

Posicionamiento en Interiores de Alta Precisión Utilizando Tecnología Infrarroja

D. Rodríguez-Navarro, J. L. Lázaro-Galilea, A. De-La-Llana-Calvo, A. Gardel-Vicente, I. Bravo-Muñoz, F. Espinosa-Zapata
Departamento de Electrónica, Universidad de Alcalá, Madrid, España
{jose.lazaro, david.rodruiguez, alvaro.llana, alfredo.gardel, ignacio.bravo, felipe.espinosa}@uah.es

Abstract— El trabajo presenta los resultados del sistema de posicionamiento en interiores basado en infrarrojo desarrollado por nuestro grupo de investigación. Dado que uno de los principales problemas que se presentan en todas las tecnologías para posicionamiento en interiores es el de los multicaminos (MP) debidos a reflexiones en objetos y paredes, en una primera fase del trabajo presentamos los estudios realizados para analizar cómo afectan en función de las diferentes técnicas de medida utilizadas y cómo se pueden mitigar. A continuación, se presenta nuestra propuesta tecnológica para el desarrollo de un sistema de posicionamiento basado en infrarrojos (IR), seguido de los resultados obtenidos. Como se muestra, los errores de posicionamiento con un solo detector, trabajando a la vez en la determinación de múltiples agentes, es inferior al centímetro.

Index Terms—Posicionamiento en interiores, espacios multiagente, señal infrarroja, PSD, compensación de multicamino.

I. INTRODUCTION

EL problema de la localización en interiores ha sido objeto de intensos estudios e investigaciones en los últimos años. Hasta el momento, se han desarrollado con éxito propuestas para dar soluciones a aplicaciones específicas, con diferentes grados de precisión y complejidad. Sin embargo, sigue existiendo el reto de lograr la implementación y aplicabilidad obtenida para los sistemas de posicionamiento y navegación en exteriores.

Desde hace tiempo se acepta que, en muchas actividades de interior, tanto profesionales como privadas, conocer la posición del usuario aporta un valor añadido clave que proporciona un nuevo conjunto de capacidades para una determinada aplicación específica.

En el posicionamiento interior, donde el entorno es complejo (paredes intermedias, objetos, etc.), no prevalece ninguna tecnología como lo hace el sistema de posicionamiento global (GPS) en los sistemas de posicionamiento en exteriores. A veces el entorno de uso restringe el diseño a una tecnología particular: la precisión, el alcance o la escalabilidad [1, 2].

La presencia de Sistemas de Posicionamiento en Interiores (IPS) en la vida cotidiana es un hecho [3, 4]. Actualmente se está realizando un gran esfuerzo de investigación para desarrollar IPS basados en la fusión de varias tecnologías, ya que los datos de localización permiten numerosas aplicaciones.

Entre las aplicaciones más populares se encuentran: seguimiento de peatones [5]; servicios basados en la localización [6] en centros públicos y comerciales [4]; servicios de asistencia en las actividades diarias (Ambient Assistant Living (AAL) como localización y seguimiento de usuarios en centros geriátricos y hospitalarios [7]; localización y seguimiento de agentes de intervención de emergencia [8]; localización y guiado de vehículos autónomos en entornos industriales y aparcamientos automatizados [9]; seguimiento de mercancías de alto valor durante el almacenamiento; información adicional para los usuarios a través de la realidad aumentada [10]; Internet de las cosas (IoT) [11], etc.

En los últimos años se han propuesto muchos IPS de diferentes tecnologías como son los sistemas basados en visión computacional [12], ondas de radio Ultra Wide Band (UWB) [13] identificación por radiofrecuencia (RFID) [14], ultrasonidos [15], señales ópticas [16] y, más recientemente, nuevos enfoques basados en las redes de comunicaciones de unidades de medida inerciales (IMU) [17], etc. Algunos de ellos, como los basados en infrarrojos y ultrasonidos, son soluciones de bajo coste, fáciles de implementar con una localización de alta precisión y que dan paso a una amplia gama de aplicaciones. En la actualidad, existen muchos requisitos a tener en cuenta a la hora de elegir la tecnología adecuada para una aplicación IPS. Como se ha discutido en [1], algunos parámetros de decisión son: exactitud, precisión, área de cobertura, infraestructura requerida, madurez del mercado, privacidad, tasa de actualización, interfaz de usuario, integridad del sistema, robustez, disponibilidad, escalabilidad, número de usuarios, grado de intrusión, cobertura legal, etc.

Los avances en las tecnologías de materiales, electrónica y comunicación facilitan la mejora continua en el rendimiento de los sistemas sensoriales. La elección de los sensores depende claramente de la aplicación y de las necesidades del usuario. La continua evolución de IPS se puede observar a través de varios trabajos dirigidos a revisar el estado del arte [1, 2].

Independientemente de la tecnología utilizada, los problemas más comunes a los que se enfrenta un IPS están relacionados con la calidad de la señal, la estrategia de despliegue de antenas, receptores, transmisores, etc., las situaciones sin visión directa (LOS), la localización dinámica, la interferencia de otros dispositivos y, de forma muy particular, los efectos de MP [18] que pueden contribuir significativamente al error del

posicionamiento en muchos entornos interiores, especialmente en tecnologías diseñadas para obtener posicionamiento de alta precisión [19].

En este trabajo se evalúa el efecto MP en dos técnicas IPS diferentes para determinar la posición (distancia) de un emisor óptico hasta un detector, basándose ambas en el mismo sensor, que en este caso ha sido un PSD (Position Sensitive Device). La primera realiza las medidas determinando el ángulo de llegada (AoA - Angle of Arrival) y la segunda la fase de llegada (PoA - Phase of Arrival). Para determinar el efecto del MP en diferentes situaciones, ambos modelos se evaluarán en las mismas condiciones. La señal recibida se obtiene a partir de la composición de la señal directa LOS y de las componentes MP (NoLOS) que llegan a un receptor, donde la potencia y el retardo de cada componente se calculan utilizando ecuaciones radiométricas y geométricas [20]. Posteriormente se selecciona una de ellas, se analiza y prueba empíricamente los resultados obtenidos al llevar a cabo un IPS basado en ella.

II. ESTUDIO DEL EFECTO DE MP

A. Estudio de los efectos de MP en las técnicas AoA y PoA usando señal infrarroja

En este subapartado nos vamos a limitar a mostrar los efectos que los MPs provocan en la determinación de la posición trabajando con un detector PSD y señales infrarrojas. Para ello se utilizarán los mismos modelos que posteriormente se expondrán en el apartado II-B. En ambos casos, trabajando con PoA y AoA, la señal llega desde un emisor modulado hasta un detector compuesto por un PSD y una óptica que recoge la señal por camino directo y por MP. Para los análisis se han considerado sistemas ópticos con tres diferentes distancias focales. Estos ensayos han consistido en la acumulación de señal recibida en el sensor a partir de un modelo de detector basado en el modelo *pinhole* (ampliamente conocido) y el modelo discreto de reflexiones de señal óptica de [20], considerando rebotes de hasta 3º orden.

Para los análisis preliminares se va a considerar un espacio cúbico cerrado de 5x5 metros x 4 de altura. En la figura 1 se muestran las posiciones en que se coloca el emisor en el plano de suelo. El detector se coloca en el plano de techo, paralelo al suelo y a 4 metros de altura, en las posiciones indicadas en la figura 2.

Analizadas las posiciones indicadas en la figura 2, por simetría, se puede obtener el resultado para una rejilla regular en todo el espacio.

En las condiciones indicadas, los resultados obtenidos para diferentes distancias focales de la lente acoplada al PSD de 4.5, 7.5 y 16 mm son los mostrados en la figura 3. Como se puede advertir, en todos los casos las medidas realizadas con AoA presentan menores efectos de MP que las realizadas con PoA, y ello es debido a que dada la geometría del fotodiodo utilizado (PSD) los efectos de los MPs se compensan parcialmente al ser recibido por los 4 canales del sensor y luego restados para determinar la posición.

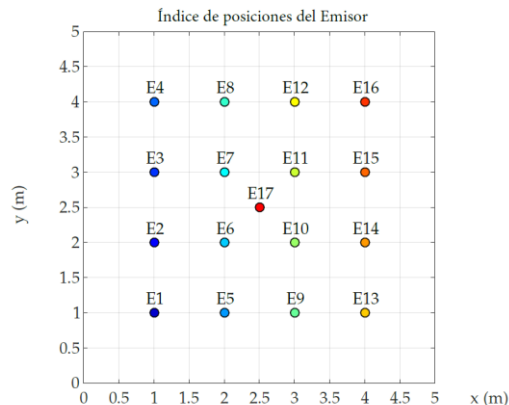


Fig. 1. Posiciones ocupadas por el emisor para las pruebas

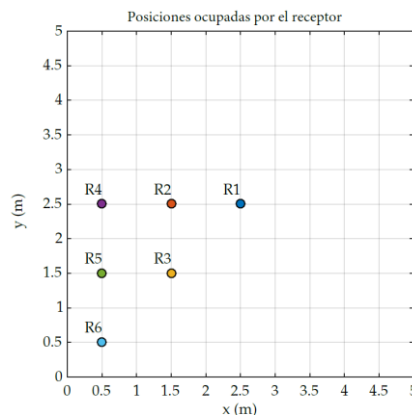


Fig. 2. Posiciones del detector para los diferentes ensayos

Otro efecto que se puede observar claramente es que al utilizar una lente con focal más grande, se limita el campo de visión, y por tanto se recogen menos efectos de MP, aunque ello también reduce el área de cobertura del sensor. Estos efectos se notan ampliamente cuando al aumentar la focal de la lente se consigue no recoger haces rebotados en las paredes, quedando únicamente las reflexiones en techo y suelo

B. Modelo del receptor

En primer lugar, indicar que el emisor para este trabajo se considera puntual con una emisión lambertiana. En los ensayos prácticos se hace uso de un IRED con potencia de 0,8W aproximadamente.

El receptor que vamos a utilizar en este trabajo es un fotodiodo PSD *pin cushion* con 4 ánodos, al que se va a adherir una lente que amplía el área efectiva de recepción (amplificación óptica) hará que la imagen puntual del emisor impacte en un punto determinado del PSD generando diferentes corrientes por los 4 ánodos en función de la posición del impacto. El circuito equivalente del detector es el mostrado en la figura 4, y las expresiones para calcular el punto de impacto de la imagen del IRED en su superficie son las mostradas en las expresiones (1) y (2). Estas expresiones son proporcionadas por los fabricantes de PSD y asumen que el comportamiento de los diferentes canales del PSD y de la electrónica e amplificación que se les asocia son ideales e iguales. Por tanto, se deberán calibrar las diferencias de comportamiento o desbalances entre canales [21].

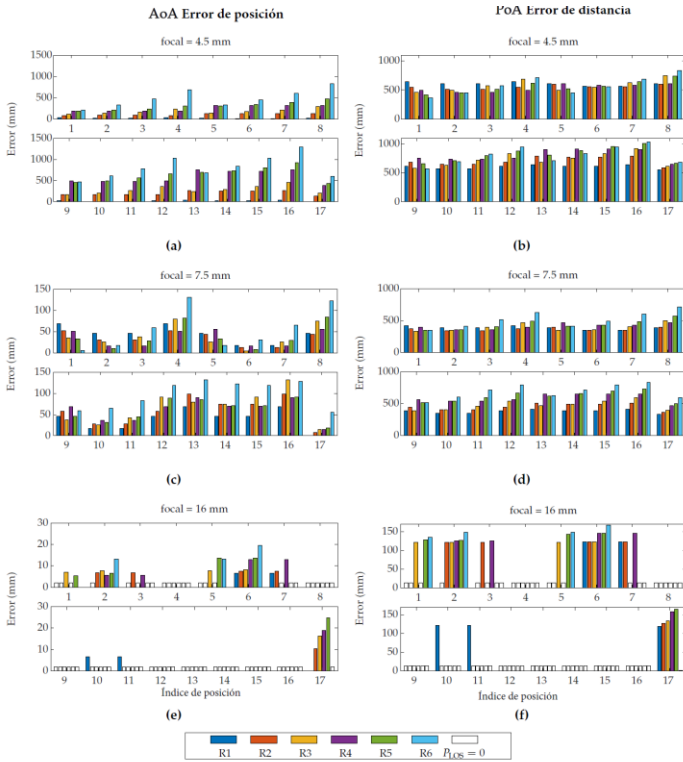


Fig. 3. Errores por MP para las diferentes posiciones de emisor y receptor con las técnicas de AoA y PoA

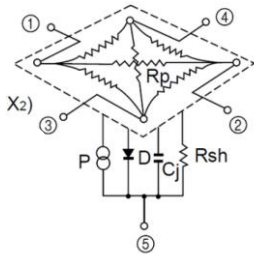


Fig. 4. Modelo equivalente del detector. (imagen cortesía de Hamamatsu obtenida de “PSD technical information”)

$$x = \frac{L_X (I_{X2} + I_{Y1}) - (I_{X1} + I_{Y2})}{2 (I_{X1} + I_{X2} + I_{Y1} + I_{Y2})} \quad (1)$$

$$y = \frac{L_Y (I_{X2} + I_{Y2}) - (I_{X1} + I_{Y1})}{2 (I_{X1} + I_{X2} + I_{Y1} + I_{Y2})} \quad (2)$$

En las expresiones (1) y (2) I_{X1} , I_{X2} , I_{Y1} , y I_{Y2} son las corrientes eléctricas de los pines de ánodo del sensor PSD y L_X y L_Y son las dimensiones del sensor. El modelo completo del Sistema sensor, y que se aplicará también para la terminación de la posición del emisor, se basa en el modelo *pinhole*. En este caso se trata de un sensor analógico que posee lo que sería el equivalente a un único pixel, pero que no está en una posición fija, sino que tiene una posición en el plano sensor de resolución continua.

Así las cosas, si planteamos como hipótesis que el sistema sensor está compuesto por el fotodiodo y una lente que enfoca una imagen en él, el modelo del sistema puede ser representado como se muestra en la figura 5, que nos permitirá saber la energía recibida y el punto de impacto del haz de luz en el sensor. (X_W, Y_W, Z_W) representa la referencia del espacio de movimiento del emisor y (X_R, Y_R, Z_R) el sistema de referencia del sistema sensor. El punto de impacto ha sido representado como (x, y) , la distancia focal de la óptica como f y el centro óptico como (C_x, C_y)

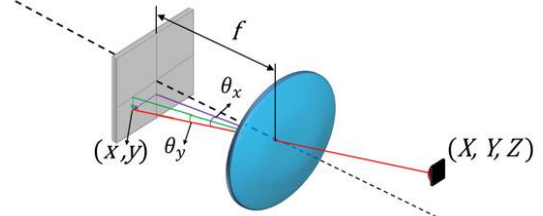


Fig. 5. Conjunto PSD lente y esquema de detección de ángulos

El sistema matemático que relaciona los dos sistemas de referencia es el mostrado en (3) y las matrices de traslación que relacionan los dos sistemas de referencia son R y T respectivamente. Así, el sistema matemático general del modelo se puede expresar como (4). Estas expresiones son una adaptación al sensor continuo de “un solo pixel” de las expresiones utilizadas en cámaras de visión.

$$\begin{pmatrix} X_R \\ Y_R \\ Z_R \end{pmatrix} = R \begin{pmatrix} X_W \\ Y_W \\ Z_W \end{pmatrix} + T \quad (3)$$

$$\begin{pmatrix} sx \\ sy \\ s \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} f & 0 & C_x \\ 0 & f & C_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}}_A \underbrace{\begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & T_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & T_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & T_z \end{pmatrix}}_{RT} \begin{pmatrix} X_W \\ Y_W \\ Z_W \\ 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

Donde s representa el factor de escala, A la matriz de parámetros intrínsecos del sistema sensor y RT representa los parámetros extrínsecos que dependen de la geometría del entorno.

C. Determinación de la posición del emisor

Definido el modelo del detector, cada emisor generará un haz de luz que impactará en un punto del detector de coordenadas (x_i, y_i) , que se obtendrán del modelo descrito. A partir de las mismas, y según el diagrama de la figura 5 se puede deducir el ángulo de incidencia de dichos haces (y su descomposición en (θ_x, θ_y)) según las expresiones (5) y (6):

$$\theta_x = \tan^{-1} \left(\frac{x}{f} \right) \quad (5)$$

$$\theta_y = \tan^{-1} \left(\frac{y}{f} \right) \quad (6)$$

A partir de estos ángulos el método para determinar las posiciones móviles utilizando un solo receptor y suponiendo que el robot móvil se mueve a lo largo de un plano, se obtiene la

intersección del plano y la dirección del ángulo, lo que proporcionará la posición 3D. Para ello es necesario conocer o determinar la geometría del plano con el receptor (trabajo que no es objetivo de este artículo y que se ha realizado previo a las medidas obtenidas en la sección de resultados).

$$AX+BY+CZ+D=0 \quad (7)$$

Una vez que se conoce el plano de desplazamiento del emisor, el ángulo de llegada AoA y el punto de impacto en el sensor PSD, se puede deducir la posición, ya que las ecuaciones para la dirección de llegada de la señal al receptor son:

$$X_i = \tan \theta_{x_i} Z_i \quad (8)$$

$$Y_i = \tan \theta_{y_i} Z_i, \quad (9)$$

siendo Z_i

$$Z_i = -D / (A \tan \theta_{x_i} + B \tan \theta_{y_i} + C).$$

III. RESULTADOS

A. Medida del error debido a MPs en el IPS propuesto

En esta primera parte de resultados, vamos a estimar los errores que se producirían en la medida a partir de un sistema compuesto por un PSD de Hamamatsu (S5991-01), al que se le acoplan dos lentes diferentes, una con focal de 7,5 mm y otra de 16 mm. En ambos casos, como se ha comentado, se procederá a medir mediante AoA siendo el emisor (agente del que se debe detectar la posición) un IRED de longitud de onda 910nm y 1W de potencia emitida. El entorno en el que se desean calcular dichos efectos es un pasillo de ladrillo rojo barnizado de 3.5 m de anchura y 4 metros de altura. Se considera que el detector está localizado en el centro del techo y el emisor se coloca en el plano de suelo. En una primera aproximación los errores serán en un entorno emulado, aunque más adelante se realizarán pruebas empíricas. En las figuras 6 y 7 se muestran los errores que se cometerían con una lente de 7,5 mm de focal y en las figuras 8 y 9 con una lente de 16 mm. Como se puede observar los errores con 16 mm son mucho menores, pero en contrapartida la cobertura del sistema no llega a abarcar todo el ancho del pasillo.

B. Medidas empíricas del posicionamiento del emisor

Para realizar las pruebas empíricas utilizamos el sensor Hamamatsu S5991-01 y una lente de 1 pulgada de diámetro, 16 mm \pm 8% de longitud focal y un emisor de infrarrojos Osram con un patrón Lambertiano y tiempos de subida y bajada reducidos. Las pruebas, en un escenario real, se han realizado utilizando un sistema de desarrollo propio, compuesto por dos placas. La primera ha sido totalmente diseñada por nuestro equipo de investigación (Figura 10a) para incluir los aspectos críticos y sensibles requeridos por el sistema propuesto, conectada a una segunda tarjeta con un SoC (system-on-chip), que dispone de un área lógica para hardware programable

(MicroZed™ basada en el Xilinx Zynq®-7000) (Figura 8b). Esta estructura flexible hace posible el desarrollo de futuros complementos para un mejor uso de los datos de medida de posicionamiento, a la vez que facilita el diseño de una aplicación de mayor nivel sobre el sistema de procesamiento estándar ARM incluido en el Zynq.

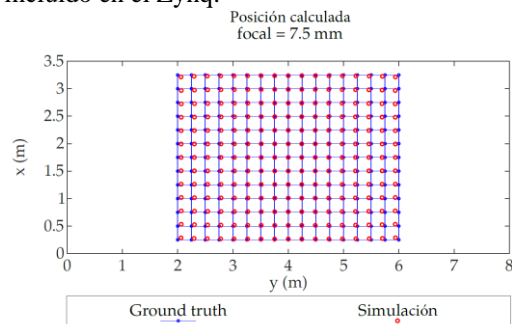


Fig. 6. Error debido a multicammino con focal de 7,5 mm. Ground truth y puntos medidos

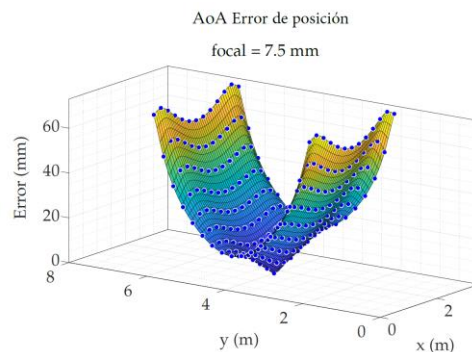


Fig. 7. Representación del error en 3-D con focal de 7,5 mm

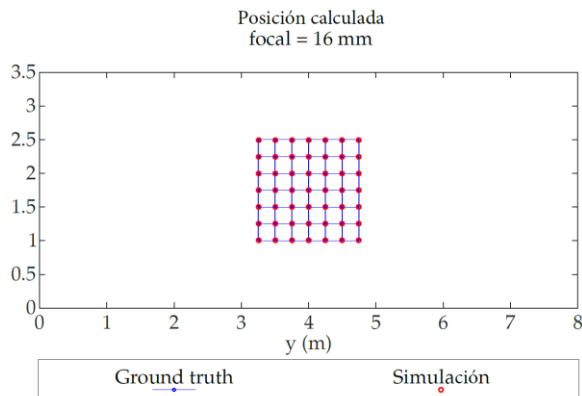


Fig. 8. Representación del error en 3-D con focal de 16 mm

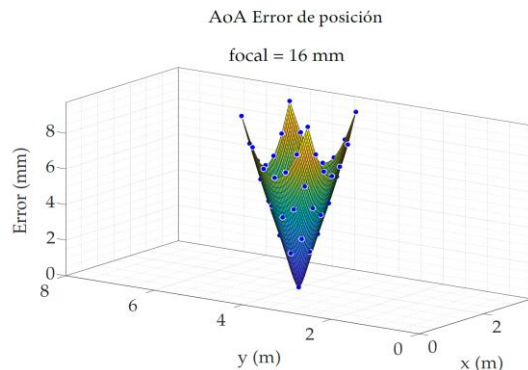


Fig. 9. Representación del error en 3-D con focal de 16 mm

La Figura 10c muestra la conexión de las placas. En la Fi-

gura 10d, presentamos el sistema final cerrado, listo para ser utilizado en escenarios reales.

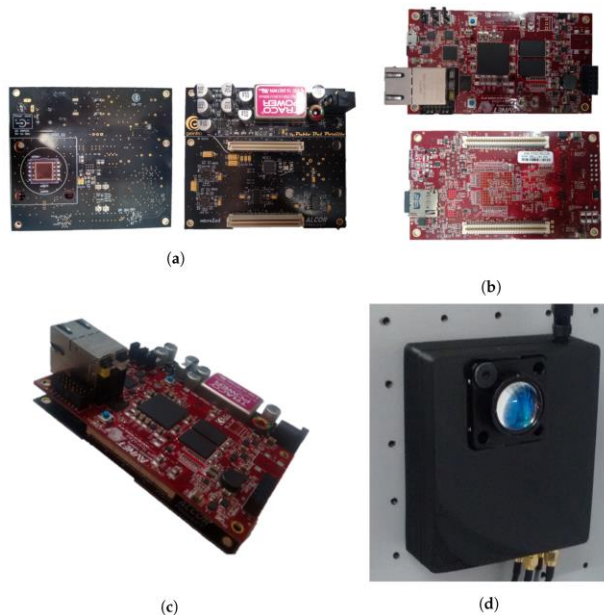


Fig. 10. Prototipo del sistema detector

Para las primeras pruebas, se ha utilizado una plataforma de movimiento mecánica que describe caminos circulares y se ha colocado en el centro del pasillo descrito en el apartado IIIA (3,5 m de anchura y 4 de altura). Con dicha plataforma se han descrito varios recorridos circulares, de los cuales se muestran 3 en la Figura 11 y su ampliación en la figura 12. En ellas se puede observar el *Ground truth* en línea discontinua y las medidas realizadas en línea continua. Hay que destacar que con nuestro sistema se pueden llegar a realizar 1000 medidas por segundo.

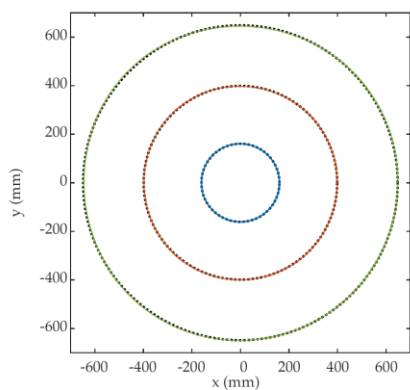


Fig. 11. Ground truth y medidas realizadas con la plataforma mecánica

En la tabla 1 se muestran los resultados numéricos de la prueba descrita

Tabla 1. Resultados empíricos de la prueba mediante AoA

Ground Truth Radio (mm)	Radio medido (mm)	Ajuste al círculo (mm)		
		STD	RMSE	Error Max
650 ± 2	648.23	0.10	0.05	1.88
400 ± 2	398.91	0.11	0.03	2.29
160 ± 2	159.87	0.08	0.02	1.21

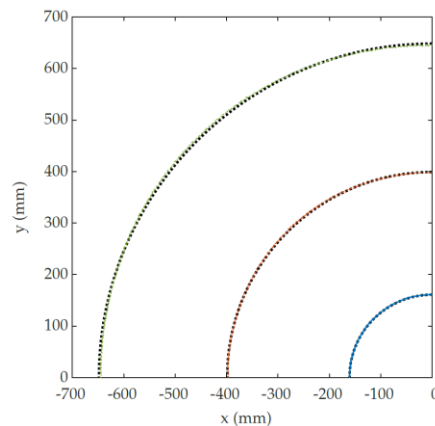


Fig. 12. Ampliación de la figura 11

Para comprobar los errores debidos a efectos de MP de forma empírica, se han provocado MPs colocando una “pared” de alta reflexión junto a la plataforma de movimiento circular según se muestra en el esquema de la Figura 12. Se han simulado los efectos con el modelo utilizado en el apartado IIA y se han realizado las medidas empíricas con el sistema propuesto obteniendo los resultados mostrados en la figura 13.

Es importante indicar, como información adicional, que las pruebas se han realizado con el detector colocado a 4 metros de altura, aproximadamente, y que se han tomado muestras durante 10 ms (100 medidas por segundo). El área de cobertura es dependiente de la altura del detector y de la focal de la lente utilizada. Si la altura se hace mayor o la focal más pequeña, el área de cobertura se hace más grande reduciendo el SNR de la señal; pero también se puede compensar aumentando el tiempo de toma de muestras.

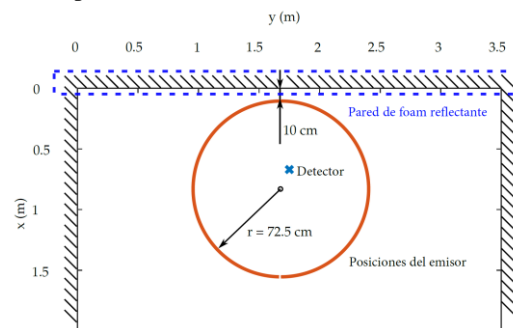


Fig. 13. Esquema de la configuración realizada para MPs conocidos

IV. CONCLUSIONES

En este trabajo hemos caracterizado los errores causados por los efectos del MP trabajando con señales IR tanto cuando se trabaja con AoA como con PoA.

Se ha encontrado, como indicaba nuestra hipótesis, que trabajando en las mismas condiciones, mediante AoA y PSD los diferentes MPs compensan sus efectos. Además, los errores varían mucho con la posición del detector, lo que indica que se pueden elegir estrategias de despliegue de sensores para mitigar los efectos de MPs. Sin embargo, en la técnica PoA, los errores de desplazamiento de fase no se compensan y no se equilibran con el mismo factor. Además, cabe señalar que los

efectos de la MP sobre el PoA son bastante homogéneos, independientemente de la posición y orientación del receptor.

Otro aspecto importante es que se puede modificar la distancia focal del IPS propuesto para evitar efectos de MP.

Respecto de las pruebas para validar la precisión del método y sistema propuestos, han demostrado que se puede medir con gran precisión, además de realizar centenas de medidas por segundo (incluso detectando múltiples agentes)

Las pruebas empíricas realizadas han validado los resultados esperados de las emulaciones y demostrado que los errores de posicionamiento en un pasillo están en el rango de los milímetros.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación se ha realizado gracias al apoyo del Programa de Investigación de la Universidad de Alcalá mediante los proyectos Ref:CCG2018/EXP-009 y Ref:UAH-GP2018-3; y al Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades del Gobierno de España mediante la Red REPNIN+ (Ref.: TEC2017-90808-REDT).

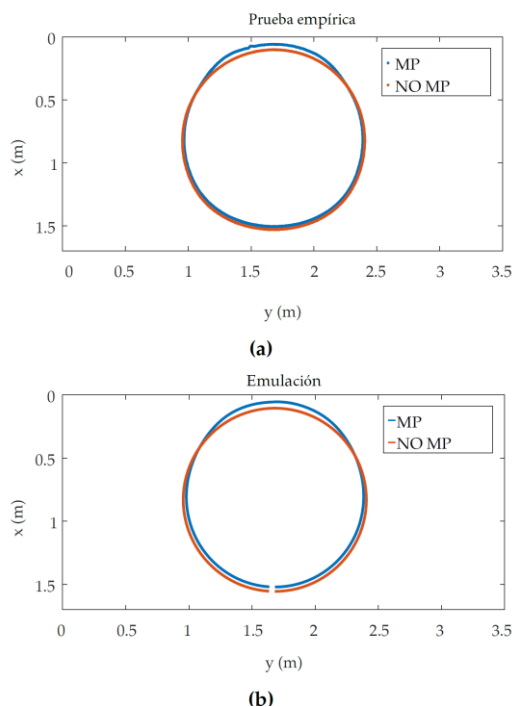


Fig. 13. Comprobación de los efectos de multicamino. a) pruebas empíricas; b) emulación

REFERENCIAS

- Mautz, R. Indoor Positioning Technologies. Ph.D. Thesis, ETH Zurich, Department of Civil, Environmental and Geomatic Engineering, Institute of Geodesy and Photogrammetry, Zürich, Switzerland, 2012. [Google Scholar]
- Brena, R.F.; García-Vázquez, J.P.; Galván-Tejada, C.E.; Muñoz-Rodríguez, D.; Vargas-Rosales, C.; Fangmeyer, J. Evolution of indoor positioning technologies: A survey. *J. Sens.* **2017**, 2017. [Google Scholar] [CrossRef]
- Kolodziej, K.W.; Hjelm, J. Local Positioning Systems: LBS Applications and Services; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2006. [Google Scholar]

- Gu, X.; Ekambaran, V.K.; Ramani, A.; Yang, J.H.; Di Prizio, G.M.; Jones, C. Systems and Methods for High-Precision Indoor Positioning, Navigation and Shopping Behavior Profiling. U.S. Patent 8,930,134, 6 January 2015. [Google Scholar]
- Harle, R. A Survey of Indoor Inertial Positioning Systems for Pedestrians. *IEEE Commun. Surv. Tutor.* **2013**, *15*, 1281–1293. [Google Scholar] [CrossRef]
- Ahson, S.A.; Ilyas, M. Location-Based Services Handbook: Applications, Technologies, and Security; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2010. [Google Scholar]
- Santoso, F.; Redmond, S.J. Indoor location-aware medical systems for smart homecare and telehealth monitoring: State-of-the-art. *Physiol. Meas.* **2015**, *36*, R53–R87. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]
- Ferreira, A.F.G.; Fernandes, D.M.A.; Catarino, A.P.; Monteiro, J.L. Localization and Positioning Systems for Emergency Responders: A Survey. *IEEE Commun. Surv. Tutor.* **2017**, *19*, 2836–2870. [Google Scholar] [CrossRef]
- Peng, Y.; Niu, X.; Tang, J.; Mao, D.; Qian, C. Fast Signals of Opportunity Fingerprint Database Maintenance with Autonomous Unmanned Ground Vehicle for Indoor Positioning. *Sensors* **2018**, *18*, 419. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]
- Gupta, A.; Bhatia, K.; Gupta, K.; Vardhan, M. A Comparative Study of Marker-Based and Marker-Less Indoor Navigation in Augmented Reality. *Int. Res. J. Eng. Technol. (IRJET)* **2018**, *5*, 1–4. [Google Scholar]
- Khelifi, F.; Bradai, A.; Benslimane, A.; Rawat, P.; Atri, M. A Survey of Localization Systems in Internet of Things. *Mob. Netw. Appl.* **2018**, 1–25. [Google Scholar] [CrossRef]
- Mautz, R.; Tilch, S. Survey of optical indoor positioning systems. In Proceedings of the 2011 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation, Guimarães, Portugal, 21–23 September 2011; pp. 1–7. [Google Scholar] [CrossRef]
- Ruiz, A.R.J.; Granja, F.S. Comparing Ubisense, BeSpoon, and DecaWave UWB Location Systems: Indoor Performance Analysis. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **2017**, *66*, 2106–2117. [Google Scholar] [CrossRef]
- Liu, M.; Wang, H.; Yang, Y.; Zhang, Y.; Ma, L.; Wang, N. RFID 3-D Indoor Localization for Tag and Tag-Free Target Based on Interference. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **2018**, 1–15. [Google Scholar] [CrossRef]
- Priyantha, N.B. The Cricket Indoor Location System. Ph.D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, USA, 2005. [Google Scholar]
- Rodríguez-Navarro, D.; Lázaro-Galilea, J.L.; De-La-Llana-Calvo, Á.; Bravo-Muñoz, I.; Gardel-Vicente, A.; Tsirigotis, G.; Iglesias-Miguel, J. Indoor Positioning System Based on a PSD Detector, Precise Positioning of Agents in Motion Using AoA Techniques. *Sensors* **2017**, *17*, 2124. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]
- Kuang, J.; Niu, X.; Chen, X. Robust Pedestrian Dead Reckoning Based on MEMS-IMU for Smartphones. *Sensors* **2018**, *18*, 1391. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]
- Dragūnas, K. Indoor multipath mitigation. In Proceedings of the 2010 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation, Zurich, Switzerland, 15–17 September 2010; pp. 1–7. [Google Scholar] [CrossRef]
- Gu, W.; Aminikashani, M.; Deng, P.; Kavehrad, M. Impact of Multipath Reflections on the Performance of Indoor Visible Light Positioning Systems. *J. Lightw. Technol.* **2016**, *34*, 2578–2587. [Google Scholar] [CrossRef]
- De-La-Llana-Calvo, Á.; Lázaro-Galilea, J.L.; Gardel-Vicente, A.; Rodríguez-Navarro, D.; Bravo Muñoz, I.; Tsirigotis, G.; Iglesias-Miguel, J. Modeling the Effect of Optical Signal Multipath. *Sensors* **2017**, *17*, 2038. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]
- Rodríguez-Navarro, D.; Lázaro-Galilea, J.L.; Bravo-Muñoz, I.; Gardel-Vicente, A.; Tsirigotis, G. Analysis and Calibration of Sources of Electronic Error in PSD Sensor Response. *Sensors* **2016**, *16*, 619.