

ADAPTACIÓN DE UN SISTEMA DE POSICIONAMIENTO ULTRASÓNICO PARA OPERACIÓN CON DRONES A BAJA VELOCIDAD EN ZONAS ACOTADAS

Jesús Ureña, Álvaro Hernández, David Gualda, José M. Villadangos

Department of Electronics, University of Alcalá, 28805, Alcalá de Henares, Madrid, Spain

jesus.urena@uah.es

Khaoula Mannay^{1,2}

¹ *Department of Electronics, University of Alcalá, 28805, Alcalá de Henares, Madrid, Spain*

² *EμE Lab Faculty of Sciences of Monastir, National Engineer School of Tunis, University of Tunis El Manar, 1002, Tunis, Tunisia*

Resumen

Con el desarrollo de drones capaces de llevar a cabo tareas de inspección en grandes factorías o búsqueda de productos en almacenes de gran altura, ha surgido la necesidad de desarrollar sistemas de posicionamiento 3D con suficiente precisión como para permitir el posicionamiento absoluto de los mismos en los entornos de operación. Los sistemas ultrasónicos ofrecen ventajas sobre otros sistemas en términos de precisión, bajo coste y confinamiento a la zona de trabajo. En este trabajo se describe el uso de Sistemas Locales de Posicionamiento Ultrasónicos (SLPU) en espacios 3D. Los retos a vencer, en comparación con el caso 2D, están relacionados con el número de sistemas a emplear para cubrir el volumen 3D con una precisión homogénea y la ubicación de los receptores para garantizar la recepción de señales que pueden llegar desde muy diferentes ángulos. Se describe la estructura del sistema, su funcionamiento y datos reales obtenidos de un primer prototipo.

Palabras clave: Posicionamiento 3D, ultrasonidos, navegación de drones en interiores, fusión de datos.

1 INTRODUCCIÓN

Los sistemas de posicionamiento en interiores son cada vez más usados para identificar, localizar o hacer el seguimiento de personas, objetos o vehículos en entornos interiores, tanto en 2D como en 3D. el caso 3D está cobrando cada vez mayor interés según van apareciendo nuevas aplicaciones en almacenes, centros comerciales, grandes factorías y otros entornos estructurados.

El uso de drones para estas aplicaciones de uso civil ha experimentado un gran crecimiento en los últimos años debido a la aprobación de legislaciones para su

uso apropiado [1]. Consecuentemente, también se han incrementado los trabajos de investigación relacionados, abarcando niveles de proceso: mejora en los algoritmos de control y manejo [2], estimación de la posición del dron en entornos exteriores a partir de la fusión sensorial de sensores inerciales con la información de GPS [3], tratamiento de imágenes obtenidas mediante una cámara instalada en el dron [4], planificación y navegación autónoma y otras aplicaciones de alto nivel relacionadas con la seguridad, vigilancia, transporte, etc.

En lo que respecta a la estimación de la posición, la tecnología más utilizada es radiofrecuencia (RF), principalmente a partir del uso de sistemas de posicionamiento basados en ultra-wideband (UWB) [5] logrando estimar la posición en 3D con errores del orden de decímetros. En [6] se realiza la fusión sensorial entre UWB, sensores inerciales y cámara incorporada en el dron para la detección de códigos QR, reportando una precisión de 10cm.

En muchos entornos de trabajo en interiores, al realizarse operaciones de aproximación y maniobras de búsqueda, la velocidad de los drones es relativamente baja, con lo que pueden emplearse sistemas ultrasónicos que ya han mostrado buenas prestaciones, con precisiones centimétricas, en el posicionamiento de robot móviles sobre el suelo [7] [8]. Un estudio inicial para estimar la posición 3D de un dron en un entorno interior utilizando un Sistema Local de Posicionamiento Ultrasónico (SLPU) se ha realizado en [9], en el que se ha analizado la influencia del propio ruido y turbulencias de las hélices y cómo minimizar el efecto según la posición del receptor en relación a la superficie del dron. Igualmente, mediante simulación, se ha estudiado la precisión en posicionamiento 3D que se puede alcanzar con SLPUs habitualmente usados en 2D, con una adecuada configuración de los mismos en el entorno [10].

En este artículo se considera una estructura en la que tres módulos (SLPUs) habitualmente empleados para posicionamiento 2D, se ubican en posiciones conocidas sobre planos perpendiculares entre sí; con todos apuntando hacia el centro del volumen de operación donde se desea realizar el posicionamiento 3D. Además de la descripción de esta disposición, el trabajo incide sobre todo el procesamiento requerido para obtener la posición de uno o varios receptores dentro del volumen cubierto. Con tres receptores sincronizados y recibiendo señales de hemisferas distintas se puede cubrir la recepción de señales desde todas las direcciones, garantizando la disponibilidad del sistema.

El resto del artículo se ha estructurado de la siguiente forma: la Sección 2 incluye la descripción de un SLPU y de la disposición de tres SLPUs para posicionamiento 3D, así como el procesamiento de señales necesario para obtener la posición de cada receptor; la Sección 3 está dedicada a la fusión de información cuando la posición se obtiene desde diferentes SLPUs; en la Sección 4 se presentan algunos resultados experimentales obtenidos y, finalmente, la Sección 5 establece las conclusiones del trabajo.

2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE POSICIONAMIENTO 3D

Cada SLPU está constituido por cinco balizas que se configuran en una estructura rígida predeterminada (ver figura 1). Una descripción de dicho sistema, llamado LOCATE-US, puede ser vista en [8]. Las cinco balizas ultrasónicas (Prowave 328ST160) no están ubicadas en el mismo plano para permitir la utilización de algoritmos de posicionamiento 3D. Sí que están dispuestas relativamente cerca y con la misma orientación con el fin de que la zona de cobertura, teniendo en cuenta que el ángulo de apertura es de 120° , sea similar para todas ellas a distancias de posicionamiento mayores a las dimensiones de la estructura (cuadrada con diagonal de 1m). El área cubierta cuando se proyectan las emisiones sobre el suelo desde una altura de 3.5 m es de aproximadamente unos 40m^2 y el volumen insonificado de unos 50m^3 . En el entorno de localización pueden posicionarse tantos receptores como se desee en modo independiente y privado [5].

2.1 DISPOSICIÓN DE BALIZAS CON VARIOS SLPUs

Aunque con un único SLPU se pueden obtener posiciones 3D, la resolución que se obtiene en la dimensión perpendicular a las balizas es peor que en las otras dos [10]. Para solventar esta limitación, se

disponen tres SLPUs en planos perpendiculares de la estancia a cubrir, apuntando todos ellos hacia el centro de la misma. Un ejemplo de instalación de tres unidades (SLPU1, SLPU2 y SLPU3) puede observarse en la Figura 2.

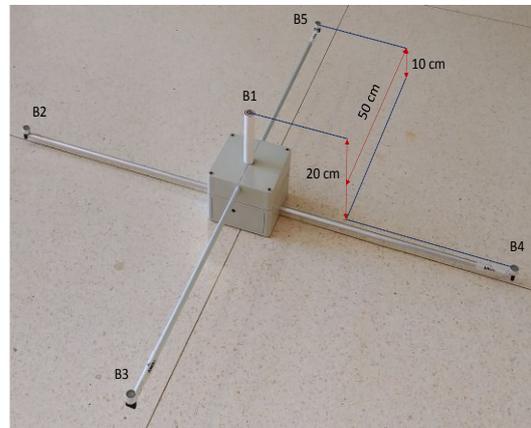


Figura 1: Vista general de un módulo SLPU, con 5 balizas a diferentes alturas.



Figura 2: Distribución de los tres SLPUs para cubrir un espacio tridimensional con alta precisión y disponibilidad.

Con esta disposición, puede haber hasta 15 transductores ultrasónicos (balizas) emitiendo simultáneamente (cinco por cada uno de los SLPUs). La técnica de acceso al medio empleada para la coexistencia de estas emisiones es una combinación de CDMA (*Code Division Multiple Access*) y TDMA (*Time Division Multiple Access*). Para ello se usan transmisiones ultrasónicas para cada baliza formadas por códigos Kasami de 255 bits, modulados en BPSK (Binary Phase Shift Keying) con una portadora de 41.667kHz –centrando el contenido en frecuencia de la señal con el ancho de banda efectivo del transductor. En este trabajo se supone que sólo las balizas de un mismo SLPU están sincronizadas. Pero entre distintas SLPUs, así como cualquier receptor que se posicione en el entorno, no necesitan ningún tipo de sincronismo.

2.2 MÓDULOS RECEPTORES

Los módulos receptores de las señales ultrasónicas, que irán a bordo del vehículo o persona a posicionar, computan su posición de modo autónomo, a partir de la medida de diferencias de tiempos de llegada de las distintas emisiones ultrasónicas. El sensor empleado es un micrófono omnidireccional (180°), tipo MEMS PU0414HR5H-SB de Knowles, cuya respuesta en frecuencia abarca más de los 41.67kHz donde están centradas las emisiones. La señal recibida es filtrada y digitalizada con una frecuencia de muestreo de 100kHz. El módulo adquiere y almacena ventanas de señal de hasta 1s, de modo que la ventana de adquisición debe incluir al menos una transmisión completa de las 15 balizas del entorno (de ahí que se use CDMA y TDMA). Un detalle de un módulo receptor real puede verse en la Figura 3.a.

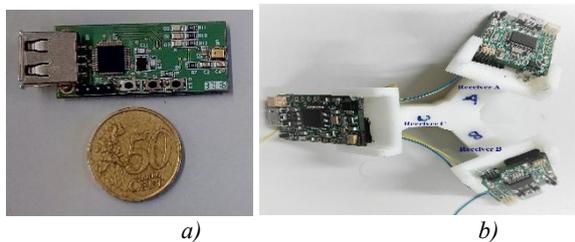


Figura 3: Aspecto general del prototipo receptor: a) receptor único, y b) tres receptores sincronizados.

Como se ha indicado, el microfono puede recibir señales de una hemiesfera (180°), pero esto no es suficiente cuando se tiene una distribución de balizas como la mostrada en la Figura 2.a), ya que las emisiones pueden llegar desde tres planos ortogonales en el espacio 3D. Para solventar este problema se ha configurado también un array de módulos de adquisición como el mostrado en la Figura 2.b). En este caso, el montaje incluye tres receptores independientes (aunque las adquisiciones de señal están sincronizadas) con las mismas características descritas en el párrafo anterior. La orientación viene dada por los planos de un hipotético tetraedro regular, cuyas aristas forman ángulos de 60°. Con estos tres receptores se aumenta la disponibilidad de las medidas (algún SLPU será visto por algún receptor e incluso, con bastante probabilidad, más de uno).

2.3 PROCESAMIENTO DE LAS SEÑALES ULTRASÓNICAS

Como se ha indicado anteriormente, los transductores ultrasónicos de cada SLPU están sincronizados y emiten señales simultáneas (o con un decalaje controlado) de manera periódica. Cada baliza está identificada con su propio código Kasami de 255 bits.

En la recepción dichos códigos son detectados mediante un filtro acoplado (empleando correlación).

En la Figura 4 se ha mostrado el diagrama de bloques completo que indica cómo se lleva a cabo el procesamiento de las señales ultrasónicas recibidas por los tres receptores. La ventana de señal digitalizada por cada receptor es almacenada y enviada a tres bancos de correladores que indicarán mediante un pico de correlación la llegada de cada uno de los códigos esperados procedentes de las balizas correspondientes. Este proceso se hace por triplicado para cada señal recibida, dado que hay tres SLPU potencialmente detectables. Tras cada correlador se implementa un detector de picos (por umbralización y separación mínima de picos consecutivos). Si algún conjunto de picos de salida no es detectado en número suficiente para aplicar el algoritmo de posicionamiento (por ejemplo porque no se está captando adecuadamente alguno de los SLPUs desde un receptor concreto), entonces se descarta. Al no haber sincronización entre las balizas y cada receptor, se determinan diferencias de instantes de llegada y con las mismas se calcula la posición usando un algoritmo de trilateración hiperbólica. Para una línea de proceso, pueden verse detalles de cada bloque en [11].

Al final del proceso, se habrá calculado un conjunto de posiciones (hasta un máximo de 9 -aunque esta situación es poco probable ya que implicaría que los tres receptores reciben los tres SLPUs).

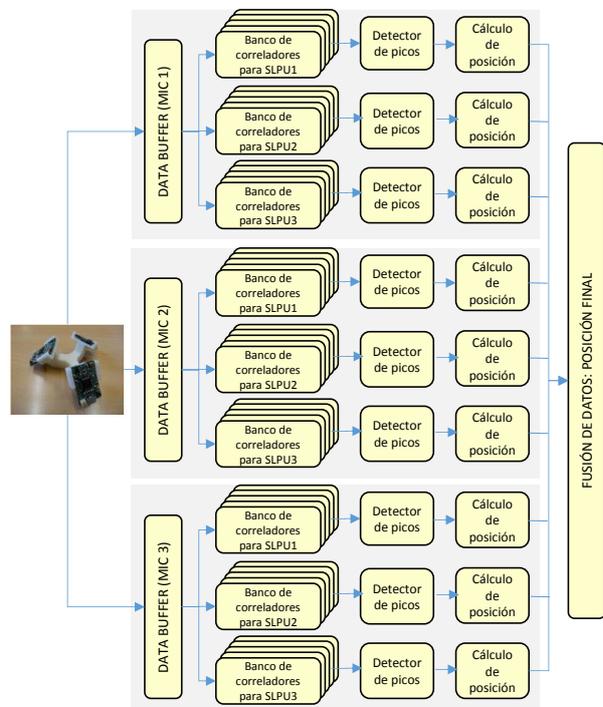


Figura 4: Diagrama de bloques del procesamiento completo llevado a cabo tras la recepción de las señales ultrasónicas.

3 FUSIÓN DE INFORMACIÓN DE POSICIÓN

Una vez calculados los valores de posición, de acuerdo con el esquema de procesamiento indicado, éstos son sometidos a un proceso de fusión. Para ello se tiene en cuenta la caracterización de errores realizada mediante simulación para todo el espacio de localización en [12]. A modo de ejemplo, en la figura 5 se ha representado un conjunto de cien posiciones obtenidas mediante simulación, donde los receptores se han ubicado hacia el centro del entorno cubierto (cruz negra en el centro). Se ha supuesto un error en la medida de distancias de 1cm, y posteriormente se han computado las diferencias de distancias para aplicar el algoritmo de posicionamiento hiperbólico. Cada color representa las posiciones obtenidas por un receptor que recibe las señales procedentes de un SLPU concreto. Puede observarse que existe un error mucho mayor en la dirección perpendicular al correspondiente SLPU. Para cuantificar el error cometido en cada coordenada se ha representado el elipsoide de error (para el 95%) en torno al punto y sus proyecciones sobre los planos XY, XZ e YZ.

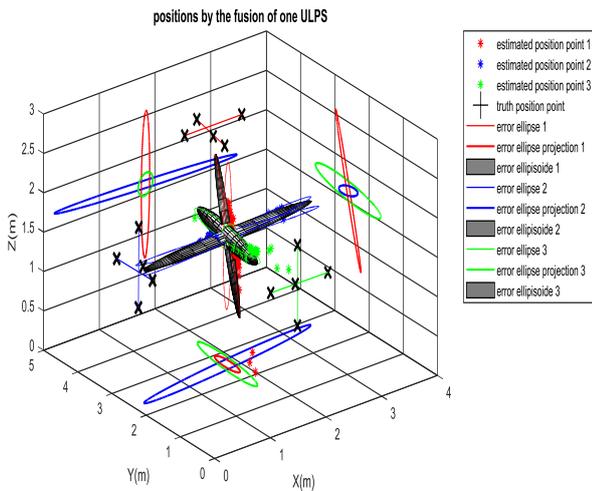


Figura 5: Estimaciones de posición a partir de tres SLPUs independientes (cada uno con un color diferente).

Si en cada iteración (análisis de una ventana de datos), se dispone de varias medidas de posición, se puede acometer un proceso de fusión de las mismas que tenga en cuenta estos modelos de error previamente simulados. Como primera aproximación se ha realizado una fusión de las medidas obtenidas con cada uno de los tres SLPUs, basada en MLE (*Maximum Likelihood Estimation*). Para el caso de tener tres medidas independientes (aunque puede extrapolarse a cualquier número de medidas) q_1 , q_2 y q_3 para una cierta posición q , estando el error de posicionamiento modelado por una función normal,

$p(q_i) = N(q, \sigma_i)$, la estimación q_{MLE} para la posición q puede ser obtenida a partir de (1):

$$q_{MLE} = \frac{\sigma_1^{-2} \cdot q_1 + \sigma_2^{-2} \cdot q_2 + \sigma_3^{-2} \cdot q_3}{\sigma_1^{-2} + \sigma_2^{-2} + \sigma_3^{-2}} \quad (1)$$

Donde q_1 , q_2 y q_3 son tres medidas independientes para la posición q . Como la información estadística es aditiva, la nueva desviación estándar σ , será (2):

$$\sigma^{-2} = \sigma_1^{-2} + \sigma_2^{-2} + \sigma_3^{-2} \quad (2)$$

En esta expresión σ_1 , σ_2 y σ_3 son las desviaciones estándares para las medidas q_1 , q_2 y q_3 . Este procedimiento puede ser aplicado para cada una de las coordenadas, tal y como se muestra en (3), donde $(X_{MLE}, Y_{MLE}, Z_{MLE})$ son las coordenadas estimadas tras la fusión:

$$\begin{aligned} X_{MLE} &= \frac{\sigma_{1x}^{-2} \cdot x_1 + \sigma_{2x}^{-2} \cdot x_2 + \sigma_{3x}^{-2} \cdot x_3}{\sigma_{1x}^{-2} + \sigma_{2x}^{-2} + \sigma_{3x}^{-2}} \\ Y_{MLE} &= \frac{\sigma_{1y}^{-2} \cdot y_1 + \sigma_{2y}^{-2} \cdot y_2 + \sigma_{3y}^{-2} \cdot y_3}{\sigma_{1y}^{-2} + \sigma_{2y}^{-2} + \sigma_{3y}^{-2}} \\ Z_{MLE} &= \frac{\sigma_{1z}^{-2} \cdot z_1 + \sigma_{2z}^{-2} \cdot z_2 + \sigma_{3z}^{-2} \cdot z_3}{\sigma_{1z}^{-2} + \sigma_{2z}^{-2} + \sigma_{3z}^{-2}} \end{aligned} \quad (3)$$

Donde las desviaciones típicas para cada coordenada han sido indicadas con los subíndices x , y o z .

La Figura 6 presenta la posición obtenida tras la fusión en cada iteración para las posiciones obtenidas con los tres SLPUs independientes (representadas previamente en la Figura 5). Es evidente la reducción en la dispersión de los puntos, como prueba ahora el mismo elipsoide de error y sus proyecciones.

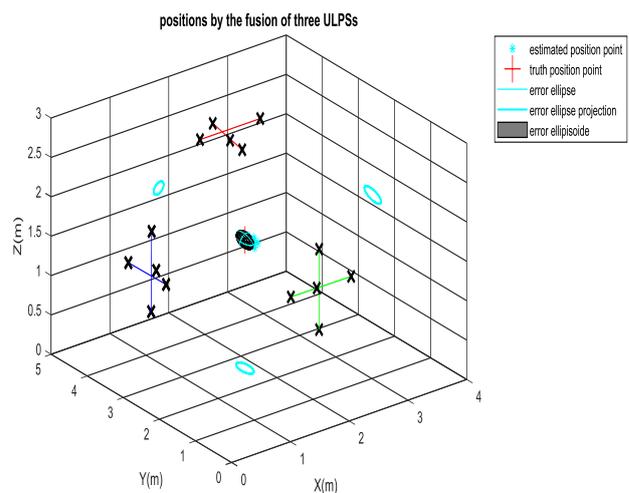


Figura 6: Estimación de las posiciones tras aplicar el algoritmo de fusión sobre las medidas tomadas desde diferentes SLPUs de la figura 5.

4 RESULTADOS EXPERIMENTALES

Se han llevado a cabo pruebas experimentales reales en el entorno de trabajo con los tres SLPUs ubicados en el techo y sobre dos muros perpendiculares entre sí, apuntando todos hacia el centro del espacio de localización. Se ha fijado un sistema de referencia absoluto en el que las coordenadas de las balizas (x,y,z), obtenidas tras un proceso de calibración, son: ULPS1 (1.977, 3.260, 2.674), ULPS2 (0.220 2.447 1.709), y ULPS3 (1.707 0.420 1.650).

A modo de ejemplo, en la figura 7.a) se ha representado un conjunto de cien posiciones obtenidas en un caso real, donde los receptores se han ubicado hacia el centro del entorno cubierto (cruz negra en el centro). Cada color representa las posiciones obtenidas por un receptor que recibe las señales procedentes de un SLPU concreto. Se evidencia la dispersión mayor esperada en la dirección perpendicular al correspondiente SLPU. En la Figura 7.b se puede observar la mejora tras aplicar el algoritmo de fusión.

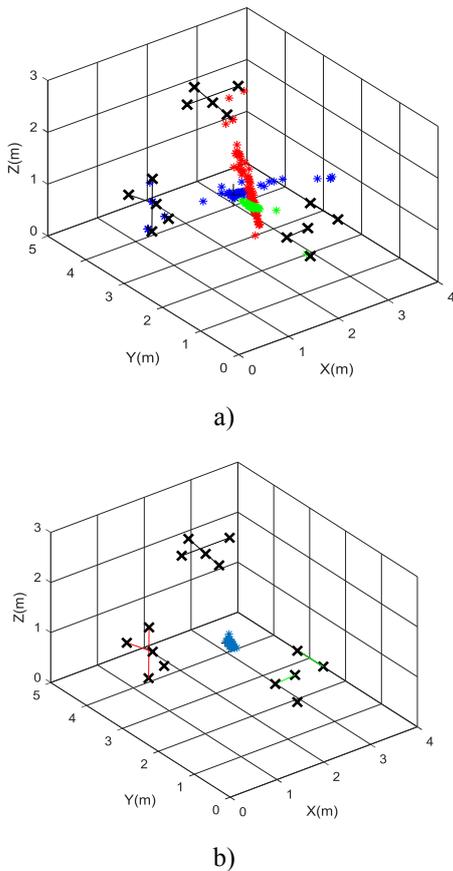


Figura 7.a): Estimaciones de posición a partir de tres SLPUs independientes (cada uno con un color diferente); b) Resultado tras aplicar la fusión.

Un aspecto importante es el análisis de la disponibilidad del sistema de posicionamiento; esto es, determinar si en todos los intentos de medida se ha podido disponer de suficiente información o no. La figura 8 representa el número de SLPUs “vistos” por cada receptor en cada iteración de medida (de la 1 a la 100). Puede observarse que siempre hay disponibles medidas desde los tres SLPUS.

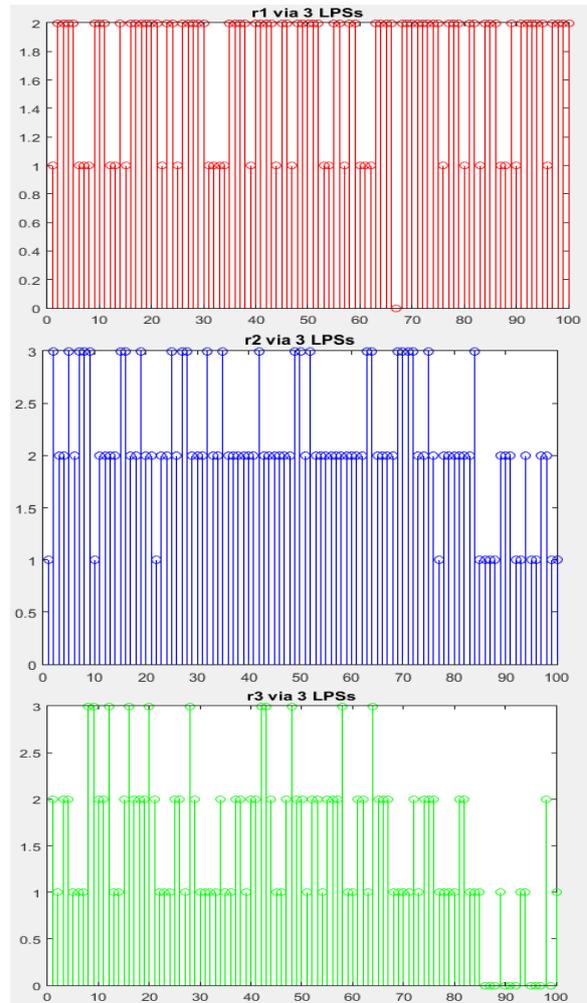
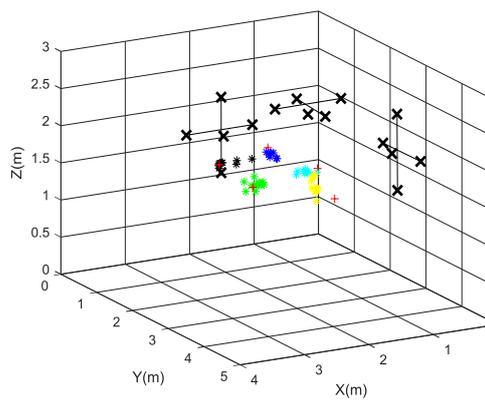
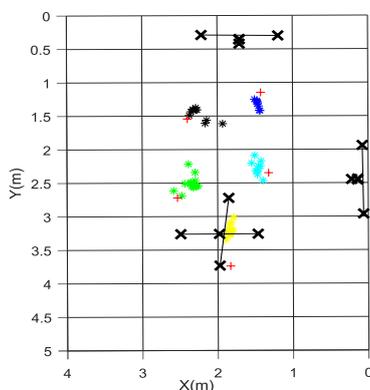


Figura 8.a): Número de SLPUs detectados por cada uno de los receptores (r1, r2 y r3 de arriba abajo) en el punto considerado de la Figura 7.

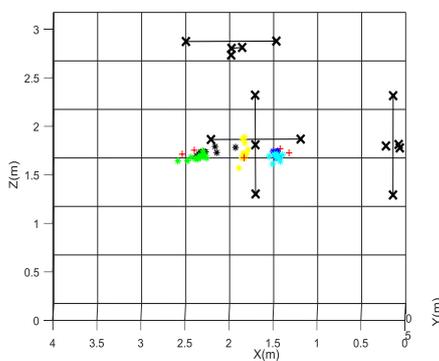
Adicionalmente, en la Figura 9.a) se representa las posiciones estimadas tras la fusión de datos en cinco puntos ubicados en el mismo plano $z=1.6m$ (marcados con “+” de color rojo). Para ver mejor la dispersión de los puntos, en las Figuras 9.b) y c) se han representado las proyecciones sobre los ejes XY y XZ respectivamente. En todos los casos la precisión está en el rango de 10 a 20 cm.



a)



b)



c)

Figura 9: Estimación de las posiciones tras 100 medidas con el módulo de tres receptores en 5 posiciones diferentes sobre el plano $z=1.6\text{m}$: a) Nubes de puntos en 3D, b) Proyección sobre el plano XY y, c) Proyección sobre el plano XZ.

5 CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado la configuración de tres SLPUs, junto con tres receptores acoplados para permitir el posicionamiento de nodos en entornos 3D con un alto grado de disponibilidad del sistema. Además de describirse el procesamiento completo

necesario para obtener la posición (incluyendo la fusión de datos cuando dicha posición se obtiene mediante medidas alternativas independientes). Se ha presentado un ejemplo simulado de fusión de datos y resultados reales tomados de una instalación de tres SLPUs. Con el algoritmo de fusión se consigue mejorar significativamente las prestaciones del sistema en términos de precisión final, corrigiéndose los grandes errores típicos de la coordenada perpendicular del sistema SLPU diseñado.

El sistema está ahora en proceso de ser validado con un dron real para lo que se limita la velocidad del mismo en el entorno de localización por debajo de 1m/s (así se evita que tenga influencia el efecto Doppler y que durante una ventana de adquisición (unos 100ms) el dron se haya desplazado una distancia excesiva).

Agradecimientos

Este trabajo se ha realizado gracias al apoyo de la Universidad de Alcalá (Echo-Drone3D, CCGP2017-EXP/050 y LocActiv, CCGP2017-EXP/053), y el Ministerio de Economía y Competitividad (TARSIOUS, TIN2015-71564-c4-1-R).

English summary

ADAPTATION OF AN ULTRASONIC POSITIONING SYSTEM FOR LOW-SPEED DRONE OPERATION IN CONFINED AREAS

Abstract

Nowadays there are drones developed to be capable of carrying out inspection tasks in large factories or product searches in high-rise warehouses. These systems need 3D positioning systems with sufficient precision to allow an absolute positioning and navigating in such indoor operating environments. Ultrasonic systems offer advantages over other systems in terms of accuracy, low-cost and signal confinement to the work area. This paper describes the use of Ultrasonic Local Positioning Systems (ULPS) in 3D spaces. The challenges to be overcome, compared to the 2D case, are related to the number of systems to be used to cover the 3D volume with homogeneous precision and the location of the receivers to guarantee the reception of signals that can come from very different angles. It describes the structure of the system, its operation and actual data obtained from a first prototype.

Keywords: 3D positioning, ultrasounds, indoor navigation of drones, data fusion.

Referencias

- [1] C. Stöcker, R. Bennett, F. Nex, M. Gerke, and J. Zevenbergen, "Review of the Current State of UAV Regulations", *Remote Sensing*, vol. 9, no. 12, p. 459, May 2017.
- [2] I. Gonzalez-Hernandez, S. Salazar, R. Lopez, and R. Lozano, "Altitude control improvement for a Quadrotor UAV using integral action in a sliding-mode controller", 2016 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), Jun. 2016.
- [3] A. Nemra and N. Aouf, "Robust INS/GPS Sensor Fusion for UAV Localization Using SDRE Nonlinear Filtering", *IEEE Sensors Journal*, vol. 10, no. 4, pp. 789–798, Apr. 2010.
- [4] X. Chao-jian and G. San-xue, "Image Target Identification of UAV Based on SIFT", *Procedia Engineering*, vol. 15, pp. 3205–3209, 2011.
- [5] J. Tiemann, F. Schweikowski, and C. Wietfeld, "Design of an UWB indoor-positioning system for UAV navigation in GNSS-denied environments," 2015 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), 2015.
- [6] A. Benini, A. Mancini, and S. Longhi, "An IMU/UWB/Vision-based Extended Kalman Filter for Mini-UAV Localization in Indoor Environment using 802.15.4a Wireless Sensor Network," *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, vol. 70, no. 1–4, pp. 461–476, 2012.
- [7] D. Ruiz, E. Garcia, J. Urena, D. de Diego, D. Gualda, and J. C. Garcia, "Extensive Ultrasonic Local Positioning System for navigating with mobile robots", 2013 10th Workshop on Positioning, Navigation and Communication (WPNC), 2013.
- [8] J. Ureña, J. M. Villadangos, D. Gualda, M. C. Pérez, A. Hernández, J. J. García, A. Jiménez, J. C. García, J. F. Arango, E. Díaz. "Technical Description of Locate-US: an Ultrasonic Local Positioning System based on Encoded Beacons", 2016 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN 2016), pp. 1-4, Alcalá de Henares, Spain, October 2016.
- [9] D. Gualda, J. Ureña, M. C. Pérez, H. Posso, S. Bachiller, R. Nieto. "Estimación de la Posición 3D en Interiores de un UAV utilizando Sistemas de Posicionamiento Ultrasonico". SAAEI 2018, Barcelona, Julio 2018, Aceptado.
- [10] K. Mannay, J. Urena, A. Hernandez, D. Gualda, Jose M. Villadangos, "Analysis of performance of ultrasonic local positioning systems for 3D spaces", 2017 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN 2017), September 2017, Sapporo, Japan.
- [11] Jesus Ureña, Álvaro Hernández, Juan Jesús García, José Manuel Villadangos, M. del Carmen Pérez, David Gualda, Fernando Álvarez, Teodoro Aguilera. "Acoustic Local Positioning With Encoded Emission Beacons". *Proceedings of IEEE*, Vol. 106, Issue:6 Pages: 1042-1062, June 2018.
- [12] Khaoula Mannay, Jesus Ureña, Álvaro Hernández, Mohsen Machhout. "Performance of Location and Positioning Systems: a 3D-Ultrasonic System Case". *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal (ASTESJ)*. Volume 3, Issue 2, Page No 106-118, 2018.



© 2018 by the authors.

Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC-BY-NC 3.0 license.

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>.