



# 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.<sup>a,\*</sup>, Bermejo-García, J.<sup>1</sup>, Romero-Sánchez, F.<sup>1</sup>, Agujetas Ortiz, R.<sup>1</sup>, Alonso-Sánchez, F.J.<sup>1</sup>

<sup>a</sup>Departamento 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  
Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)

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.

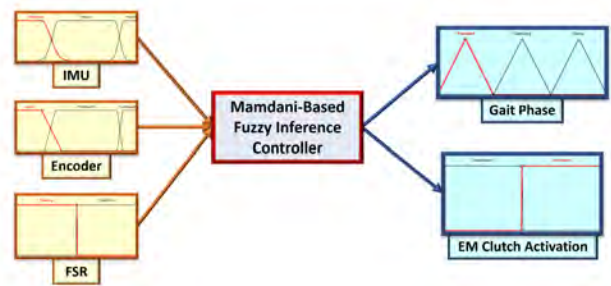


Figura 1: Sistema de Inferencia Difusa (FIS) tipo Mamdani con sus entradas y salidas

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.

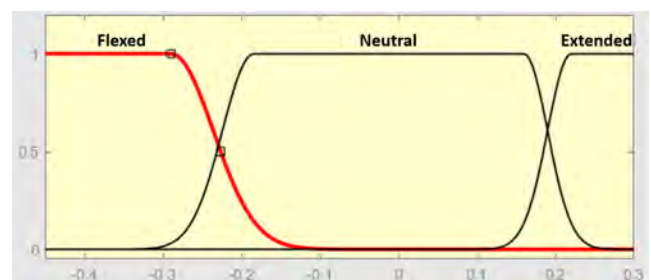


Figura 2: Funciones miembro del detector de fase de marcha: IMU

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.

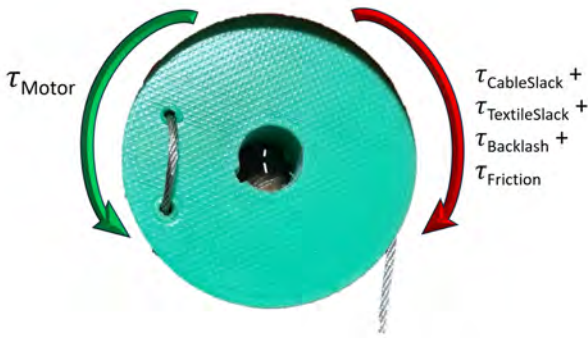


Figura 3: Par total del backlash a compensar

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.

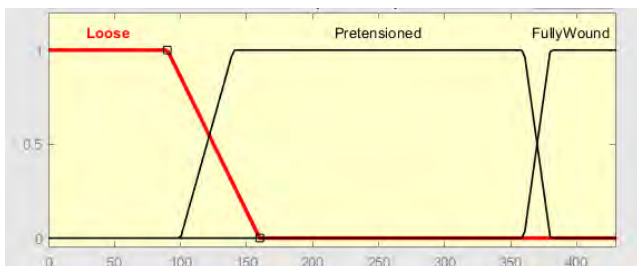


Figura 4: Funciones miembro del controlador de la actuación: Encoder

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.

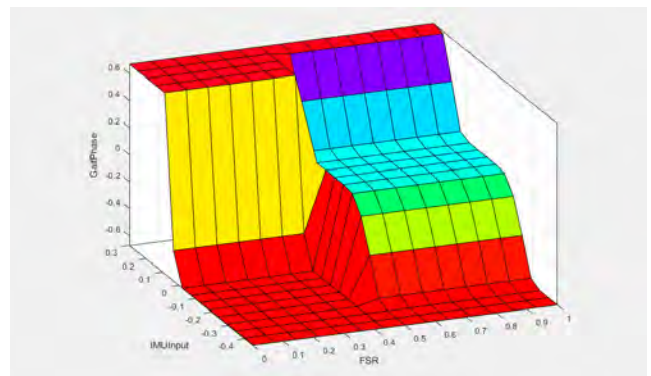


Figura 5: IMU y FSR: Gráfico de superficie de la fase de la marcha

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.

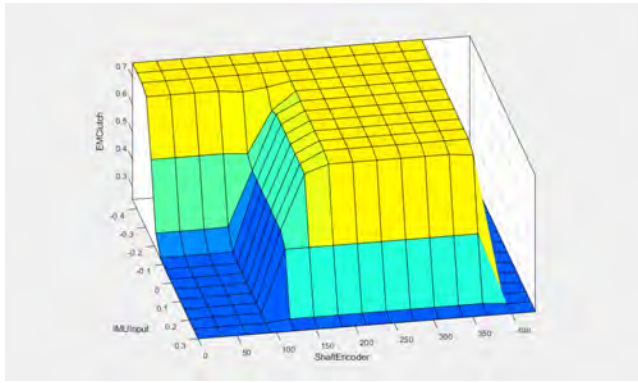


Figura 6: IMU y Encoder: Gráfico de superficie de activación de embrague

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.