adaptability to the particular needs of patients. This article presents a recent line of research focused on the automation of clinical functional evaluation scales of the upper extremity using serious games and virtual reality (VR). The document describes the automation process using VR of a clinical scale such as the Wolf Motor Function Test (WMFT), which is widely used to measure the level of motor functionality and the evolution of patients in neurorehabilitation.

Keywords: Virtual reality, Rehabilitation, Upper extremity, Motor function, Automation

1. Introducción

Actualmente, el marco conceptual propuesto por la OMS de clasificación de funcionalidad, discapacidad y salud (CIF), es el modelo internacional predominante dentro de la rehabilitación neurológica para medir la salud y la discapacidad (World Health Organization, 2002). Según la CIF, la funcionalidad de una persona se puede clasificar en tres niveles: funcionalidad a nivel del cuerpo o parte del cuerpo, la persona completa y la persona completa en un contexto social. En consecuencia, la discapacidad implica disfuncionalidad en uno o más de estos mismos niveles: impedimentos, limitaciones de la actividad y restricciones de participación. Las herramientas de evaluación utilizadas en la evaluación funcional también se pueden clasificar de acuerdo con la CIF como se muestra en (Salter et al., 2013).

Considerando que la rehabilitación es un proceso laborioso

y costoso, que su efectividad se mide usando escalas manuales objetivas pero cuya interpretación puede ser subjetiva, y que existen recursos inadecuados para pacientes con trastornos neurológicos en la mayor parte del mundo, se pone de manifiesto la necesidad de elaborar procesos de rehabilitación más autónomos y objetivos.

Otten et al. (Otten et al., 2015) proponen un método de evaluación usando sensores de bajo coste que registra datos de los movimientos del usuario. Las puntuaciones obtenidas en la evaluación fueron comparadas con las obtenidas con el Fugl-Meyer Assessment (FMA) mostrando resultados similares. De esta manera mostraron que el FMA se puede automatizar. Otro estudio para automatizar el FMA por medio de sensores se muestra en (Wang et al., 2014). Otro trabajo en curso se presenta en (Lee et al., 2015), que tiene como objetivo automatizar el Action Research Arm Test (ARAT). En dicho estudio,

*Autor para correspondencia: eona@ing.uc3m.es

se ha desarrollado la automatización de la subprueba de comprensión del ARAT, mediante la sensorización de uno de los objetos utilizados en la tarea, en este caso un cubo de 7.5 cm.

En (Hsiao et al., 2013) se presenta la automatización del Box and Blocks Test (BBT) mediante una cámara Kinect para identificar el número de cubos transportados, obteniendo una tasa de éxito en el conteo del 90 % hasta 80 bloques. Por otro lado, una versión virtualizada del BBT se desarrolló por Cho et al. Cho et al. (2016) usando una Kinect V1. Este sistema virtual presenta una correlación con el sistema real. Los dos sistemas anteriores son capaces de detectar la mano y sus movimientos moderadamente, sin embargo, la administración automática de la prueba no se aborda. Otra versión virtual del BBT fue desarrollada por Gieser et al. Gieser et al. (2016) usando un sensor Leap motion. Este sensor mejora altamente la detección de los movimientos de la mano y dedos, pero la administración automática de la prueba no se aborda. Esta limitación fue estudiada por Oña et al. Oña et al. (2019), incluyendo además un entorno completamente inmersivo que fomenta la administración automática del BBT.

También se pueden revisar varios proyectos centrados en la automatización del WMFT. Por ejemplo, en Wade et al. (2010) se presenta una evaluación automática basada en el uso de sensores que los usuarios deberían usar (wearables). Aquí, se estima como medida de resultado el tiempo necesario para completar 7 de las 17 tareas de la prueba. Un enfoque similar se presenta en Bento et al. (2011), donde los elementos se califican mediante sensores colocados en el brazo, el antebrazo y el hombro. Este sistema logró hasta un 60 % de precisión en la tarea 1 y un 80 % en la tarea 2 en comparación con el profesional clínico. Mejores resultados fueron obtenidos por Parnandi et al. Parnandi et al. (2010), donde utilizando un dispositivo de medición inercial colocado en la muñeca, lograron el 90 % de precisión de evaluación en todas las tareas en comparación con las del terapeuta. Otro enfoque se propone en Dr. Droid Goodney et al. (2012), que es una aplicación de Android que administra el WMFT dando instrucciones de audio y visuales al paciente y recopilando los datos del acelerómetro del teléfono inteligente en la muñeca. Cabe señalar que estos métodos de automatización son importantes porque eliminan la subjetividad del profesional clínico; sin embargo, a diferencia de los serious games, no mejoran la motivación de los pacientes a la hora de realizarlos, lo que puede influir negativamente en los resultados finales.

Así, se observa que varios trabajos se centran en la detección de movimientos de las extremidades superiores por medio de sensores que el paciente debe usar, sensorizando objetos usados en las pruebas, o a través de sistemas de visión por computadora. De esta manera, se busca obtener plataformas de evaluación automáticas que sean objetivas, dinámicas, que muestren repetibilidad, capacidades de diagnóstico y que puedan proporcionar más información que las escalas tradicionales. Sin embargo, aún no se ha implementado un sistema automatizado completo y, por lo tanto, un sistema que se pueda administrar sin intervención de los médicos. La tecnología de RV puede contribuir a modelar la interacción paciente-terapeuta e incrementar la administración autónoma de las pruebas. Por ello, este artículo presenta un sistema para medir (etapa de evaluación) la capacidad de UE mediante el uso de un escenario

virtual basado en el Wolf Motor Function Test (WMFT). El sistema propuesto es una versión gamificada totalmente inmersiva del WMFT, cuyo objetivo es promover que el usuario realice varios movimientos tomados de la prueba tradicional y brindar una medida de resultado automatizada. En esta etapa de investigación, 6 de los 17 elementos del WMFT están integrados en el juego.

2. Arquitectura del sistema

La rehabilitación neurológica asistida por robots ha ido creciendo e incorporando avances en robótica junto con neurociencia y rehabilitación, para definir nuevos métodos de tratamiento de problemas relacionados con lesiones neurológicas. Una reciente revisión de la literatura en neurorehabilitación enfocada en la extremidad superior (Oña et al., 2018), ha relacionado la contribución de la robótica con el ciclo de rehabilitación (valoración, asignación, intervención y evaluación) y ha mostrado que para obtener procesos de rehabilitación más autónomos, debe existir una comunicación adecuada entre los componentes del proceso y aprovechar las métricas objetivas obtenidas por los sistemas robóticos. Esta metodología aplicada a la automatización usando RV del WMFT está ilustrada en la Figura 1.

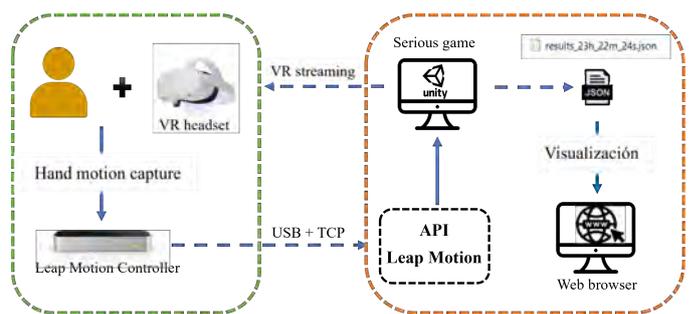


Figura 1: Metodología para automatización del WMFT

Por otro lado, el término “gamificación” se refiere en términos generales a desarrollos en los que la realidad se vuelve más lúdica. En este contexto, este artículo tiene como objetivo integrar la mecánica de evaluación tradicional del WMFT en el diseño de videojuegos. Por lo tanto, se podría obtener una evaluación “lúdica”, transparente desde el punto de vista del paciente ya que el objetivo es completar el juego, no la evaluación funcional. Así, el sistema propuesto promueve una interacción similar a un juego utilizando movimientos tomados de los elementos WMFT para controlar diferentes acciones en el juego. El WMFT basado en realidad virtual integra los auriculares Oculus para ofrecer un entorno más inmersivo y el Leap Motion Controller (LMC) para capturar los movimientos de la mano del paciente.

Para el desarrollo del entorno virtual, se eligió el motor de juego Unity debido a la flexibilidad que ofrece en el modelado de realidad virtual y las herramientas disponibles para integrar la interacción manual utilizando Ultraleap SDK. Finalmente, se ha elegido una interfaz basada en páginas web para la visualización de datos almacenados porque puede ejecutarse localmente, en una red interna o públicamente en Internet. Dado que se ejecuta en navegadores, no requiere software adicional y utiliza pocos recursos.

Tabla 1: Items del Wolf Motor Function Test

Item	WMFT tasks	Body position	Virtualized
1	Forearm to table	Side	X
2	Forearm to box	Side	X
3	Extended elbow	Side	
4	Extend elbow (weight)	Side	
5	Hand to table	Front	X
6	Hand to box	Front	X
7	Weight to box	Front	
8	Reach and retrieve	Front	
9	Lift can	Front	X
10	Lift pencil	Front	
11	Lift paper clip	Front	
12	Stack checkers	Front	X
13	Flip cards	Front	
14	Grip strength	Front	
15	Turn key in lock	Frontal	
16	Fold towel	Front	
17	Lift basket	Standing	

Tabla 2: Functional Ability Scale

Score	Description
0	Does not attempt with involved arm
1	Involved arm does not participate functionally; however, an attempt is made to use the arm. In unilateral tasks the uninvolved extremity may be used to move the involved extremity.
2	Arm does participate, but requires assistance of uninvolved extremity for minor readjustments or change of position, or requires more than two attempts to complete, or accomplishes very slowly. In bilateral tasks the involved extremity may serve only as a helper or stabilizer.
3	Arm does participate, but movement is influenced to some degree by synergy or is performed slowly and/or with effort
4	Arm does participate; movement is close to normal*, but slightly slower; may lack precision, fine coordination or fluidity
5	Arm participates; movement appears to be normal

3. WMFT basado en realidad virtual

El WMFT cumple con características adecuadas para la automatización como: (a) la puntuación de la prueba es simple (métrica numérica basada en 5 puntos), (b) sus instrucciones son sistemáticas y claras, y el desarrollo de la prueba está bien definido (interacción paciente-terapeuta modelable), así como (c) un amplio uso en entornos clínicos como método de evaluación de la función motora en neurorehabilitación. Dichas características son propicias para desarrollar versiones automatizadas de la prueba y, como en éste trabajo, basadas en Realidad Virtual.

3.1. Wolf Motor Function Test

El WMFT es una de las escalas más estandarizadas en la evaluación de las extremidades superiores y se usa ampliamente en investigaciones con personas en etapas subagudas o crónicas de recuperación de un derrame cerebral. Fue desarrollado por el Dr. Steven L. Wolf en 1989 y constaba de 21 tareas secuenciales en función de las articulaciones involucradas y la dificultad. Posteriormente, por recomendación del Dr. Wolf, se eliminaron algunas de las tareas, quedando 17 en la versión actual. Table 1 presenta los elementos que componen el WMFT.

De todas las tareas que componen el WMFT, sólo trece tienen potencial para ser virtualizadas, ya que las otras cuatro requieren pesas adicionales o un dinamómetro para medir la fuerza (ver Tabla 1). Entre aquellas tareas viables, teniendo en cuenta características como la facilidad de integración en un videojuego, la variabilidad en las propiedades motoras que evalúan o lo interesantes y motivadoras que puedan resultar, se han seleccionado un total de seis tareas para gamificar. Estos ítems son el 1, 2, 5 y 6 (que permiten evaluar la capacidad funcional frontal y lateral del hombro) y los ítems 9 y 12 (que sirven para examinar el funcionamiento tanto del brazo como de la mano).

Para la evaluación funcional, 15 de los ítems se califican según el tiempo de ejecución y la calidad del movimiento (evaluada visualmente por el terapeuta). Los ítems 7 y 14 involucran fuerza. La calidad del movimiento se califica según una escala de 0 a 5 puntos, y las pautas para la puntuación de la capacidad funcional se muestran en la Tabla 2.

3.2. Virtualización de la prueba

Las tareas seleccionadas se han introducido en un único videojuego con realidad virtual que se compone de cinco escenas, una de ellas contiene el menú para iniciar la aplicación y realizar la configuración y calibración inicial, y el resto componen el propio videojuego. Su desarrollo parte de una escena principal en la que, mediante una cámara en primera persona, el jugador comenzará a correr automáticamente por un camino lineal. Durante el transcurso de este irán apareciendo diferentes enemigos que se mueven hacia el jugador y que deberá esquivar para no perder energía. Asimismo, también aparecerán boosters en forma de cajas que introducen al usuario en diferentes minijuegos y, si los supera, le otorgarán recompensas.

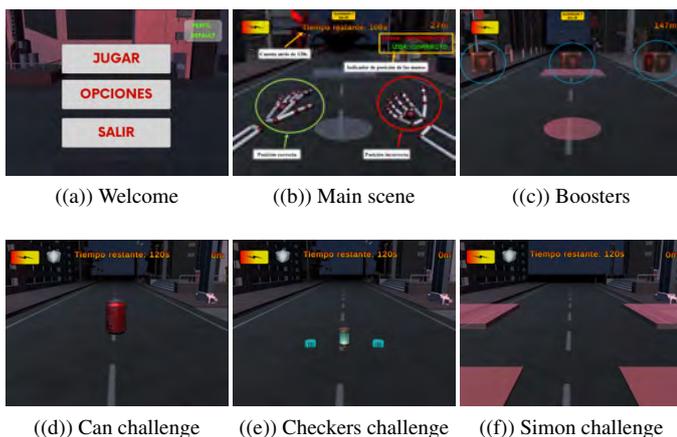


Figura 2: Escenas de la versión gamificada del WMFT.

En la escena principal (Figura 2-b), el desarrollo de la escena comienza con el personaje detenido mientras se reproduce un audio con una breve explicación de cómo funciona dicha escena, los elementos de la interfaz y posibles interacciones del usuario. Simultáneamente aparecerá en el ordenador un mensaje con una casilla marcada indicando que la explicación se reproducirá una vez por escena dentro del mismo juego y, si es relevante que se vuelva a explicar más adelante, se debe desmarcar esta opción haciendo clic en ella. Este evento ocurre en cada una de las escenas (excepto el menú) para darle contexto al jugador y ayudarlo con la mecánica del juego. Una vez finalizado el audio, el reproductor comenzará a moverse automáticamente a lo largo de una ruta generada dinámicamente.

El camino por el que corre el personaje consta de tres carriles invisibles en los que se posicionan el jugador, los enemigos y los potenciadores. Los enemigos pueden ser de dos tipos, drones o láseres, y ambos se mueven a una velocidad constante en dirección opuesta a la del jugador. Los drones están situados a media altura y ocupan uno de los tres carriles. Por el contrario, en el caso de los láseres, el modelo se ha construido utilizando herramientas propias de Unity, están posicionadas a una altura cercana al suelo y ocupan los tres carriles disponibles. Estos se generan cada 3 segundos a una distancia fija del jugador y, en el caso del dron, ocupando el mismo carril que este.

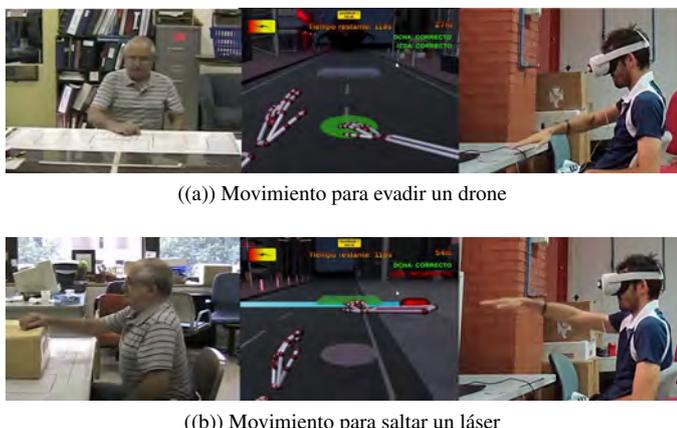


Figura 3: Movimientos reales y virtuales para esquivar obstáculos

Cuando uno de estos enemigos esté lo suficientemente cerca del personaje, el juego se detendrá y el usuario tendrá la posibilidad de esquivarlo usando los dos botones que se encuentran frente a él. Por un lado, el botón circular representa la tarea 5 del WMFT, cuya finalidad es colocar la mano frontalmente sobre la mesa. Por otro lado, el botón cuadrado virtualiza la tarea 6 cuyo objetivo es similar al anterior, pero en este caso colocando la mano sobre una caja (ver Figura 3).

En esta etapa, se muestra una cuenta regresiva de 120 segundos en la parte superior de la interfaz, que es el período de tiempo permitido para evitar el obstáculo. Tenga en cuenta que también se indicará si la palma de la mano está hacia abajo como se indica en las instrucciones de la prueba. Si el enemigo es un dron (ver Figura 3-a), el usuario debe presionar el botón circular con la mano derecha o izquierda para moverse hacia la derecha o izquierda respectivamente. Si por el contrario el enemigo es un láser (ver Figura 3-b), será el botón cuadrado que deberá presionar con cualquiera de las manos para saltar y adelantarlos. Ninguno de los dos botones funcionará si la mano utilizada no está en la posición correcta, y si se acaba el tiempo el jugador se estrellará, perdiendo un 20 % de su energía máxima total. El juego termina cuando el usuario no tiene energía.

4. Discusión y Conclusiones

En rehabilitación neurológica, evaluar la funcionalidad motora es fundamental para definir tratamientos de recuperación adecuados, utilizándose pruebas clínicas estandarizadas para obtener resultados objetivos. Por lo tanto, este artículo propone el uso de la realidad virtual para promover la evaluación de la función motora de la UE basada en la mecánica gamificada del WMFT. La gamificación se refiere al diseño de sistemas para brindar experiencias y motivaciones similares a las de los juegos y, en consecuencia, intentar afectar el comportamiento del usuario de forma positiva.

Este enfoque de evaluación gamificada ofrece varias ventajas. Al tratarse de un videojuego con realidad virtual completamente inmersiva, el paciente puede jugar usando el visor, mientras que el terapeuta de forma simultánea puede supervisar el proceso en el ordenador donde se ejecuta. Esto permite el seguimiento en vivo y muestra información exclusiva con la que el experto clínico puede interactuar sin que el paciente se dé cuenta.

Además, en la prueba original del WMFT era necesario que el terapeuta evaluara los movimientos del individuo en tiempo real, lo que hacía que la prueba fuera subjetiva. Este inconveniente se pueden solventar en el videojuego generando los resultados de forma automatizada y objetiva, separando la ejecución de la prueba de su evaluación. Esto también permite que cada paciente pueda realizar las pruebas sin necesidad de supervisión o incluso fuera del centro médico, fomentando la tele-rehabilitación.

El método actual basado en realidad virtual para calificar los elementos WMFT se basa en áreas de desempeño que son detectadas por objetos del juego colisionadores, con el objetivo de imitar la observación visual del terapeuta. Sin embargo, la realidad virtual ofrece la oportunidad de mejorar la manera de medir el deterioro motor y en futuro obtener una herramienta

más descriptiva, ya que las trayectorias de las manos se almacenan automáticamente para un mejor análisis. Dado que la mayoría de los movimientos requeridos en el WMFT pueden considerarse movimientos discretos de punto a punto, un análisis más detallado de las trayectorias puede proporcionar métricas adicionales sobre la calidad del movimiento como la suavidad. Así, el uso de un índice de suavidad del movimiento como la longitud del arco espectral (SPARC) fue estudiado en un trabajo anterior [?], mostrando buenos resultados. Este indicador será incluido en la versión gamificada del WMFT para proporcionar métricas más descriptivas de la capacidad funcional.

Finalmente, en esta etapa de investigación se identifican algunas limitaciones del WMFT gamificado. En primer lugar, el sistema requiere que el usuario complete un tiempo mínimo de juego para poder evaluar todos los elementos. Por tanto, es necesario impulsar la participación del paciente en función de la experiencia del usuario y fomentar la adherencia al tratamiento. Otra limitación es que sólo se pueden evaluar elementos que no requieran contacto físico. Este hecho se debe a la naturaleza de la interacción virtual. Por lo tanto, desarrollos futuros pueden considerar la inclusión de objetos instrumentados o un manipulador robótico para asistir en las tareas y medir otras capacidades funcionales. En última instancia, el método propuesto ha sido poco probado en la etapa actual. En consecuencia, es necesario realizar pruebas piloto para llegar a afirmaciones concluyentes sobre la validez del sistema y su desempeño en escenarios reales.

Agradecimientos

The research leading to these results has received funding from the the Spanish Ministry of Economy and Competitiveness as part of the project: ROBOASSET: Intelligent robotic systems for assessment and rehabilitation in upper limb therapies”(PID2020-113508RB-I00), funded by AEI/10.13039/501100011033, and from the RoboCity2030-III-CM project (S2013/MIT-2748) which is supported in part by Programas de Actividades I+D en la Comunidad de Madrid, and in part by Structural Funds of the EU.

Referencias

- Bento, V. F., Cruz, V. T., Ribeiro, D. D., Cunha, J. P., 2011. Towards a movement quantification system capable of automatic evaluation of upper limb motor function after neurological injury. In: 2011 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. IEEE, pp. 5456–5460.
- Cho, S., Kim, W.-S., Paik, N.-J., Bang, H., 2016. Upper-limb function assessment using vbbs for stroke patients. *IEEE computer graphics and applications* 36 (1), 70–78.
- Gieser, S. N., Gentry, C., LePage, J., Makedon, F., 2016. Comparing objective and subjective metrics between physical and virtual tasks. In: *International Conference on Virtual, Augmented and Mixed Reality*. Springer, pp. 3–13.
- Goodney, A., Jung, J., Needham, S., Poduri, S., 2012. Dr. droid: Assisting stroke rehabilitation using mobile phones. In: *Mobile Computing, Applications, and Services: Second International ICST Conference, MobiCASE 2010, Santa Clara, CA, USA, October 25-28, 2010, Revised Selected Papers 2*. Springer, pp. 231–242.
- Hsiao, C.-P., Zhao, C., Do, E. Y.-L., 2013. The digital box and block test automating traditional post-stroke rehabilitation assessment. In: *Pervasive Computing and Communications Workshops (PERCOM Workshops), 2013 IEEE International Conference on*. IEEE, pp. 360–363.
- Lee, T. K., Leo, K., Sanei, S., Chew, E., 2015. Automated scoring of rehabilitative tests with singular spectrum analysis. In: *Signal Processing Conference (EUSIPCO), 2015 23rd European*. IEEE, pp. 2571–2575.
- Oña, E. D., Cano de la Cuerda, R., Sánchez-Herrera, P., Balaguer, C., Jardón, A., 2018. A review of robotics in neurorehabilitation: Towards an automated process for upper limb. *Journal of Healthcare Engineering 2018 (Article ID 9758939)*, 1–19.
- Oña, E. D., García, J. A., Raffé, W., Jardón, A., Balaguer, C., 2019. Assessment of manual dexterity in vr: Towards a fully automated version of the box and blocks test. In: *Digital Health: Changing the Way Healthcare is Conceptualised and Delivered*. IOS Press, pp. 57–62.
- Otten, P., Kim, J., Son, S. H., 2015. A framework to automate assessment of upper-limb motor function impairment: A feasibility study. *Sensors* 15 (8), 20097.
- Parnandi, A., Wade, E., Matarić, M., 2010. Motor function assessment using wearable inertial sensors. In: 2010 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology. IEEE, pp. 86–89.
- Salter, K., Campbell, N., Richardson, M., et al., 2013. Outcome measures in stroke rehabilitation. In: *Evidence-Based Review of Stroke Rehabilitation*. Heart and Stroke Foundation. Canadian Partnership for Stroke Recovery.
- Wade, E., Parnandi, A. R., Matarić, M. J., 2010. Automated administration of the wolf motor function test for post-stroke assessment. In: *Pervasive Computing Technologies for Healthcare (PervasiveHealth), 2010 4th International Conference on-NO PERMISSIONS*. IEEE, pp. 1–7.
- Wang, J., Yu, L., Wang, J., Guo, L., Gu, X., Fang, Q., 2014. Automated fugl-meyer assessment using svr model. In: *Bioelectronics and Bioinformatics (ISBB), 2014 IEEE International Symposium on*. IEEE, pp. 1–4.
- World Health Organization, 2002. *International Classification of Functioning, Disability and Health (ICF)*. WHO, [Online] (Accessed October 2017). URL: <http://www.who.int/classifications/icf/en/>



Simposio de Robótica, Bioingeniería y Visión por Computador 2024



Integración de Inteligencia Artificial Generativa en Entornos de Realidad Virtual para la Robótica de Rehabilitación

Gordon, A. ^a, Lorenzo, M. ^a, Delgado-Oleas, G. ^{ab}, Romero-Sorozabal, P. ^a, Cebrián, M. ^a, Rocon, E. ^a

^a Centro de Automática y Robótica, Consejo Superior de Investigaciones Científicas–Universidad Politécnica de Madrid (CSIC-UPM), Ctra. M300 Campo Real, Km 0,200, Arganda del Rey – 28500 Madrid (España).

^b Ingeniería Electrónica, Universidad del Azuay, Cuenca (Ecuador).

Resumen

La Parálisis Cerebral (PC) es un grupo de trastornos que afectan al movimiento y desarrollo de miembros del cuerpo y la gamificación, usan las mecánicas de los juegos enfocadas a la rehabilitación, para aumentar la motivación y constancia del paciente al asistir a la rehabilitación. La plataforma robótica Discover2Walk ayuda a la rehabilitación de los patrones de la marcha en infantes que sufren de parálisis cerebral. El objetivo de este proyecto es la creación de dos entornos en realidad virtual diseñados para funcionar con la plataforma robótica Discover2Walk mediante el middleware ROS2. Uno de estos entornos hará uso de inteligencia artificial generativa para un posterior estudio de la evolución cognitiva de los pacientes durante la rehabilitación.

Palabras clave: Inteligencia Artificial, Realidad Virtual, Tecnología de asistencia e ingeniería de rehabilitación, eHealth, Monitorización.

Integration of Generative Artificial Intelligence in Virtual Reality Environments for Rehabilitation Robotics

Abstract

Cerebral palsy is a group of disorders that affect movement and development in body limbs, and gamification uses game mechanics focused on rehabilitation to increase patient motivation and consistency in attending rehabilitation. The robotic platform Discover2Walk helps in the rehabilitation of walking patterns in infants suffering from cerebral palsy. The goal of this project is to create two virtual reality environments designed to work with the Discover2Walk robotic platform using the middleware ROS2. One of these environments will use generative artificial intelligence for the study of the cognitive evolution of patients during rehabilitation.

Keywords: Artificial Intelligence, Virtual Reality, Assistive technology and rehabilitation engineering, eHealth, Monitoring.

1. Introducción

La parálisis cerebral (PC) afecta a entre 2 y 3 bebés de cada 1000 nacidos en todo el mundo, siendo la principal causa de discapacidad motora en la infancia (Sewell et al., 2014). Se trata de un trastorno del neurodesarrollo en el cerebro de bebés o fetos en desarrollo que resulta en alteraciones permanentes del movimiento y la postura (Rosenbaum et al., 2007). Los pacientes con parálisis cerebral suelen experimentar una gran dependencia debido a sus dificultades para moverse, lo que afecta tanto su estado emocional como el de sus familias, así como su calidad de vida (Meyer-Heim & van Hedel, 2013).

Aunque actualmente no hay una cura para la parálisis cerebral, existen terapias, tratamientos y procedimientos quirúrgicos que pueden mejorar la calidad de vida de estos pacientes. Las terapias de rehabilitación tienen como objetivo mejorar la movilidad del paciente, su capacidad para caminar y otorgarles independencia en actividades cotidianas como jugar, comer y ducharse (Booth et al., 2018). Sin embargo, las terapias de rehabilitación convencionales suelen ser intensivas y laboriosas, lo que genera grandes costos tanto para el sistema de salud como para las familias de los pacientes (Díaz et al., 2011). Por esta razón, han surgido soluciones tecnológicas

*Autor para correspondencia: alfonso.gordon@csic.es

Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)

como las terapias de rehabilitación robóticas, que complementan las terapias tradicionales al permitir la realización de ejercicios funcionales con movimientos precisos en lugar de movimientos repetitivos sin objetivo específico (Bayón, 2018). Dependiendo del dispositivo utilizado, las terapias robóticas pueden apoyar tanto al paciente como al fisioterapeuta, permitiendo el control de factores de la marcha, la velocidad y la longitud del paso, y el soporte parcial de peso corporal al paciente, lo que beneficia a quienes tienen debilidad muscular. Una limitación importante de esta aproximación es la motivación de los pacientes, ya que tanto los familiares como los fisioterapeutas de pacientes pediátricos con PC consideran que la motivación es la característica personal más importante que determina los resultados de mejora motriz y funcional (Law et al., 2009).

Durante estos últimos años, la implementación de la gamificación, una técnica que aplica mecánicas de juego a entornos no lúdicos como la atención médica (Rodríguez, 2021), ha suscitado interés por parte de la comunidad científica (Hamari et al., 2014). La gamificación puede motivar a los pacientes a asistir a sus sesiones de rehabilitación (Grant et al., 2013), (Sardi et al., 2017) y aumentar su disfrute de estas; el sistema de recompensas que ofrece esta técnica genera un incentivo natural para alcanzar los objetivos que conducen a la recuperación del paciente. Un ejemplo de esta tendencia es el uso de realidad virtual (R.V.), y su aplicación en terapias de salud mental para diferentes tipos de trastornos, como fobias o trastorno del espectro autista (Rutkowski et al., 2020). Sin embargo, también se utiliza en diferentes campos de la rehabilitación física, como la función del miembro superior, donde los controladores incluidos en estos dispositivos pueden ser muy útiles para rastrear los movimientos del paciente. En cuanto a la rehabilitación del miembro inferior, se ha demostrado que el uso de exoesqueletos y técnicas de interfaz novedosas mejora las funciones motoras y puede ayudar en la transición de la clínica a los entornos de rehabilitación del hogar (Mubin et al., 2019).

El objetivo de este trabajo es el diseño de juegos basados en tecnologías inmersivas, Realidad Virtual, mediante los cuales se puedan realizar ejercicios basados en refuerzo positivo estableciendo objetivos y recompensas en función de la información proveniente de los sensores de la plataforma y del paciente. La integración con la plataforma robótica aumentará la sensación de inmersión del usuario. Además, nos permitirán explorar el uso de la inteligencia artificial no solo para mejorar la experiencia del juego, sino también para estudiar la evolución cognitiva de los pacientes mientras participan en las sesiones de rehabilitación robótica. (Martínez-Cabrera et al., 2022).

2. Plataforma robótica Discover2Walk

La plataforma robótica “Discover2Walk (D2W)” (Palomino-Díaz et al., 2021) se diseñó con el objetivo de actuar en las extremidades inferiores para la rehabilitación de niños mayores que sufren P.C. para que descubran y experimenten

cómo se camina, aprovechando su mejora cognitiva y motriz. La plataforma (Figura 1) controla el movimiento del paciente mediante cables motorizados que se fijan al traje, alcanzando un completo control dinámico de la cadera y el peso del niño. Con la intención de poder probar el generador de patrones que se diseñó para la plataforma, se cambió el sistema de tracción original por una cinta de correr (Delgado-Oleas et al., 2023).

La plataforma robótica, se controla a través del middleware ROS2 (Maruyama et al., 2016), un sistema de desarrollo de software modular extensamente utilizado en aplicaciones robóticas. Este sistema permite que todos aquellos sistemas conectados a la misma red que la plataforma robótica puedan controlar el D2W. Es posible comunicar ROS2 con otras aplicaciones externas mediante “puentes” creados tanto por el propio equipo de ROS como por la comunidad, lo que permite un amplio abanico de integraciones con otros entornos de desarrollo, entre los cuales se encuentra Unity.



Figura 1: Sistema robótico Discover2Walk. Se observa el prototipo del exoesqueleto flexible para el estudio de movimiento del niño, además se distinguen los diferentes actuadores que ayudan al movimiento de los miembros inferiores, dándoles cierto grado de libertad. También se ve el cambio entre el sistema de tracción y la cinta de correr (Delgado-Oleas et al., 2023).

2.1. Unity

Unity es un entorno gratuito de desarrollo gráfico que permite crear aplicaciones y juegos en R.V. Dicho entorno cuenta con una amplia comunidad de desarrolladores capaces de crear paquetes que permitan adecuar el juego a los controles deseados e incorporar diversas características, como es el caso de la interacción con ROS2 o el uso de Personajes No Jugables (N.P.Cs) impulsados por inteligencia artificial (I.A.).

La conexión entre el D2W y Unity (Figura 2) se realiza con un puente que conecta Unity con el entorno de ROS2. En el caso del primer entorno se utiliza el paquete ros2-for-unity (RobotecAI, 2023) que permite crear este puente exclusivamente compatible con el sistema operativo Windows, donde ROS2 demuestra ciertas limitaciones a la hora de usar mensajes personalizados por lo que hay que utilizar un ordenador intermediario que lea y opere con los mensajes estándar que se envían a la hora de intercambiar información con el D2W. El segundo entorno utiliza el paquete Unity Robotics Hub (Unity-Technologies, 2022) que permite la conexión con ROS2 mediante la creación de un servidor, de manera que es dicho servidor quien convierte las instrucciones de Unity a mensajes de ROS2 y viceversa, este paquete también permite el uso de mensajes personalizados independientemente del sistema operativo puesto que no es el

propio Unity el encargado de manejar dichos mensajes sino el servidor de ROS2, facilitando la comunicación con el D2W.

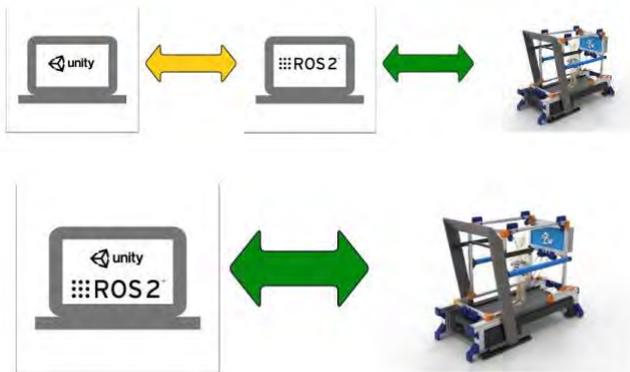


Figura 2: Comunicación entre el D2W y Unity para los diferentes entornos. Arriba: cómo se comunica el primer entorno con el uso del paquete ros2-for-unity. Abajo: como se comunica el segundo entorno con el uso del paquete Unity Robotics Hub. En amarillo se indica la transmisión de mensajes estándar y en verde la transmisión de mensajes personalizados.

3. Escenarios de Realidad Virtual

Para lograr una mayor inmersión de los usuarios hemos desarrollado dos entornos de realidad virtual en Unity: un circuito y un escape room. Ambos entornos, que se describen en las siguientes subsecciones, se comunican con el sistema D2W a través de ROS2.

3.1. Circuito

Este entorno (Figura 3) consiste en un recorrido circular a lo largo del cual el paciente debe recoger unas monedas. A lo largo del recorrido hay unos charcos que provocan que velocidad del D2W se reduzca mientras el paciente pasa a través de ellos. En este entorno, el jugador no tiene control alguno sobre su representación en el juego, el entorno se mueve de una moneda a otra a lo largo del circuito hasta que termina la simulación y se indica el número de monedas recogidas y la distancia total recorrida. Tras hacer pruebas, se comprobó que la integración de la VR en la rehabilitación era exitosa, mostrando un incremento notable en el grado de compromiso y disfrute de los pacientes. También se comprobó que, dado que la velocidad a la que se mueven los pacientes es la misma a la que se mueve la cinta, estos no se mareaban durante largas sesiones de juego.



Figura 3: Izquierda: Mapa del circuito del primer entorno. Derecha: charco capaz de ralentizar y moneda de recompensa.

3.2. Escape room

Este segundo entorno (Figura 4) consiste en un escape room que el paciente deberá resolver para luego poder explorar un pequeño terreno con animales en caso de que la sesión de rehabilitación no haya terminado. El cambio de paquetes para la comunicación entre ROS2 y Unity permite que el paciente tenga mayor control sobre el D2W, pudiendo aumentar la velocidad, hasta un máximo de 3 km/h, o reducirla, hasta llegar a detenerse si es necesario, para poder interactuar con el mundo sin riesgo a que se pueda marear.

En el desarrollo de este entorno se incorporó el uso de un N.P.C. (*Non Player Character*) guiado por I.A., cuya función es ayudar al paciente a resolver las preguntas y que permite, mediante el modelado de las interacciones lingüísticas entre el paciente y el N.P.C, el estudio de la evolución cognitiva de los pacientes a medida que mejoran la marcha. Este N.P.C. se incorporó a través de la empresa ConvAI que ha diseñado un paquete que permite crear N.P.Cs conectados a los distintos modelos de lenguaje que se están popularizando hoy en día, en en nuestro caso usamos ChatGTP 3.5 (OpenAI®, Estados Unidos de América). La solución de ConvAI permite un alto grado de personalización de los N.P.Cs, como un trasfondo, una base de conocimiento de la que extraer la información personalizada o programar coletillas a la hora de hablar con el jugador, de tal manera que simula la interacción con una persona de una manera más natural que los árboles de decisión y diálogos preestablecidos que se utilizan habitualmente en los videojuegos.



Figura 4: Arriba izquierda: visión general del mapa. Arriba derecha: interior del Escape Room. Abajo: N.P.C impulsado por I.A. generativa.

4. Consideraciones éticas

La investigación con R.V. e I.A. Generativa para la rehabilitación de la PC presenta un gran potencial, pero exige un análisis ético profundo. Se debe obtener un consentimiento informado válido y adaptado a las capacidades cognitivas de los participantes, especialmente niños con P.C. La protección de datos sensibles es fundamental, implementando mecanismos robustos de seguridad y transparencia en su gestión. La seguridad y el bienestar de los participantes son una prioridad, desarrollando protocolos específicos, medidas de prevención y atención a la salud mental. Evaluar cuidadosamente los riesgos y beneficios, involucrando a las partes interesadas, es crucial. Diseñar interfaces y experiencias accesibles, e implementar estrategias para facilitar el acceso a la tecnología por parte de poblaciones diversas, son acciones necesarias para promover la equidad.

5. Conclusiones y trabajo futuro

Este estudio establece los fundamentos para la aplicación de la gamificación a través de la Realidad Virtual en las sesiones de rehabilitación de pacientes pediátricos con Parálisis Cerebral (P.C.), utilizando la plataforma robótica D2W. Se espera que esta integración mejore la motivación, así como las funciones motoras y cognitivas de los pacientes.

Sin embargo, existen áreas de mejora y otros aspectos que podrían explorarse en futuras investigaciones. En primer lugar, se sugiere realizar un estudio exhaustivo sobre la efectividad de la Realidad Virtual en las sesiones de rehabilitación, especialmente al utilizar el escape room, aprovechando la aplicación de la Inteligencia Artificial para evaluar la mejora de las funciones cognitivas y los impactos positivos de esta tecnología emergente en el proceso de rehabilitación.

Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por los proyectos Stride “Validación técnica y económica de la plataforma Discover2Walk para el entorno clínico” (PDC2022-133898-C31) y Discover2Walk “Desarrollo de una plataforma robótica para ayudar a niños con Parálisis Cerebral a descubrir cómo caminar” (PID2019-105110RB-C31), financiados por el Ministerio de Ciencia e Innovación.

Referencias

Sewell, M. D., Eastwood, D. M., & Wimalasundera, N. (2014). Managing common symptoms of cerebral palsy in children. *BMJ*, 349. <https://doi.org/10.1136/BMJ.G5474>

Rosenbaum, P., Paneth, N., Leviton, A., Goldstein, M., & Bax, M. (2007). A report: the definition and classification of cerebral palsy April 2006. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 49(SUPPL. 2), 8–14. <https://doi.org/10.1111/J.1469-8749.2007.TB12610.X>

Meyer-Heim, A., & van Hedel, H. J. A. (2013). Robot-Assisted and Computer-Enhanced Therapies for Children with Cerebral Palsy: Current State and Clinical Implementation. *Seminars in Pediatric Neurology*, 20(2), 139–145. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.spen.2013.06.006>

Booth, A. T. C., Buizer, A. I., Meyns, P., Oude Lansink, I. L. B., Steenbrink, F., & van der Krogt, M. M. (2018). The efficacy of functional gait training in children and young adults with cerebral palsy: a systematic review and meta-analysis. *Developmental Medicine and Child Neurology*, 60(9), 866–883. <https://doi.org/10.1111/DMCN.13708>

Díaz, I., Gil, J. J., & Sánchez, E. (2011). Lower-Limb Robotic Rehabilitation: Literature Review and Challenges. *Journal of Robotics*, 2011, 1–11. <https://doi.org/10.1155/2011/759764>

Bayón, C. (2018). Design, Development and Evaluation of a Robotic Platform for Gait Rehabilitation and Training in Patients with Cerebral Palsy [Universidad Carlos III de Madrid]. <http://hdl.handle.net/10261/167024>

Law, M., Darrach, J., Pollock, N., King, G., Rosenbaum, P., Russell, D., Palisano, R., Harris, S., Armstrong, R., & Watt, J. (2009). Family-Centred Occupational Therapy for Children with Cerebral Palsy. *Physical & Occupational Therapy In Pediatrics*, 18(1), 83–102. https://doi.org/10.1080/J006V18N01_06

Rodríguez, P. (2021, 10 March). The Ultimate Definition of Gamification (With 6 Real World Examples). *Growth Engineering*. <https://www.growthengineering.co.uk/definition-of-gamification/>

Hamari, J., Koivisto, J., & Sarsa, H. (2014, January). Does gamification work?--a literature review of empirical studies on gamification. In 2014 47th Hawaii international conference on system sciences (pp. 3025-3034). Ieee.

Grant, S., & Betts, B. (2013, May). Encouraging user behavior with achievements: an empirical study. In 2013 10th Working Conference on Mining Software Repositories (MSR) (pp. 65-68). IEEE.

Sardi, L., Idri, A., & Fernández-Alemán, J. L. (2017). A systematic review of gamification in e-Health. *Journal of biomedical informatics*, 71, 31-48.

Emmelkamp, P. M., & Meyerbröker, K. (2021). Virtual reality therapy in mental health. *Annual Review of Clinical Psychology*, 17, 495-519.

Rutkowski, S., Kiper, P., Cacciante, L., Cieślak, B., Mazurek, J., Turolla, A., & Szczepańska-Gieracha, J. (2020). Use of virtual reality-based training in different fields of rehabilitation: A systematic review and metaanalysis. *Journal of Rehabilitation Medicine*.

Mubin, O., Alnajjar, F., Jishtu, N., Alsinglawi, B., & Al Mahmud, A. (2019). Exoskeletons with virtual reality, augmented reality, and gamification for stroke patients' rehabilitation: systematic review. *JMIR rehabilitation and assistive technologies*, 6(2), e12010.

Martínez-Cabrera, S., Sanchez-Betancourt, J.T., Meza-Amaya, A., Avilés-Reyes, R., Trillo-Gabaldón, S., & Domínguez, A. (2022). Diferencias entre la rehabilitación tradicional y la robótica sobre funciones cognitivas en pacientes con parálisis cerebral. *DIVULGARE Boletín Científico de la Escuela Superior de Actopan*.

Palomino-Díaz, V., Romero-Sorozábal, P., Delgado-Oleas, G., & Martín, C. (2021). Diseño conceptual de una plataforma robótica para ayudar a que los niños con parálisis cerebral descubran como caminar. In XII Simposio CEA de Bioingeniería (Vol. 83).

G. Delgado-Oleas, P. Romero-Sorozábal, J. Lora-Millan, A. Gutierrez and E. Rocon, "Bioinspired Hierarchical Electronic Architecture for Robotic Locomotion Assistance: Application in Exoskeletons," in IEEE Access, vol. 11, pp. 131610-131622, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3336003.

Y. Maruyama, S. Kato, and T. Azumi, "Exploring the performance of ROS2," Proceedings of the 13th International Conference on Embedded Software, EMSOFT 2016, Oct. 2016, doi: 10.1145/2968478.2968502.

RobotecAI. (2023). GitHub - RobotecAI/ros2-for-unity: High-performance ROS2 solution for Unity3D. GitHub. <https://github.com/RobotecAI/ros2-for-unity>

Unity-Technologies. (2022). GitHub - Unity-Technologies/Unity-Robotics-Hub: Central repository for tools, tutorials, resources, and documentation for robotics simulation in Unity. GitHub. <https://github.com/Unity-Technologies/Unity-Robotics-Hub>



Simposio de Robótica, Bioingeniería y Visión por Computador 2024



Sesión: Bioingeniería

Framework en ROS para Decodificación Mioeléctrica mediante Aprendizaje por Demostración

Bernat, L.^{a,c,*}, Alonso, J. F.^b, Ubeda, A.^c, Martínez-Rojas, M.^b

^aInstituto Universitario de Física Aplicada a las Ciencias y las Tecnologías, Grupo Human Robotics, Universidad de Alicante, Alicante, España.

^bDepartamento de Ingeniería de Sistemas, Automática e Informática Industrial, Research Center for Biomedical Engineering (CREB), Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España.

^cDepartamento de Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal, Grupo Human Robotics, Universidad de Alicante, Alicante, España.

Resumen

En este artículo se presenta el diseño e implementación de un *framework* para la decodificación motora de la mano a partir de señales electromiográficas (EMG). El sistema se basa en el Aprendizaje por Demostración, permitiendo a los usuarios entrenar modelos de decodificación de movimientos específicos con sus señales EMG particulares. Para ello, se emplea como base *Robot Operating System* (ROS), ofreciendo un entorno modular y fácilmente adaptable a diferentes modelos o alternativas en el sistema. Se realiza una evaluación del sistema empleando dos modelos: un regresor lineal y un clasificador *Linear Discriminant Analysis* (LDA). Con esto se valida el funcionamiento del *framework* y se estudia la calidad de la decodificación de los dos modelos empleados.

Palabras clave: Interacción cerebro-máquina, Tecnología asistiva e ingeniería de rehabilitación, Procesamiento de señales, Neurosistemas, Análisis e interpretación de bioseñales.

A ROS-based Framework for Myoelectric Decoding via Learn from Demonstration

Abstract

In this paper, we present the design and implementation of a framework for hand motor decoding from electromyographic (EMG) signals. The system is based on Learning from Demonstration, allowing users to train specific movement decoding models with their particular EMG signals. For this purpose, Robot Operating System (ROS) is used as a base, offering a modular environment, easily adaptable to different models or alternatives in the system. An evaluation of the system is carried out using two models: a linear regression model and a Linear Discriminant Analysis (LDA) classifier. In this way, the performance of the framework is validated and the decoding quality of the two models used is studied.

Keywords: Brain-machine interaction, Assistive technology and rehabilitation engineering, Signal processing, Neuro-systems, Bio-signals analysis and interpretation.

1. Introducción

Se estima que 57,7 millones de personas vivían con la amputación de una extremidad debido a una causa traumática en 2017 (McDonald et al., 2021). En particular, la amputación de mano puede afectar de manera significativa a una persona y conducir a graves limitaciones en la vida cotidiana. Es por ello que desde hace décadas se han desarrollado prótesis con el fin de ofrecer dispositivos que ayuden en la realización de Actividades de la Vida Diaria (AVD) y otras tareas. Sin embargo, el

avance conseguido no ofrece soluciones comerciales que funcionalmente ofrezcan una mejora significativa en comparación a dispositivos de hace casi cien años. En la actualidad, el campo de la prótesis es de sumo de interés y está experimentando un rápido desarrollo, gracias a los avances en tecnología, técnicas quirúrgicas y conocimiento de la anatomía y fisiología humanas. Esto hace factible que en los próximos años se desarrollen nuevas generaciones de prótesis que puedan entrar al mercado y ofrecer estos avances a los usuarios (Farina and Amsüss, 2016).

*Autor para correspondencia: lluis.bernat@ua.es

Actualmente existe un gran número de prótesis de mano, tanto en el mercado como en investigación, lo cual ofrece una gran variedad de alternativas para los usuarios (Mendez et al., 2021). El diseño de estas prótesis suele comprender un balance entre la funcionalidad proporcionada y la estética lograda, y depende de una serie de factores como el precio, peso, tamaño, necesidades del usuario y apariencia. Con respecto a las prótesis actuadas, se pueden diferenciar las *body-powered* y las motorizadas, siendo estas últimas las que más avance tecnológico están experimentado. Un aspecto crucial de las prótesis motorizadas es el método de control empleado, donde los más comunes son los que están basados en la detección de la actividad eléctrica de la musculatura subyacente (Vujaklija and Farina, 2022).

Se han desarrollado diversas estrategias de control para prótesis mioeléctricas (Farina et al., 2014), destacando como la más común el control proporcional de un único grado de libertad (Bernat et al., 2023). Sin embargo, al aumentar el número de Grados de Libertad (GDL) de la prótesis, el control resulta poco intuitivo y complicado, aunque hay enfoques que intentan solucionar esta problemática (Nowak et al., 2023; Hasbani et al., 2022). Se ha investigado en otros métodos, como el reconocimiento de patrones, el cual se basa en la suposición de que existen patrones de señales distinguibles y repetibles entre diferentes tareas motoras (Sartori et al., 2018). A pesar de ello, los sistemas de reconocimiento de patrones electromiográficos (EMG) enfrentan desafíos debido a la necesidad de coincidencia repetible entre los patrones EMG durante el uso diario y los utilizados durante el entrenamiento. Estos patrones pueden cambiar debido a factores ambientales y del usuario, lo que limita su capacidad para manejar movimientos simultáneos de manera intuitiva (Vujaklija et al., 2016).

Una cuestión común a todas las alternativas de control existentes para las prótesis de mano es la facilidad de uso para los usuarios y la necesidad de entrenamiento previo para poder conseguir realizar movimientos complejos. A pesar de ello, el control de las prótesis modernas suele ser poco intuitivo y agotador. Ante esto, existen varios enfoques que tratan de solucionar esta problemática, como por ejemplo, el uso de control adaptativo (Edwards et al., 2016) o emplear paradigmas de Aprendizaje por Demostración (Vasan and Pilarski, 2018). En particular, el Aprendizaje por Demostración trata de entrenar el algoritmo de control de la prótesis en base a la capacidad de generar señales EMG del usuario y los movimientos que este desee realizar. Este paradigma se ha aplicado junto con algoritmos de Aprendizaje por Refuerzo, donde un algoritmo es capaz de aprender patrones de movimiento proporcionados por el usuario y generar sinergias de control de la mano y la muñeca (Vasan and Pilarski, 2017).

En este artículo se describe el desarrollo de un *framework* para la decodificación de la cinemática de la mano a partir de señales EMG del antebrazo. La finalidad de esta decodificación es controlar una prótesis de mano, de manera que esta sea capaz de imitar los movimientos asociados a una cierta actividad muscular. Para ello, se hace uso del paradigma de Aprendizaje por Demostración, en el que hay una fase previa de entrenamiento donde el usuario puede mostrar qué movimientos debe realizar la prótesis empleando su brazo sano, en base a las señales EMG que se generen en su brazo afectado.

2. Equipamiento y software

2.1. Equipo EMG

El equipo EMG empleado es el *Ultium EMG* (Noraxon, USA) (Figura 1(a)). Este es un equipo de adquisición de electromiografía superficial mediante sensores inalámbricos con electrodos bipolares. Se emplean cuatro de estos sensores, de manera que cada uno registra las señales EMG de uno de los músculos seleccionados, generando así la entrada del algoritmo de control. Estas señales EMG tienen una frecuencia de muestreo de 2000 Hz.

Para la adquisición, es necesario emplear junto a los sensores el software *myoRESEARCH* (Noraxon, USA), el cual se encarga de la comunicación entre los sensores inalámbricos y el ordenador. Este mismo software permite retransmitir las señales que le llegan de los sensores, lo cual permite emplear los datos en tiempo real en un software externo.

2.2. Cámaras RGB y software de seguimiento de mano

Para capturar la cinemática de la mano se hace uso de dos cámaras *webcam* RGB (Figura 1(b)). Estas cámaras ofrecen dos imágenes de una misma escena desde diferentes perspectivas, permitiendo así triangular las posiciones y obtener coordenadas de profundidad.

Para la detección de la cinemática de la mano se emplea el software de *MediaPipe Hand Landmarker* (Zhang et al., 2020), el cual a partir de una imagen devuelve las coordenadas de ciertos *keypoints* de la mano, permitiendo un seguimiento de ésta y de los dedos en tiempo real sin la necesidad de marcadores.

2.3. Mano robótica

Se ha hecho uso de la *Flexy-Hand* (Gyrobot, UK) (Figura 1(c)). Este es un proyecto de mano robótica de bajo coste que se puede construir fácilmente con una impresora 3D. A esta mano robótica se le han añadido cinco servomotores MG 996R (Figura 1(e)), uno para cada dedo, los cuales se controlan por medio de una placa Arduino UNO (Figura 1(d)). La placa Arduino recibe órdenes de posicionamiento angular de cada uno de los dedos y se encarga de transmitir estas órdenes a cada uno de los motores.

Esta mano robótica tiene cinco GDL, uno para cada dedo. El accionamiento se realiza mediante los servomotores indicados, los cuales tiran de unos tendones que accionan el cierre del dedo. La apertura del dedo se realiza de forma pasiva, mediante las articulaciones impresas en filamento flexible. A parte de la propia mano, se ha impreso también el antebrazo del proyecto *InMoov* para colocar cada uno de los motores y la electrónica necesaria.

A parte de la propia construcción de la *Flexy-Hand*, se han empleado los archivos 3D para crear un modelo *Unified Robot Description Format* (URDF) de la mano, el cual se puede utilizar para poder visualizar la mano en la herramienta *RViz* de *Robot Operating System* (ROS).

3. Diseño del *framework* basado en Aprendizaje por Demostración

En el presente trabajo se aborda la implementación de un *framework* que incluye todo el software y hardware necesario para generar un algoritmo de control de una prótesis robótica de

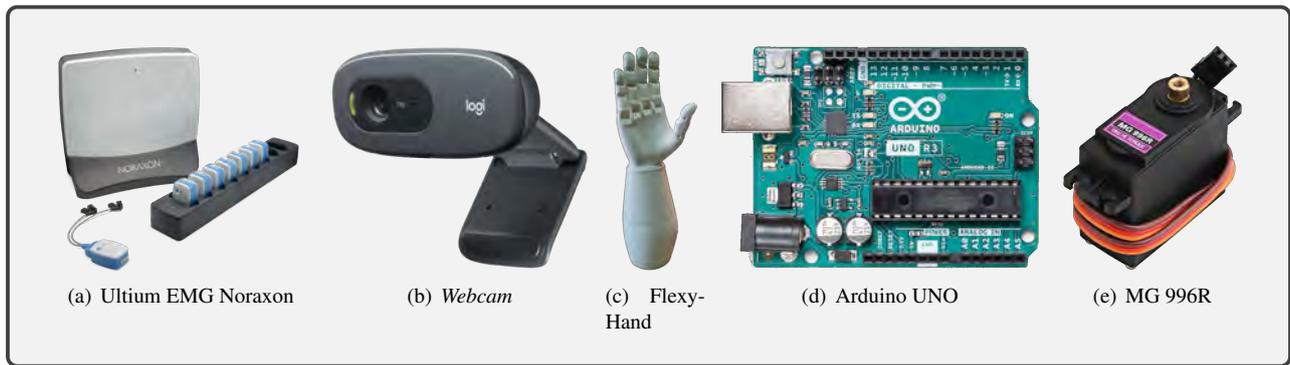


Figura 1: Equipamiento del *framework*.

mano. Este algoritmo de control se genera dentro del paradigma de Aprendizaje por Demostración, de manera que el usuario de la prótesis puede *enseñarle* al algoritmo los movimientos que debe realizar en base a unas señales EMG específicas. Para ello, se debe realizar una adquisición simultánea de señales EMG de los músculos que se deseen emplear para el control y de la cinemática de la mano. De esta manera, se emplean las señales EMG del brazo afectado como entrada para el algoritmo, al tiempo que la cinemática de la mano del brazo sano se emplea para obtener la salida deseada del mismo. Con ello, ambas medidas se correlacionan, siendo el objetivo del algoritmo decodificar las posiciones articulares que debería tener la prótesis en base a las señales EMG.

El *framework* se puede subdividir en varios módulos, los cuales deben trabajar en conjunto y sincronía con el fin de poder realizar la adquisición de los datos para el entrenamiento del algoritmo. En la Figura 2 se puede ver un esquema del flujo de trabajo del *framework* y a continuación se detallan las particularidades de cada módulo que lo compone.

3.1. Captura y procesado de las señales EMG

Se realiza la captura de señales EMG de cuatro músculos seleccionados del brazo afectado. A priori, estos músculos pueden ser cualesquiera que se consideren, aunque puede ser más intuitivo emplear aquellos que tengan una relación más directa con el movimiento o sobre los que se tenga un mayor control. Esto permite que el algoritmo generado se pueda adaptar fácilmente a las características de cada usuario.

Las señales EMG se capturan directamente con el software *myoRESEARCH*, el cual facilita a su vez el procesado de las señales en tiempo real. Este procesado consiste en una rectificación de la señal EMG y la aplicación de un filtro de media móvil de 150 ms (300 muestras).

Con el fin de paliar las diferencias intersesiones de las señales EMG para un mismo usuario, se realiza una normalización de la señal en base a la Contracción Máxima Voluntaria (CMV). Para ello, antes de iniciar el registro de las señales EMG de entrenamiento, se obtiene esta CMV.

La señal procesada se envía desde el software de Noraxon a un código externo en Python que se encarga de recibir esta información y correlacionarla en tiempo real con la información de cinemática que se recibe al mismo tiempo. A este código le llegan fragmentos *cortos* de la señal EMG que va guardando,

aunque por simplicidad, en vez del fragmento recibido, únicamente guarda el valor medio de dicho fragmento.

3.2. Captura y procesado de la cinemática de la mano

Se realiza la captura de la cinemática de la mano del brazo sano. Esta cinemática se representa por una serie de *keypoints* en el espacio tridimensional, los cuales se pueden consultar en la Figura 2. Para ello se emplean dos imágenes con diferentes perspectivas de la misma escena, sobre las cuales se detectan los *keypoints* en dos dimensiones de la mano mediante el software de *MediaPipe*. Luego, gracias a una calibración previa de las dos cámaras empleadas, se triangula la posición de cada *keypoint* para obtener una representación en tres dimensiones.

A partir de la información de la cinemática de la mano, y tomando en consideración el rango de movimiento de la *Flexy-Hand*, se decide extraer información específica. Esta información es el ángulo de cierre de cada dedo, considerándolo como el ángulo entre la primera y segunda falange del dedo. Con esto, se obtienen cinco valores (uno para cada dedo) que se envían a un código que se encarga de mapearlos con las señales EMG, como se ha comentado con anterioridad.

3.3. Mapeado de los datos y entrenamiento del modelo

Las señales EMG y de cinemática se mapean en tiempo real y se guardan en un fichero para hacer posteriormente el entrenamiento de un modelo de decodificación. El entrenamiento de este modelo se realiza a posteriori a partir de los datos guardados.

Una vez el modelo se ha entrenado, este se guarda en un fichero con el fin de ser utilizado para la decodificación en tiempo real.

3.4. Feedback visual

Durante la fase de adquisición de datos, la cinemática de la mano del brazo sano representa el comportamiento que deberá tener la prótesis. Sin embargo, de manera general las prótesis de mano no representan la totalidad de movimientos que una mano humana puede realizar. Es por ello, que durante la adquisición de la cinemática, esta se envía directamente a la *Flexy-Hand* para ver en directo cual sería el comportamiento real de la prótesis. Para este visionado puede emplearse tanto el modelo físico que se ha construido como la simulación, o ambos.

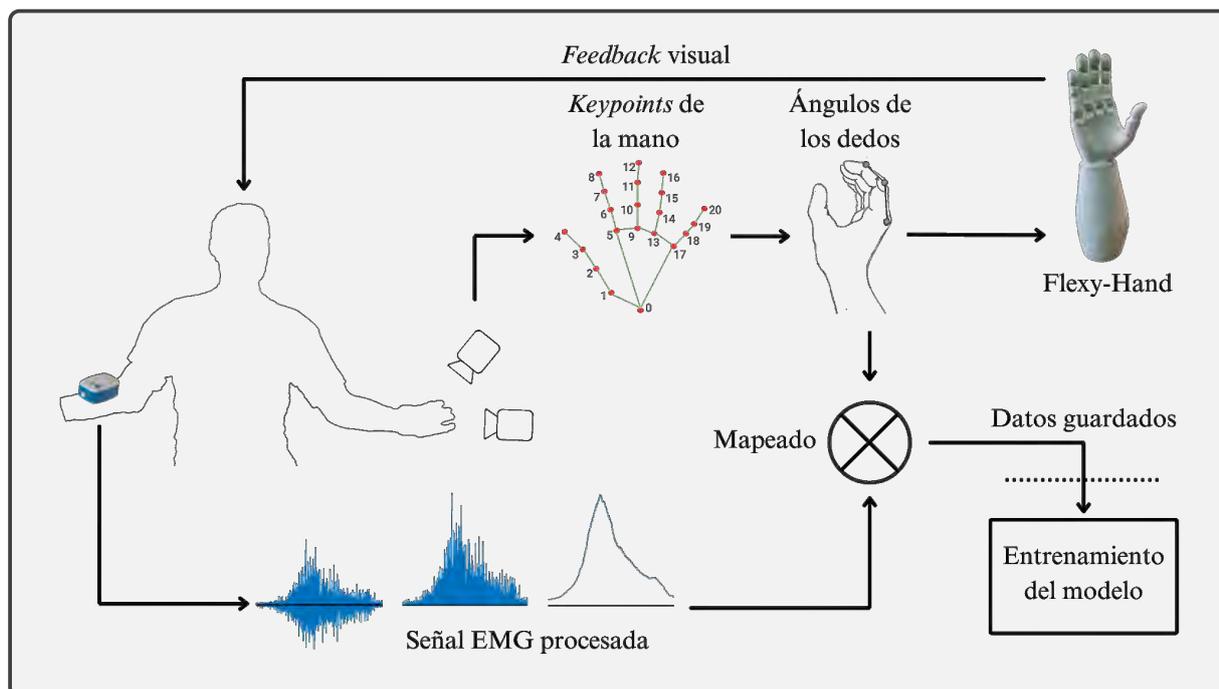


Figura 2: Diagrama de flujo del *framework*.

4. Protocolo de evaluación del *framework*

Con tal de determinar la calidad de la decodificación, se plantea un protocolo de evaluación que se puede llevar a cabo con sujetos sin amputación, es decir, que conserven ambas manos. En la Figura 3 se puede ver un diagrama de flujo del protocolo.

Este protocolo consiste en adquirir las señales EMG de un brazo y la cinemática de la mano del mismo brazo. Las señales EMG se decodifican en las posiciones angulares de cada dedo, de manera que se pueden comparar los movimientos reales que el usuario realiza con las posiciones decodificadas por el modelo. Además, las posiciones decodificadas por el modelo se envían a la mano robótica para poder ver el funcionamiento real de la misma.

Por tanto, a partir de ambas medidas de cinemática decodificada y de referencia sobre la misma mano se pueden extraer métricas que permiten evaluar el modelo empleado.

5. Evaluación experimental

Se realiza el entrenamiento de los modelos seleccionados y se aplica el Protocolo de Evaluación para cada uno de los sujetos de un grupo de 4 personas (1 mujer y 3 hombres con una edad media de 23 ± 1 años). Todos los participantes son diestros, y todos han firmado el correspondiente consentimiento informado siguiendo el Protocolo del Comité de Ética (REF:UA-2023-10-04) de acuerdo con la Declaración de Helsinki, la cual establece posturas, pausas y tiempos a seguir. La evaluación experimental consta de dos fases, una de entrenamiento y una de evaluación que se detallan a continuación.

5.1. Fase de entrenamiento

En primer lugar, se seleccionan los modelos que se van a entrenar: un Regresor Lineal (RL) múltiple y un *Linear Discriminant Analysis* (LDA). De esta forma, se prueba el comportamiento de un regresor para predecir una medida continua de cómo de *abierto o cerrado* debe estar cada dedo de la prótesis. Y también se prueba un clasificador que diferencia entre dos estados para cada dedo: totalmente abierto o totalmente cerrado.

El procedimiento seguido para cada sujeto es el descrito a continuación. En primer lugar se toma la medida de la CMV. Luego se le pide al sujeto realizar una serie de movimientos de apertura y cierre de la mano. Se realizan en total 60 movimientos de apertura y cierre, los cuales son guiados por un vídeo que se reproduce en una pantalla y muestra al sujeto en que momento realizar cada movimiento.

5.2. Fase de evaluación

Para evaluar el funcionamiento del algoritmo de control, se realiza otra adquisición con movimientos de apertura y cierre de la mano siguiendo el Protocolo de Evaluación descrito anteriormente. Se realizan un total de 30 movimientos de apertura y cierre, los cuales son guiados por un vídeo.

De esta manera, a partir de las señales decodificadas de posición angular de cada dedo, y las señales de posición de referencia obtenidas, se calculan una serie de métricas que describen la calidad de la decodificación.

6. Resultados y discusión

En primer lugar, mediante la realización del Protocolo de Evaluación, se ha podido validar el funcionamiento del *framework*, siendo este capaz de generar los algoritmos de decodificación deseados.

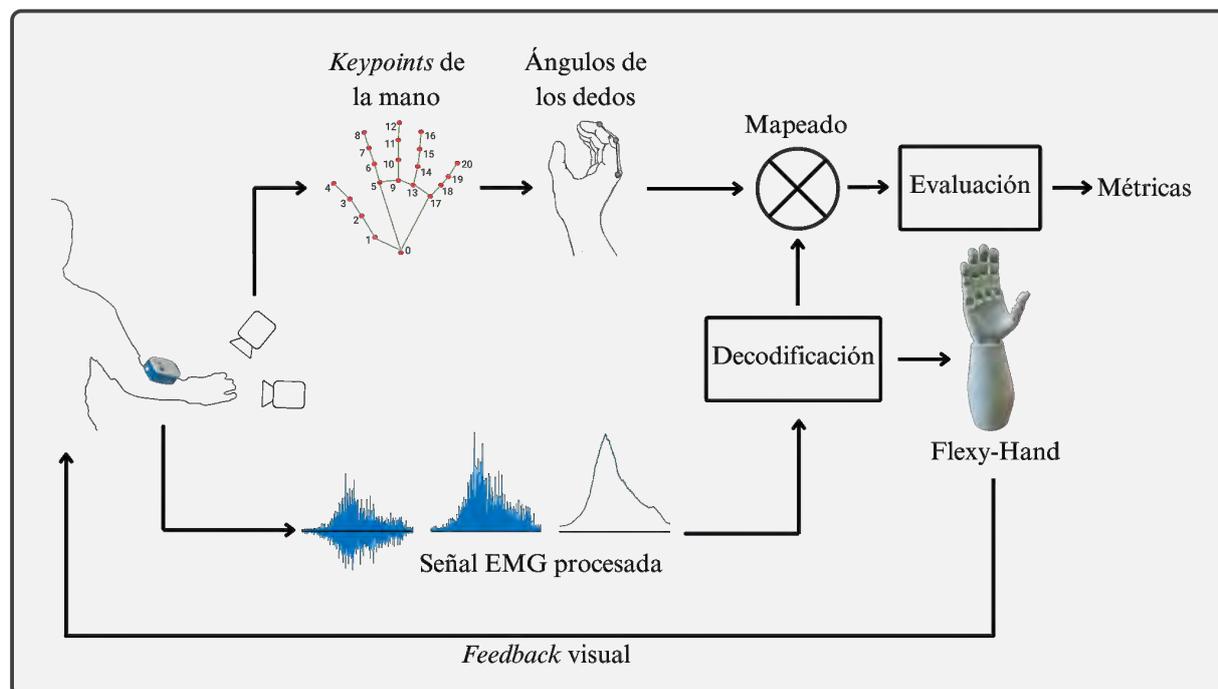


Figura 3: Diagrama de flujo del Protocolo de Evaluación.

Por un lado, en cuanto al RL, en la Tabla 1 pueden verse las métricas extraídas a partir de comparar las señales decodificadas y de referencia. Esta tabla contiene los datos medios del conjunto de sujetos.

El primer elemento destacable es que las métricas para el pulgar son considerablemente diferentes a las de los otros dedos. Esto puede ser debido a la diferencia fisiológica del movimiento del pulgar y a las diferencias que pueden haber tanto en la detección de la cinemática como en el cálculo del ángulo de ese dedo. Es por ello que, a parte de las métricas para cada uno de los dedos, se calculan los valores medios de esas métricas para todo el conjunto de dedos y también para todo el conjunto excepto el pulgar.

Tabla 1: Métricas del RL para los datos medios del conjunto de sujetos. Las métricas para *Cuatro dedos* se refieren a todos excepto el pulgar. MEA: Error Medio Absoluto (*Mean Absolute Error*), STD: Desviación Estándar del Error Medio Absoluto (*Standard Deviation*), RMSE: Raíz del Error Cuadrático Medio (*Root Mean Square Error*), Corr: Correlación

	MEA (°)	STD (°)	RMSE (°)	Corr
Pulgar	7,97	5,17	9,51	0,33
Índice	27,66	22,22	35,54	0,77
Corazón	28,73	22,38	36,51	0,75
Anular	29,01	22,76	36,98	0,74
Meñique	28,57	23,07	36,85	0,74
Cinco dedos	24,39	19,12	31,08	0,67
Cuatro dedos	28,49	22,61	36,47	0,75

En primer lugar, con tal de poder evaluar las métricas obtenidas, cabe destacar que el ángulo de los dedos en los movimientos de apertura y cierre de la mano oscila entre 60° y 180° .

De media para todos los dedos, el MAE y la STD es de $24,39^\circ \pm 19,12^\circ$ ($28,49^\circ \pm 22,61^\circ$ sin tener en cuenta el pulgar), lo cual es un error considerable en el contexto del posicionamiento de los dedos de una prótesis de mano. De igual manera, el RMSE es igualmente considerable, siendo este de $31,08^\circ$. Ante esto, puede considerarse que la decodificación del ángulo de los dedos tiene demasiado error para el control de una prótesis. Sin embargo, al observar la señal decodificada en comparación con la de referencia, como se muestra en la Figura 4, se puede ver como el modelo es capaz de identificar de manera correcta los momentos de apertura y cierre de la mano. Por tanto, el modelo es capaz de decodificar correctamente la intención del usuario. El error que se acumula al comparar ambas señales se debe a la inexactitud del valor del ángulo decodificado y a la aparición de picos en la señal decodificada, los cuales añaden errores significativos momentáneos que se reflejan en las métricas. A pesar de estos errores, las señales están correlacionadas hasta cierto punto.

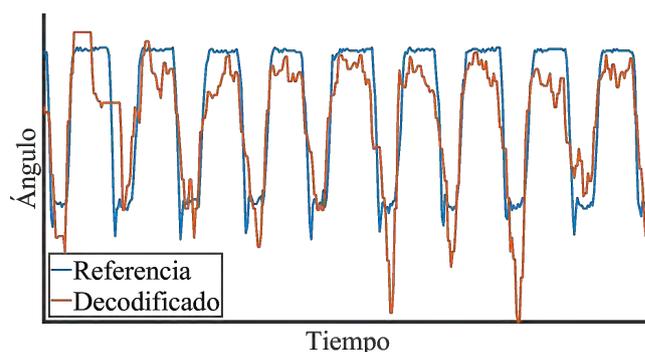


Figura 4: Ángulo de referencia y decodificado del dedo índice para uno de los sujetos durante la evaluación.

Cabe destacar también la diferencia de tener en cuenta el dedo pulgar o no para la media de las métricas. Se puede ver que con el pulgar el error es menor, pero la correlación también es menor. La menor precisión en la decodificación para el pulgar podría explicar la baja correlación; mientras que el rango de ángulos del pulgar es menor, lo cual contribuye a valores más bajos en las métricas de error.

Por otro lado, en cuanto al clasificador LDA, en la Tabla 2 pueden verse las métricas que se han extraído de la clasificación. En primer lugar cabe destacar que ocurre el mismo suceso con respecto al dedo pulgar que en el caso del regresor. Aquí se puede ver como la clasificación funciona peor para el pulgar. Y por ello, también se han obtenido métricas generales para los cinco dedos, y para todo el conjunto excepto el pulgar.

Tabla 2: Métricas del clasificador LDA para los datos medios del conjunto de sujetos. Las métricas para *Cuatro dedos* se refieren a todos excepto el pulgar.

	Precision	<i>f1-score</i>
Pulgar	0,64	0,67
Índice	0,87	0,88
Corazón	0,85	0,85
Anular	0,85	0,85
Meñique	0,85	0,85
Cinco dedos	0,81	0,82
Cuatro dedos	0,86	0,86

De manera general y sin tomar en cuenta al pulgar se obtiene una precisión de 0,86 y una *f1-score* de 0,86 (tomando en cuenta el pulgar se obtiene 0,81 y 0,82, respectivamente), con lo cual se puede considerar que en la mayoría de los casos el modelo es capaz de identificar correctamente la intención del usuario.

7. Conclusiones

Este artículo muestra la implementación de un *framework* para la decodificación motora en prótesis de manos, el cual se ha validado mediante un protocolo experimental. Respecto a esta validación, se considera que el *framework* ha sido capaz de generar los algoritmos de decodificación deseados. Haciendo especial hincapié en el paradigma de Aprendizaje por Demostración, los sujetos han sido capaces de generar un algoritmo que decodificase sus movimientos a partir de lo que estos le habían enseñado previamente.

Con respecto a los dos modelos implementados, el regresor, a pesar de que haya presentado métricas de error elevadas, es capaz de detectar correctamente la intención de movimiento del usuario y decodificar las posiciones angulares de los dedos, aunque para el pulgar la decodificación empeora. El clasificador también es capaz de detectar la mayoría de las veces el movimiento que el usuario desea realizar. Por tanto, se considera que el regresor resulta a priori una mejor alternativa, puesto que se prefiere para una prótesis de mano que la posición no sea exactamente la deseada, frente a que en algún momento se abra o cierre cuando debería ser al contrario.

En definitiva, el *framework* propuesto ha demostrado ser efectivo para la decodificación motora de la mano, aunque con

ciertas limitaciones en la precisión de la decodificación. A pesar de esto, los modelos implementados ofrecen resultados prometedores en la detección de la intención de movimiento del usuario. Estos resultados validan el *framework*, pero también sugieren que estos modelos con otras características u otros modelos más avanzados podrían mejorar la precisión de la decodificación en el futuro.

Agradecimientos

Este estudio ha sido desarrollado en el marco de los proyectos MYOREHAB (PCI2023-143405) y TECICREHAB (PID2020-117751RB-I00), financiados por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades y la Agencia Estatal de Investigación MCIN/AEI/10.13039/501100011033. Y el proyecto MyoSleeve (EXP_75029) financiado por el Consejo Superior de Deportes.

Referencias

- Bernat, L., Morell, V., Ramon, J. L., Pomares, J., Ubeda, A., 2023. A neuromechanical model of knee flexion-extension based on linear regressors for neuro-controlled exoskeletons. In: Tardioli, D., Matellán, V., Heredia, G., Silva, M. F., Marques, L. (Eds.), ROBOT2022: Fifth Iberian Robotics Conference. Springer International Publishing, Cham, pp. 243–251.
- Edwards, A. L., Dawson, M. R., Hebert, J. S., Sherstan, C., Sutton, R. S., Chan, K. M., Pilarski, P. M., 2016. Application of real-time machine learning to myoelectric prosthesis control: A case series in adaptive switching. *Prosthet. Orthot. Int.* 40 (5), 573–581.
- Farina, D., Amsüss, S., 2016. Reflections on the present and future of upper limb prostheses. *Expert review of medical devices* 13(4), 321–324.
- Farina, D., Jiang, N., Rehbaum, H., Holobar, A., Graimann, B., Dietl, H., Aszmann, O. C., 2014. The extraction of neural information from the surface emg for the control of upper-limb prostheses: Emerging avenues and challenges. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering* 22 (4), 797–809.
- Hasbani, M. H., Barsakcioglu, D. Y., Jung, M. K., Farina, D., 2022. Simultaneous and proportional control of wrist and hand degrees of freedom with kinematic prediction models from high-density emg. In: 2022 44th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine Biology Society (EMBC). pp. 764–767.
- McDonald, C. L., Westcott-McCoy, S., Weaver, M. R., Haagsma, J., Kartin, D., 2021. Global prevalence of traumatic non-fatal limb amputation. *Prosthetics and orthotics international* 45(2), 105–114.
- Mendez, V., Iberite, F., Shokur, S., Micera, S., 2021. Current solutions and future trends for robotic prosthetic hands. *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems* 4 (Volume 4, 2021), 595–627.
- Nowak, M., Vujaklija, I., Sturma, A., Castellini, C., Farina, D., 2023. Simultaneous and proportional real-time myocontrol of up to three degrees of freedom of the wrist and hand. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* 70 (2), 459–469.
- Sartori, M., Durandau, G., Dosen, S., Farina, D., Oct. 2018. Robust simultaneous myoelectric control of multiple degrees of freedom in wrist-hand prostheses by real-time neuromusculoskeletal modeling. *Journal of neural engineering* 15 (6).
- Vasan, G., Pilarski, P. M., 2017. Learning from demonstration: Teaching a myoelectric prosthesis with an intact limb via reinforcement learning. In: 2017 International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR). pp. 1457–1464.
- Vasan, G., Pilarski, P. M., Aug. 2018. Context-aware learning from demonstration: Using camera data to support the synergistic control of a multi-joint prosthetic arm. In: 2018 7th IEEE International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (Biorob). IEEE.
- Vujaklija, I., Farina, D., 2022. *Prosthetics and Innovation*. Springer International Publishing, Cham.
- Vujaklija, I., Farina, D., Aszmann, O. C., 2016. New developments in prosthetic arm systems. *Orthopedic Research and Reviews* 8, 31–39.
- Zhang, F., Bazarevsky, V., Vakunov, A., Tkachenka, A., Sung, G., Chang, C.-L., Grundmann, M., 2020. Mediapipe hands: On-device real-time hand tracking.



Simposio de Robótica, Bioingeniería y Visión por Computador 2024



Sesión: Bioingeniería

Framework para rehabilitación gamificada con robots de efector final

Sempere, N.^{a,*}, Porcel, K.^a, Morell, V.^a, Ubeda, A.^a, Jara, C.A.^a

^aGrupo Human Robotics, Universidad de Alicante, Crta. San Vicente del Raspeig, S/N, 03690, San Vicente del Raspeig, España.

To cite this article: Sempere, N., Porcel, K., Morell, V., Ubeda, A., Jara, C.A. 2024. Framework for gamified rehabilitation with end-effector robots.

Simposio de Robótica, Bioingeniería y Visión por Computador, 2024, 1-5. <https://doi.org/>

Resumen

En este artículo se presenta un framework para rehabilitación motora de miembro superior asistida por robots de efector final basado en actividades gamificadas. El framework combina un robot colaborativo UR3, un sistema de electromiografía Noraxon para evaluación neuromecánica de la función motora y juegos virtuales programados en Unity. Nuestra propuesta simplifica la puesta en marcha de este tipo de sistemas, proporcionando un sistema que permita la estandarización de los procedimientos de terapia física asistida por robots y que funcione como una herramienta complementaria para el terapeuta, fácil de utilizar e intuitiva. Se muestran los primeros resultados obtenidos del registro sincronizado de los datos y que demuestran la viabilidad del sistema en futuras aplicaciones de rehabilitación de miembro superior en pacientes con daño cerebral adquirido.

Palabras clave: Robótica, Control, Ingeniería de rehabilitación, Interfaces, Adquisición de datos sensoriales

Framework for gamified rehabilitation with end-effector robots

Abstract

This paper presents a framework for end-effector robot-assisted upper limb motor rehabilitation based on gamified activities. The framework combines a UR3 collaborative robot, a Noraxon electromyography system for neuromechanical assessment of motor function and virtual games programmed in Unity. Our proposal simplifies the implementation of this type of systems, providing a system that allows the standardization of robot-assisted physical therapy procedures and that works as a complementary tool for the therapist, easy to use and intuitive. The first results obtained from the synchronized recording of data are shown and demonstrate the feasibility of the system in future applications of upper limb rehabilitation in patients with acquired brain damage.

Keywords: Robotics, Control, Rehabilitation engineering, Interfaces, Sensory data acquisition

1. Introducción

La pérdida súbita de la función motora de las extremidades superiores es una condición clínica que generalmente es causada por daño cerebral, trauma a nivel de la médula espinal u otras enfermedades neuromusculares. La recuperación funcional es variable y específica para cada paciente, y depende de la gravedad de la lesión y el tipo de patología. En el caso de los pacientes con Daño Cerebral Adquirido (DCA), la mayoría de ellos sufriendo un accidente cerebrovascular, la recuperación es crucial durante la fase subaguda, que ocurre entre uno y seis meses después del incidente.

Durante los últimos años, la rehabilitación convencional ha visto un importante desarrollo en herramientas complementarias para aumentar la efectividad de la terapia. Una de las principales formas de proporcionar una recuperación más rápida y mejor es el uso de dispositivos robóticos. En el caso de la rehabilitación de las extremidades superiores, los robots de efector final han proporcionado una manera muy efectiva de aumentar la intensidad y repetibilidad de los protocolos de rehabilitación. Sin embargo, el uso de estos sistemas aún no se ha estandarizado en el entorno clínico debido a la variabilidad en los protocolos y tecnologías y la ausencia de una evaluación más confiable y cuantitativa de la función motora, Chien *et al* (2020).

*Autor para correspondencia: natalia.sempere@ua.es

En el ámbito de la robótica de efector final, los robots colaborativos están siendo ampliamente utilizados para la rehabilitación, especialmente para pacientes con discapacidades en las extremidades superiores, Chiriatti *et al* (2020). Estos robots están especialmente preparados para la interacción humano-robot, y pueden asistir el movimiento en diferentes modalidades dependiendo de la movilidad del miembro (pasiva, activa, activa-asistida, etc.). En estos casos, la interacción humano-robot es mediada por herramientas de efector final. El punto de conexión del extremo del robot está conectado a la extremidad del paciente y puede guiarlo sobre un camino fijo o puede aplicar un control asistido según sea necesario para la terapia de rehabilitación. Estos sistemas suelen utilizar mangos, sujetos por el paciente como efectores finales del robot, para generar un movimiento de la extremidad en el espacio. Sin embargo, en la mayoría de los casos, estos efectores finales no permiten la movilidad o el agarre de la mano, lo que reduce las posibilidades de los ejercicios de rehabilitación, Molteni *et al* (2018).

Como complemento a la asistencia robótica, se emplea la evaluación de la función motora utilizando la información de sensores instrumentados para permitir una evaluación más cuantitativa y precisa de la efectividad terapéutica. Los robots de rehabilitación permiten la medición automática de parámetros cinemáticos y dinámicos del movimiento. Estos parámetros ofrecen una ventaja en comparación con las escalas clínicas convencionales que tienen una menor resolución. Según Colombo (2018), estos parámetros pueden describir la función motora en sí misma o incluso la función sensorial, es decir, la propiocepción de las extremidades afectadas por una patología neuromuscular. Alternativamente a estas métricas, la información electrofisiológica puede proporcionar otro conjunto de biomarcadores neuromecánicos útiles. Por ejemplo, el control complejo de los músculos ha sido evaluado utilizando paradigmas como sinergias musculares, retardos neuromecánicos, fatiga muscular, coherencia inter e intramuscular, comportamiento de las unidades motoras, entre otros, Garro *et al.* (2021). Sin embargo, todos estos enfoques están limitados a actividades motoras específicas y, la mayoría de las veces, solo se prueban en sujetos sanos. Estos protocolos aún deben ser evaluados en escenarios clínicos a gran escala para demostrar su eficacia como métricas de recuperación motora que podrían mejorar la terapia asistida por robots.

Además, la combinación de esta evaluación neuromecánica con elementos de neurorehabilitación gamificada ha demostrado ser una tecnología factible y efectiva para la recuperación del DCA tanto en enfoques no robóticos como robóticos en comparación con metodologías convencionales. Sin embargo, aún existen problemas de aceptación por parte de los usuarios y los clínicos, así como problemas de escalabilidad que han limitado su implantación clínica de manera regular, Stephanie Miranda and Levac (2018). El próximo desafío es abordar cómo superar esta brecha entre la evaluación de la investigación y el uso clínico efectivo.

Este artículo presenta el desarrollo de un framework para actividades gamificadas (serious-games) para su uso en entornos de rehabilitación robótica de efector final con el objetivo principal de la búsqueda de estándares en este tipo de sistemas de rehabilitación. El framework también permite la captura de datos de sensores electromiográficos (EMG), así como

los parámetros cinemáticos-dinámicos del robot para poder realizar una evaluación más cuantitativa y precisa de la efectividad terapéutica. Se muestran experimentos realizados mediante el uso de un robot colaborativo tipo UR3, así como la captura de datos de los sensores EMG de un dispositivo Noraxon.

2. Desarrollo del framework

El marco de trabajo desarrollado se ha construido a partir de tres elementos clave: el robot colaborativo UR3 (Figura 1), los sensores EMG inalámbricos del sistema Noraxon Ultium y una interfaz de usuario. El objetivo principal consiste en facilitar la rehabilitación del miembro superior en pacientes con DCA mediante un control de admitancia del efector final del robot. Simultáneamente, los sensores de EMG permiten la recopilación de datos sobre la actividad eléctrica de los músculos durante la ejecución del ejercicio. La interfaz de usuario integra el control del robot y de los sensores, posibilitando una interacción sencilla e intuitiva con los elementos del framework.

2.1. El robot

El robot empleado en el framework es el brazo robótico UR3 de Universal Robots, el cual exhibe una capacidad de carga de 3 kg. En el extremo del efector se ha incorporado el sensor de fuerza y torque OptoForce, con el fin de realizar un control de admitancia. Este control ha sido implementado en Python como un nodo de ROS y permite el movimiento del efector final en base a la fuerza ejercida por el paciente. El robot se comporta como un sistema masa-amortiguador-resorte, lo que permite ajustar la resistencia al movimiento variando el parámetro de amortiguación y adecuar así el ejercicio a las capacidades del paciente. Para favorecer la movilidad de la muñeca durante la manipulación, se ha empleado un efector final con una esfera rotatoria unida a dos cintas que sujetan la mano.

2.2. Sensores EMG

El segundo elemento fundamental del framework son los sensores EMG, los cuales se emplearán para ejecutar una evaluación del progreso, así como para proporcionar feedback en tiempo real de la actividad muscular. Las unidades de las medidas son μV . Para iniciar la recopilación de datos, se activan 8 canales bipolares a través del programa MR Software del sistema Ultium de Noraxon. En el framework se emplean dos computadoras distintas. En una de ellas se activa la lectura de datos de los sensores EMG, mientras que en la segunda se ejecuta la interfaz de usuario y el control del robot. Por ese motivo, además de activar los sensores, se inicia la transmisión de datos HTTP para que la segunda computadora reciba y procese los datos. La Figura 1 muestra un ejemplo de uso de los sensores sobre el brazo de un paciente, el cual está moviendo el extremo del robot con la ayuda del efector final sujetado a la muñeca



Figura 1: Paciente con los sensores de EMG realizando un ejercicio de rehabilitación.

2.3. Comunicación con la UI

Una de las principales metas del framework es desarrollar una interfaz de usuario (UI) que posibilite la visualización y captura de datos en tiempo real durante el ejercicio de rehabilitación. Para alcanzar este objetivo, se requiere establecer un protocolo de comunicación efectivo entre la interfaz, el robot y los sensores. La UI se ha desarrollado utilizando Unity, y para integrar la comunicación con ROS, se ha empleado el paquete Unity Robotics Hub. Este paquete proporciona componentes de Unity equipados con las funciones necesarias para realizar publicaciones, suscripciones y llamadas a servicios mediante un extremo TCP conectado a un nodo de ROS. Además, incluye un plugin que facilita la traducción de mensajes de ROS a clases C#, comprensibles para Unity.

Basándose en este paquete, se ha integrado un componente publicador y un suscriptor personalizados que intercambian mensajes, imitando el comportamiento de un nodo de ROS. Dichos componentes permiten capturar los datos emitidos por el robot y el sensor de fuerza en tiempo real, a través de los tópicos específicos de ROS, y manipular esta información para su almacenamiento y presentación al usuario en Unity.

Paralelamente, la interacción con el robot real es gestionada a través de los paquetes de Universal Robots para ROS. Otro paquete necesario para la ejecución de movimientos en el robot UR3 es ROS MoveIt. Aunque ambos paquetes podrían ser lanzados manualmente, se ha programado la aplicación para lanzar automáticamente los procesos al inicio de la sesión de rehabilitación.

Por otro lado, la comunicación con los sensores EMG se establece de manera directa mediante solicitudes HTTP a la computadora que aloja el software de Noraxon. La Figura 2 muestra un esquema de comunicación entre los componentes.

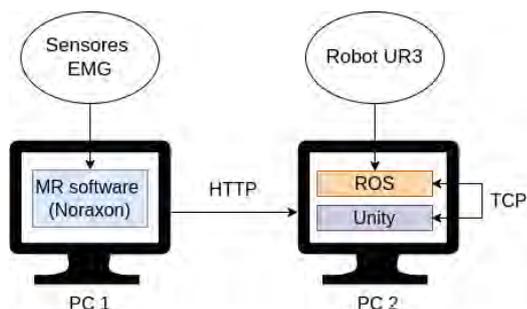


Figura 2: Esquema de comunicación entre los componentes del sistema.

2.4. Diseño de la UI

La aplicación de usuario ha sido diseñada en Unity con el fin de actuar como un punto de acceso a diferentes funcionalidades relacionadas con la rehabilitación del paciente. Adicionalmente, se ha diseñado la aplicación siguiendo un estilo minimalista junto con animaciones gráficas que permiten un uso intuitivo. Ejemplos de ello son el cambio de color de los botones, ampliación de la escala de elementos al colocar el ratón sobre ellos, selección del color de los textos según su grado de importancia, entre otros detalles.

En primer lugar, la persona a cargo del experimento accede a la pantalla de inicio, donde es posible registrar un nuevo usuario o iniciar sesión (Figura 3). El objetivo de identificar a los usuarios de la aplicación es almacenar permanentemente los ajustes que se realicen dentro de ella: ruta de exportación de los datos, parámetro de amortiguación, etc. Esta información tan solo se ha de configurar en el primer inicio de sesión, ya que se almacena para el resto de sesiones.

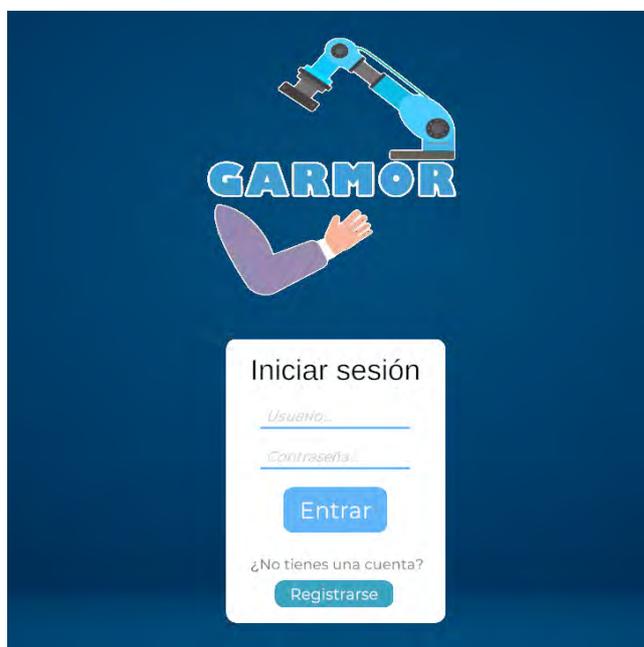


Figura 3: Pantalla de inicio de sesión donde es posible acceder a la aplicación con una cuenta propia o registrar un usuario nuevo.

Al iniciar sesión, se muestra la interfaz principal de la aplicación, donde es posible acceder a diferentes pestañas mediante un menú lateral. Todos los elementos visuales presentan feedback para facilitar la interacción usuario-máquina. Seleccionando la primera pestaña *Minijuegos* (Figura 4), se accede a una lista de todos los serious-games añadidos a la plataforma. Cada uno de estos juegos está programado en una escena distinta, ya que de este modo es posible ampliar el repertorio de juegos compatibles con el framework. Para añadir un nuevo juego de rehabilitación, sería necesario importar los elementos gráficos e insertar la miniatura en el botón del menú *Minijuegos*. La captación de datos del robot y de los sensores se gestionan en componentes compartidos en todas las escenas, por lo que solo existe una única instancia de dichos componentes. Cada juego puede acceder a estas instancias y manejar la información que proporcionan para mostrarla por la interfaz o exportarla.

En segundo plano, la aplicación establece la conexión con el robot y los sensores de forma automática, por lo que tan solo es necesario verificar que los sensores y el robot están encendidos.



Figura 4: Pantalla de selección de serious-games.

En la segunda pestaña, *Monitorizar* (Figura 5), se visualiza en tiempo real la posición articular del robot, así como la posición, velocidad y fuerza en el TCP. A la derecha de la pantalla, ocho diagramas circulares representan la información recibida desde los sensores EMG. El rango de visualización de los diagramas se actualiza automáticamente según el máximo valor registrado desde los sensores, aunque también es posible modificarlo manualmente mediante dos botones colocados sobre el diagrama del primer canal.

El botón *Grabar* inicia o detiene la grabación de datos. A la izquierda del botón, un mensaje de texto informa al usuario de que es necesario calibrar el robot antes de iniciar la grabación. Cada vez que se detiene la grabación, los datos se exportan automáticamente en formato csv.

En la zona inferior, dos entradas de texto permiten modificar la IP y el puerto de la computadora que ejecuta el software de Noraxon. Estos dos elementos se añadieron con el objetivo de aportar mayor flexibilidad al framework.

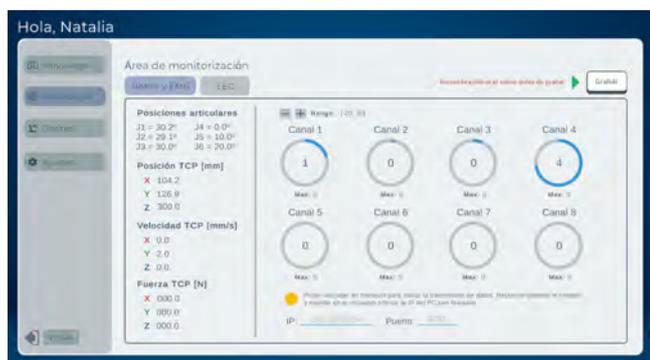


Figura 5: Pantalla de monitorización del estado del robot y de los sensores EMG.

La pestaña *Control* (Figura 6) ofrece al usuario la capacidad de modificar parámetros del controlador y del robot. Los parámetros del controlador son el valor de amortiguación del sistema y el tipo de control. El valor de amortiguación corresponde con la resistencia al movimiento que ofrece el robot, y se modifica escribiendo el valor o mediante un *slider*. Respecto al tipo de control, en el punto actual del framework está disponible

una opción, el control de admitancia.

Los parámetros del robot restringen el movimiento a un plano en concreto o permiten las tres direcciones del espacio. La selección del plano de trabajo se realiza mediante un menú de cuatro opciones: plano x-y, plano x-z, plano y-z o 3D. Cada opción está acompañada de una imagen que muestra visualmente el plano de referencia. A la derecha de este menú de opciones, otro menú de idénticas características permite seleccionar el tipo de robot a emplear durante el ejercicio (Figura 7). En la zona superior, el botón *Calibrar* se emplea para realizar la calibración del extremo del robot en el control de admitancia.

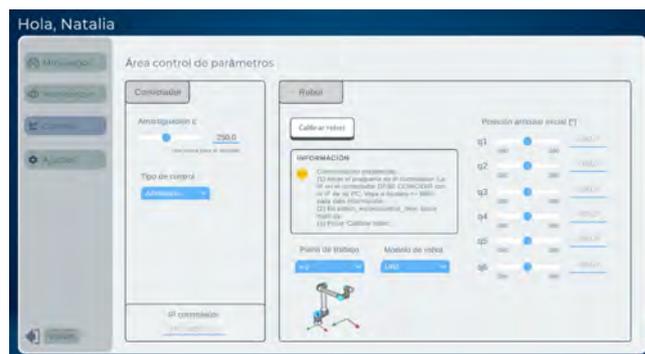


Figura 6: Pantalla de control de parámetros del robot.

La última pestaña, *Ajustes* (Figura 8), alberga la configuración de la ruta de exportación, el nombre del paciente y la selección de los parámetros que serán exportados al finalizar la sesión. Los parámetros que se ofrecen son los ocho canales correspondientes con ocho sensores de EMG, información relativa a la posición y velocidad cartesianas y articulares del robot, la fuerza en el extremo, la velocidad media, la velocidad máxima y parámetros de evaluación del ejercicio que dependen del videojuego seleccionado.

2.5. Almacenamiento de los datos

Al presionar el botón *Grabar* de la pestaña *Monitorizar*, la aplicación inicia automáticamente el registro de datos. Una vez finalizado el ejercicio y pulsado de nuevo el botón para pausar la grabación, se generan dos archivos en formato csv guardados en la ruta especificada en *Ajustes*.

El primer archivo contiene información relativa al robot y al control de admitancia en el momento de la sesión, además del valor de amortiguación del sistema, la posición articular, la fuerza en el extremo y otros parámetros seleccionados. Cada valor se asocia al correspondiente timestamp de ROS. La publicación de datos desde ROS es 100 Hz y se realiza en un nodo diferente al control de admitancia, ya que en caso contrario disminuye la frecuencia máxima de publicación a 16 Hz debido al tiempo de cálculo.

El segundo archivo incluye los datos de las peticiones HTTP a los sensores EMG. Cuando se realiza una petición, se obtiene un paquete de datos de los sensores que se une al último timestamp de ROS disponible. Cada uno de estos datos se interpola para asociar un valor de tiempo único a cada medida. De este modo, se obtiene una lista de datos temporalmente sincronizados con los valores del robot. Respecto a la frecuencia de registro, Noraxon admite hasta 4000 Hz, pero se realizado

un remuestreo a posteriori de 1500 Hz con el fin de reducir el tiempo de procesamiento de los datos al finalizar el ejercicio.



Figura 7: Elementos gráficos para seleccionar el plano de trabajo y el tipo de robot.

3. Experimentos

El framework implementado desempeña un papel fundamental en el establecimiento de un entorno experimental. Unificando las funcionalidades en una única aplicación, se posibilita la ejecución de un método sistemático para la adquisición de datos y la rehabilitación del paciente.

El procedimiento inicial implica la inicialización del robot, los sensores y la aplicación, siendo esta última responsable de iniciar la comunicación entre los tres componentes. Posteriormente, se llevan a cabo las configuraciones necesarias a través de la interfaz, las cuales comprenden el control de admitancia, el plano de trabajo del robot y el formato de exportación de los datos. Gracias a este framework, tales ajustes pueden ser realizados con facilidad sin requerir modificaciones en el código por parte del operador del experimento.

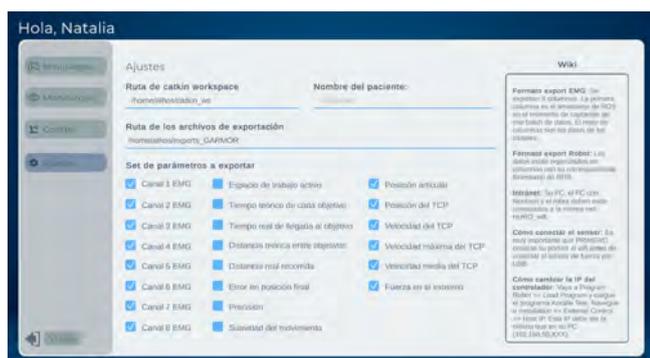


Figura 8: Pantalla de ajuste de información de la sesión.

Una vez configurado el entorno, se colocan los sensores de EMG sobre el miembro superior del paciente. Detalles adicionales sobre la disposición muscular se pueden visualizar en el software oficial de Noraxon, el cual es ejecutado en paralelo por otra computadora. Además, la disposición de los sensores dependerá de los músculos a estudiar y del ejercicio de rehabilitación que se desee efectuar.

Con los sensores y el robot preparados, se procede a seleccionar uno de los serious-games diseñados específicamente para la rehabilitación. Alternativamente, se puede optar por no

seleccionar ningún minijuego y simplemente manipular el robot a través de la interfaz principal. Actualmente, la aplicación ofrece tres minijuegos diferentes: *KoraGame*, *Skyward* y *Odyssey*. *KoraGame* y *Odyssey* se basan en el concepto de *center-out*, donde el paciente debe trasladar el extremo del robot desde un objetivo central hacia otros en la periferia. En *KoraGame*, los objetivos representan frutas que aparecen en un bosque a lo largo del espacio de trabajo del robot, mientras que en *Odyssey*, los objetivos están dispuestos equidistantemente en una configuración circular. En el caso de *Skyward*, se permite el control en una dimensión, como la extensión y retracción del brazo siguiendo una línea recta horizontal.

Durante la realización del ejercicio, se han de considerar dos factores relevantes. El primero es el asentamiento de una postura constante para cada uno de los experimentos, especificando el modo de agarre del efector final y qué músculos deben predominar durante el movimiento. Por ejemplo, se ha de especificar si el paciente debe realizar el ejercicio con el brazo extendido o ligeramente flexionado, si el brazo en reposo puede servir a modo de apoyo o no, la postura de la espalda respecto de la silla, o bien si el ejercicio se realiza de pie, etc. El segundo factor está relacionado con las limitaciones de carga del robot, como se ha mencionado en el apartado 2.1. La resistencia ofrecida por el robot depende del factor de amortiguación, el cual no debe ser excesivamente alto para no generar fuerzas en el extremo que provoquen una parada de emergencia del controlador. Por ese motivo, la aplicación limita el rango de amortiguación a valores entre 0 y 600, siendo 600 el valor máximo permitido de resistencia al movimiento.

Tras realizar el ejercicio, se exportan automáticamente dos archivos en formato csv con la información del robot y de los sensores EMG. La Figura 9 muestra un ejemplo de captación de los datos de EMG en el tríceps braquial medial durante la realización del juego *Odyssey*, en el que el paciente ha realizado un movimiento de tipo *center-out* bidireccional de izquierda a derecha durante 6 minutos. Los diferentes picos en la señal que se observan corresponden con el esfuerzo del paciente para cambiar la dirección del extremo del robot y avanzar hacia el siguiente objetivo.

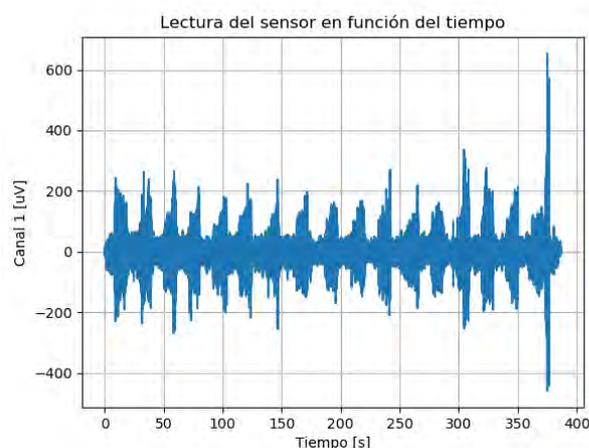


Figura 9: Señal de los sensores EMG en el tríceps braquial medial durante la realización del ejercicio de rehabilitación.

La Figura 9 muestra un correcto procesamiento de los datos desde la aplicación, donde se captan, interpolan y remuestran los paquetes de datos obtenidos mediante HTTP desde el software oficial de Noraxon.

4. Conclusiones

En el presente estudio, se ha abordado el desafío de la neurorehabilitación gamificada de miembro superior, haciendo uso de un robot de efector final cuyo extremo permite la movilidad de la mano, y empleando sensores para evaluar la función motora. Se ha desarrollado un framework que simplifica la puesta en marcha del sistema, y ejerce de herramienta complementaria para el ejercicio del terapeuta. Se ha establecido un protocolo de comunicación entre los componentes del sistema, y adicionalmente se ha validado la correcta captación de datos. Haciendo uso del framework, se ha establecido un método sistemático para el registro de datos, el cual constituye una solución independiente y unificada para la monitorización precisa de la actividad muscular durante la realización del ejercicio. Adicionalmente, se han añadido tres serious-games mediante los cuales es posible realizar diversos ejercicios de rehabilitación y registrar datos para su posterior análisis.

Futuras investigaciones deberían centrarse en el estudio de la aceptación de la interfaz por parte del paciente, así como en la evaluación de la escalabilidad clínica del sistema. Además, también se deberá investigar el uso del sensor de fuerza en el extremo del robot con el fin de desarrollar un control de impedancia, el cual que aporte asistencia durante el movimiento y permita aumentar el abanico de pacientes en potencia de beneficiarse del framework.

Agradecimientos

Este trabajo es parte del proyecto de I+D+i con referencia PID2022139105OB-I00, financiado por MCI-N/AEI/10.13039/501100011033.

Referencias

- Chien *et al.*, F., 2020. Robot-assisted therapy for upper-limb rehabilitation in subacute stroke patients: A systematic review and meta-analysis. *Brain and Behavior* 10, 1742.
DOI: 10.1002/brb3.1742
- Chiriatti *et al.*, G., 2020. A Framework for the Study of Human-Robot Collaboration in Rehabilitation Practices. *Advances in Service and Industrial Robotics* 1, 190–198.
DOI: 10.1007/978-3-030-48989-2_21
- Colombo, R., 2018. Chapter 8 - performance measures in robot assisted assessment of sensorimotor functions. In: Colombo, R., Sanguineti, V. (Eds.), *Rehabilitation Robotics*. Academic Press, pp. 101–115.
DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811995-2.00011-4>
- Garro, F., Chiappalone, M., Buccelli, S., De Michieli, L., Semprini, M., 2021. Neuromechanical biomarkers for robotic neurorehabilitation. *Frontiers in Neurobotics* 15.
DOI: 10.3389/fnbot.2021.742163
- Molteni *et al.*, F., 2018. Exoskeleton and End-Effector Robots for Upper and Lower Limbs Rehabilitation: Narrative Review. *Innovations Influencing Physical Medicine and Rehabilitation* 10, 174–188.
DOI: 10.1007/978-3-030-48989-2_21
- Stephanie Miranda, N. G., Levac, D. E., 2018. Barriers, facilitators and interventions to support virtual reality implementation in rehabilitation: A scoping review. *Journal of Physical Medicine and Rehabilitation* 10 (11), 1237–1251.e1.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pmrj.2018.07.004>



Simposio de Robótica, Bioingeniería y Visión por Computador 2024



Sesion: Visión por computador

Detección de caídas con un robot social aplicando Visión Artificial

Sánchez-Girón, C.^{a,*}, García-Gómez, M.^a, Duque-Domingo, J.^a, Gómez-García-Bermejo, J.^a, Zalama, E.^a

^aDepartamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, ITAP, Universidad de Valladolid, C/ Dr Mergelina s/n, 47011 Valladolid, España

Resumen

Hoy en día las caídas involuntarias son la principal causa de lesiones en las personas mayores. Esto puede suponer un grave problema para las personas de tercera edad dependientes que no cuentan con una supervisión continua del cuidador. Debido a esto, surge la necesidad de encontrar métodos para detectar caídas en el domicilio y avisar a los familiares del accidente. En este artículo se propone un enfoque basado en la visión artificial para dar solución a este problema. Se ha desarrollado un sistema de detección de caídas mediante reconocimiento de objetos y segmentación de los individuos en la imagen para determinar si la persona está caída o no; para realizar la predicción se han utilizado ResNet y capas Fully Connected. Tras realizar diferentes pruebas, se ha conseguido un modelo que detecta caídas con un 93.29 % de eficacia para el set de test. El modelo será integrado en el robot social Temi, que se introducirá en la vivienda del usuario.

Palabras clave: Visión Computacional, Técnicas de Inteligencia Artificial, Redes Neuronales, Robótica Social, Detección de caídas, Ancianos

Fall detection with a social robot applying artificial vision

Abstract

Nowadays, unintentional falls are the leading cause of injury in the elderly. This can be a serious problem for dependent elderly people who do not have continuous caregiver supervision. Because of this, there is a need to find methods for detecting falls in the home and alerting family members of the accident. In this paper, a computer vision-based approach is proposed to solve this problem. A fall detection system has been developed using object recognition and segmentation of the individuals in the image to determine whether the person is fallen or not; ResNet and Fully Connected layers have been used to perform the prediction. After performing different tests, a model has been obtained that detects falls with 93.29 % efficiency for the test set. The model will be integrated into the Temi social robot, which will be introduced in the user's home.

Keywords: Computer Vision, Artificial intelligence techniques, Neural Network, Social Robot, Fall detection, Elderly

1. Introducción

En los últimos años, cada vez hay un mayor número de personas mayores dependientes que deciden residir en su propio domicilio en soledad o bien con su pareja. De hecho, en nuestro país la cifra de personas mayores de 65 años que viven solas ha aumentado un 25.8 % en la última década (INE, 2023). En este contexto, es frecuente que los individuos de tercera edad tengan caídas u otro tipo de accidentes en el interior de su vivienda cuando se encuentran solos, donde no podrán ser socorridos. En este contexto hay un gran número de líneas de investigación abiertas relacionadas con detección, caídas y el reconocimiento postural.

Como se detallará en la Sección 2, se han realizado diversas investigaciones destinadas a la detección de caídas involuntarias de personas mayores, analizando las señales de sensores inerciales. Para ello se han adquirido datos de los acelerómetros y giroscopios integrados en dispositivos inteligentes, como pulseras inteligentes, colocados en las extremidades o el torso del usuario. Sin embargo, esta idea puede no ser del todo eficaz a la hora de controlar a personas que viven en sus hogares sin supervisión, ya que deben llevar el dispositivo encima constantemente para garantizar la correcta adquisición de datos (Sánchez-Girón et al., 2023).

Igualmente, encontramos una rama muy extendida de investigaciones que aplican la visión computacional para la de-

*Autor para correspondencia: celia.sanchez-giron@uva.es
Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)

tección de caídas. La llegada de los procesadores gráficos ha permitido optimizar el entrenamiento de modelos de inteligencia. Esto ha repercutido mucho en la investigación en visión por computador, que ha experimentado un crecimiento significativo en los últimos años. En el campo de la visión artificial se han trabajado diversas áreas como el reconocimiento de imágenes, la detección de objetos o el seguimiento de movimiento, entre otros, gracias a los algoritmos y redes convolucionales cada vez más complejas que se han implementado. Es común encontrar investigaciones que utilizan modelos de detección de objetos en la imagen, con los que se pueden obtener las coordenadas del objeto de interés en la imagen. Un ejemplo de este tipo de modelos es la red YOLO (You Only Look Once) que a partir de una imagen devuelve como salida su 'bounding box' caja delimitadora que encierra un objeto detectado en la imagen. Esta caja está definida por cuatro coordenadas $[x1,y1,x2,y2]$ que definen la situación de la esquina superior izquierda de la caja $(x1,y1)$ y la esquina inferior derecha $(x2,y2)$ desde el origen de coordenadas de la imagen original (esquina superior izquierda).

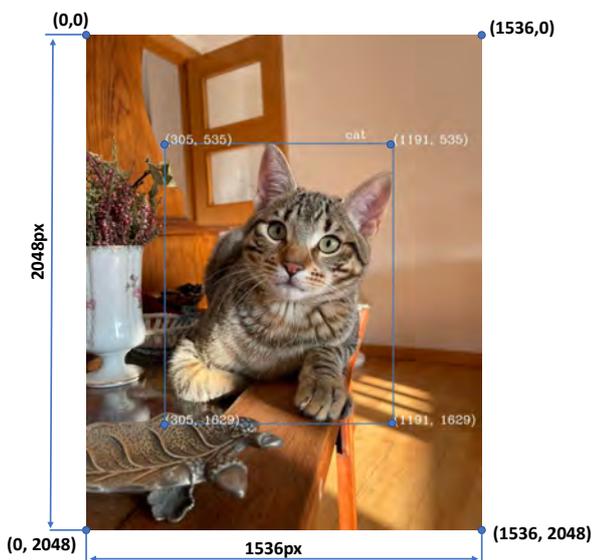


Figura 1: Coordenadas bounding box aplicando YOLO en una imagen.

De la misma forma hay un gran número de artículos que estudian la disposición de las articulaciones del esqueleto de los individuos; en función de la posición relativa de las diferentes coordenadas del esqueleto se entrenan modelos neuronales para predecir si está caído, sentado o realizando otras actividades.

Por otra parte, se han desarrollado modelos neuronales muy potentes, como Resnet o ConvNext, capaces de realizar predicciones con una alta eficacia, tomando como entrada únicamente un fotograma. Estos modelos han sido entrenados con bases de datos de millones imágenes (Deng et al., 2009), de forma que son capaces de extraer de manera precisa las diferentes características en una imagen y encontrar un patrón entre imágenes que pertenecen a la misma clase. Gracias a los nuevos modelos de aprendizaje profundo se han desarrollado clasificadores muy potentes, que permiten detectar caídas y otras posturas corporales.

A pesar de los avances mencionados, existen limitaciones como la necesidad de disponer de grandes conjuntos de datos o las condiciones ambientales al capturar imágenes. Para abordar

estos desafíos, se propone una solución que combina la identificación del esqueleto y la segmentación de una persona con la detección de objetos mediante YOLO.

Este enfoque busca mejorar la precisión en la detección de caídas, especialmente en entornos donde las personas mayores residen solas y pueden necesitar asistencia inmediata. El artículo forma parte del proyecto EIAROB, que tiene como objetivo crear un ecosistema de Inteligencia Ambiental para apoyar el cuidado de larga duración en el hogar mediante robots sociales (EIAROB, 2022). Se propone integrar un sistema de detección de accidentes que combina sensores ambientales (Merino-Fidalgo et al., 2023) con la cámara que está integrada en un robot social, centrando este documento en la parte relacionada con la cámara del robot.

El documento se divide en cuatro secciones principales. En la Sección 2 se realiza una revisión bibliográfica sobre métodos de detección de caídas; en la Sección 3 se explica el procedimiento que se ha seguido para desarrollar el modelo así como las bases de datos empleadas; en la Sección 4 se presentan los resultados obtenidos; por último, en la Sección 5, se discuten las conclusiones y posibles direcciones futuras del trabajo.

2. Trabajos relacionados

Gracias al desarrollo de la visión artificial en estos últimos años, el número de artículos e investigaciones que emplean esta herramienta para el reconocimiento de actividades humanas y otros movimientos ha incrementado de forma exponencial.

Algunos autores como (Bevilacqua et al., 2014) combinan el uso de cámaras con sensores cinéticos para detectar diferentes tipos de caídas en tiempo real. Para ello se emplean cámaras RGB-D (que contemplan color y profundidad) con la que obtienen la velocidad de expansión y contracción de la altura, ancho y profundidad de la bounding box del usuario correspondiente. Otras investigaciones apuestan por una detección de caídas temprana empleando una secuencia de vídeo de una sola cámara. Por ejemplo, en el artículo (Vishwakarma et al., 2007) combinan el uso de técnicas de sustracción de fondo adaptativo para detectar un objeto en movimiento y delimitarlo con el bounding box de la persona caída. Los resultados han demostrado que con este modelo se puede detectar con bastante precisión la mayoría de los tipos posibles de caídas humanas aunque de forma individual.

En otros artículos, como (Mubashir et al., 2013) se ha combinado el potencial de la visión artificial con pulseras de actividad que nos aportan información postural del paciente. De esta forma, por un lado, se interpretan los resultados obtenidos mediante una cámara y a continuación se combinan con las señales inerciales obtenidas de estos dispositivos inteligentes.

Algunas plataformas, como MediaPipe o OpenPose, han sido clave en los últimos años para el desarrollo de modelos de detección de caídas. MediaPipe tiene capacidad de realizar un seguimiento preciso y eficiente de las articulaciones del cuerpo humano en tiempo real utilizando secuencias de vídeo. Mediante algoritmos de aprendizaje profundo y técnicas de visión por computadora, puede detectar las articulaciones corporales incluso en condiciones difíciles como variaciones en el fondo o interposición de objetos entre la cámara y el usuario. Debido a su eficacia, un gran número de investigaciones han apostado por

emplear herramientas de reconocimiento postural a la hora de detectar caídas. En (Lotfi et al., 2018) se estudia el movimiento de una silueta humana para clasificar diferentes comportamientos. Asimismo, se tiene en cuenta el histograma de proyección de la silueta para describir posturas del cuerpo humano y eventos de caída posteriores.

En el artículo (Anwary et al., 2022) se propone un modelo de Deep Learning que explora las posibles caídas de personas mayores aplicando el framework *MediaPipe*. Para ello emplean un vídeo RGB del que se extraen diferentes características de la marcha. Los resultados experimentales demostraron que el modelo puede alcanzar una exactitud de 96.35 %, lo que demuestra su efectividad.

A pesar de los avances anteriores, en los estudios se explica que debido a los vectores de características empleados no hay una discriminación clara entre una caída real o una persona que está tumbada o sentada. Esto puede aumentar el número de falsos positivos.

Otro estudio interesante es (Domingo et al., 2022) en el que se tiene en cuenta no solo el esqueleto de la persona, sino también los objetos cercanos a la persona en la imagen. Gracias a esto se tiene en cuenta la posible interacción que puede haber entre la persona y el objeto, lo que puede resultar muy útil en nuestro caso para distinguir si la persona está acostada o caída, por ejemplo.

3. Metodología propuesta

3.1. Dataset

Para entrenar el modelo planteado se ha utilizado un dataset E-FPDS (Fallen People Data Set) que contiene fotos de personas caídas y no caídas con sus etiquetas correspondientes (Maldonado-Bascon et al., 2019). Las etiquetas se disponen en ficheros .txt con el mismo nombre de la imagen asociada y proporcionan un 1 o -1 si la persona está caída o no respectivamente, así como el *bounding box* de cada persona de la imagen, que obtuvieron mediante una red YOLO. Con este data set obtuvimos un conjunto de 1902 imágenes, de las cuales 938 eran personas caídas y 964 no caídas. De estos datos decidimos prescindir del *bounding box* que nos ofrecía las etiquetas de este dataset y nos quedamos tan solo con el valor que determinaba si la persona estaba caída o no.

3.2. Detección de objetos con YOLO

Las imágenes de personas caídas y no caídas se pasaron por una red YOLOv8s (Jocher et al., 2023) para conseguir el *bounding box* de cada persona individual y el de los elementos de interés en la imagen. En particular, consideramos como objetos de interés las sillas, camas y sofás. Se ha considerado que las posturas más cotidianas de los usuarios estudiados en sus hogares serán “de pie”, “sentado” y “tumbado”, por lo que los elementos anteriores pueden tener importancia para diferenciar estos tres estados en los que el usuario no está caído. Para tener una cierta seguridad de los elementos segmentados se estableció un porcentaje de confianza de 0.8 a la hora de detectar personas y de 0.5 para detectar sillas, sofás y camas. Una vez obtenidos los *bounding boxes* correspondientes, las coordenadas obtenidas de cada persona detectada en la imagen se pasarán como entrada al

modelo para la etapa de segmentación de la persona en la imagen. En la Figura 2 se ha pasado como entrada la imagen con los objetos de interés detectados por la YOLO.

3.3. Segmentación de personas con MediaPipe

La siguiente fase en nuestra metodología implica la segmentación de cada persona en la imagen. Utilizaremos el modelo Pose LandMarker de *MediaPipe*, desarrollado por Google, que emplea algoritmos de aprendizaje automático para detectar y estimar la pose humana con gran precisión, lo cual es crucial para nuestro problema.

Aunque este modelo puede detectar varios esqueletos de personas en una imagen, solo puede segmentar una de ellas. Se exploraron diferentes modelos para la segmentación multipersona, pero finalmente se optó por la solución de *MediaPipe* debido a su mejor rendimiento para nuestro caso.

Para lograr la segmentación multipersona con *MediaPipe*, pasamos al modelo la imagen de cada persona detectada por YOLO, recortada según las coordenadas del *bounding box*. De esta manera, si YOLO detecta, por ejemplo, tres personas en una imagen, se introducen tres imágenes diferentes al modelo Pose LandMarker para segmentar cada persona individualmente. Esta solución ofrece una segmentación precisa de la persona y asegura que lo detectado por YOLO sea realmente una persona, proporcionando un doble filtro para encontrar personas en la imagen.

Como salida del modelo de *MediaPipe* obtendremos la imagen de la persona segmentada (fondo negro y la persona con su color) y el *bounding box* de la persona segmentada obtenido en la etapa anterior, que aporta información sobre la situación espacial de la persona en la imagen.

3.4. Solapamiento persona-objeto

Una vez localizada la persona y los objetos de interés en la imagen (sillas, sofás y camas), comprobamos el grado de solapamiento. Para ello se comprueba si el área del rectángulo que forma el *bounding box* de la persona segmentada interseca con el área del *bounding box* de cada objeto de interés detectado. Para calcular el solapamiento hemos aplicado la métrica de Intersection Over Union (IoU):

$$IoU = \frac{Area_{persona} \cap Area_{objeto}}{Area_{persona} \cup Area_{objeto}} \quad (1)$$

Como criterio se ha definido que si existe solapamiento, como es el caso de la Figura 3, entonces se conservan las coordenadas de la persona y del objeto, ya que puede darse la situación en la que la persona esté sentada o tumbada sobre él. En caso de no existir solapamiento, entonces se mantienen las coordenadas de la persona, pero se establece como *bounding box* de la silla, sofá o cama no solapada [0,0,0,0].

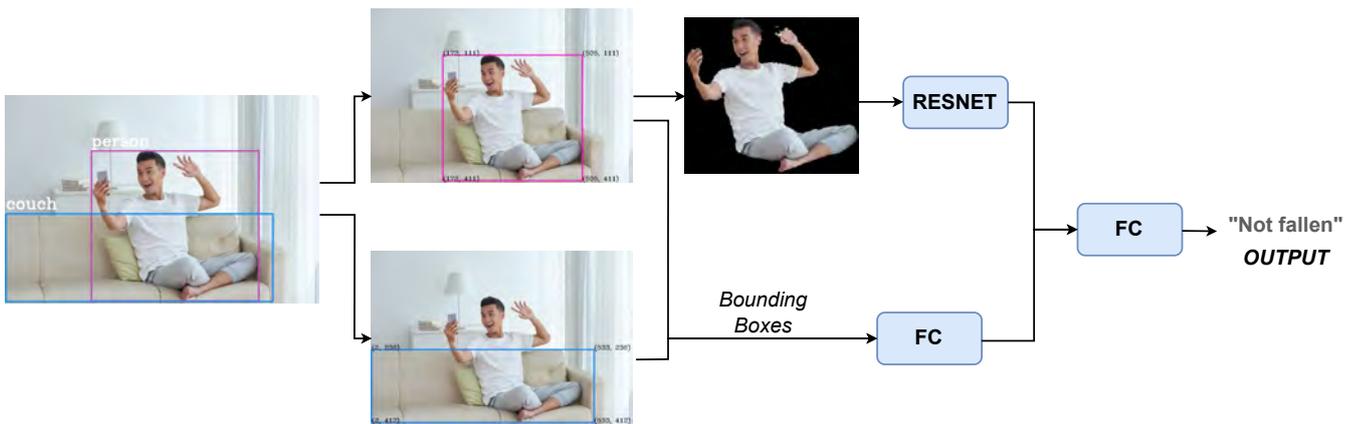


Figura 2: Esquema general de la metodología aplicada

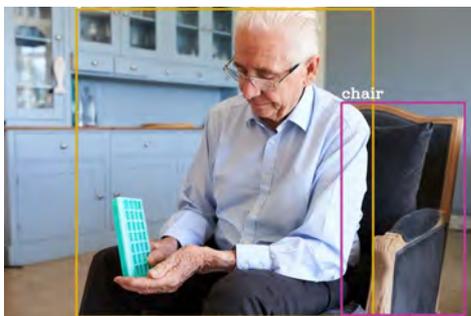


Figura 3: Ejemplo de solapamiento entre persona y silla en una imagen del dataset

3.5. ResNet y Fully Connected

Los datos obtenidos en las etapas anteriores son las entradas de un modelo neuronal. Por una parte, se ha implementado una capa Fully Connected Layer que tiene como entrada los *bounding boxes* obtenidos tras el solapamiento. La entrada de esta capa presenta un tamaño de 16, por estar formada cada entrada por el *bounding box* de la persona y los tres *bounding boxes* de los objetos presentes o no. Con esto se ha obtenido el vector de características de la entrada de texto. Por otro lado, se ha empleado una red ResNet18 preentrenada que toma como entrada la imagen segmentada de la persona. A la salida de la ResNet se ha obtenido un vector de características con 512 valores. A continuación se concatenaron los dos vectores característicos anteriores y se introdujo el vector resultante en una capa Fully Connected. A la salida del mismo se consiguió un vector de tamaño correspondiente al número de clases, en nuestro caso de tamaño uno porque se trata de una salida binaria.

4. Resultados

Con el objetivo de tener una referencia inicial, en un principio se han realizado pruebas con el dataset original, con las imágenes sin aplicar segmentación, utilizando una ResNet18 preentrenada y algunas capas Fully Connected. Más adelante ha procedido evaluar el comportamiento de la red utilizando

imágenes en las que las personas estaban segmentadas. Para comparar los comportamientos de los modelos, se han calculado una serie de métricas que se recogen en la Tabla 1:

Tabla 1: Resultados de las predicciones con imágenes originales y segmentadas

	<i>Im.originales</i>	<i>Im.segmentadas</i>
<i>Accuracy</i>	0.8933	0.9315
<i>Loss</i>	0.3545	0.2762
<i>Precision</i>	0.9524	0.9756
<i>F1 - score</i>	0.9091	0.9412

Tras realizar diferentes pruebas, comprobamos que la red realizaba una predicción más precisa trabajando con imágenes segmentadas. Tanto la exactitud como la pérdida para el set de test obtuvo mejores resultados al trabajar con imágenes de personas segmentadas. Al obtener los resultados anteriores surgió la duda de cómo mejoraría el modelo si además de la imagen segmentada, introducimos al modelo neuronal información sobre la posición de la persona y los objetos de la imagen; así se planteó la metodología que se muestra en la Figura 2.

Se hizo el entrenamiento y la validación con las etiquetas, entradas de texto y entradas de imagen procesadas, como se ha explicado en los pasos anteriores, y se obtuvieron los siguientes resultados que se exponen en las siguientes gráficas:

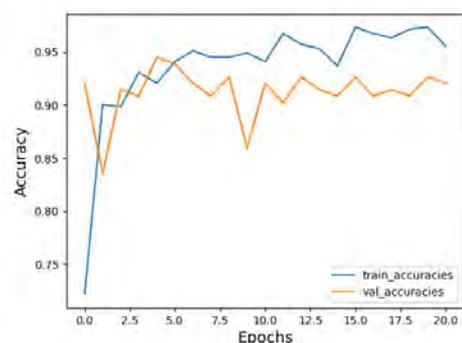


Figura 4: Gráfica de accuracy

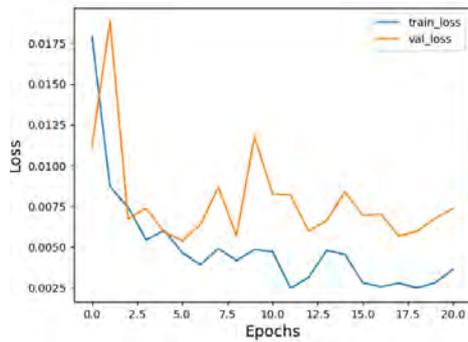


Figura 5: Gráficas de *loss*

Como se puede comprobar tanto el *loss* como el *accuracy* durante el entrenamiento tienen valores bastante altos desde la primera época y ambos parámetros mejoran con el transcurso del entrenamiento. En la época 17 ya se alcanzó una exactitud de 96.54 % y una pérdida del 0.0034 para el entrenamiento, lo que nos da una idea del buen comportamiento del modelo. En cuanto a los resultados con el conjunto de test, en la Figura 6 se han representado los porcentajes de *true positives* (TP), *true negatives* (TN), *false positives* (FP) y *false negatives* (FN) en la siguiente matriz de confusión.

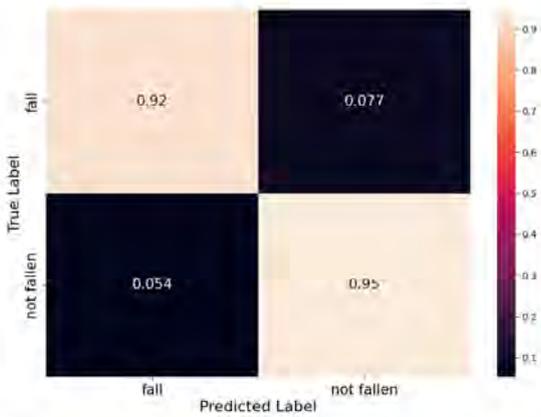


Figura 6: Matriz de confusión con conjunto de test

A partir de los datos anteriores se han calculado diferentes métricas de clasificación recogidas en la Tabla 2.

Tabla 2: Métricas de la matriz de confusión para el conjunto de test	
<i>Resultados</i>	
<i>Accuracy</i>	0.9329
<i>Precision</i>	0.9231
<i>Recall</i>	0.9633
<i>F1 – Score</i>	0.8972

El valor del *accuracy* para estos datos de evaluación fue de 93.29 % y la pérdida fue de 0.1375. Igualmente, la puntuación F1 es elevada, por lo que se entiende que hay un buen balance entre la especificidad y la sensibilidad en el modelo. Los valores obtenidos son un indicio de que el comportamiento del modelo

para el problema de clasificación planteado puede ser bastante adecuado.

Para verificar el rendimiento del modelo en un caso real, se creó un nuevo conjunto de test con fotos tomadas desde el propio robot social Temi. Para ello se accedió a la cámara del mismo desde el paquete de Android *camera2* mediante una aplicación instalada en el robot. El nuevo conjunto de test consta de 125 imágenes de diferentes personas, 64 representan caídas y 61 no caídas; un ejemplo de estas imágenes se muestra en la Figura 7. Las imágenes han sido tomadas desde perspectivas diferentes y en localizaciones distintas.



Figura 7: Ejemplos de imágenes en el nuevo conjunto de test

Tras realizar la inferencia con este conjunto de datos se calculó la matriz de confusión para estas imágenes que se muestra en la Figura 8.

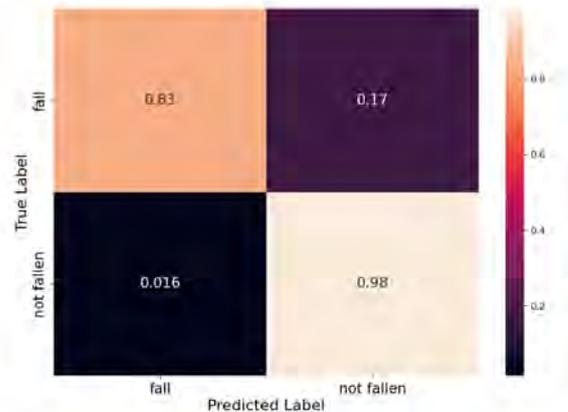


Figura 8: Matriz de confusión con el nuevo conjunto de test

Como resultados finales se obtuvo un porcentaje de *true positives* de 83 % y 98 % para las etiquetas de caídas y no caídas respectivamente. Se consiguió un valor de exactitud de 87.39 % y una pérdida del 0.2639 para este conjunto de test.

Al realizar una revisión de la literatura previa se comprobó que los valores obtenidos de *accuracy* y *loss* con esta metodología son comparables a los conseguidos en otros artículos enfocados en la detección de caídas utilizando segmentación en imágenes. En algunos estudios, como (Abd et al., 2022), se alcanza una exactitud de 91.7 % a la hora de detectar caídas a partir del esqueleto de la persona con el paquete *OpenPose*; en (Yao et al., 2020) se alcanza un *accuracy* del 90.5 % empleando un método de detección en tiempo real de caídas utilizando herramientas de segmentación. Cabe destacar que con la me-

metodología planteado no solo se obtienen valores de exactitud elevados, sino que además se ha comprobado que tiene mejor especificidad que varias de las investigaciones mencionadas anteriormente debido a la baja tasa de falsos positivos. Además, este planteamiento permite la detección de caídas de varias personas en una imagen; esto es algo que no se logra fácilmente con otras técnicas disponibles en la literatura. Con los resultados obtenidos a partir de nuestra metodología se puede confirmar que el enfoque planteado es eficaz a la hora de detectar a una o varias personas caídas y no caídas.

5. Conclusión

En el presente trabajo se ha planteado una metodología para la detección de caídas a partir de imágenes; para ello se han combinado diferentes técnicas de reconocimiento de objetos y segmentación con el objetivo de favorecer el comportamiento de la red cuando se trabaja con pocas muestras de entrenamiento.

Para ayudar al modelo neuronal a llegar a la predicción correcta se propone desechar los elementos de la imagen que no tienen que ver con la caída del usuario. Para ello realizamos una segmentación de la persona en RGB sobre un fondo negro. Con esto ayudamos a la red neuronal a centrarse exclusivamente en la región relevante para la tarea de predicción, eliminando distracciones y mejorando la precisión del modelo. También tenemos en cuenta algunos elementos en la imagen como camas o sillas que pueden servir para diferenciar si el usuario está sentado, tumbado o manteniendo alguna postura diferente de estar caído. Para verificar si efectivamente la persona puede tener relación con el objeto de interés se comprueba si existe solapamiento entre la persona y el objeto detectado. De acuerdo con los resultados presentados en la Sección 4, la metodología empleada es eficiente a la hora de detectar caídas en una imagen en la que hay una o varias personas presentes. El modelo expuesto se ha desarrollado para ser implementado en el proyecto EIAROB como un sistema de detección de caídas utilizando la cámara integrada en un robot social. Este proyecto tiene como objetivo principal mejorar la calidad de vida y la seguridad de las personas mayores que viven solas o con su pareja en el domicilio, por lo que consideramos que el enfoque ha cumplido estos requisitos.

Una gran ventaja de este proyecto es que no se emplean cámaras fijas, sino que se utiliza la cámara del propio robot para capturar imágenes. En líneas de investigación futuras, se propone aprovechar esto para hacer frente a los casos de reconocimiento dudoso de personas o cuando se detecta un obstáculo entre la cámara y la persona. Una solución sería usar diferentes puntos de vista para hacer las fotografías que podemos conseguir al mover el robot de posición. Aunque los resultados obtenidos en el presente estudio y en otros trabajos relacionados sean favorables, es necesario continuar investigando en el campo de la inteligencia artificial para garantizar la seguridad de las personas mayores. Con este estudio se pretende facilitar el día a día de estas personas y sus familiares aplicando las nuevas tecnologías.

Agradecimientos

La investigación que se presenta en este trabajo ha recibido financiación del proyecto ROSOGAR PID2021-123020 OB-I00 financiado por MCI-N/AEI/10.13039/501100011033/FEDER, UE, y del proyecto EIAROB Financiado por Consejería de Familia of the Junta de Castilla y León - Next Generation EU.

Referencias

- Abd, W. H., Sadiq, A. T., Hussein, K. A., 2022. Human fall down recognition using coordinates key points skeleton. In: 2022 3rd Information Technology To Enhance e-learning and Other Application (IT-ELA). IEEE, pp. 232–237.
- Anwary, A. R., Rahman, M. A., Muzahid, A. J. M., UI Ashraf, A. W., Patwary, M., Hussain, A., 2022. Deep learning enabled fall detection exploiting gait analysis. In: 2022 44th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine Biology Society (EMBC). pp. 4683–4686. DOI: 10.1109/EMBC48229.2022.9871964
- Bevilacqua, V., Nuzzolese, N., Barone, D., Pantaleo, M., Suma, M., D'Ambruso, D., Volpe, A., Loconsole, C., Stroppa, F., 2014. Fall detection in indoor environment with kinect sensor. In: 2014 IEEE International Symposium on Innovations in Intelligent Systems and Applications (INISTA) Proceedings. IEEE, pp. 319–324.
- Deng, J., Dong, W., Socher, R., Li, L.-J., Li, K., Fei-Fei, L., 2009. Imagenet: A large-scale hierarchical image database. In: 2009 IEEE conference on computer vision and pattern recognition. Ieee, pp. 248–255.
- Domingo, J. D., Gómez-García-Bermejo, J., Zalama, E., 2022. Improving human activity recognition integrating lstm with different data sources: Features, object detection and skeleton tracking. IEEE Access 10, 68213–68230. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3186465
- EIAROB, 2022. Ecosistema de inteligencia ambiental para el apoyo a los cuidados de larga duración en el hogar mediante uso de robots sociales. <https://www.itap.uva.es/en/eiarob/>. INE, 2023.
- Jocher, G., Chaurasia, A., Qiu, J., Jan. 2023. Ultralytics YOLO. URL: <https://github.com/ultralytics/ultralytics>
- Lotfi, A., Albawendi, S., Powell, H., Appiah, K., Langensiepen, C., 2018. Supporting independent living for older adults; employing a visual based fall detection through analysing the motion and shape of the human body. IEEE Access 6, 70272–70282.
- Maldonado-Bascon, S., Iglesias-Iglesias, C., Martín-Martín, P., Lafuente-Arroyo, S., 2019. Fallen people detection capabilities using assistive robot. Electronics 8 (9), 915.
- Merino-Fidalgo, S., Zalama, E., Gómez-García-Bermejo, J. and Duque-Domingo, J., Gómez, R., Viñas, P., García, D., Urueña, H., 7 2023. Sistema de monitorización no intrusiva para vivienda de personas mayores. Jornadas Nacionales de Robótica y Bioingeniería 2023: Libro de actas, 115–121. No publicado. DOI: 10.20868/UPM.B00K.74896
- Mubashir, M., Shao, L., Seed, L., 2013. A survey on fall detection: Principles and approaches. Neurocomputing 100, 144–152.
- Sánchez-Girón, C., Zalama, E., Gómez-García-Bermejo, J. and Duque-Domingo, J., 7 2023. Reconocimiento de actividades humanas aplicando modelos de aprendizaje profundo. Jornadas Nacionales de Robótica y Bioingeniería 2023: Libro de actas, 223–229. No publicado. DOI: doi.org/10.20868/UPM.book.74896
- Vishwakarma, V., Mandal, C., Sural, S., 2007. Automatic detection of human fall in video. In: Pattern Recognition and Machine Intelligence: Second International Conference, PReMI 2007, Kolkata, India, December 18-22, 2007. Proceedings 2. Springer, pp. 616–623.
- Yao, C., Hu, J., Min, W., Deng, Z., Zou, S., Min, W., 2020. A novel real-time fall detection method based on head segmentation and convolutional neural network. Journal of Real-Time Image Processing 17, 1939–1949.



Simposio de Robótica, Bioingeniería y Visión por Computador 2024



Estudio de localización de una cámara sin necesidad de crear mapas 3D

Moreno, F.A.* , Álvarez-Romero, N., González-Jiménez, J.

Machine Perception and Intelligent Robotics Group (MAPIR), System Engineering and Automation Department, Málaga Institute for Mechatronics Engineering and Cyber-Physical Systems (IMECH.UMA). University of Málaga, Campus de Teatinos, 29071, Málaga, Spain.

Resumen

Este trabajo preliminar explora, en el ámbito de la Localización Visual (VL), una perspectiva alternativa al tradicional enfoque que requiere mapas geométricos con *landmarks* 3D. Así, estudiamos las posibilidades de la VL en un mapa que combina datos de apariencia mediante descriptores holísticos georreferenciados, conjuntos de *keypoints* extraídos en las imágenes mapeadas e información geométrica relativa entre las poses de sus elementos. En este enfoque, el mapa 3D se sustituye por una base de datos de imágenes que son agrupadas en regiones locales con similitud en apariencia, denominados submapas de apariencia. La pose relativa de cada par de imágenes en estos submapas se calcula fuera de línea a partir de la matriz esencial. En este artículo presentamos un procedimiento de localización métrica, eficiente y preciso en dos etapas: (i) Reconocimiento Visual de Lugares para obtener la región de la cámara y (ii) estimación de su pose métrica dentro de cada submapa a partir de sus vecinos en el espacio de apariencia. Los resultados preliminares presentan este método como un enfoque prometedor para realizar Localización basada en Apariencia.

Palabras clave: Navegación de robots, programación y visión, Localización, Robots móviles autónomos.

Appearance-based localization in two-steps

Abstract

This preliminary work explores, in the field of Visual Localization (VL), an alternative perspective to the traditional use of geometric maps that relies on 3D *landmarks*. Thus, we study the possibilities of performing VL in a map that combines appearance information by means of holistic descriptors, sets of extracted *keypoints* in the mapped images, and relative geometric data between the poses of its elements. The creation of the map is based on the clustering of local regions with similarity in appearance and the averaging of the relative poses between their elements calculated from the essential matrix. In this paper we present an efficient and accurate two-step metric localization method: (i) performing Visual Place Recognition to obtain the camera region and (ii) estimating its metric pose, from its neighbors, within the obtained region. Preliminary results present this method as a promising approach for Appearance-based Localization.

Keywords: Robot Navigation, Programming and Vision, Localization, Autonomous Mobile Robots.

1. Introducción

El desarrollo de tecnologías emergentes como vehículos autónomos (robots, coches o UAVs) o dispositivos de Realidad Aumentada demanda métodos de Localización Visual (*Visual Localization*, VL) rápidos y fiables para determinar la pose de una cámara dado un modelo pre-construido del entorno (Piasco et al., 2018; Toft et al., 2020). Los métodos actuales de VL del estado del arte suelen abordarse desde una perspectiva 3D, basándose en un mapa que comprende entidades geométricas (*landmarks*), en su mayoría puntos 3D (Mur-Artal et al., 2015),

y a veces también segmentos (Gomez-Ojeda et al., 2019). Con este mapa, la pose de la cámara se estima minimizando una función de coste que tiene en cuenta los errores entre las proyecciones de los puntos mapeados y sus correspondientes observaciones en la imagen. Este enfoque ha demostrado ser muy preciso en una amplia variedad de escenarios, siendo hoy en día adoptado como el estándar *de facto* para VL.

Sin embargo, confiar en este tipo de mapa 3D para VL tiene una serie de limitaciones e inconvenientes que surgen cuando: (i) se requiere una localización global (p.e., relocalización, *kid-*

*Autor para correspondencia: famoreno@uma.es

napped robot); (ii) se detectan pocas características y/o están mal distribuidas en las imágenes; (iii) las condiciones de iluminación de la escena varían sustancialmente en comparación con las del mapa (p.e., día/noche, diferentes estaciones, etc.); o (iv) el mapa se hace muy grande, lo que exige más recursos de procesamiento y memoria.

En cambio, la localización basada en la apariencia (*Appearance-based Localization*, AbL) ofrece una perspectiva totalmente distinta ya que evita modelar la geometría 3D del mundo. En su lugar, el contenido de la imagen se codifica mediante un descriptor compacto, normalmente a través de una red neuronal convolucional (CNN) (Arandjelovic et al., 2016; Lopez-Antequera et al., 2017), y la apariencia del entorno se representa a través de una base de datos georreferenciada de descriptores, usualmente conocida como Mapa de Apariencia (*Appearance Map*, AM). Estos AMs han demostrado ser especialmente adecuados para el Reconocimiento Visual de Lugares (*Visual Place Recognition*, VPR) (Lowry et al., 2015), tanto en entornos muy grandes como en presencia de fuertes cambios de iluminación. Desafortunadamente, su ventaja para la localización topológica tiene un precio: un rendimiento pobre para la localización métrica. Tal deficiencia se hace especialmente pronunciada cuando se utiliza VPR para obtener resultados de AbL precisos (Sattler et al., 2018), ya que el resultado obtenido es la pose del elemento del AM con mayor parecido visual a la imagen *query*. Entre las soluciones adoptadas para mejorar la AbL se encuentra la suposición de que la cámara a localizar sigue una trayectoria previamente recorrida (Maddern et al., 2012; Thoma et al., 2019), reduciendo el problema a una localización en 1D, con una evidente aplicabilidad limitada, o la representación del entorno con un AM denso (Ham et al., 2005; Lopez-Antequera et al., 2016), lo que conduce a mapas costosos de mantener, con muestras innecesarias y redundantes. En la literatura podemos encontrar soluciones para clusterizar estos mapas densos y obtener regiones con parecido en apariencia y cercanas en pose (Jaenal et al., 2022, 2023). Estas regiones, denominadas submapas de apariencia, se consideran *lugares* donde localizar la cámara de manera aproximada, suponiendo un primer paso para una localización métrica posterior.

Este trabajo analiza este enfoque y describe un sistema de localización visual en dos etapas:

1. Una etapa inicial de VPR, donde se hace uso de un descriptor holístico para determinar el submapa donde se ubica la imagen de consulta.
2. Una segunda etapa donde se hace uso de puntos de interés en las imágenes del submapa para determinar la posición geométrica de la imagen *query* dentro de esta región local basándose en la estimación de la matriz esencial.

A nuestro parecer, este enfoque de localización apariencia-métrico presenta un gran potencial para determinar la pose de una imagen de manera eficiente y precisa sin necesidad de construir un mapa 3D, tal y como sugieren los resultados preliminares presentados.

2. Propuesta

Como ya se ha comentado, el objetivo del sistema propuesto es estimar la pose de una cámara dentro de un entorno a partir

de la imagen capturada, utilizando para ello un proceso en dos etapas: Reconocimiento Visual de Lugares (VPR) y una estimación de la pose métrica dentro del lugar obtenido. Para ello se parte de un conjunto de imágenes georreferenciadas que cubren el entorno y que se usarán para construir el mapa topológico-métrico en un proceso realizado *offline* por el que, primero, se calculan descriptores holísticos para todas las imágenes del mapa y se agrupan en regiones que tienen similitud en apariencia (parte topológica). Posteriormente, se escoge una imagen como referencia de cada región y se determinan las poses relativas de cada imagen local con la de referencia (parte métrica). Por último, se extraen *keypoints* en las imágenes y se almacenan también para su uso posterior.

En la fase de localización, realizada *online*, se calcula el descriptor holístico para la imagen de consulta (o imagen *query*) y se compara con las de referencia de las regiones, buscando aquella más parecida. Posteriormente se extraen los *keypoints* en la imagen *query* y se buscan emparejamientos con los vecinos locales, seleccionando un número reducido de ellos. Utilizando los emparejamientos se determina la matriz esencial entre vistas *y*, de ahí, la rotación y traslación existente entre la imagen *query* y los vecinos. Un proceso de optimización final determina la pose *global* de la imagen *query* dentro de la región seleccionada.

En lo sucesivo se describen la formalización del problema (Sección 2.1), la construcción del mapa a partir de las imágenes georreferenciadas (Sección 3), y el *pipeline* de localización (Sección 4). Finalmente, en las Secciones 5 y 6 se presentan los experimentos preliminares realizados, y las conclusiones, respectivamente.

2.1. Formalización del problema

Sea \mathcal{M} un mapa topométrico con información de apariencia formado por un conjunto desordenado de N elementos

$$\mathcal{M} = \{I_i \mid I_i = (\mathbf{p}_i, \delta_i, \mathbf{D}_i), \forall i = 1 \dots N\}, \quad (1)$$

donde $\mathbf{p}_i \in \text{SE}(3)$ es la pose desde donde se tomó la imagen, $\delta_i \in \mathbb{R}^D$ un descriptor global de la imagen y \mathbf{D}_i , a su vez, representa un conjunto de N_i pares

$$\mathbf{D}_i = \left\{ \left(\mathbf{q}_i^k, \mathbf{d}_i^k \right) \right\}_{k=1}^{N_i}, \quad (2)$$

siendo $\mathbf{q}_i^k \in \mathbb{R}^2$ las coordenadas del k^{th} *keypoint* en la imagen y $\mathbf{d}_i^k \in \mathbb{R}^K$ su descriptor local. Este mapa se representa como un grafo donde cada elemento I_i corresponde a un nodo y las aristas entre los nodos i y j representan la rotación \mathbf{R}_{ij} y traslación \mathbf{t}_{ij} relativas entre sus poses asociadas (ver Figura 1). El objetivo de este trabajo es determinar la pose métrica absoluta $\mathbf{p}_q = (x_q, y_q, z_q, \alpha_q, \beta_q, \gamma_q)$ de una imagen *query* dado el mapa del entorno.

3. Construcción del mapa

La construcción de este mapa topométrico con información de apariencia se realiza *offline* y requiere de: (i) el cálculo de un descriptor global para cada imagen, (ii) el cálculo y almacenamiento de todos los *keypoints* y descriptores para cada imagen en el mapa, y (iii) la estimación de las transformaciones geométricas existentes entre aquellas que tienen co-visibilidad, es decir, aquellas que tienen un número suficiente de *keypoints*

en común. El primer elemento nos permitirá obtener una medida de la similitud en apariencia entre los nodos, mientras que los dos siguientes nos permitirán obtener relaciones métricas entre los nodos del mapa. De esta forma, en esta etapa inicial se realiza un proceso de clusterización del mapa para identificar regiones (o *lugares*) dentro del mismo que tengan cercanía en pose y similitud en cuanto a su apariencia, generando información topológica al mapa. El hecho de tener en cuenta tanto la pose como la apariencia para realizar esta clusterización nos permite mitigar el efecto del *aliasing* perceptual (*Perceptual Aliasing*), que agruparía dentro del mismo lugar o submapa imágenes parecidas pero de localizaciones muy distantes.

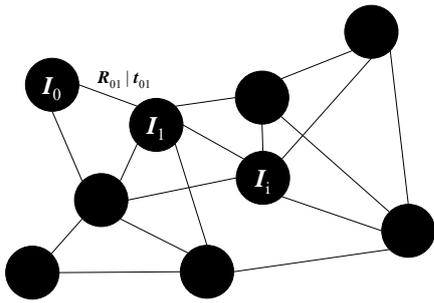


Figura 1: Grafo ejemplo del mapa.

En este trabajo se utilizará el método SIFT (Lowe, 2004) para obtener los *keypoints* junto con sus respectivos descriptores locales para cada una de las imágenes del mapa (ver ecuación 2) y la arquitectura NetVLAD (Arandjelovic et al., 2016) para obtener el descriptor holístico de la imagen.

3.1. Cálculo de las transformaciones relativas

Para obtener las transformaciones relativas entre los elementos del mapa, se realizará primero el emparejamiento entre los *keypoints* de cada imagen a partir de sus descriptores. De esta forma, y basándonos en la geometría epipolar, obtenemos una restricción por cada par de puntos correspondientes $\mathbf{q}, \mathbf{q}' \in \mathbb{R}^3 \times \mathbb{R}^3$ sobre la pose relativa: $\mathbf{q}'^T [\mathbf{t}_{ij}]_{\times} \mathbf{R}_{ij} \mathbf{q} = 0$. En esta expresión $\mathbf{E}_{ij} = [\mathbf{t}_{ij}]_{\times} \mathbf{R}_{ij}$ es la matriz esencial entre vistas. Si el número de correspondencias es suficientemente alto (es decir, las imágenes tienen suficiente co-visibilidad), se hará uso del conocido método de los cinco puntos (Nistér, 2004), robustificado mediante el uso de RANSAC (Fischler and Bolles, 1981), para determinar \mathbf{E}_{ij} . Finalmente, a partir de esta matriz esencial se puede obtener de manera directa la pose relativa entre las cámaras (hasta un factor de escala).

Para determinar la similitud en apariencia, se calcula un descriptor holístico NetVLAD δ_i para cada imagen y se calcula la distancia entre los descriptores de los elementos cercanos en pose, agrupando aquellos cuya distancia en apariencia sea menor a un determinado umbral. Para cada grupo, tomaremos uno de ellos como origen o referencia de la región. La especificación del proceso concreto de partición del grafo en regiones queda fuera del ámbito de este artículo, pero podría utilizarse, por ejemplo, el propuesto en (Jaenal et al., 2022).

3.2. Mapa topológico

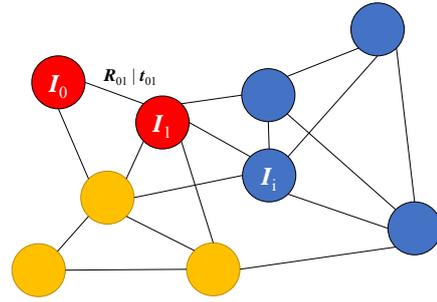


Figura 2: Grafo de un mapa con tres regiones según su apariencia.

3.3. Mapa métrico

Con respecto a las relaciones métricas entre los elementos del mapa, tal y como se describió en la Sección 3.1, en este punto disponemos de las rotaciones y traslaciones relativas entre aquellos pares de imágenes que tienen co-visibilidad, pero nos encontramos con dos inconvenientes:

- Indefinición del factor de escala: El proceso de recuperación de la rotación y translación a partir de la matriz esencial no proporciona el factor de escala del vector de translación, sino únicamente la dirección del mismo.
- Consistencia de la solución: Errores en el cálculo de las poses relativas entre nodos hace que bucles en el grafo de poses cuya composición debería resultar, idealmente, en la matriz identidad, generen residuos. Así, se producen inconsistencias al determinar la pose de un nodo cuando se siguen distintos caminos en el grafo.

Para solventar estos problemas, proponemos corregir las posiciones de los nodos (imágenes) minimizando el residuo de los bucles de transformaciones entre el nodo de referencia y el resto de las imágenes del submapa. De esta manera se obtiene la escala de las traslaciones y se consigue que la pose *óptima* de cada nodo dentro de la región sea aquella que minimice los errores e inconsistencias existentes en la información relativa entre ellos (ver Figura 3).

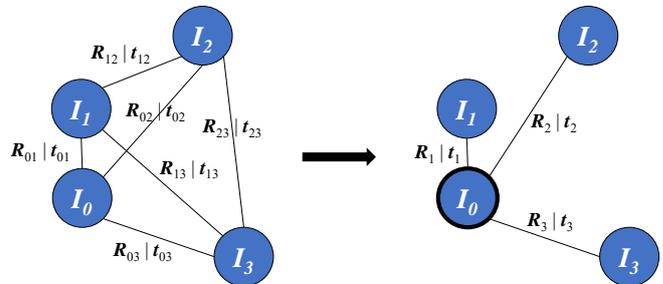


Figura 3: Ejemplo de mapa métrico de una región.

Para ello hacemos uso del método propuesto en (Wilson and Snavely, 2014) donde se presenta un método sencillo y eficaz para resolver problemas de *SfM* mediante el promediado de

geometrías epipolares. Dicho trabajo se basa en el procedimiento propuesto en (Chatterjee and Govindu, 2013) para promediar rotaciones relativas entre sistemas de referencia y lo amplía con un sistema para resolver las traslaciones en 3D de manera robusta ante la presencia de *outliers*. A continuación se presenta una breve descripción de ambos procedimientos, emplazando al lector a los artículos originales para obtener más detalles.

3.3.1. Promediado de las rotaciones

Formalmente, denotemos por $\mathbf{R}_i \in SO(3)$ la rotación *absoluta*¹ de la i -ésima imagen mapeada, y \mathbf{R}_{ij} como la rotación *relativa* calculada entre las imágenes i y j , de manera que:

$$\mathbf{R}_{ij} = \mathbf{R}_i^T \mathbf{R}_j. \quad (3)$$

Para obtener una estimación de las rotaciones globales para cada elemento de la región, partimos de la definición de distancia intrínseca entre matrices de rotación:

$$d(\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2) = \frac{1}{\sqrt{2}} \|\log(\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2^{-1})\|_F, \quad (4)$$

la cual está calculada en el álgebra de Lie. El objetivo es minimizar la suma de estas distancias para las rotaciones implicadas con el fin de obtener la rotación absoluta óptima de los elementos de la región:

$$\{\mathbf{R}_k\} = \arg \min_{\mathbf{R}_k \in SO(3)} \sum_{i,j} d^2(\mathbf{R}_{ij}, \mathbf{R}_i^T \mathbf{R}_j). \quad (5)$$

Esta minimización se realiza resolviendo iterativamente el sistema

$$\mathbf{A}\omega_g = \omega_r, \quad (6)$$

donde $\omega_g \in \mathfrak{so}(3)$ es el conjunto de rotaciones *globales* a determinar tal que $[\omega]_{\times} = \log(\mathbf{R})$ y $\omega_r \in \mathfrak{so}(3)$ es el conjunto de rotaciones relativas entre elementos. La matriz \mathbf{A} , a su vez, aglutina las relaciones entre las rotaciones relativas y absolutas.

La obtención de las poses absolutas se realiza en dos pasos: inicialmente resolviendo la ecuación (6) usando la norma ℓ_1 que es menos sensible a la presencia de *outliers* (denominado **LIRA** en (Chatterjee and Govindu, 2013)) y posteriormente usando esta solución como inicialización para una segunda minimización de (6) mediante una solución iterativa pesada de mínimos cuadrados (*Iteratively Reweighted Least Squares*, IRLS). En esta segunda optimización se realiza una robustificación de la función de coste mediante la función de Huber para reducir aún más el efecto de los *outliers*. Se emplaza al lector a (Chatterjee and Govindu, 2013) para una explicación completa.

3.3.2. Cálculo de las traslaciones

En cuanto a la traslación, una vez conocidas las rotaciones, partimos de la ecuación que relaciona la traslación entre dos imágenes i y j , sus traslaciones absolutas y la rotación absoluta de i :

$$\mathbf{t}_{ij} = \mathbf{R}_i^T (\mathbf{t}_j - \mathbf{t}_i), \quad (7)$$

donde \mathbf{t}_{ij} , \mathbf{t}_i y $\mathbf{t}_j \in \mathbb{R}^3$ y construimos una función de coste:

$$e(\mathcal{T}) = \sum_{(i,j)} d_{ch}^2 \left(\hat{\mathbf{t}}_{ij}, \frac{\mathbf{t}_j - \mathbf{t}_i}{\|\mathbf{t}_j - \mathbf{t}_i\|} \right), \quad (8)$$

siendo $d_{ch}(\mathbf{u}, \mathbf{v})$ la distancia Euclídea entre los vectores \mathbf{u} y \mathbf{v} y $\hat{\mathbf{t}}_{ij} = \lambda_{ij} \mathbf{R}_i \mathbf{t}_{ij} \in \mathbb{S}^2$ es un vector unitario que indica la dirección de la traslación entre las imágenes i y j una vez tenida una estimación de la rotación absoluta de i y la traslación relativa entre ambas imágenes. Nótese que λ_{ij} representa el factor de escala en la traslación no recuperable a partir la matriz esencial entre vistas.

La optimización de este coste se realiza mediante el método denominado 1DSfM en (Wilson and Snavely, 2014) que contempla una etapa inicial de limpieza de *outliers*, y, posteriormente, la minimización por Levenberg-Marquardt de $e(\mathcal{T})$. De nuevo, se emplaza al lector al artículo original para una explicación completa.

4. Procedimiento de localización

Una vez construido el mapa, tanto a nivel métrico como topológico, podemos utilizarlo para realizar la localización *online* de una imagen *query*. Este proceso sigue el esquema mostrado en la Figura 4, el cual se describe a continuación.

4.1. VPR y elección de vecinos

En primer lugar se calcula el descriptor holístico de la imagen de consulta con NetVLAD y se compara con los de las regiones en el mapa, obteniendo aquella con menor distancia ℓ_2 en el espacio del descriptor. Una vez determinada la región, se seleccionan las K imágenes vecinas dentro la región que tienen mayor similitud en apariencia con la imagen *query* usando como métrica la similitud del coseno, la cual evalúa la separación angular entre dos vectores basándose en el valor del coseno del ángulo que forman.

4.2. Cálculo de rotaciones y traslaciones relativas

Posteriormente se determinan las rotaciones y traslaciones relativas entre los K vecinos seleccionados y la imagen *query* siguiendo el mismo procedimiento descrito en la construcción del mapa métrico, es decir: (i) extrayendo los *keypoints* SIFT de la imagen *query* y realizando emparejamiento estéreo entre ella y los vecinos, (ii) estimando la matriz esencial entre pares de vistas mediante el algoritmo de los cinco puntos y (iii) obteniendo la rotación y la traslación entre imágenes (sin factor de escala) a partir de dicha matriz. Para obtener una mejor estimación de ambos elementos, volvemos a realizar el procedimiento de promediado de rotaciones utilizado para la construcción del mapa (Sección 3.3) con la diferencia de que en esta ocasión solo se optimiza la rotación absoluta de la imagen *query*, ya que las del mapa se consideran fijas al haber sido optimizadas *offline* durante la construcción del mismo.

Una vez obtenida la rotación absoluta de la imagen *query*, el objetivo es resolver su traslación respecto a la referencia de la región, siguiendo, de nuevo, un proceso similar al desarrollado para la construcción del mapa métrico. Así, reescribimos (7) para el caso de la imagen *query* q y una de las imágenes vecinas:

$$\lambda_{dq}^k \mathbf{R}_d^k \mathbf{t}_{dq}^k = (\mathbf{t}_q - \mathbf{t}_d^k), \quad (9)$$

¹Recordemos que nos referimos a la pose absoluta dentro de la región. Es, por tanto, relativa a la referencia.

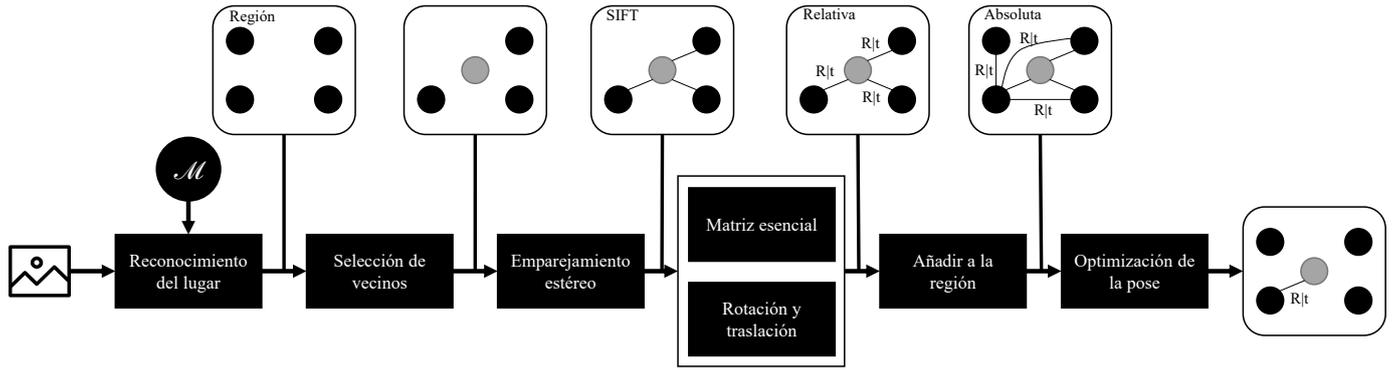


Figura 4: Esquema del proceso de localización.

y optimizamos una función de coste similar a (8):

$$e(\mathcal{T}) = \sum_k \omega_{dq}^k d_{ch}^2 \left(\mathbf{R}_d^k \mathbf{t}_{dq}^k, \frac{\mathbf{t}_q - \mathbf{t}_d^k}{\|\mathbf{t}_q - \mathbf{t}_d^k\|} \right), \quad (10)$$

donde cada imagen vecina contribuye con una restricción a la traslación global de la imagen *query* pesada con un factor ω_{dq}^k que es proporcional al número de correspondencias que tiene con la imagen de consulta. Con el objetivo de refinar la solución, tras realizar estos procedimientos, la estimación aproximada de la rotación y la traslación de la imagen de consulta se emplea como inicialización de un proceso de *Bundle Adjustment* (BA) final Schonberger and Frahm (2016) entre aquellos elementos que tienen co-visibilidad de *keypoints* dentro de la región. El resultado obtenido tras el BA es la estimación final de la pose absoluta de la imagen de consulta.

5. Experimentos

Este artículo presenta un trabajo en progreso por lo que el *pipeline* completo aún no ha podido ser evaluado. Los resultados preliminares mostrados aquí se centran en determinar los errores cometidos en la estimación de: (i) la pose relativa entre dos vistas y (ii) la pose absoluta de una imagen dentro de una región local ya conocida. Quedan fuera de la evaluación en este artículo la clusterización del mapa y el proceso completo de localización, incluyendo el VPR y la localización métrica final.

5.1. Evaluación de las poses relativas

Para este experimento se ha utilizado el *dataset* 7-Scenes (Shotton et al., 2013), una colección de imágenes tomadas con una cámara RGB-D de tamaño 640×480 que incorporan su información *ground truth* de pose. El *dataset* presenta secuencias de entrenamiento y de validación. De las secuencias de entrenamiento se seleccionarán pares de imágenes aleatorios que presenten co-visibilidad y de donde se calcularán sus rotaciones relativas. Estas estimaciones serán comparadas con las determinadas por las poses *ground truth* que se proporcionan en el *dataset*. Los errores obtenidos en cada uno de los ejes de rotación se muestran en la Tabla 1.

En cuanto a la estimación de la traslación a partir de la matriz esencial, se muestra en la Tabla 2 el error en ángulo existente entre los vectores de *ground truth* y los de traslación, ya que estos últimos no proporcionan el factor de la escala. Como

se puede apreciar, el error angular es relativamente alto cuando se toman las vistas dos a dos, por lo que se hace necesario el procedimiento descrito en la Sección 3.3.2.

Tabla 1: Evaluación de la rotación relativa en 7-Scenes, incluyendo el nombre de la escena, el número de estimaciones hechas, y la media de los errores de estas en los 3 ejes de rotación.

Nombre	# img	Error (X,Y,Z) [°]
Office (seq-05)	10	(1.8, 2.16, 1.57)
Office (seq-05)	50	(1.16, 0.99, 0.21)
Chess (seq-01)	50	(4.50, 0.92, 1.38)
Fire (seq-01)	50	(3.30, 1.34, 0.07)
Fire (seq-01)	200	(2.37, 0.02, 0.1)
Heads (seq-02)	100	(4.76, 0.64, 0.65)
Pumpkin (seq-08)	200	(1.16, 0.47, 0.06)
Redkitchen (seq-11)	200	(2.27, 2.5, 1.26)
Stairs (seq-06)	200	(0.97, 1.5, 0.82)

5.2. Evaluación de las poses absolutas

Para la evaluación de la pose absoluta estimada de una imagen *query*, se han construido los mapas de apariencia correspondientes a las distintas escenas de *dataset* 7-Scenes y se ha lanzado el método de localización para las imágenes del conjunto de pruebas proporcionado por el propio *dataset*. En la tabla 3 se muestran los errores obtenidos en la rotación y en la traslación absoluta, habiendo fijado a 40 el número de vecinos escogidos para la localización. Como se observa en los resultados, se obtienen errores en la rotación absoluta por debajo de los 2° en la mayoría de las escenas, y por debajo de 1m en la estimación de la traslación.

6. Conclusiones y trabajos futuros

En este artículo hemos presentado una propuesta de *pipeline* para la localización visual basada en apariencia de una imagen sin necesidad de construir un mapa geométrico 3D tradicional. En cambio, se construye un mapa topológico-métrico formado por imágenes georreferenciadas a las que: (i) se les añade información de apariencia mediante el uso de descriptores holísticos y (ii) se les extraen *keypoints* que se utilizan para estimar las relaciones geométricas relativas entre ellas a partir de la matriz esencial. Posteriormente, este mapa se divide en regiones locales con apariencia similar, añadiendo la información topológica.

Tabla 2: Evaluación de la dirección de la traslación en el *dataset 7-Scenes*, incluyendo el nombre de la escena, el número de estimaciones hechas y la media de los errores obtenidos.

Nombre	# muestras	Error ang. medio [°]
Office (seq-06)	50	13.54°
Office (seq-05)	50	13.39°
Chess (seq-01)	50	10.53°
Fire (seq-01)	50	11.44°
Fire (seq-01)	200	10.97°
Heads (seq-02)	100	13.94°
Pumpkin (seq-08)	200	20.43°
Redkitchen (seq-11)	200	14.82°
Stairs (seq-06)	200	15.87°

Tabla 3: Evaluación de la rotación y la traslación absolutas estimadas, incluyendo la escena en la que se ha evaluado, el número de evaluaciones realizadas y el error medio obtenido en grados y en metros.

Nombre	# muestras	Error [°]	Error [m]
Office	25	1.54	0.71
Chess	25	2.58	0.54
Fire	25	1.81	0.43
RedKitchen	25	1.14	0.67
Heads	25	1.76	0.81
Pumpkin	25	3.12	0.84
Stairs	25	1.11	0.93

En comparación con los mapas de *landmarks*, este tipo de mapa nos permite eliminar la necesidad de inferir la posición de elementos 3D, presenta mayor robustez ante cambios de iluminación, perspectiva y apariencia, reduce el número de elementos a comparar a la hora de estimar la pose geométrica de una imagen *query* y reduce el tamaño de la información a almacenar.

Para demostrar el potencial de este tipo de representación del entorno, la hemos utilizado para localizar una imagen de consulta en dos etapas: una etapa inicial de VPR para establecer la región local a la que pertenece la imagen, y una estimación posterior de su pose absoluta dentro de la región. Los resultados obtenidos demuestran resultados prometedores que animan a continuar explorando sus posibilidades.

Entre los trabajos futuros destacan la evaluación del *pipeline* completo, la robustificación de la estimación de la matriz esencial (propensa a caer en mínimos locales), una mejora de la eficiencia en el promediado de la rotación y el cálculo de la rotación, la validación de sus resultados en otros *datasets* que presenten más dificultades.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado parcialmente por el proyecto de investigación ARPEGGIO (PID2020-117057GB-I00) financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación.

Referencias

- Arandjelovic, R., Gronat, P., Torii, A., Pajdla, T., Sivic, J., 2016. Netvlad: Cnn architecture for weakly supervised place recognition. In: Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. pp. 5297–5307.
- Chatterjee, A., Govindu, V. M., 2013. Efficient and robust large-scale rotation averaging. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision. pp. 521–528.
- Fischler, M. A., Bolles, R. C., 1981. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. *Communications of the ACM* 24 (6), 381–395.
- Gomez-Ojeda, R., Moreno, F.-A., Zuñiga-Noël, D., Scaramuzza, D., Gonzalez-Jimenez, J., 2019. PL-SLAM: A stereo SLAM system through the combination of points and line segments. *IEEE Transactions on Robotics* 35 (3), 734–746.
- Ham, J., Lin, Y., Lee, D. D., 2005. Learning nonlinear appearance manifolds for robot localization. In: 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, pp. 2971–2976.
- Jaenal, A., Moreno, F.-A., Gonzalez-Jimenez, J., 2022. Unsupervised appearance map abstraction for indoor visual place recognition with mobile robots. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 1–7.
- Jaenal, A., Moreno, F.-A., Gonzalez-Jimenez, J., 2023. Sequential monte carlo localization in topometric appearance maps. *The International Journal of Robotics Research* 42 (13), 1117–1132.
- Lopez-Antequera, M., Gomez-Ojeda, R., Petkov, N., Gonzalez-Jimenez, J., 2017. Appearance-invariant place recognition by discriminatively training a convolutional neural network. *Pattern Recognition Letters* 92, 89–95.
- Lopez-Antequera, M., Petkov, N., Gonzalez-Jimenez, J., 2016. Image-based localization using gaussian processes. In: 2016 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN). IEEE, pp. 1–7.
- Lowe, D. G., 2004. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *International Journal of Computer Vision* 60, 91–110.
- Lowry, S., Sünderhauf, N., Newman, P., Leonard, J. J., Cox, D., Corke, P., Milford, M. J., 2015. Visual place recognition: A survey. *IEEE Transactions on Robotics* 32 (1), 1–19.
- Maddern, W., Milford, M., Wyeth, G., 2012. Cat-slam: probabilistic localisation and mapping using a continuous appearance-based trajectory. *The International Journal of Robotics Research* 31 (4), 429–451.
- Mur-Artal, R., Montiel, J. M. M., Tardos, J. D., 2015. Orb-slam: a versatile and accurate monocular slam system. *IEEE transactions on robotics* 31 (5), 1147–1163.
- Nistér, D., 2004. An efficient solution to the five-point relative pose problem. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence* 26 (6), 756–770.
- Piasco, N., Sidibe, D., Demonceaux, C., Gouet-Brunet, V., 2018. A survey on visual-based localization: On the benefit of heterogeneous data. *Pattern Recognition* 74, 90–109.
- Sattler, T., Maddern, W., Toft, C., Torii, A., Hammarstrand, L., Stenborg, E., Safari, D., Okutomi, M., Pollefeys, M., Sivic, J., et al., 2018. Benchmarking 6dof outdoor visual localization in changing conditions. In: Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. pp. 8601–8610.
- Schonberger, J. L., Frahm, J.-M., June 2016. Structure-from-motion revisited. In: Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). pp. 4104–4113.
- Shotton, J., Glocker, B., Zach, C., Izadi, S., Criminisi, A., Fitzgibbon, A., 2013. Scene coordinate regression forests for camera relocalization in rgb-d images. In: Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. pp. 2930–2937.
- Thoma, J., Paudel, D. P., Chhatkuli, A., Probst, T., Gool, L. V., 2019. Mapping, localization and path planning for image-based navigation using visual features and map. In: Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. pp. 7383–7391.
- Toft, C., Maddern, W., Torii, A., Hammarstrand, L., Stenborg, E., Safari, D., Okutomi, M., Pollefeys, M., Sivic, J., Pajdla, T., et al., 2020. Long-term visual localization revisited. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 44 (4), 2074–2088.
- Wilson, K., Snavely, N., 2014. Robust global translations with 1dsfm. In: Computer Vision—ECCV 2014: 13th European Conference, Zurich, Switzerland, September 6–12, 2014, Proceedings, Part III 13. Springer, pp. 61–75.



Simposio de Robótica, Bioingeniería y Visión por Computador 2024



Realidad extendida y discapacidad: Revisión bibliográfica sobre el uso de las tecnologías emergentes para el alumnado con necesidades educativas especiales

Lancho, E.^a, Dordio, A.^a, Merchán, M.J.^a, Merchán, P.^{b,*}

^a Departamento de Didáctica de las Ciencias Sociales, Lengua y Literatura, Universidad de Extremadura, Avda. de Elvas, s/n, 06006, Badajoz, España.

^b Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Automática, Universidad de Extremadura, Avda. de Elvas, s/n, 06006, Badajoz, España.

Resumen

Cada vez son más los centros educativos que utilizan la Realidad Aumentada (RA) y la Realidad Virtual (RV) por la necesidad de recursos innovadores para adaptarse a una sociedad cada vez más digitalizada. Estas tecnologías ofrecen múltiples posibilidades y nuevas experiencias para la práctica educativa permitiendo, además, fomentar la inclusión educativa, proporcionando herramientas que permiten nuevas formas de enseñanza para todo el alumnado, en general, y para el alumnado con necesidades educativas especiales, en particular. Por ello, esta revisión pretende conocer y analizar la bibliografía existente hasta la fecha sobre el uso de la Realidad Extendida en educación con el alumnado con necesidades educativas especiales. Con este objetivo, se ha realizado una búsqueda en las bases de datos Scopus y Web of Science, seleccionando de entre los resultados 23 artículos publicados en revistas científicas. El análisis muestra que ambas tecnologías (RA y RV) se han utilizado en similar medida en el ámbito educativo para tratar la discapacidad y que, pese a que todavía existen pocas experiencias publicadas, el interés por incluirlas en la práctica educativa del alumnado con necesidades especiales va en aumento.

Palabras clave: Realidad virtual, Realidad aumentada, Educación especial

Extended reality and disability: Literature review on the use of emerging technologies for students with special educational needs

Abstract

Educational centers are increasingly using Augmented Reality (AR) and Virtual Reality (VR) as innovative resources to adapt to a digitized society. These technologies offer new possibilities and experiences for educational practice, promoting educational inclusion and providing tools for teaching all students. This review aims to analyse the existing literature on the use of Extended Reality in education, particularly for students with special educational needs. A search was conducted in the Scopus and Web of Science databases, resulting in the selection of 23 articles published in scientific journals. The analysis reveals that both AR and VR technologies have been utilized to a similar extent in the educational field to address disabilities and that, although there are few published experiences, there is a growing interest in incorporating these technologies into the educational practices of students with special needs.

Keywords: Virtual Reality, Augmented Reality, Special Education.

1. Introducción

European Schoolnet, la asociación de ministerios de educación europeos definió hace unos años los *Future Classroom Lab*, que en España fueron adaptados como Aulas del Futuro, cuya finalidad es fomentar el uso de las metodologías activas, favorecer los aprendizajes

competenciales, mejorar el trabajo cooperativo y desarrollar las iniciativas del alumnado. Estas aulas pretenden no solo la creación de un aula tecnológica, sino poner la tecnología al servicio competencial del alumnado. Las metodologías activas son la base de la pedagogía del siglo XXI (Peralta y Guamán, 2020), y para adaptarse a estas nuevas metodologías es necesario incorporar nuevos recursos tecnológicos que

*Autor para correspondencia: pmerchan@unex.es

permitan desarrollar un aprendizaje competencial (Bannister, 2017).

Dentro de los recursos tecnológicos disponibles en estas aulas, se presentan de forma novedosa la Realidad Virtual (RV) y la Realidad Aumentada (RA) para apoyar los procesos de enseñanza-aprendizaje (Abásolo et al., 2017).

Hace tiempo que las experiencias de Realidad Extendida se vienen utilizando en industrias como la automotriz o espacial, entre otras. Sin embargo, sólo ahora están empezando a abrirse camino en el ámbito educativo. (Pimentel, 2023).

En esta área, para garantizar el éxito de estas nuevas metodologías es necesario que estén adaptadas al entorno sociocultural de los centros educativos, así como a las demandas y necesidades del alumnado. Dentro de la diversidad de alumnos que encontramos en un centro educativo, está el alumnado con necesidades educativas especiales. Según el artículo 73 de la LOMLOE, se considera alumnado con necesidades educativas “aquel que afronta barreras que limitan su acceso, presencia, participación o aprendizaje, derivadas de discapacidad o de trastornos graves de conducta, de la comunicación y del lenguaje, por un periodo de su escolarización o a lo largo de toda ella, y que requiere determinados apoyos y atenciones educativas específicas para la consecución de los objetivos de aprendizaje adecuados a su desarrollo”.

La integración de las tecnologías emergentes en el sistema educativo conlleva distintas dificultades, entre ellas, la insuficiente preparación del profesorado para introducirlas en su práctica habitual en el aula (Fernández-Cruz y Fernández-Díaz, 2016). Un recurso tecnológico no adaptado puede convertirse en una barrera de aprendizaje para el alumnado con necesidades educativas especiales debido a sus dificultades comunicativas pudiendo conllevar, además, problemas afectivo-emocionales (Armas-Alba y Alonso-Rodríguez, 2021). En este sentido, será imprescindible una formación adecuada del profesorado sobre cómo incorporar dichos recursos en su aula, de manera que facilite su uso, mejore el rendimiento de cada uno de los alumnos y alumnas y se adapte a los diferentes contextos educativos (Capperucci y Franceschini, 2020). Por ello, adecuar las herramientas tecnológicas a la diversidad del alumnado implica conocer y respetar las necesidades y características personales de cada individuo (Franceschini, 2018).

Teniendo en cuenta todo lo expuesto, este estudio pretende revisar qué actividades se han realizado hasta la fecha para el alumnado con necesidades educativas especiales utilizando tecnologías emergentes como la Realidad Extendida. Para ello, se ha llevado a cabo un análisis bibliométrico, cuya definición, resultados y conclusiones se exponen en las siguientes secciones.

2. Metodología

Dada la creciente necesidad de inclusión educativa y de actualización de los recursos didácticos en las escuelas se hace necesario conocer las líneas de investigación que se están llevando a cabo en este campo. Para identificarlas, se ha realizado una búsqueda bibliográfica y un análisis bibliométrico utilizando las bases de datos Scopus y Web of Science.

En la realización de esta búsqueda se ha perseguido el siguiente objetivo: analizar y estudiar el uso de la Realidad Extendida en el ámbito de la Educación Especial.

Para dar respuesta a este objetivo general, se han formulado las siguientes preguntas de investigación:

1. ¿Cuándo y dónde se han llevado a la práctica más experiencias con la Realidad Extendida como recurso educativo destinado al alumnado con necesidades educativas especiales?
2. ¿Con qué tipos de discapacidades se han llevado a la práctica estas tecnologías?
3. ¿Qué tecnología es más utilizada en el ámbito de la Educación Especial?

2.1. Estrategias de búsqueda y criterios de selección

Para obtener los documentos, se realizó una búsqueda en Scopus y en Web of Science el día 2 de abril de 2024 utilizando las siguientes palabras clave: “special education”, “virtual reality”, “augmented reality”, “extended reality” y “mixed reality”. Además, se utilizaron los operadores booleanos “AND” y “OR”, quedando la ecuación de búsqueda de la siguiente manera:

“special education” AND (“virtual reality” OR “augmented reality” OR “extended reality” OR “mixed reality”)

En ambas bases de datos, se llevó a cabo la búsqueda a través de “Abstract”.

El número total de documentos encontrados en un primer momento fue 230 (114 en Scopus y 116 en Web of Science), los cuales se redujeron a 84 tras haber aplicado los criterios de exclusión e inclusión que se especifican a continuación. Este número bajó a 23 una vez analizados los resúmenes de todos los artículos científicos seleccionados.

Los criterios de exclusión utilizados para la selección de los artículos fueron los siguientes:

- Documentos duplicados.
- Revisiones sistemáticas y meta-análisis.
- Libros y capítulos de libro.
- Conferencias y congresos.
- Tesis doctorales.
- Artículos centrados en la formación del profesorado de Educación Especial.

Además de lo anterior, se utilizaron los siguientes criterios de inclusión:

- Artículos publicados en revistas científicas.
- Experiencias llevadas a la práctica con alumnado con necesidades educativas especiales.
- Artículos publicados en cualquier idioma.
- Artículos publicados en acceso abierto.

3. Resultados

3.1. Análisis descriptivo de los documentos según su año de publicación

En primer lugar, se ha analizado el año en el que fueron publicados los artículos utilizados en el presente estudio. Para

esta investigación no se ha seleccionado ningún rango concreto de años.

Como podemos observar, en el año 2013 comienzan a publicarse artículos sobre este tema, produciéndose un pico de publicaciones en el año 2019, con un total de 26,08% de los documentos. Del mismo modo, en el año 2023 volvió a aumentar el interés sobre el tema, produciéndose en este año el 21,74% de las publicaciones.

Por el contrario, los años 2013, 2016 y 2017 muestran el menor número de publicaciones, obteniendo el 4,34% cada uno de ellos.

Cabe destacar que el año 2024 no puede ser tenido en cuenta al mismo nivel que el resto, puesto que solamente han transcurrido 4 meses desde que comenzó. Sin embargo, ya se han publicado 2 artículos relacionados con el tema analizado (el 8,70% de los documentos considerados en la revisión), por lo que se puede suponer que este será un año de varias publicaciones relacionadas.

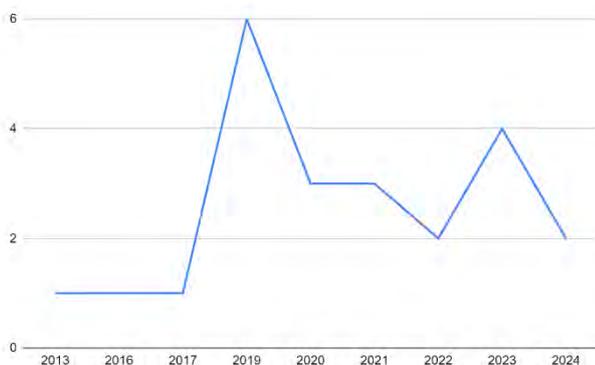


Figura 1. Número de artículos sobre el uso de Realidad Extendida en educación especial según su año de publicación.

3.2. Análisis descriptivo de los documentos según su idioma y país de publicación

Al analizar los documentos según el idioma en el que fueron publicados, podemos señalar que la gran mayoría de ellos, en concreto el 86,96%, están escritos en inglés; seguido de los escritos en coreano, con el 8,70% del total.

El idioma con menor número de publicaciones sobre este tema es el portugués, con únicamente el 4,34% de los documentos.

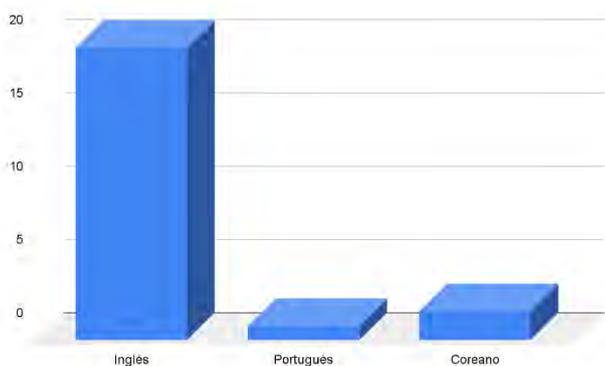


Figura 2. Número de artículos sobre el uso de Realidad Extendida en educación especial según su idioma de publicación.

3.3. Análisis descriptivo de los documentos según el país en el que han sido publicados

Respecto a los países en los que han sido publicados estos documentos, nos encontramos con que la mayoría de ellos han sido publicados en Brasil (17,39%) y en los Países Bajos (17,39%), seguidos de Estados Unidos (13,04%).

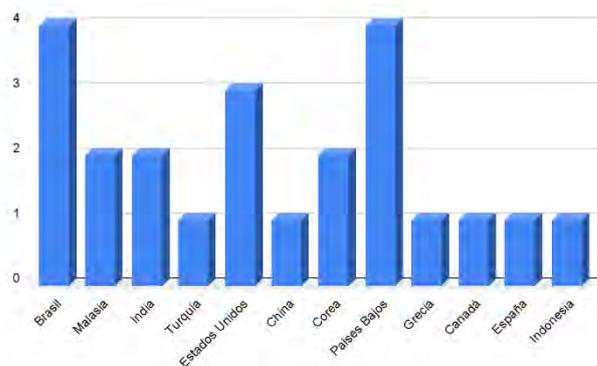


Figura 3. Número de artículos sobre el uso de Realidad Extendida en educación especial según su país de publicación.

3.4. Análisis descriptivo de los documentos según el tipo de discapacidad con la que trabaja

Con el fin de comprobar con qué tipo de discapacidad o trastorno ha sido más frecuente el uso de la RV y/o RA, analizamos los documentos separándolos según este criterio. Así, nos encontramos con:

- Discapacidad Intelectual (DI).
- Sordera.
- Parálisis Cerebral (PC).
- Trastorno del Espectro del Autismo (TEA).
- Discapacidad Motora (DM).
- Síndrome de Down.
- Dificultad Específica del Aprendizaje (DEA).
- Trastornos de conducta (TC).
- Trastornos del Habla y del Lenguaje (THL).
- Trastornos de ansiedad.

De este modo, y como se puede observar en la Figura 4, el trastorno más frecuentemente trabajado en estos artículos es el TEA, presente en un 47,83% de los documentos analizados. En segunda posición encontramos la DI (34,78%) y, en tercer lugar, los TC (17,39%).

El resto de las discapacidades no han sido muy estudiadas en cuanto a su trabajo a través de estas tecnologías emergentes.

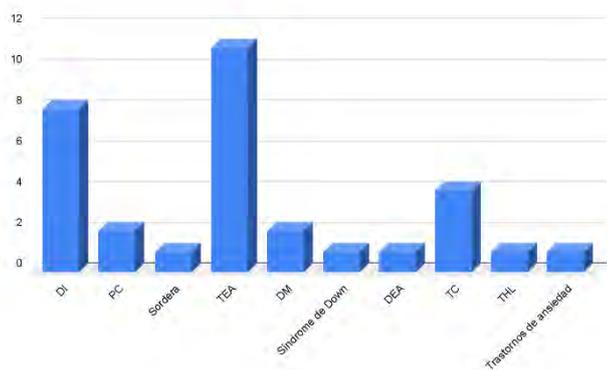


Figura 4. Número de artículos sobre el uso de la Realidad Extendida en educación especial según la discapacidad que trabaja.

En cuanto a las tecnologías, algoritmos o dispositivos de visión por computador de los que se ha hecho uso, cabe señalar que solo el 65.22% de los documentos analizados proporciona alguna información al respecto. De ellos, el 30,43% corresponde a experiencias de RV y el 34,78% a desarrollos de RA. La Tabla 2 recoge los porcentajes para los documentos que sí especifican datos de implementación. Como se ve, la mayoría de las experiencias se han desarrollado utilizando plataformas comerciales. Unity3D ha sido el software elegido en un 20% de los casos, en combinación con Blender, 3ds Max o Vuforia. Además, en dos experiencias de RV se ha utilizado un controlador Leap Motion y vídeo 360° en HMD, respectivamente. También se detalla el uso de Genial.ly como plataforma de desarrollo de un juego interactivo que emplea RA.

3.5. Análisis descriptivo de los documentos según la tecnología con la que trabaja

Para esta parte de los resultados se relacionaron las variables “tecnología” y “tipo de discapacidad” con el fin de comprobar con cuál de ellas se trabaja más cada discapacidad.

Se ha separado la variable tecnología en: realidad virtual (RV), realidad aumentada (RA) y realidad mixta (RM), aunque, como se muestra en la Tabla 1, los artículos analizados sólo mencionan la RV y la RA.

Se observó que ambas tecnologías se han utilizado en similar medida, aunque es un poco más frecuente el uso de la RV, con un el 51,61% del total.

Por otro lado, es interesante analizar el tipo de tecnología utilizado para trabajar las discapacidades más comunes, mencionadas en el apartado anterior. De este modo tenemos que:

En TEA se trabaja un 30,43 % de las ocasiones con RA y un 12,10% con RV.

En DI se trabaja un 12,48% de las ocasiones con RA y un 9,64% con RV.

Por último, en TC únicamente se han encontrado evidencias de trabajo con RV (16,64%).

Tabla 1. Relación entre la tecnología utilizada y el tipo de discapacidad.

Tecnología \ Discapacidad	RA	RV	SUMA TOTAL
DEA		2,84%	2,84%
DM	1,70%	2,65%	4,35%
THL		3,59%	3,59%
DI	12,48%	9,64%	22,12%
PC	1,32%	0,38%	1,70%
Síndrome de Down	1,89%		1,89%
Sordera	0,57%		0,57%
TC		16,64%	16,64%
TEA	30,43%	12,10%	42,53%
Trastornos de ansiedad		3,78%	3,78%
SUMA TOTAL	48,39%	51,61%	100,00%

Tabla 2. Tecnologías/algoritmos/dispositivos de visión por computador utilizados.

	RV	RA	Total
Plataforma comercial	26,67%	33,33%	60%
Unity 3D + otros	6,67%	13,33%	20%
Leap Motion	6,66%		6,67%
Vídeo 360° en HMD	6,67%		6,66%
Genial.ly		6,67%	6,67%
Total	46,47%	53,33%	100,00%

4. Discusión y conclusiones

Tras el análisis de los resultados, con respecto a la primera pregunta de investigación: ¿Cuándo y dónde se han llevado a la práctica más experiencias con la Realidad Extendida como recurso educativo destinado al alumnado con necesidades educativas especiales?, se puede observar que el uso de este tipo de tecnologías en el ámbito de la Educación Especial es una preocupación relativamente reciente. Aunque ya se utilizaban este tipo de herramientas en 2013, hasta 2019 no se ha producido un incremento del número de estas experiencias destinadas al alumnado con necesidades educativas especiales. Por otro lado, se puede comprobar que son diversos los países que están poniendo en práctica diferentes actividades de este tipo relacionadas con las tecnologías de Realidad Extendida, destacando la cantidad de artículos publicados sobre este tema en el continente asiático. Aun así, el país donde más artículos se han publicado es en Brasil.

Con relación a la segunda pregunta planteada: ¿Con qué tipos de discapacidad se han llevado a la práctica estas tecnologías?, tras el análisis realizado, se ha comprobado que la mayoría de las actividades han sido diseñadas y desarrolladas para alumnado con Trastorno del Espectro del Autismo (TEA). Esto puede ser debido al creciente número de diagnósticos que hay actualmente de este trastorno. La prevalencia del alumnado con TEA se ha visto incrementada desde mediados de los años 90, con cifras de prevalencia actual 1/100 en Europa y en España, según estudios de investigación europeos (Geralda, et. al, 2020).

Por último, se quería estudiar qué tecnología es más utilizada en el ámbito de la educación especial. Para ello, se planteó la tercera y última pregunta de investigación: ¿Qué tecnología (RV, RA, RM) es más utilizada en el ámbito de la Educación Especial? Se observa que, en los artículos

revisados, se han diseñado actividades tanto con realidad aumentada como con realidad virtual, sin apenas diferencias.

Tras este análisis, podemos concluir que, según los resultados obtenidos y de acuerdo con otras revisiones bibliográficas similares de autores como Kapetanaki, et. al (2022) o Checa-Domene, et. al (2023), existe un interés creciente por integrar estas nuevas tecnologías de Realidad Extendida en las aulas de los centros escolares, incluido en el ámbito de la Educación Especial.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado gracias al apoyo de la Junta de Extremadura y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional “Una manera de hacer Europa” mediante el proyecto con referencia IB20172.

Referencias

- Abásolo, M. J., Sanz, C., Naiouf, M., De Giusti, A., Santos, G., Castro, M., y Bouciguez, M. (2017). Realidad aumentada, realidad virtual e interacción tangible para la educación. [Sesión de Conferencia]. XIX Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación. Buenos Aires, Argentina.
- André, T. G., Valdez Montero, C., Ortiz Félix, R. E., y Gámez Medina, M. E. (2020). Prevalencia del Trastorno del Espectro Autista: una Revisión Bibliográfica de la Literatura. *Jóvenes en la Ciencia*, 7.
- Armas-Alba, L. y Alonso-Rodríguez, I. (2021). Las TIC y competencia digital en la respuesta a las necesidades educativas especiales durante la pandemia: Una revisión sistemática. *Revista Internacional de Pedagogía e Innovación Educativa*, 2(1), 11-48.
- Buzón-García, O. y Vega-Caro, L. (2018). Diseño de actividades con realidad aumentada para la atención de la diversidad en Educación Primaria. *EDUcación con TECnología*, 1395-1400.
- Capperucci, D. y Franceschini, G. (2020). Introduzione alla pedagogia e alla didattica dell'inclusione scolastica. Riferimenti culturali, normativi, metodologici. Guerini, Milán.
- Checa-Domene, L., García-Martínez, I., Gavín-Chocano, Ó., y Prieto, M. G. V. (2023). Augmented and virtual reality as a teaching resource to attend to the diversity of students with special educational needs: a systematic review. *European Journal of Special Needs Education*, 1-20.
- European Schoolnet (2017). Pautas para estudiar y adaptar los espacios de aprendizaje en centros educativos. https://intef.es/wp-content/uploads/2018/09/EspaciosdeAprendizaje_Gu%C3%ADa_ES.pdf
- Fernández-Cruz, F. J. y Fernández-Díaz, M. J. (2016). Los docentes de la Generación Z y sus competencias digitales. *Comunicar*, 46(24), 97-105.
- Kapetanaki, A.; Krouska, A.; Troussas, C. y Sgouropoulou, C. (2022). Exploiting Augmented Reality Technology in Special Education: A Systematic Review. *Computers*, 11(10), 143.
- Ley Orgánica 3/2020, de 29 de diciembre, por la que se modifica la Ley Orgánica 2/2006, de 3 de mayo, de Educación.
- Peralta Lara, D. C., y Guamán Gómez, V. J. (2020). Metodologías activas para la enseñanza y aprendizaje de los estudios sociales. *Sociedad & Tecnología*, 3(2), 2-10.
- Pimentel, M. J.; Zambrano, B. M.; Mazzini, K. A. y Villamar, M. A. (2023) Realidad virtual, realidad aumentada y realidad extendida en la educación. *RECIMUNDO*, 7(2), 74-88.
- Kakir, R., y Korkmaz, O. (2019). The effectiveness of augmented reality environments on individuals with special education needs. *Educ Inf Technol* 24, 1631-1659.
- Carvalho, D. y Manzini, E.J. (2017). Aplicação de um Programa de Ensino de Palavras em Libras Utilizando Tecnologia de Realidade Aumentada. *Revista Brasileira de Educação Especial*, 23(2):215-232.
- Chae, C.H., y Kim, D.I. (2022). Effects of a video modelling-based augmented reality mathematical computation program on mathematics learning of students with intellectual disabilities. *지적장애연구*, 24(1), 187-216.
- da Silva, L. y Romanovitch, D.I (2016). Evaluation of gross motor function before and after virtual reality application. *Fisioterapia em Movimento*, 29, 131-136.
- de Oliveira Malaquias, F. F., Malaquias, R. F., Lamounier Jr, E. A., y Cardoso, A. (2013). VirtualMat: A serious game to teach logical-mathematical concepts for students with intellectual disability. *Technology and disability*, 25(2), 107-116.
- de Vasconcelos, D.F., Júnior, E.A., de Oliveira Malaquias, F.F., Oliveira, L.A., y Cardoso, A. (2020). A Virtual Reality Based Serious Game to Aid in the Literacy of Students with Intellectual Disability: Design Principles and Evaluation. *Technology and Disability*, 32(3), 149-157.
- Hu, X., y Han, Z. R. (2019). Effects of gesture-based match-to-sample instruction via virtual reality technology for Chinese students with autism spectrum disorders. *International journal of developmental disabilities*, 65(5), 327-336.
- Khoirunnisa A.N., y Munir, D.L. (2023). Design and Prototype Development of Augmented Reality in Reading Learning for Autism. *Computers*, 12(3), 55.
- Kim, M. y Han, K. (2019). Effectiveness of 360-degree virtual reality video as community simulation learning for students with severe and multiple disabilities. *Retraso, Trastornos Múltiples de la Salud*, 62(4), 231-256. *지체.중복.건강장애연구*, 62(4), 231-256.
- Klein Schaarsberg, R. E., Popma, A., Lindauer, R. J. L., y van Dam, L. (2022). The Effects of a Virtual Reality-Based Training Program for Adolescents With Disruptive Behavior Problems on Cognitive Distortions and Treatment Motivation: Protocol for a Multiple Baseline Single-Case Experimental Design. *JMIR research protocols*, 11(5), e33555.
- Liu, Y., An, P., Xiao, Y., Zang, Z., Zhan, H., Katsuragawa, K., y Zhao, J. (2023). Eggly: Designing Mobile Augmented Reality Neurofeedback Training Games for Children with Autism Spectrum Disorder. *Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, 7(2), 1-29.
- López-Bouzas, N., del Moral-Pérez, M.E. y Castañeda-Fernández, J. (2023). Communicative competence in students with ASD: Interaction and immersion in a Gamified Augmented Environment. *Education and Information Technologies*.
- Nuguri, S.S., Calyam, P., Oruche, R., Gulhane, A., Valluripally, S., Stitche, J. y He, Z. (2021). vSocial: a cloud-based system for social virtual reality learning environment applications in special education. *Multimedia Tools and Applications*, 80, 16827-16856.
- Rapti, D., Gerogiannis, D., y Soulis, S. G. (2023). The effectiveness of augmented reality for English vocabulary instruction of Greek students with intellectual disability. *European Journal of Special Needs Education*, 38(2), 185-202.
- Ravindran, V., Osgood, M., Sazawal, V., Solorzano, R., y Turnacioglu, S. (2019). Virtual Reality Support for Joint Attention Using the Floreo Joint Attention Module: Usability and Feasibility Pilot Study. *JMIR pediatrics and parenting*, 2(2), e14429.
- Savitha, K.K., y Renumol, V.G. (2019). Effects of Integrating Augmented Reality in Early Childhood Special Education. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*, 8(3), 7864-7867.
- Smith, M. J., Smith, J. D., Jordan, N., Sherwood, K., McRobert, E., Ross, B., Oulvey, E. A., y Atkins, M. S. (2021). Virtual Reality Job Interview Training in Transition Services: Results of a Single-Arm, Noncontrolled Effectiveness-Implementation Hybrid Trial. *Journal of Special Education Technology*, 36(1), 3-17.
- Verhoef, R. E. J., van Dijk, A., Verhulp, E. E., y de Castro, B. O. (2021). Interactive virtual reality assessment of aggressive social information processing in boys with behaviour problems: A pilot study. *Clinical psychology & psychotherapy*, 28(3), 489-499.
- Verhoef, R.E.J., Verhulp, E.E., van Dijk, A. y de Castro, B.O. (2022). Interactive Virtual Reality versus Vignette-Based Assessment of Children's Aggressive Social Information Processing. *Research on Child and Adolescent Psychopathology*, 50, 621-636.
- Wong, K.-T., Hanafi, H. F. bin, Abdullah, N., Noh, N. M., y Hamzah, M. (2019). A Prototype of Augmented Reality Animation (ARA) E-Courseware: An Assistive Technology To Assist Autism Spectrum Disorders (Asd) Students Master In Basic Living Skills. *International*

Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering, 9(1), 3487-3492).

Wong, K.-T., Hosshan, H., Hanafi, H. F., y Alif Mudiono. (2023). Augmented Reality (AR): An Assistive Technology for Special Education Needs.

Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology, 35(1), 97–105.



Simposio de Robótica, Bioingeniería y Visión por Computador 2024



Sesión: Visión por computador

Fusión estática de imágenes del espectro visible y térmico para una mejor detección de personas mediante Redes Neuronales Convolucionales: un análisis del rendimiento

Heredia-Aguado, E.^{a,*}, Valiente, D., Gil, A., Máximo, M., Paya, L.

^aInstituto de Investigación en Ingeniería de Elche (I3E). Universidad Miguel Hernández de Elche. Avda. de la Universidad s/n, 03202 Elche (Alicante), Spain

To cite this article: Heredia-Aguado, E., Valiente, D., Gil, A., Máximo, M., Paya, L. 2024. Fusión estática de imágenes del espectro visible y térmico para una mejor detección de personas mediante Redes Neuronales Convolucionales: un análisis del rendimiento.

Simposio de Robótica, Bioingeniería y Visión por Computador, 2024, 1-5. <https://orcid.org/0009-0001-7717-1428>

Resumen

Este artículo presenta diferentes métodos de fusión estática para imágenes compuestas de dos espectros, imagen del espectro visible RGB e imagen térmica (infrarrojo lejano) para ser empleadas en tareas de detección mediante redes neuronales convolucionales. Aunque las tareas de detección mediante imagen están muy desarrolladas, siguen estando fuertemente limitadas por las condiciones de iluminación, tanto del *dataset* como de las condiciones de trabajo. Esta limitación hace que estas técnicas no consigan un grado de fiabilidad suficiente para ser aplicadas a gran escala. Las imágenes térmicas añaden información que, de por sí, es invariante a las condiciones de iluminación, complementando las imágenes del espectro visible allí donde son menos robustas. En este trabajo se analiza el rendimiento de diferentes técnicas que, al margen del *dataset* empleado, permiten fusionar los cuatro canales de información (RGBT) para aprovechar la potencia de detección de algoritmos empleados en imágenes RGB. Enfocados en operaciones de búsqueda y salvamento, seguridad o vigilancia, se pretenden detectar personas de manera robusta. Se aprovechará la potencia de YOLOv8 haciendo uso de un *dataset* de imágenes multispectral: Kaist.

Palabras clave: imagen térmica, detección de personas, fusion imagen multispectral, aprendizaje profundo, visión por computador

Abstract

This paper presents a review of different image fusion methods for the combination of visible spectrum images with thermal spectrum (far-infrared) images, aimed to enhance people detection by means of Convolutional Neural Networks (CNNs). While image detection with RGB images is a well-developed area, it still heavily relies on and is greatly limited by lighting conditions. This limitation poses a significant challenge for image detection to play a larger role in everyday technology, where illumination cannot always be controlled. Far-infrared images (which are invariant to light conditions), can serve as a valuable complement to RGB images in environments where illumination cannot be controlled and a robust detection of objects is needed. In this work, various fusion techniques are presented so that the information fused can be used in more advanced detection algorithms. Focussing on the field of search and rescue operations, security of vigilance the work focuses on pedestrian detection, taking advantage of the power of YOLOv8 algorithm. All the fusion techniques are tested making use of a multispectral *dataset*, Kaist, with the aim of addressing these limitations and improving detection performance.

Keywords: thermal images, person detection, multispectral image fusion, deep learning, computer vision

*Autor para correspondencia: e.heredia@umh.es

1. Introducción

El campo de la detección de objetos en base a imágenes ha evolucionado mucho en los últimos años, dando resultados muy avanzados. Esta área del procesamiento de imagen, centrada en combinar la clasificación de objetos junto con la localización de la misma en una imagen, se ha focalizado mayormente en imágenes del espectro visible. No es raro que sea así, pues la mayoría de cámaras y aplicaciones funcionan en dicho espectro. Pero en según qué situaciones limitar el espectro de imagen a un rango tan pequeño, el visible, puede ser contraproducente dejando información relevante fuera de la imagen. Además, muchas de las técnicas dependen directamente de un control preciso de la iluminación, condición que no se cumple en todos los casos de uso. Tareas como son las de búsqueda y rescate (SAR *Search And Rescue*), vigilancia o seguridad limitan la influencia que puede tenerse sobre la iluminación del entorno. Son tareas que a su vez requieren una gran madurez en el sistema empleado y una robustez a cambios ambientales que la imagen visible no es capaz de ofrecer.

En la última década han destacado dos familias de detectores basados en Redes Neuronales Convolucionales (CNNs, *Convolutional Neural Networks*). La primera, basada en detección en dos etapas, está representada por la familia de detectores RCNN Girshick et al. (2013) y sus derivados Fast-RCNN (Girshick, 2015) y Faster-RCNN (Ren et al., 2015). Por otro lado, otros detectores combinan la detección y clasificación en una sola etapa como las redes YOLO (Redmon et al., 2015), así como todas las versiones que de ella han derivado. En los últimos años, las arquitecturas basadas en *transformers* (Vaswani et al., 2017), inicialmente desarrolladas para el ámbito del procesamiento del lenguaje, se han abierto camino en el mundo del procesamiento de imagen, destacando la red DETR (Carion et al., 2020).

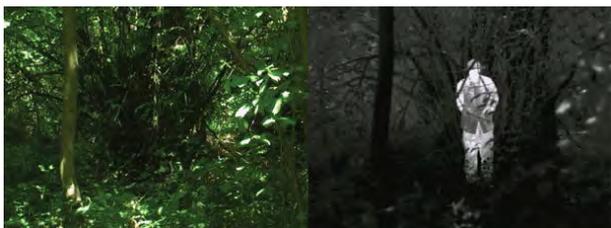


Figura 1: El poder de combinar imágenes visuales y térmicas (Kalita et al., 2020)

Los últimos avances siguen mejorando centrándose sobre imágenes en el espectro visible, algunas cuestiones de interés surgen: ¿Qué pasa cuando las condiciones de iluminación no pueden controlarse? ¿Qué pasa cuando hay oclusiones que impiden detectar la presencia de ciertos objetos? Merecen especial atención las oclusiones que, en algunos casos, sólo se dan en cierto espectro de la luz, tal y como puede verse claramente ejemplificado en la Figura 1. En la misma puede verse claramente como los arbustos impiden identificar a la persona que hay detrás, claramente visible en el espectro térmico. Aplicaciones como las mencionadas, de SAR, seguridad o vigilancia no pueden permitirse el precio de no detectar individuos presentes, así como excusarse en una falta de iluminación.

Un espectro de la luz especialmente interesante, dada la situación planteada, es el espectro térmico. Las cámaras térmicas son capaces de procesar luz infrarroja, que es sabido es emitida por los diferentes cuerpos del entorno de manera proporcional a la temperatura de los mismos. El espectro infrarrojo es un espectro bastante amplio, dependiendo del rango de temperaturas que se quiera medir se centrará la adquisición de imagen en una zona concreta. En este caso se centrará en el infrarrojo lejano o LWIR (*Longwave Infrared*), que abarca desde los $8\mu\text{m}$ hasta $14\mu\text{m}$. En función de la sensibilidad del sensor de la cámara, y variando la misma, este espectro permite aproximar temperaturas del rango de -20°C hasta los 1000°C . Una configuración típica permitiría medir desde los -20°C hasta los 120°C , que es el rango óptimo para detectar personas, por ejemplo desaparecidas en una montaña, y diferenciarlas del entorno circundante.

Hay algunos trabajos centrados en emplear las imágenes térmicas por sí solas, como en el caso de Ivašić-Kos et al. (2019) o Kalita et al. (2020), evaluados con la red YOLOv3 (parte de los detectores previamente mencionados). Puede verse una descripción completa expuesta por Redmon and Farhadi (2018), muy relevante e ilustrativa para entender la familia YOLO. Aunque las imágenes térmicas pueden aportar gran cantidad de información relevante, siendo esta invariante a condiciones de iluminación (una de las limitaciones previstas en el caso de imágenes visuales), aún presenta sus propias limitaciones. Por ejemplo algunos objetos transparentes en el espectro visible se verán opacos, con un tono proporcional a la temperatura del mismo, en la imagen térmica. También son susceptibles a cambios ambientales: no hace la misma temperatura en exteriores en invierno que en verano, ni las personas a detectar llevan la misma cantidad de ropa. Estos son parte de los retos que se plantean frente a una tarea de detección.

Teniendo cada tipo de imagen sus ventajas y desventajas, la mejor solución posible podría pasar por combinarlas para suplir con una los problemas de la otra. Aunque hay diferentes enfoques al problema de fusión de imágenes, este trabajo se va a centrar en aquellos que aprovechan el desarrollo de algoritmos de detección tradicionales fusionando ambas imágenes en una nueva imagen que se usará como entrada para afinar el algoritmo dado. Estos algoritmos de fusión para comprimir ambas imágenes pueden ir desde los más sencillos como puede ser una media entre la información de ciertos canales (Vandersteege et al., 2018) a soluciones más complejas como *superpixel segmentation* (Mao et al., 2021) o el uso de *wavelets* (Chipman et al., 1995) o (Su and Jung, 2018). Otros enfoques se plantean sustituir las arquitecturas clásicas de detección para integrar la etapa de fusión en la propia red profunda, integrándola en la etapa de extracción de características (Xiang et al., 2022) o en la etapa de clasificación al final de la red.

Es bastante tentador, cuando se buscan nuevas soluciones a un problema tal y como el que se ha planteado, optar por soluciones especialmente complejas, sumergiéndose en las últimas técnicas del estado del arte e involucrando arquitecturas cada vez más complejas. Pero antes de dar ese paso creemos que es importante establecer una línea base, sobre la que evaluar la mejoría y su coste en términos de complejidad, tiempo de cómputo o gasto de recursos. En consecuencia, este trabajo plantea: ¿hasta donde pueden llevarnos los métodos más simples de fusión de imagen?

Establecida la pregunta de investigación, se continúa con Sección 2 explicando diferentes algoritmos de fusión de imagen. La Sección 3 cubre los aspectos relacionados con la metodología del estudio, así como la descripción del algoritmo y el *dataset* empleados. También se resaltan algunas limitaciones que serán relevantes en la Sección 4, donde se comentan los resultados obtenidos para cada una de las condiciones y algoritmos de fusión. Por último, la Sección 5 incluye algunas conclusiones que se han considerado relevantes, así como unas pinceladas de lo que serán futuros desarrollos.

2. Fusión de imagen: térmica y visible

El objetivo de la fusión de imágenes que se plantea en este trabajo es el de comprimir la información de dos imágenes en una sola. Las imágenes visibles incluyen tres canales, RGB, mientras que las imágenes térmicas incluyen un solo canal de intensidad; de esta manera, la imagen resultante debe incluir información de los cuatro canales compactada en solo tres.

La mayoría de desarrollos en torno a la detección de imagen, tal y como se ha introducido previamente, están optimizados para emplear imágenes del espectro visible, típicamente con tres canales de entrada. Es por eso que se ha optado por este enfoque en la fusión puesto que la idea es aprovechar la potencia de dichos enfoques adaptándolos ligeramente al caso que nos ocupa.

Los métodos que se plantean en este artículo se les ha denominado métodos estáticos de fusión, pues son métodos predefinidos que se aplican por igual a todas las imágenes sea cual sea el *dataset*. Nótese que esta serie de métodos requieren que la escena en ambas imágenes, visible y térmica, sea exactamente la misma.

2.1. Fusión RGBT

Tal y como proponen en Vandersteegen et al. (2018), y para evitar la menor pérdida de información posible, ambas imágenes se comprimen haciendo la media aritmética entre sus canales. Los tres canales de la imagen del espectro visual, por separado, con el canal de intensidad de la imagen térmica. Puede observarse la expresión matemática en (1).

$$\begin{aligned} ch_1 &= (R + T)/2 \\ ch_2 &= (G + T)/2 \\ ch_3 &= (B + T)/2 \end{aligned} \quad (1)$$

La imagen resultante se conforma combinando de vuelta los tres canales ch_1 , ch_2 y ch_3 como si se tratasen de los canales RGB originales.

2.2. Fusión HSVT

Para comprimir ambas imágenes, en este caso tomando la visual en el espacio de color HSV, se da mayor importancia a la información de color. De esta forma se mantienen los canales de tono (canal H) y saturación (canal S) de la imagen, combinando la intensidad (canal V) con la imagen térmica. Ambos canales se suman y se reescalán para entrar de nuevo en una representación de 8 bits, típica en imágenes. De esta manera se comprime la información de intensidades haciendo uso de todo

el rango de valores del último canal de la imagen. Las ecuaciones a continuación describen la transformación realizada:

$$\begin{aligned} ch_1 &= H \\ ch_2 &= S \\ ch_3 &= 255 * (V + T)/\max(V + T) \end{aligned} \quad (2)$$

Nuevamente, la imagen fusionada es el resultado de combinar de vuelta los canales ch_1 , ch_2 y ch_3 en una sola imagen como si de los canales HSV originales se tratasen.

2.3. Fusión VTHS

En función de la iluminación puede darse el caso en que el color no sea especialmente relevante, y la mayoría de la información útil esté contenida en el canal de intensidad. En este caso, la fusión descrita previamente estaría ocupando mayor espacio para la información más escasa, comprimiendo en un solo canal la más representativa. Es importante remarcar que las diferencias pueden deberse tanto al *dataset* como a la importancia del color en los objetos que se pretende detectar.

Asumiendo una mayor importancia de la intensidad frente al color, se reservan dos canales de la imagen resultante exclusivamente para el canal de intensidad de la imagen visible y el canal de intensidad de la imagen térmica. El tercer canal se compone con la información más significativa de los canales de tono y saturación. Nótese que contienen información diferente y no sería conveniente realizar una media. La compresión se hace concatenando los 4 bits más significativos de cada uno de los canales en un solo canal, tal y como describe (3).

$$\begin{aligned} ch_1 &= V \\ ch_2 &= T \\ ch_3 &= (H \gg 4) \& ((S \gg 4) \ll 4) \end{aligned} \quad (3)$$

La imagen resultante surge de recomponer los tres canales de vuelta.

2.4. Fusión VT

Llevando al extremo el caso anterior, y asumiendo que la información de color no esté aportando beneficio a la detección, podrían obtenerse buenos resultados dando aun mayor importancia a los canales de intensidad. Nótese, nuevamente, que las diferencias entre métodos tendrán una gran dependencia sobre los datos de partida.

La fusión en este caso mantendrá los canales V y T, como en el caso anterior, y rellenará el tercer canal con la media de ambos. La entrada que se pretende tener es de tres canales y es posible que cierta información recurrente pueda aprovecharse dentro de la red profunda. La ecuación (4) describe la fusión planteada.

$$\begin{aligned} ch_1 &= V \\ ch_2 &= T \\ ch_3 &= (V + T)/2 \end{aligned} \quad (4)$$

La combinación de los tres canales daría como resultado la imagen fusionada.

3. Metodología

3.1. Algoritmo de detección: YOLOv8

Presentado en la Sección 1, YOLO es uno de los algoritmos estrella en cuanto a tareas de detección. El trabajo comenzó con las últimas actualizaciones de YOLOv5, desarrollado en Python (Pytorch) por la empresa Ultralytics (Jocher, 2020), finalmente se actualizó a la versión v8, con la que se han realizado las pruebas, también haciendo uso del paquete Pytorch (Jocher et al., 2023). YOLOv8 incluye, además de la detección, capacidades para funcionar como clasificador, segmentar diferentes clases de objetos en imágenes y otra serie de funcionalidades. En estas pruebas solo se ha evaluado funcionando como detector.

En este caso, YOLOv8 toma como entrada una imagen de 3 canales, y habiendo sido entrenado para ello, es capaz de detectar un conjunto de objetos así como su posición sobre la imagen. Bajo este contexto se ha reentrenado la red para detectar una sola clase, la clase 'peatón'. Nótese que en el texto se usará indistintamente la palabra persona o peatón.

En las tareas de detección, para medir el rendimiento del algoritmo, se hace uso de dos métricas combinadas: la probabilidad sobre la posición de la *bounding box*, y la probabilidad de una clase. Para cuantificar la exactitud de la posición estimada por la red se usa la primera, *box confidence*, que combina dos valores: *objectness score*, ¿contiene la caja un objeto? así como la intersección sobre la unión (IoU, *Intersection over Union*). Para cuantificar la exactitud de la clasificación realizada se toma una probabilidad condicionada de que sea una clase habiéndose detectado un objeto sobre esta. Se ha trabajado con los valores por defecto de YOLO, que pueden resultar algo restrictivos.

3.2. dataset: Kaist

Para evaluar la fusión de imágenes se ha recurrido al *dataset* Kaist (Hwang et al., 2015). Este *dataset* contiene 95k pares de imágenes térmicas-visibles (640x480, 20Hz). Ha sido etiquetado manualmente incluyendo las clases 'peatón', 'ciclista' y 'grupo de gente'. Todas las imágenes están calibradas de manera que la escena vista en cada par de imágenes es completamente coincidente, requisito necesario para la fusión planteada.

El *dataset* no incluye suficientes instancias de las clases 'ciclista' ni 'grupo de personas' para el tipo de entrenamiento que se va a hacer, así que se han eliminado. Se usarán las clases 'peatón' y 'ciclista', interpretadas en ambos casos como 'persona'.

El propio *dataset* incluye una propuesta de división de las imágenes en subsets tanto para entrenamiento como para validación/test. Estos subsets de imágenes han sido equilibrados en cuanto al número de imágenes e instancias de objetos que se encuentran para cada caso. La Tabla 1 muestra un resumen de cómo se han utilizado los sets propuestos por Kaist para el entrenamiento posterior, revisando el número de imágenes en cada caso, el número de fondos y el número de instancias de persona. Los subsets de *train* se han empleado para entrenar la red y los de *test* para validación y test.

Tabla 1: Resumen de las características de los sets empleados en el entrenamiento y validación del modelo

Nombre del set	Imágenes	Fondos	Instancias
test-day-01	29178	15191	34492
train-day-02	16694	10803	12521
test-night-01	15962	10253	11999
train-night-02	8392	4817	8671

Se observa que el número de imágenes entre condiciones, día y noche no está equilibrado, habiendo muchas más imágenes del caso diurno. Para evitar posible sesgo debido a este desbalanceo, no habiendo demasiadas imágenes del caso nocturno, se ha optado por entrenar dos modelos diferenciando, por separado, el modelo diurno del modelo nocturno.

El *dataset* de Kaist, tal y como detallan los autores del mismo, está enfocado a la conducción autónoma, concretamente en el ámbito de la detección de personas. El *dataset* por tanto incluye una serie de imágenes consecutivas en entornos urbanos tomándolas desde un coche (perspectiva diferente a la que podría tener un UAV, un dron o un robot terrestre). Estas características suman una serie de limitaciones a la hora de traspasar la información al caso de uso que nos ocupa.

3.3. Entrenamiento del modelo

Aunque YOLO incluye modelos preentrenados con el *dataset* COCO (Lin et al., 2014), incluyendo información que puede ser muy relevante a la hora de entrenar una red, presenta una gran limitación: requiere utilizar exactamente la misma arquitectura sobre la que cargar los pesos preentrenados. Como a futuro se plantean modificaciones de arquitectura, se ha optado por entrenar de cero la red, fijando Kaist como la única fuente de datos, pudiendo así comparar el rendimiento sobre una base común. De esta manera, diferentes arquitecturas y algoritmos de fusión serán evaluados con una base común, sin incluir la mejora del *dataset* externo.

Evidentemente este marco nos permite hacer comparaciones justas entre los algoritmos empleados, pero nos impide comparar con modelos o algoritmos externos que hagan uso de otras fuentes de información o condiciones de ejecución. Para poder hacer una comparación más justa sería necesario adaptar otros *datasets* con información térmica y visual que permitan aumentar el tamaño de datos en la etapa de entrenamiento.

Pese a la limitada cantidad de imágenes con las que contamos, podemos obtener conclusiones prácticas sobre la dirección de avance de la investigación, dejando el trabajo más costoso (reentrenar con más datos) para aquellos casos más prometedores. Es importante recordar que las conclusiones extraídas con un *dataset* a escala no tienen por qué ser directamente trasladables a un *dataset* más grande; habría que hacer pruebas con varios modelos para poder confirmarlo con seguridad.

3.4. Evaluación y métricas

Algunas métricas típicas han sido empleadas para evaluar el rendimiento de la red. Se definen las mismas a continuación para poder presentar el posterior análisis de resultados en la Sección 4:

- **Precision (P)**: permite evaluar la capacidad del modelo de evitar equivocarse, de detectar falsos positivos.

- *recall* (R): permite medir la capacidad del sistema para detectar todas las instancias de una clase dado un nivel de confianza para la detección.
- *Intersection over Union* (IoU): permite cuantificar hasta qué punto el algoritmo es capaz de encontrar adecuadamente (posición y tamaño) las instancias de cada clase. Para ello compara la intersección de ambas *bounding boxes*, la predicción y la etiqueta, sobre la unión de las mismas.
- *Average Precision* (AP): se calcula integrando el área bajo la curva de *Precision-recall* para una clase dada. Permite resumir en un solo valor el rendimiento del modelo.
- *Mean Average Precision* (mAP): cuantifica el rendimiento general del modelo haciendo la media de los AP para diferentes clases. En el caso de uso que se plantea se evaluará solo una clase, 'persona', aun así se empleará esta métrica por ser la comúnmente utilizada. Esta métrica se calcula para diferentes IoU: mAP50 para un límite de IoU de 0.5 (detecciones más sencillas); mAP50-95 acumula la media de AP calculada para diferentes mínimos de IoU que van desde 0.5 hasta 0.95, siendo una métrica mucho más restrictiva.

4. Resultados

La Tabla 2 contiene un resumen de los resultados comentados a continuación. Además de los resultados obtenidos en base a los cuatro métodos de fusión presentados, se han añadido tanto los resultados con imágenes del espectro visible y térmico, por separado, a modo de referencia para la condición diurna y nocturna respectivamente.

Tal y como se plantea el escenario de trabajo, parece lógico dar mayor prioridad a un mejor *recall* (detectar todas las instancias) sin descuidar la *precision* (evitar falsos positivos). Puede verse una comparación de la curva de *precision-recall* para las condiciones diurnas y nocturnas en la Figura 2(a) y la Figura 2(b) respectivamente.

En el espectro visual, y con las condiciones del *dataset* presentado, no hay método de fusión que supere a las imágenes del espectro visible. Tiene un mejor mAP para el límite de 0.5 de IoU, mejor *recall* y el menor tiempo de duración del entrenamiento, algo que también se debe considerar. Cuando la restricción de IoU es mayor, el valor de mAP50-95 puede ser superado por otros métodos (VT y VTHS). VT y VTHS proporcionan mejor resultados en la búsqueda de personas, del *bounding box* al priorizar la imagen térmica, que en este *dataset* resalta especialmente a los peatones. Aunque el método RGBT ofrece una mayor *precision* se sigue prefiriendo un mayor *recall*.

Respecto a la condición nocturna, de entre la imagen visual y LWIR, es la LWIR la que contiene mayor información y la que se empleará como referencia. En este caso, los mejores resultados, nuevamente en cuanto a mAP y *recall*, se obtienen con el método de fusión VTHS. Aunque inspeccionando las imágenes puede verse cómo el color no es un componente muy relevante en el *dataset* (además de dar resultados muy pobres solo con la imagen visible), la información que proporciona sigue siendo mejor que la eliminación completa del mismo como en

la fusión VT. Nuevamente, en cuanto a precisión, VT es ligeramente mejor al reducir los falsos positivos incidiendo más en la imagen térmica, que permite distinguir mejor a los peatones (se ven resaltados con respecto al entorno en las imágenes de este *dataset*). Aun cuando se restringe el IoU sigue siendo superior el desempeño del método VTHS. En ambos casos el tiempo de entrenamiento es razonable, siendo muy superior para métodos con peor desempeño.

El equilibrio entre la *precision* y *recall* puede evaluarse en las curvas de la Figuras 2(a) y 2(b). En el caso diurno puede comprobarse cómo ambos, RGBT y visible, dan buenos resultados. A su vez se valida que el método VTHS llega a proporcionar una mejor *precision* a costa de un muy bajo *recall*. En el caso nocturno se observa mayor diferencia; el método VTHS estaría proporcionando resultados significativamente mejores que el VT en cuanto *recall* a igual *precision*.

5. Conclusiones

Es generalmente aceptado que tener más cantidad de datos puede generar mejores resultados incluso que algoritmos más refinados. Es por ello que trabajos futuros deberían enfocarse en mejorar los datos para el caso de uso que se plantea. El *dataset* debería complementarse con más datos (día, noche y diferentes peatones, no solo imágenes contiguas), y también con información más variada (oclusiones que apliquen a una de las imágenes pero no a la otra, como la mostrada en la Figura 1, más cambios en iluminación y condiciones climatológicas). Además de ampliar la información se pretende ajustar la división de datos entre entrenamiento y validación para ajustarla a las necesidades del caso planteado, en vez de las propuestas por los autores de Kaist (Hwang et al., 2015).

Estos cambios en los datos deberían tener un claro impacto en los resultados obtenidos. El rendimiento solo con imágenes de espectro visual empeorará claramente una vez se incluyan este tipo de datos dando mejores resultados y mayor importancia a la fusión en ambas condiciones, diurna y nocturna.

Aunque la decisión de eliminar COCO de la ecuación nos permite comparar de manera justa diferentes enfoques de la fusión, ninguna conclusión debería tomarse como definitiva sin añadir información extra. No debe obviarse la posibilidad de incluir otro tipo de *datasets* que puedan complementar la información sobre la que se va a trabajar.

Por último, para poder comparar los métodos en otros rankings sería preciso evaluar también métricas específicas como las propuestas por Hwang et al. (2015) como el *miss rate* o el *Log Average Miss Rate*.

Mejorando la información es un paso clave para obtener unas conclusiones más robustas en cuanto a la fusión de imágenes que nos ocupa.

Agradecimientos

Esta publicación forma parte del proyecto PROMETEO/2021/075 financiado por la Generalitat Valenciana y al proyecto TED2021-130901B-I00, financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y por la Unión Europea "Next-GenerationEU"/PRTR.

Tabla 2: Resultados de entrenamiento y validación de diferentes test separados por condición diurna/nocturna para cada algoritmo de fusión de imagen

	P	R	mAP(50)	mAP(50-95)	Best epoch
HSVt day	0.4612	0.4832	0.4935	0.2186	59
VT day	0.5969	0.4915	0.5466	0.2378	20
VTHS day	0.5922	0.5372	0.5657	0.2345	9
RGBT day	0.6106	0.5466	0.5664	0.2284	6
Visible day	0.6041	0.5560	0.5762	0.2292	5
RGBT night	0.5712	0.2048	0.3783	0.1533	69
HSVt night	0.5913	0.2364	0.4104	0.1568	69
LWIR night	0.5383	0.5916	0.5201	0.1718	3
VT night	0.6268	0.5652	0.5671	0.1892	20
VTHS night	0.6133	0.6251	0.5894	0.2012	20

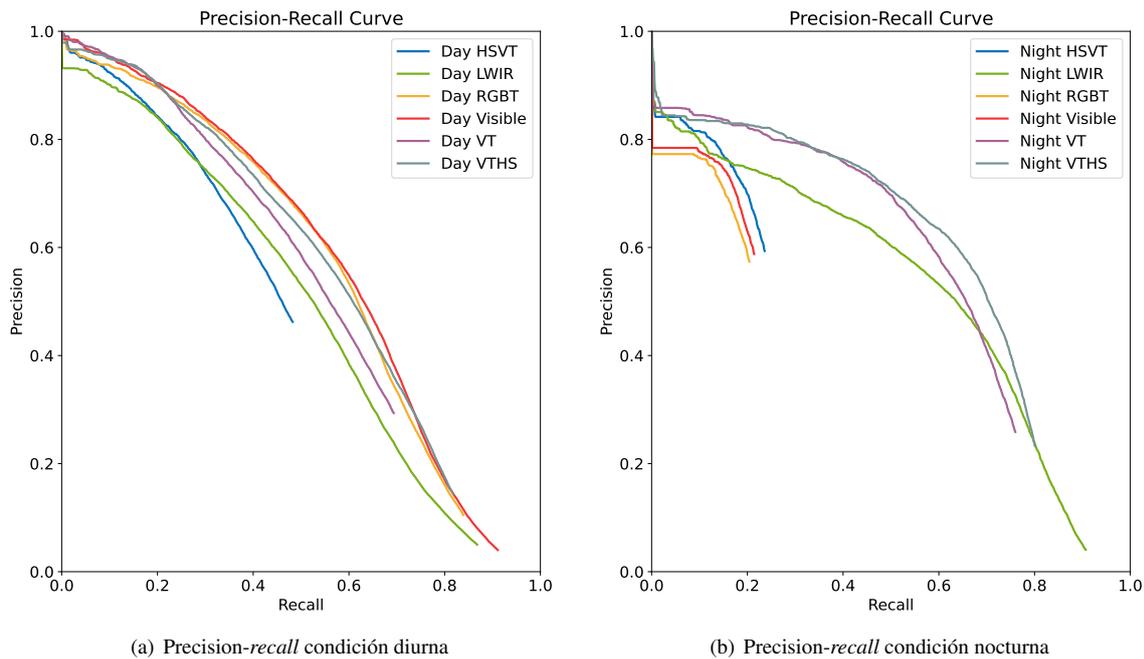


Figura 2: Resultados conjuntos de los test de entrenamiento

Referencias

- Carion, N., Massa, F., Synnaeve, G., Usunier, N., Kirillov, A., Zagoruyko, S., 2020. End-to-end object detection with transformers. CoRR abs/2005.12872.
- Chipman, L., Orr, T., Graham, L., 1995. Wavelets and image fusion. In: Proceedings., International Conference on Image Processing. Vol. 3. pp. 248–251 vol.3.
- Girshick, R. B., 2015. Fast R-CNN. CoRR abs/1504.08083.
- Girshick, R. B., Donahue, J., Darrell, T., Malik, J., 2013. Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation. CoRR abs/1311.2524.
- Hwang, S., Park, J., Kim, N., Choi, Y., Kweon, I. S., 2015. Multispectral pedestrian detection: Benchmark dataset and baseline. In: 2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). pp. 1037–1045.
- Ivašić-Kos, M., Krišto, M., Pobar, M., 2019. Human detection in thermal imaging using yolo. In: Proceedings of the 2019 5th International Conference on Computer and Technology Applications. ICCTA '19. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, p. 20–24.
- Jocher, G., May 2020. YOLOv5 by Ultralytics.
URL: <https://github.com/ultralytics/yolov5>
- Jocher, G., Chaurasia, A., Qiu, J., Jan. 2023. YOLOv8 by Ultralytics.
URL: <https://github.com/ultralytics/ultralytics>
- Kalita, R., Talukdar, A. K., Kumar Sarma, K., 2020. Real-time human detection with thermal camera feed using yolov3. In: 2020 IEEE 17th India Council International Conference (INDICON). pp. 1–5.
- Lin, T., Maire, M., Belongie, S. J., Bourdev, L. D., Girshick, R. B., Hays, J., Perona, P., Ramanan, D., Dollár, P., Zitnick, C. L., 2014. Microsoft COCO: common objects in context. CoRR abs/1405.0312.
- Mao, S., Duan, J., Zhang, Z., Zhang, Z., 2021. Visible and infrared image fusion via superpixel segmentation and salient region detection. In: 2021 36th Youth Academic Annual Conference of Chinese Association of Automation (YAC). pp. 643–648.
- Redmon, J., Divvala, S. K., Girshick, R. B., Farhadi, A., 2015. You only look once: Unified, real-time object detection. CoRR abs/1506.02640.
- Redmon, J., Farhadi, A., 2018. Yolov3: An incremental improvement. CoRR abs/1804.02767.
- Ren, S., He, K., Girshick, R. B., Sun, J., 2015. Faster R-CNN: towards real-time object detection with region proposal networks. CoRR abs/1506.01497.
- Su, H., Jung, C., 2018. Multi-spectral fusion and denoising of rgb and nir images using multi-scale wavelet analysis. In: 2018 24th International Conference on Pattern Recognition (ICPR). pp. 1779–1784.
- Vandersteegen, M., Van Beeck, K., Goedemé, T., 2018. Real-time multispectral pedestrian detection with a single-pass deep neural network. In: Campilho, A., Karray, F., ter Haar Romeny, B. (Eds.), Image Analysis and Recognition. Springer International Publishing, Cham, pp. 419–426.
- Vaswani, A., Shazeer, N., Parmar, N., Uszkoreit, J., Jones, L., Gomez, A. N., Kaiser, L., Polosukhin, I., 2017. Attention is all you need. CoRR abs/1706.03762.
- Xiang, J., Gou, S., Li, R., Zheng, Z., 2022. Rgb-thermal based pedestrian detection with single-modal augmentation and roi pooling multiscale fusion. In: IGARSS 2022 - 2022 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. pp. 3532–3535.



Simposio de Robótica, Bioingeniería y Visión por Computador 2024



Modelo automático e integrable en tiempo real para la localización de herramientas de cirugía laparoscópica

Benavides, D.^a, Cisnal, A.^{a,*}, de la Fuente, E.^a, Turiel, J.P.^a

^a Instituto de las Tecnologías Avanzadas de la Producción, Universidad de Valladolid, Paseo Prado de la Magdalena 3-5, 47011, Valladolid, España

Resumen

La cirugía mínimamente invasiva y la cirugía robótica son dos de las técnicas quirúrgicas más populares en la actualidad. A pesar de sus múltiples beneficios respecto a las técnicas tradicionales, también existen algunas limitaciones que las hacen más complicadas de realizar que sus alternativas. Uno de estos problemas se basa en el control del endoscopio, que normalmente es manejado por un ayudante o por el propio cirujano, lo que requiere un mínimo grado de coordinación entre ambos o aumenta el tiempo de aprendizaje en el caso del cirujano. Por ello, se propone un enfoque de visión artificial utilizando técnicas de aprendizaje profundo. Este modelo es capaz de detectar hasta dos herramientas quirúrgicas con una exactitud del 92,86 % y puede ser implementado en un sistema robótico en tiempo real (21,64 FPS), con el objetivo de automatizar esta tarea y simplificar este tipo de intervenciones.

Palabras clave: Control compartido, cooperación y grado de automatización, Inteligencia artificial, Navegación guiada y control, Modelización cinética de trazadores mediante diversos sistemas de imagen, Sistemas y procesamiento de señales médicas y biomédicas.

Automatic and real time integrative model for laparoscopic tools tracking

Abstract

Minimally invasive surgery and robotic surgery are two of the most popular surgical techniques today. Despite their numerous benefits over traditional techniques, there are also some limitations that make them more challenging to perform than their alternatives. One of these problems is based on the control of the endoscope, typically managed by an assistant or the surgeon, requiring a minimum degree of coordination between them or increasing the learning curve in the case of the surgeon. Therefore, an artificial vision approach using deep learning techniques is proposed. The model can detect up to two surgical tools with an accuracy of 92.86 % and can be implemented in a real-time robotic system (21.64 FPS), aiming to automate this task and simplifying this type of interventions.

Keywords: Artificial intelligence, Biomedical and medical image processing and systems, Shared control, cooperation and degree of automation, Guidance navigation and control, Tracer kinetic modelling using various imaging systems.

1. Introducción

La cirugía laparoscópica es un procedimiento quirúrgico mínimamente invasivo, mediante el cual, a través de varias incisiones pequeñas, se introducen en la cavidad abdominal del paciente dos o más instrumentos quirúrgicos, junto con un endoscopio que permite observar internamente la operación. El tamaño reducido de estas incisiones permite lograr una tasa de recuperación más rápida, minimizar el riesgo de infecciones y reducir el dolor en comparación con la cirugía abierta. Estos beneficios médicos han llevado al uso generalizado de técnicas

laparoscópicas, convirtiéndose en el estándar para muchas intervenciones, especialmente en el ámbito ginecológico y digestivo (Buia et al., 2015).

Sin embargo, esta técnica es más compleja ya que el cirujano pierde gran parte de la retroalimentación táctil sobre la presión que ejerce en los tejidos del paciente, ya que la manipulación se realiza usando los largos instrumentos laparoscópicos. Otro inconveniente es que los cirujanos no pueden percibir la escena de operación captando información tridimensional como lo hace en la cirugía abierta. Las operaciones laparoscópicas se observan siempre a través de un

*Autor para correspondencia: ana.cisnal@uva.es

monitor que restringe significativamente el campo de visión y en el que el cirujano pierde por completo la sensación de profundidad. Estas dificultades técnicas hacen que cualquier manipulación de los tejidos sea más complicada en operaciones de cirugía laparoscópica.

En los últimos años se han realizado grandes esfuerzos para facilitar el trabajo de los médicos y aumentar sus capacidades durante las cirugías, tratando de incorporar a los quirófanos robots que colaboren con ellos en una amplia gama de tareas (Esteve et al., 2019). Gran parte de estos esfuerzos se centran en la obtención de información a partir de una señal de vídeo que proporciona el endoscopio.

La detección y seguimiento de instrumentos quirúrgicos basados en imágenes se presenta como un enfoque atractivo, ya que simplemente utiliza la señal captada por el endoscopio para estimar la posición de la herramienta en los fotogramas de vídeo de una forma sencilla y flexible, sin necesidad de añadir equipos adicionales al quirófano o modificar el flujo de trabajo. Es por ello, que este enfoque se ha convertido en el más utilizado para la detección de herramientas en laparoscopia en los últimos años. Han sido muchos los métodos propuestos para la detección de herramientas quirúrgicas en imágenes. No obstante, en los últimos años, con el fuerte desarrollo de la inteligencia artificial, ha habido una marcada tendencia hacia el empleo de métodos de detección basados en *deep learning* o aprendizaje profundo.

La aparición de Faster R-CNN (*Faster Region-based Convolutional Neural Network*) (Ren et al., 2017), supuso una mejora significativa en el tiempo de ejecución respecto a los algoritmos existentes. En Faster R-CNN una pequeña red separada, llamada *Region Proposal Network*, propone las regiones donde es posible que se encuentre la herramienta para que más tarde se introduzcan en la red de clasificación. Faster R-CNN también introdujo el uso de nueve cuadros de anclaje para cada píxel en el mapa de características con el fin de hacer frente a tres escalas y tres relaciones de aspecto. Faster R-CNN ha sido empleada para lograr el posicionamiento de las herramientas quirúrgicas y evaluar las técnicas quirúrgicas de los cirujanos por (Sarıkaya et al., 2017) y (Jin et al., 2018).

Faster R-CNN considera la detección de objetos como un problema de dos etapas: generar las propuestas de región y luego clasificar esas regiones. Sin embargo, algunos algoritmos más recientes plantean la detección de objetos desde un enfoque integrado al introducir la imagen de entrada en una única red convolucional que predice en una sola etapa los cuadros delimitadores y sus probabilidades. El algoritmo YOLO (*You Only Look Once*), propuesto por (Redmon et al., 2016), implementa este enfoque unificado planteando la detección de objetos como un problema de regresión. YOLO es reconocido como uno de los algoritmos más eficientes, adecuado para el procesamiento en tiempo real, debido a esta evaluación con una sola red convolucional. La arquitectura YOLO fue introducida por (Choi et al., 2017). para realizar un seguimiento de los instrumentos quirúrgicos en tiempo real.

Aunque los detectores de una sola etapa como YOLO son más eficientes que los de dos, ambos utilizan anclaje de cajas (*anchor boxes*). El anclaje de cajas tiene dos inconvenientes introducen muchos hiper-parámetros que requieren un diseño fino y ralentizan el entrenamiento. Los métodos que utilizan anclaje de cajas suelen detectar las herramientas quirúrgicas con gran precisión, pero no pueden hacerlo en tiempo real. (Liu

et al., 2020) combinaron una CNN sin anclaje y una red de reloj de arena (*Hourglass*) (Newell et al., 2016) para determinar la localización de herramientas quirúrgicas en tiempo real utilizando un mapa de calor.

Los modelos basados en arquitecturas U-Net (Ronneberger et al., 2015), muy populares en tareas de segmentación, también se ha utilizado para determinar la posición de los instrumentos quirúrgicos (Gao et al., 2019) (Ni et al., 2019). (Kurmán et al., 2017) propusieron una red en forma de U con el fin de reconocer simultáneamente múltiples instrumentos, así como sus partes. (Laina et al., 2017) formulan la tarea de estimación de posición como una regresión de mapa de calor que se estima a la vez que la segmentación de la herramienta.

Este trabajo introduce un modelo de visión que emplea módulos *Hourglass* para la detección de hasta dos herramientas quirúrgicas. En primer lugar, se describen las bases de datos empleadas, el diseño del modelo de visión desarrollado y los criterios métricos utilizados para evaluar su desempeño. Luego, se procede a la evaluación del rendimiento del modelo, seguido de un análisis y discusión exhaustiva de los resultados obtenidos.

2. Materiales y métodos

En este apartado se detallan las bases de datos empleadas, el modelo de red propuesto para detectar las herramientas y las métricas empleadas para evaluar el rendimiento del modelo.

2.1. Bases de datos

En este estudio se utilizan tres bases de datos para validar el algoritmo de detección de herramientas.

a) Base de datos *ITAP Robótica Médica*

Incluye 3532 fotogramas de vídeos de escenas quirúrgicas simuladas utilizando varios órganos porcinos exvivo y una herramienta quirúrgica de la casa de instrumental médico Karl Storz, como se observa en la Figura 1(a). Solo 609 fotogramas contienen la herramienta etiquetada.

b) Base de datos *ATLAS Dione* (Sarıkaya et al., 2017)

Consta de 86 vídeos, con un total de 22467 fotogramas, en los que 10 cirujanos ejecutan 6 tareas diferentes empleando el sistema quirúrgico Da Vinci utilizando maniqués y objetos, tal como se aprecia en la Figura 1(b).

c) Base de datos *EndoVis Challenge (Data - Grand Challenge, n.d.)*

Contiene 180 fotogramas etiquetados de un total de 4535 fotogramas, que corresponden con 4 simulaciones de cirugías exvivo con instrumentos rígidos, como se refleja en la Figura 1 (c).

2.2. Arquitectura de la red

Se presenta una red neuronal basada en el uso de módulos *Hourglass*, diseñada para la localización articulaciones humanas en imágenes (Newell et al., 2016). Estos módulos se denominan así debido a su estructura en forma de reloj de arena. La red propuesta (Figura 2) se basa en dos módulos *Hourglass* individuales dispuestos en serie. Cada módulo comprende una etapa de reducción de dimensionalidad de los mapas de características seguida de una etapa de aumento, similar al modelo U-Net o a la estructura de *autoencoders*. Sin embargo, se distingue del modelo U-Net por sus conexiones de escape, que incluyen una etapa intermedia de procesamiento.

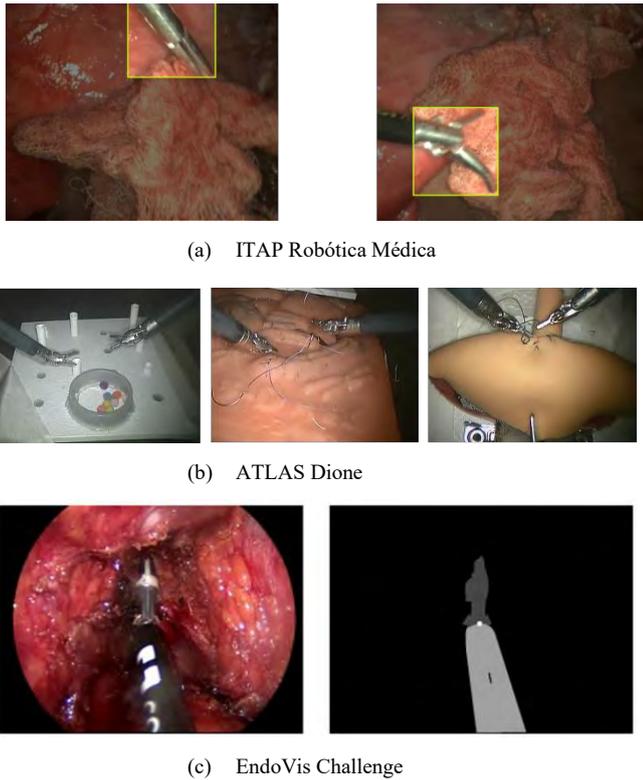


Figura 1: Fotogramas de las distintas bases de datos utilizadas

Una diferencia significativa de este módulo con respecto a otras arquitecturas tradicionales radica en su simetría entre las fases de reducción y aumento de la dimensionalidad de los mapas de características. Además, este módulo reemplaza operaciones típicas de aumento de dimensionalidad, como la convolución inversa, con una capa de *up-sampling* utilizando el algoritmo *k-means*, lo que reduce el costo computacional al no requerir capas entrenables (Newell et al., 2016).

La estructura básica del modelo consta de un módulo de convolución 7×7 y un módulo residual, que combinados

reducen la dimensionalidad de las imágenes en un factor de 4. Luego, las imágenes pasan por dos módulos *Hourglass*, donde se reduce su dimensionalidad para luego aumentarla nuevamente según lo explicado anteriormente. La salida de estos módulos se introduce en una red neuronal convolucional (CNN) simple de propagación hacia adelante para interpretar las características extraídas por cada módulo *Hourglass*. Además, después del primer módulo *Hourglass*, las características extraídas se combinan con los mapas anteriores al módulo mediante una convolución 1×1 y una capa de *batch-normalization* a modo de supervisión, conservando las características espaciales de las imágenes. Posteriormente, los mapas ingresan en un segundo módulo *Hourglass* idéntico al primero y la inferencia se realiza con una CNN similar a la descrita en el primer módulo. Las salidas de las tres ramas de la CNN corresponden a diferentes características (centro de la herramienta, ubicación del *bounding-box* y *offset*). Aunque el modelo está diseñado para obtener estas tres características, en este caso solo se conserva la rama relativa al centro de la herramienta para ahorrar parámetros y mejorar el rendimiento temporal.

Además, en lugar de utilizar módulos residuales como en la versión original del módulo *Hourglass*, se emplean módulos *Fire*. Estos módulos presentan diferencias ligeras pero significativas en términos de costo computacional. Las convoluciones 3×3 realizadas en los módulos residuales buscan relaciones combinadas tanto en las dimensiones de la imagen como en las dimensiones de los canales. Por otro lado, los módulos *Fire* descomponen estas operaciones para buscar primero relaciones entre los canales y luego relaciones espaciales, lo que los hace más eficientes. Para lograrlo, utilizan una convolución 1×1 para reducir el número de canales, seguida de una bifurcación que realiza una convolución 1×1 , similar a los módulos residuales, y una convolución separable, lo que optimiza el proceso y la utilización de recursos (Chollet, 2016).

La última capa utiliza una función de activación sigmoide, asignando a cada píxel una probabilidad de pertenecer al centro

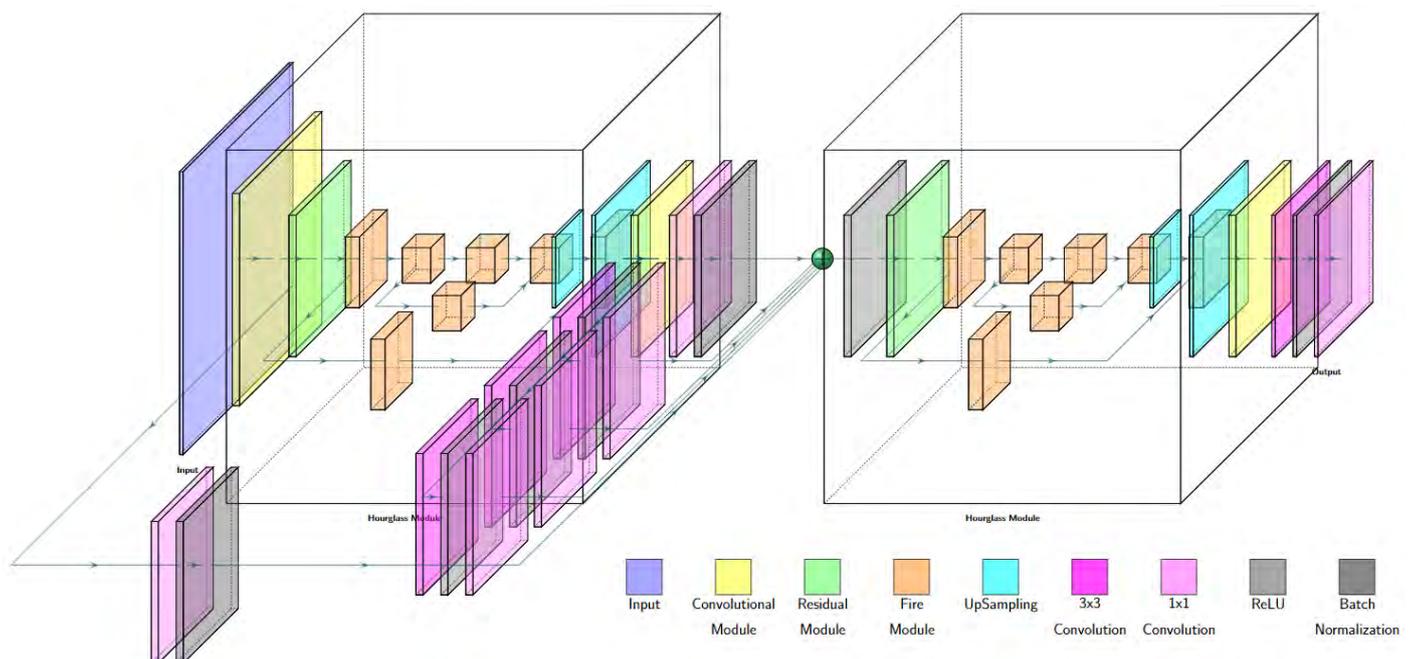


Figura 2: Diagrama de la red neuronal propuesta basada en dos módulos Hourglass individuales dispuestos en serie.

de la herramienta. De tal forma que la salida del modelo consiste en dos imágenes monocromáticas que representan el mapa de calor de la posición de las herramientas, con una distribución similar a una función gaussiana en dos dimensiones, donde el valor máximo indica el centro de la herramienta.

2.3 Función de pérdidas

El objetivo del modelo es producir dos mapas de calor en los que los píxeles con el valor máximo identifiquen los centros de las herramientas. Este enfoque se asemeja a la clasificación, como en la segmentación de imágenes, donde cada píxel recibe una probabilidad de ser el centro de una herramienta. Sin embargo, a diferencia de la segmentación, hay pocos puntos donde se espera una predicción positiva, lo que puede causar un desequilibrio en la clasificación binaria, con el riesgo de que el modelo prediga la totalidad de los píxeles como negativos para maximizar la precisión.

Para abordar este problema, utilizamos como función de coste la versión modificada del *Focal Loss* (Law & Deng, 2018). La variante α -balanceada del *Focal Loss* (1), propuesta por (Lin et al., 2017), prioriza las instancias difíciles de clasificar y se adapta al modelo mediante un factor de modulación adaptativo (γ).

$$FL(p_t) = -\alpha_t(1 - p_t)^\gamma \log(p_t) \quad (1)$$

La versión modificada del *Focal Loss* (Law & Deng, 2018) incorpora un factor de modulación adicional basado en el valor real del píxel, reduciendo la penalización alrededor del centro de la herramienta (2). Esto es especialmente útil con etiquetas gaussianas, donde solo un punto tiene un valor alto y los demás valores cercanos a 1 serían penalizados injustamente si se clasificaran como positivos.

$$L_{det} = \frac{-1}{N} \sum_{c=1}^c \sum_{i=1}^H \sum_{j=1}^W \left\{ \begin{array}{l} (1 - p_{cij})^\alpha \log(p_{cij}) \quad \text{if } y_{cij} = 1 \\ (1 - y_{cij})^\beta (p_{cij})^\alpha \log(1 - p_{cij}) \quad \text{otherwise} \end{array} \right. \quad (2)$$

Siendo p_{cij} es la probabilidad en el píxel (i, j) para la clase c del mapa de calor predicho, y_{cij} es la probabilidad del mapa de calor real, N es el número de herramientas en la imagen, y α y β son hiper-parámetros que controlan la contribución de cada punto. El término $(1 - p_{cij})$ reduce la penalización en los píxeles cercanos al centro de la herramienta. Se ha utilizado un valor de 2 para α y 4 para β en este caso.

2.4. Generación de los mapas de calor

Es necesario generar los mapas de calor para entrenar modelo. Para ello, se inicializa una cuadrícula de 128x128 con valores cero. Posteriormente, se asigna un valor de uno a los píxeles que corresponden a las coordenadas del centro de la herramienta y se aplica un filtro Gaussiano (3).

$$g(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{(x^2+y^2)}{2\sigma^2}} \quad (3)$$

El parámetro σ se determina como el valor máximo entre la altura ($tool_H$) y la anchura ($tool_W$) de la herramienta dividido entre 3, siguiendo la metodología empleada por (Law & Deng, 2018).

2.5. Métricas

Para evaluar el rendimiento de los modelos propuestos, se utilizan dos métricas que se basan en la distancia entre el centro de coordenadas de la herramienta predicho y el real.

a) Error medio

Se define la distancia de la herramienta (4) como la distancia Euclidiana entre el centro real de la herramienta $p(x, y)$ y el centro predicho $\hat{p}(\hat{x}, \hat{y})$. Las coordenadas del centro detectado corresponden con el píxel que tiene el mayor valor en el mapa de calor predicho por la red, siempre que exceda un umbral predeterminado. Si no se excede este umbral, se considera que no hay herramienta.

$$distancia(px) = \sqrt{(x - \hat{x})^2 + (y - \hat{y})^2} \quad (4)$$

Esta distancia se calcula en función del tamaño de la imagen para poder hacer comparaciones entre imágenes de diferentes tamaños (5).

$$distancia(\%) = \frac{distancia(px)}{tamaño(px)} \cdot 100 \quad (5)$$

Como la red puede detectar hasta dos herramientas, el error medio se calcula en función del número de herramientas (N) que aparecen en la imagen:

- $N=2$: el error medio se determina como el promedio de las distancias calculadas para cada herramienta.
- $N=1$: el error medio se toma como la distancia de la única activación en el mapa de calor. Si ambos mapas tienen activación, se elige la distancia mínima entre ambas.
- $N=0$: Si la red no detecta ninguna herramienta, el error medio es cero. Si detecta al menos una herramienta, el error medio se establece como el tamaño máximo de la imagen.

b) Exactitud

Se establece un umbral que define la máxima discrepancia permitida en términos de distancia entre las coordenadas del centro de la herramienta real y la predicha para determinar si una predicción es correcta o incorrecta. Este umbral ϵ es un porcentaje respecto al ancho de la imagen. Una vez determinadas las predicciones correctas e incorrectas en base a este umbral, se calcula la exactitud del modelo (6).

$$exactitud = \frac{clasificaciones\ correctas}{todas\ las\ clasificaciones} \cdot 100 \quad (6)$$

c) Valor máximo medio (VMM)

EL VMM tiene como objetivo comprobar el grado de confianza de predicción del modelo para la detectar la herramienta. Su valor corresponde con el valor medio de los puntos máximos de los mapas de calor. Un VMM cercano a 1 significa que el modelo predice ese punto como centro con una confianza mucho mayor sobre el resto de los píxeles, mientras que si se acerca más a 0 implica que su confianza es menor.

2.6. Evaluación experimental

Se proponen tres modelos. El primero de ellos (H1) tiene un tamaño de entrada de 512x512 píxeles y un número máximo

de filtros en su capa más profunda de 256. El segundo (H2) posee el mismo tamaño de entrada de 512×512 píxeles, pero únicamente posee 128 filtros en su capa más profunda, con el objetivo de disminuir el número de parámetros del modelo. Por último, el tercer modelo (H3) de 128 filtros en su capa más profunda, pero en este caso el tamaño de entrada es 256×256 píxeles con la intención de agilizar la inferencia del modelo, al reducir la carga computacional sobre la imagen. La disminución en el número de filtros resulta en una reducción de parámetros de 1.946.068 a 490.228. Respecto al modelo H3, la reducción del tamaño de la entrada conlleva una reducción adicional de los parámetros de 490.228 a 443.854.

Además, mientras que los modelos H1 y H2 fueron entrenados únicamente con el conjunto de datos Atlas Dione, para modelo H3 se ha utilizado también el conjunto de datos de ITAP con el objetivo de compensar la pérdida de resolución de las imágenes con un mayor número y variabilidad de estas.

Los modelos han sido evaluados en un subconjunto de entrenamiento formado por 3685 imágenes del conjunto Atlas Dione, pertenecientes a una gran variedad de actividades y tareas, lo que lo convierte en un conjunto más fiable que otros *datasets* donde solamente aparece un tipo de imágenes.

El modelo se ha evaluado en un dispositivo equipado con una CPU Intel Core i7-7700/3.60 GHz, 16 GB de memoria RAM y GPU integrada.

3. Resultados

En la Tabla 1 se muestran los resultados de los 3 modelos entrenados en relación con la exactitud, el error medio de las predicciones (distancia a la herramienta) y el rendimiento que ha alcanzado el modelo. Se puede apreciar como el modelo más simple (H3) es el que nos ha ofrecido unos mejores resultados en el conjunto de test en todos los aspectos.

Tabla 1: Resultados alcanzados por el modelo

Modelo	Modelo		Exactitud (%) ($\epsilon = 10\%$)	Error Medio	FPS	VMM
	N filtros	Tamaño entrada (px)				
H1	256	512x512	89,25	2,03	3,56	0,778
H2	128	512x512	86,50	3,12	7,91	0,611
H3	128	256x256	92,86	1,72	21,64	0,794

Una vez hemos obtenido los resultados generales de los modelos, se ha querido ver cómo varía su comportamiento en cuanto a su exactitud para otros umbrales de error. En primer lugar, se ha comparado en la Figura 3 los dos modelos entrenados únicamente con el *dataset* Atlas Dione para valorar sus posibles diferencias de rendimiento.

En la Figura 3 se puede ver como para todos los umbrales de error, el modelo con más parámetros es capaz de ofrecer mejores resultados a costa de una velocidad de inferencia mucho menor, como se ha visto anteriormente. En cambio, cuando el umbral de error es suficientemente grande, la diferencia entre los dos modelos se reduce y consiguen resultados comparables.

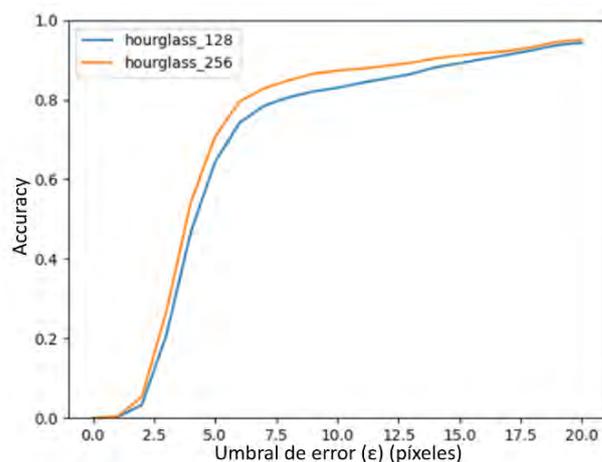


Figura 3. Comparación de la precisión de los modelos de 256 y 128 filtros para diferentes valores de umbral de error (ϵ).

Posteriormente se decidió evaluar el rendimiento del modelo más simple y compararlo con los dos anteriores de una forma similar. En este caso, al no tener el mismo tamaño los *heatmaps* de salida de todos los modelos, la evaluación del modelo variando el umbral de error en píxeles no tendría sentido, ya que no se correspondería con las mismas distancias en la realidad. Por ello, se ha optado por variar el umbral de error en base a un porcentaje del ancho de la imagen para estandarizar la medida dando igual cuál sea la resolución del *heatmap* de salida. Los resultados de esta comparativa pueden verse en la Figura 4.

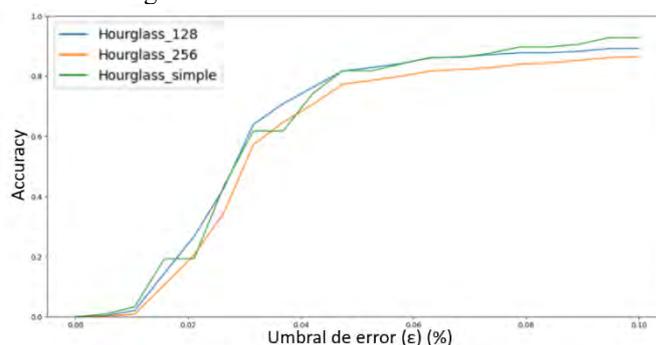


Figura 4. Exactitud en función de la variación del porcentaje de umbral de error (ϵ) en los tres modelos desarrollados.

Los resultados de la comparativa muestran que el modelo más simple ofrece resultados similares al modelo más complejo durante prácticamente todos los umbrales, llegando a mejorar su rendimiento para los umbrales más altos. Los saltos o escalones que pueden apreciarse en la línea verde del gráfico no se deben a una disminución del rendimiento, sino a que un punto porcentual en este modelo, al tener menos resolución en los *heatmaps* de salida, no se corresponde a un píxel completo, por lo que su rendimiento no varía respecto al punto anterior. En cambio, si se interpola la función solamente donde los rendimientos sí varían, podría verse que su evolución es igual o incluso superior en algunos puntos.

Finalmente, se comprobó cuál es la robustez con la que un modelo es capaz de detectar los puntos centrales de la herramienta en promedio, para lo que se utilizó el VMM. Los resultados para los dos modelos entrenados únicamente con el *dataset* Atlas Dione fueron 0,7780 y 0,6115 para el modelo de 256 y 128 filtros respectivamente. El modelo entrenado con ambos *datasets* obtuvo un valor de VMM de 0,79413, por lo

que este modelo también ha tenido un rendimiento más robusto en nuestro conjunto de test.

4. Discusión y conclusiones

Se ha desarrollado un modelo de visión artificial basado en redes convolucionales y aprendizaje profundo capaz de detectar las coordenadas de los centros de herramientas quirúrgicas en tiempo real. Además, este modelo ha sido implementado en un equipo con características comunes, lo que implica que podría ser implementado en muchos otros de características parecidas debido a su bajo coste computacional.

Además de este modelo, se han entrenado otros de diferentes tamaños, tanto en los filtros como en la resolución de las imágenes de entrada y salida. Aunque el aumento del tamaño de los modelos parece mejorar el rendimiento en exactitud de estos, la comparación entre los dos modelos entrenados con el mismo *dataset* no ha mostrado diferencias demasiado elevadas en cuanto a la tasa de acierto del modelo de 256 filtros respecto del modelo de 128 filtros. En cambio, donde sí que se ha visto una diferencia significativa ha sido en el modelo entrenado con dos *datasets*. Este modelo tenía como entrada imágenes de menor resolución a los demás, y el número máximo de filtros se mantuvo en 128. En cambio, su rendimiento en cuanto a la exactitud mejoró notablemente y los FPS capaces de predecir incrementaron de 7,91 hasta 21,64, consiguiendo un funcionamiento en tiempo real. Esto implica que el modelo H3, que recibe menos información y tiene la misma complejidad que el modelo H2, tiene un rendimiento muy superior a este gracias a haber sido entrenado con dos conjuntos de datos.

Finalmente, podemos concluir que este modelo es una buena alternativa para dotar a los dispositivos de cirugía robótica de una autonomía que hasta el momento no tienen, pudiendo controlar estos dispositivos en tiempo real sin necesidad de equipos excesivamente costosos, lo que reduce el riesgo de errores intraoperatorios y los beneficios que ello conlleva en este tipo de intervenciones.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades, a través del proyecto Estrategias de control compartido en cirugía hepática laparoscópica (PID2022-138206OB-C33).

Referencias

Buia, A., Stockhausen, F., & Hanisch, E. 2015. Laparoscopic surgery: A qualified systematic review. *World Journal of Methodology*, 5(4), 238. DOI: 10.5662/WJM.V5.I4.238

Choi, B., Jo, K., Choi, S., & Choi, J. 2017. Surgical-tools detection based on Convolutional Neural Network in laparoscopic robot-assisted surgery. *Proceedings of the Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, EMBS*, 1756–1759. DOI: 10.1109/EMBC.2017.8037183

Chollet, F. 2016. Xception: Deep Learning with Depthwise Separable Convolutions. *Proceedings - 30th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR 2017, 2017-January*, 1800–1807. DOI: 10.1109/CVPR.2017.195

Data - Grand Challenge. (n.d.). Retrieved July 10, 2023, from <https://endovissub-instrument.grand-challenge.org/Data/>

Esteva, A., Robicquet, A., Ramsundar, B., Kuleshov, V., DePristo, M., Chou, K., Cui, C., Corrado, G., Thrun, S., & Dean, J. 2019. A guide to deep learning in healthcare. *Nature Medicine* 25:1, 25(1), 24–29. DOI: 10.1038/s41591-018-0316-z

Gao, C., Unberath, M., Taylor, R., & Armand, M. 2019. Localizing dexterous surgical tools in X-ray for image-based navigation. *ArXiv*, 1-4, DOI: 10.48550/arXiv.1901.06672

Jin, A., Yeung, S., Jopling, J., Krause, J., Azagury, D., Milstein, A., & Fei-Fei, L. 2018. Tool detection and operative skill assessment in surgical videos using region-based convolutional neural networks. *Proceedings - 2018 IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision, WACV 2018, 2018-January*, 691–699. DOI: 10.1109/WACV.2018.00081

Kurmann, T., Marquez Neila, P., Du, X., Fua, P., Stoyanov, D., Wolf, S., & Sznitman, R. 2017. Simultaneous recognition and pose estimation of instruments in minimally invasive surgery. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 10434 LNCS, 505–513. DOI: 10.1007/978-3-319-66185-8_57

Laina, I., Rieke, N., Rupperecht, C., Vizcaíno, J. P., Eslami, A., Tombari, F., & Navab, N. 2017. Concurrent segmentation and localization for tracking of surgical instruments. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 10434 LNCS, 664–672. DOI: 10.1007/978-3-319-66185-8_75

Law, H., & Deng, J. 2018. CornerNet: Detecting Objects as Paired Keypoints. *International Journal of Computer Vision*, 128(3), 642–656. DOI: 10.1007/s11263-019-01204-1

Lin, T. Y., Goyal, P., Girshick, R., He, K., & Dollar, P. 2017. Focal Loss for Dense Object Detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 42(2), 318–327. DOI: 10.1109/TPAMI.2018.2858826

Liu, Y., Zhao, Z., Chang, F., & Hu, S. 2020. An anchor-free convolutional neural network for real-time surgical tool detection in robot-assisted surgery. *IEEE Access*, 8, 78193–78201. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2989807

Newell, A., Yang, K., & Deng, J. 2016. Stacked hourglass networks for human pose estimation. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 9912 LNCS, 483–499. DOI: 10.1007/978-3-319-46484-8_29

Ni, Z. L., Bian, G. Bin, Xie, X. L., Hou, Z. G., Zhou, X. H., & Zhou, Y. J. 2019. RASNet: Segmentation for Tracking Surgical Instruments in Surgical Videos Using Refined Attention Segmentation Network. *Proceedings of the Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, EMBS*, 5735–5738. DOI: 10.1109/EMBC.2019.8856495

Redmon, J., Divvala, S., Girshick, R., & Farhadi, A. 2016. You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection (pp. 779–788). <http://pjreddie.com/yolo/>

Ren, S., He, K., Girshick, R., & Sun, J. 2017. Faster R-CNN: Towards Real-Time Object Detection with Region Proposal Networks. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 39(6), 1137–1149. DOI: 10.1109/TPAMI.2016.2577031

Ronneberger, O., Fischer, P., & Brox, T. 2015. U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 9351, 234–241. DOI: 10.1007/978-3-319-24574-4_28

Sarikaya, D., Corso, J. J., & Guru, K. A. 2017. Detection and Localization of Robotic Tools in Robot-Assisted Surgery Videos Using Deep Neural Networks for Region Proposal and Detection. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 36(7), 1542–1549. DOI: 10.1109/TMI.2017.2665671



Colaboradores:

