

# Sistema de Posicionamiento en Interiores Basado en Iluminación LED y Sensor PSD

Álvaro De La Llana Calvo, José Luis Lázaro Galilea, Alfredo Gardel Vicente,  
David Rodríguez Navarro, Ignacio Bravo Muñoz, Felipe Espinosa Zapata  
Departamento de Electrónica de la Universidad de Alcalá, Madrid, España  
{alvaro.llana, josel.lazaro, alfredo.gardel, david.rodriguez, ignacio.bravo, felipe.espinosa}@uah.es

**Resumen**— En este trabajo proponemos un sistema y un método para posicionamiento en interiores basado en la propia iluminación del entorno con dispositivos LEDs. La propuesta se basa en la modulación de la señal visible emitida, en frecuencias entre los 50 y 200 kHz y su detección sobre un fotodiodo PSD (Position Sensitive Detector). Se presenta una primera aproximación del modelo y de su implementación en los que se asume que el detector se desplaza sobre un plano (en este caso a distancias entre 1 y 3 metros de la fuente de luz) y se detecta su localización a partir de un punto de luz. La técnica para llevar a cabo el posicionamiento se basa en el ángulo de llegada de la señal luminosa (AoA). En el trabajo se han utilizado algoritmos genéticos para determinar los parámetros del modelo del detector (compuesto por un PSD y lente acoplada) y posteriormente se han realizado pruebas para determinar la precisión en el posicionamiento a 3 metros de distancia y sobre un área de cobertura de 3x3 m<sup>2</sup>. En el apartado de resultados se refleja el error medio en la detección de la posición. Como se puede observar, con bajo efecto de los multicaminos (MP) el error en posicionamiento está por debajo de 1 cm en el 80% de los puntos. Con la presencia de efectos fuertes de multicaminos los errores máximos en el posicionamiento no superan los 4,5 cm.

**Palabras clave**—Posicionamiento en interiores, Posicionamiento por iluminación LED -VLP-, ángulo de llegada -AoA-, Dispositivo sensor de posición -PSD-.

## I. INTRODUCCIÓN

EL artículo está relacionado con el desarrollo de un IPS (Indoor Positioning System) basado en señales emitidas desde las luminarias LED de los edificios, y sensores PSD. Dicho IPS se destinará a obtener la posición de agentes móviles en entornos interiores. En la actualidad son múltiples las técnicas y tecnologías utilizadas para el desarrollo de IPS, y presentan diferentes características de precisión y alcance. La utilización de una u otra va a depender de la aplicación fundamentalmente, siendo casi todas ellas complementarias. Como ejemplos de tecnologías de uso común se pueden mencionar las siguientes: infrarrojos, ultrasonido, video y radiofrecuencia.

La importancia actual de disponer de sistemas IPS es muy alta, ya que cada vez más se plantean aplicaciones que hacen uso de la información de posición en múltiples facetas de la vida cotidiana; 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 determinadas aplicaciones específicas como, por ejemplo, ofertar productos a clientes. Tal es así que la presencia de sistemas IPS en la vida cotidiana es más habitual de lo que somos capaces de percibir como ciudadanos [1]. Entre las aplicaciones más populares se encuentran: seguimiento de peatones [2], servicios basados en la localización [3] en centros públicos y comerciales [1], localización y seguimiento de usuarios en centros geriátricos y hospitalarios [4], localización y guiado de vehículos autónomos en entornos industriales y aparatos automatizados [5], etc.

En [6] se presenta una revisión de la evolución de las tecnologías para posicionamiento en interiores; en los últimos años se han propuesto muchos IPS basados en estas tecnologías como son los sistemas basados en visión por ordenador [7], ondas de radio Ultra Wide Band (UWB) [8], identificación por radiofrecuencia (RFID) [9], ultrasonidos [10], señales ópticas [11] y, más recientemente, nuevos enfoques basados en las redes de comunicaciones de unidades de medida inerciales (IMU) [12], etc.

Independientemente de la tecnología utilizada para detectar la posición de un agente móvil, los sistemas IPS se basan en estrategias como: tiempo de llegada/tiempo de vuelo (ToA/ToF) que mide el tiempo necesario para llegar desde la emisión de la señal hasta la recepción; tiempo de llegada diferencial (TDoA) que mide la diferencia entre los tiempos de llegada a diferentes receptores; ángulo de llegada (AoA) que mide los ángulos de llegada a cada receptor desde cada emisor; e intensidad de la señal recibida (RSS) que extrae la distancia entre el emisor y el receptor en función de la intensidad de la señal que llega a cada receptor.

En los sistemas basados en AoA, comúnmente utilizados en los sistemas de cámaras digitales, es posible obtener la posición utilizando geometría estereoscópica. Esta estrategia se aplica a los sensores PSD, como se indica en [13]. Una vez medidas las distancias y diferencias entre ellas, la intensidad de la señal y los ángulos de llegada, la posición del agente móvil puede determinarse mediante triangulación.

En los últimos años han crecido de forma exponencial los trabajos dedicados a posicionar en interiores a partir de la iluminación LED (*Visible Light Positioning*, como variante de *Visible Light Communication*). Además de trabajos sobre técnicas

de posicionamiento con esta tecnología, han aparecido también algunos que tratan de modelar las características del canal, que es necesario conocer para tener en cuenta efectos de la propagación de las señales. En [14] se presenta una revisión de trabajos dedicados a dicho modelado y en [15-18] algunos trabajos recientes específicos de dicho modelado. En [19, 20] se presentan trabajos sobre un aspecto muy importante en posicionamiento, como es caracterizar el efecto de los multicaminos de señal óptica.

En lo que se refiere a el estado del arte de propuestas concretas para posicionamiento VLP, en [21] encontramos el diseño de un protocolo para posicionamiento en interiores mediante LEDs. A continuación, se enumeran algunos de los trabajos más recientes que incluyen propuestas de posicionamiento VLP. Así, en [22] se muestra un método basado en la calibración del modelo de propagación. En [23] se presenta un trabajo que, además de luz, utiliza acelerómetros para detectar la ubicación del receptor; [24] combina acelerómetros con sensores de imagen. [25] tiene en cuenta un entorno ruidoso para el posicionamiento; [26, 27] presentan propuestas basadas en la utilización de cámaras de *Smartphone* para alcanzar precisión centimétrica.

En el trabajo presentado en [28] los autores combinan un receptor QADA (*quadrant angular diversity aperture*) con la cámara de un teléfono móvil, y estudian sus limitaciones prácticas. En [29] utilizan una modulación de la luz multinivel, para proponer un sistema de posicionamiento en interiores con precisión. En [30] se presentan diferentes resultados experimentales de posicionamiento mediante VLP utilizando un sistema basado en OFDMA.

En este trabajo proponemos un método para medir el AoA de la señal recibida desde los focos LED de iluminación, utilizando en el agente móvil un fotodiodo PSD. Para ello, dado que un sistema óptico está unido al PSD con un comportamiento no ideal, es necesario realizar una calibración geométrica para determinar los parámetros intrínsecos del sistema, lo que nos permite determinar con precisión el ángulo de llegada del haz. Además, va a ser necesario determinar el vector superficie del sensor respecto del plano de movimiento, y otros parámetros que se van a escribir en el modelo.

Posteriormente, estos parámetros se tendrán en cuenta para, a partir del ángulo de llegada del haz de luz al detector, determinar la posición del detector.

El artículo se ha estructurado en 4 secciones. En la siguiente sección II, se describe el sistema de posicionamiento, cuál es el esquema que se propone utilizar para realizar las medidas, el método de calibración requerido y ecuaciones para la obtención de la posición. En la sección III se describen los resultados obtenidos con un sistema real, primero viendo la plataforma utilizada para obtener las medidas, los valores reales de calibración de los parámetros y los resultados de posicionamiento. En la última sección IV, se enumeran una serie de conclusiones a las que se ha llegado con el presente trabajo.

## II. SISTEMA DE POSICIONAMIENTO

### A. Esquema del sistema

El esquema del sistema de posicionamiento propuesto se muestra en la figura Fig. 1. Los emisores LED se sitúan en el techo en posiciones conocidas y emiten una señal modulada que permite su identificación. Entre las distintas técnicas de modulación existentes, las más importantes y viables en el sistema propuesto serían las siguientes: FDMA – cada emisor emite una frecuencia distinta y el sensor PSD mediante filtros obtiene la señal de cada emisor; CDMA – cada emisor emite una señal codificada con una secuencia y el receptor mediante correlaciones extrae la información de cada emisor. El análisis de las tecnologías de modulación utilizadas está fuera del alcance de lo que se presenta en este trabajo.

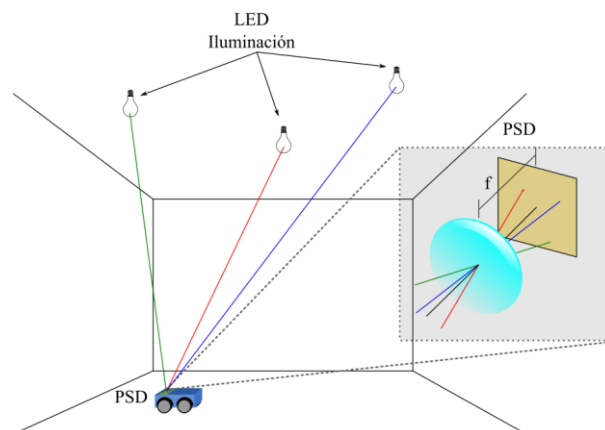


Fig. 1. Esquema del sistema de posicionamiento propuesto

El receptor usado en el sistema es un sensor PSD. La figura Fig. 2 muestra el modelo de un sensor PSD pin-cushion bidimensional. El fotodiodo PSD dispone de 4 ánodos y un cátodo común.

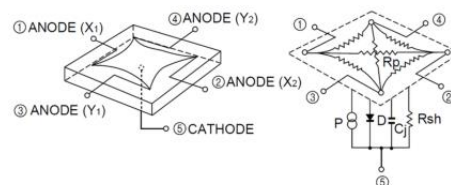


Fig. 2. Modelo de un sensor PSD pin-cushion bidimensional. (Cortesía de Hamamatsu)

El punto de impacto  $(x_i, y_i)$  de un haz de luz procedente del emisor se obtiene a partir de las corrientes de cada uno de los ánodos del sensor PSD según las siguientes ecuaciones:

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

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

donde  $I_{X1}$ ,  $I_{X2}$ ,  $I_{Y1}$  y  $I_{Y2}$  son las corrientes eléctricas de cada uno de los 4 ánodos del sensor PSD. Y las constantes  $L_X$  y  $L_Y$  son las dimensiones del sensor.

Para posicionar el PSD dentro del entorno se va a utilizar la

técnica AoA. En función del número de emisores que estén dentro del campo de visión (FoV) del set PSD+lente, se procederá de manera distinta. Asumiendo que los LEDs se sitúan todos en el mismo plano (en el techo) y sus posiciones son conocidas, existen diferentes casos:

- Solo hay un 1 emisor dentro del FoV. Se deben conocer las diferentes orientaciones del PSD, y el PSD debe moverse en un único plano paralelo al de los emisores. Si este plano no es paralelo (situación real) se deberán obtener (calibrar) la rotación y traslación entre ellos.
- Hay 2 emisores dentro del FoV. El sensor PSD se debe mover en planos paralelos al de los emisores o se deberán obtener sus situaciones relativas. Se conocen 2 de los 3 ángulos que definen la orientación del PSD, ya que el tercer ángulo, que define la rotación del PSD sobre su vector superficie, así como la separación entre los planos de movimientos y de los emisores se pueden obtener.
- Hay 3 emisores o más. Se puede obtener la posición 3D del PSD junto con su orientación.

En este trabajo se centra el estudio en el primer caso donde únicamente hay un solo emisor dentro del FoV del receptor.

Para posicionar el agente móvil dentro de un entorno, es decir conocer sus coordenadas en el mundo real  $(X_r, Y_r, Z_r)$ , se parte de las siguientes hipótesis:

- El PSD se mueve en un plano, manteniendo siempre la misma orientación.
- El vector normal de la superficie del PSD no es paralelo al vector normal del plano de movimiento. Dicha diferencia de orientación se define con los ángulos de Euler  $\alpha, \beta, \gamma$ . A partir de estos ángulos se obtiene la matriz R de rotación entre uno y otro plano.
- Los parámetros distancia focal  $f$  y centro de proyección perspectiva del PSD+lente  $(C_x, C_y)$  son desconocidos.
- El emisor (LED) es un foco puntual.
- No se conoce la posición precisa del emisor en el entorno  $(X_e, Y_e, Z_e)$

Para modelar el conjunto PSD más lente se va a usar el modelo *pinhole*. En la figura Fig. 3 se muestra el sistema para el modelo del PSD y la lente acoplada al mismo.

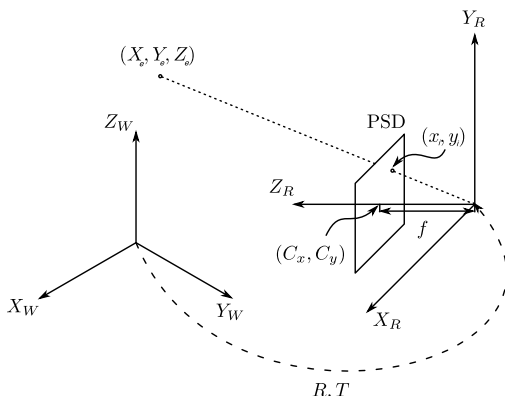


Fig. 3. Sistema para el modelo del PSD y la lente.

Las expresiones que relacionan las coordenadas 3D del emisor  $(X_e, Y_e, Z_e)$  con las coordenadas 2D del punto de impacto en el sensor PSD  $(x'_i, y'_i)$  se muestran en las siguientes ecuaciones, donde  $s$  es el valor de escala de la proyección 3D-2D:

$$\begin{pmatrix} sx'_i \\ sy'_i \\ s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f & 0 & C_x \\ 0 & f & C_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_e - X_r \\ Y_e - Y_r \\ Z_e - Z_r \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{pmatrix} sx'_i \\ sy'_i \\ s \end{pmatrix} = AR \begin{pmatrix} X_e - X_r \\ Y_e - Y_r \\ Z_e - Z_r \end{pmatrix} \quad (4)$$

Si se conociesen con precisión los valores de la matriz de los parámetros intrínsecos  $A$  y matriz de rotación  $R$ , además de la posición del emisor no sería necesario el proceso de calibración que se describe en la siguiente sección. Resaltar, que en nuestro caso se va a realizar el posicionamiento del sistema PSD móvil por un plano desconocido usando un único emisor LED.

### B. Calibración

Dado que no siempre es posible conocer con precisión todos los parámetros del sistema, se va a proponer un proceso de calibración que permita con pocas medidas y de forma sencilla obtener los parámetros necesarios para obtener la posición del sistema PSD con precisión.

Los pasos propuestos son los siguientes:

- Elegir un origen de coordenadas en el entorno.
- Respecto al origen de coordenadas mover el PSD en diferentes posiciones conocidas. El PSD siempre deberá moverse en un mismo plano  $Z = Z_r$ . (ver figura Fig. 4)
- Obtener los puntos de impacto en el PSD  $(x_i, y_i)$
- Mediante algoritmos genéticos obtener los parámetros del sistema que minimizan el error de re-proyección.

En la figura Fig. 4 se presenta la situación relativa entre el plano de movimiento y el plano sensor.

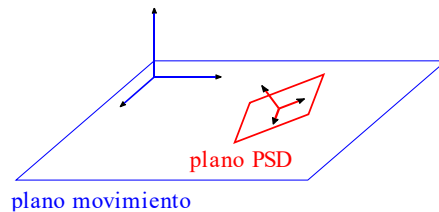


Fig. 4. Plano del PSD y del movimiento

Las entradas y salidas del algoritmo genético se muestran en la figura Fig. 5. Como entradas se tiene el punto de impacto y la ubicación del sistema PSD en el entorno.

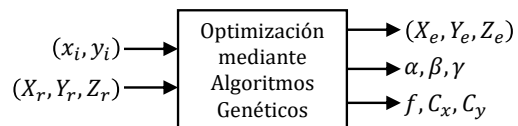


Fig. 5. Parámetros de entrada y salida del algoritmo genético

El algoritmo genético debe proporcionar los valores de los

parámetros utilizados: posición del emisor en el entorno, ángulos de desalineamiento del sistema PSD respecto al plano de movimiento y los parámetros intrínsecos. Para ello obtiene los valores de todos esos parámetros de forma que se minimice el valor de error obtenido como la suma de las distancias euclídeas entre las coordenadas  $(x'_i, y'_i)$  y las coordenadas medidas  $(x_i, y_i)$ :

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{(x'_i - x_i)^2 + (y'_i - y_i)^2} \quad (5)$$

Se realiza este proceso ya que permite posicionar el sistema PSD sin conocer con precisión la posición del emisor y permite corregir en parte los efectos no lineales de los multicaminos ajustando el resto de parámetros del sistema.

### C. Obtención de la posición

Una vez obtenidos los parámetros del sistema se pueden obtener las posiciones del PSD en cada punto a partir de los puntos de impacto en su superficie  $(x_i, y_i)$

$$\begin{pmatrix} X_r \\ Y_r \\ Z_r \end{pmatrix} = -R^{-1}A^{-1} \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{pmatrix} s + \begin{pmatrix} X_e \\ Y_e \\ Z_e \end{pmatrix} \quad (6)$$

Si llamamos:

$$Q = -R^{-1}A^{-1} \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

se tiene:

$$\begin{pmatrix} X_r \\ Y_r \\ Z_r \end{pmatrix} = Qs + \begin{pmatrix} X_e \\ Y_e \\ Z_e \end{pmatrix} \quad (8)$$

Se conoce el valor de  $Z_r$ , ya que es el plano de movimiento del PSD, por tanto, se puede obtener s:

$$s = \frac{Z_r - Z_e}{q_3} \quad (9)$$

donde  $q_3$  es el tercer elemento del vector  $Q$ . Conocido el valor de  $s$  se obtienen las coordenadas del receptor según la ecuación 8.

## III. RESULTADOS

### A. Plataforma para la realización de las pruebas

Para llevar a cabo las pruebas experimentales y tener un *ground truth* de las medidas, las pruebas se han llevado a cabo en un banco de pruebas con una resolución de medida de  $\pm 1$ mm. Se ha usado un sensor PSD de 9x9mm de superficie con una lente de focal 8mm. Se ha usado un emisor LED de 4,5W de luz emitida (aprox 3000 lúmenes). La señal emitida se ha modulado a 50kHz por lo que la emisión máxima del LED ha sido de 2,25 W. En el receptor se digitaliza la señal a una frecuencia de muestro de 5Ms/s y se procesa la señal con una serie de filtros para obtener únicamente las componentes principales. Por cada

canal del PSD se obtiene el valor RMS a partir del cual se obtienen las coordenadas de impacto  $(x_i, y_i)$ .

En la figura Fig. 6 se muestra el banco de pruebas junto con el emisor y el PSD descrito anteriormente.

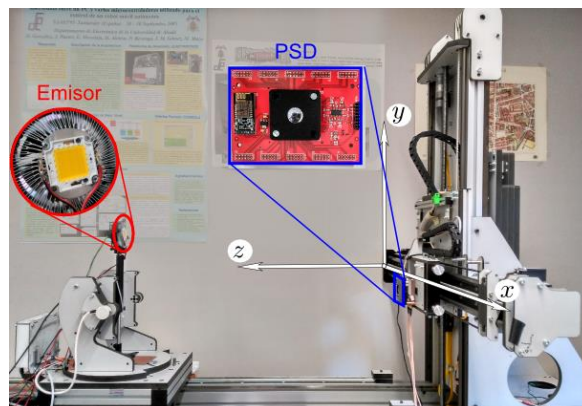


Fig. 6. Banco de pruebas

### B. Obtención de los $(x_i, y_i)$

A partir de la señal filtrada procedente de los 4 canales del PSD se calcula el valor *rms* de la señal emitida obteniendo un valor  $(x_i, y_i)$  como máximo 50K veces por segundo. Para obtener un valor más preciso se puede calcular el valor rms con más periodos minimizando la influencia del ruido, pero reduciendo el número de posiciones por segundo. En la figura Fig. 7 se muestran los puntos obtenidos en el detector (resultados obtenidos) utilizando únicamente un periodo de la señal. Y el resultado utilizando 100 ms de señal.

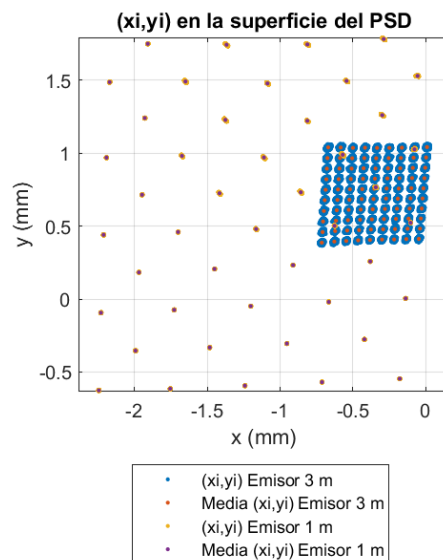


Fig. 7. Resultados de los puntos recogidos en el sensor

### C. Resultados de calibración

Para la calibración se han usado un total de 12 puntos, moviendo el banco de pruebas a 6 puntos distintos y ubicando el emisor a 2 distancias diferentes.

Las posiciones usadas en el ajuste de los parámetros son las mostradas en la figura Fig. 8.

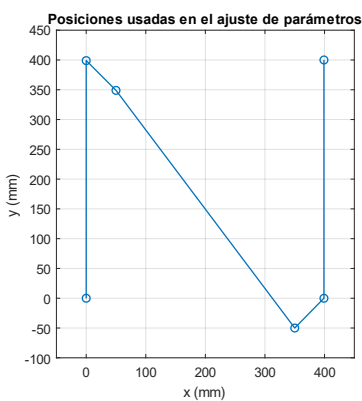


Fig. 8. Posiciones usadas en el ajuste de los parámetros

Se han realizado los movimientos con el banco de pruebas con un error de  $\pm 1$ mm. Para estas posiciones de PSD se ha posicionado el emisor inicialmente a una distancia de 3m con un error de  $\pm 1$  cm. Para la otra medida se ha desplazado el emisor 2m hacia el receptor con una precisión de  $\pm 1$ cm. Con esos ensayos se han obtenido los 9 parámetros del sistema que se pueden ver en la tabla 1.

TABLA I  
PARÁMETROS DEL SISTEMA OBTENIDOS EN LA ETAPA DE CALIBRACIÓN

$\alpha$	$\beta$	$\gamma$
0.0602 rad	-0.1557 rad	-0.0137 rad
$X_e$	$Y_e$	$Z_e$
-29.6 mm	145.3 mm	2977 mm
$f$	$C_x$	$C_y$
4.65 mm	0.755 mm	1.01 mm

En la figura Fig. 9 se muestran los puntos en la superficie del PSD utilizados para calibración.

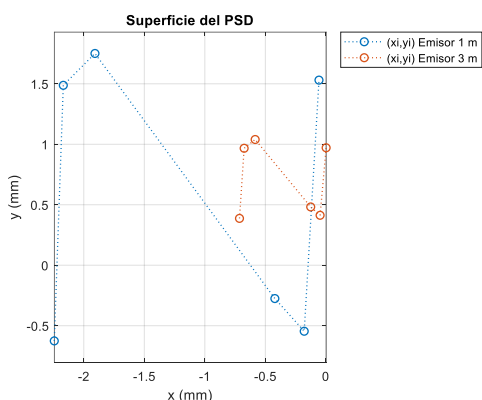


Fig. 9. Puntos en la superficie del PSD usados para la calibración

Para el proceso de calibración se han usado los valores de medidas promediando 100 milisegundos.

#### D. Resultados de posicionamiento

Para las pruebas se ha desplazado el sistema PSD en un plano  $Z = Z_r$  en diferentes posiciones  $(X_r, Y_r)$ , siempre manteniendo la misma orientación. Aplicando la ecuación 8 se obtienen las

posiciones del receptor en cada caso. En la figura Fig. 10 se muestran, como ejemplo, los resultados obtenidos a 1 m de distancia. Con aspas se marca el *ground truth* y con círculos las posiciones obtenidas con el sistema propuesto.

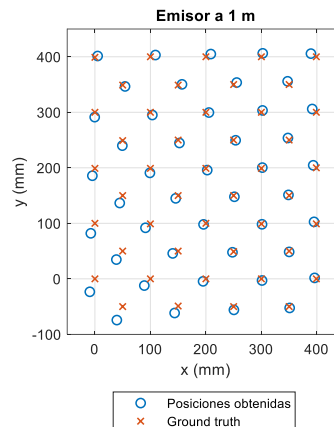


Fig. 10. Resultados obtenidos con el sistema propuesto.

En la tabla 2 se indican los principales errores de las medidas de posicionamiento realizadas a 1 y 3 metros.

TABLA II  
ERRORES DE POSICIONAMIENTO

Distancia entre plano emisor y receptor	Error Medio	Desviación estándar del error	Error Máximo
1 m	8.13 mm	5.91 mm	26.5 mm
3 m	28.6 mm	17.7 mm	62.2 mm

Hay que destacar que el efecto en nuestro sistema de los MP en las pruebas a 1 m es muy reducido. Sin embargo, dada la posición del banco de pruebas, cuando se realiza medidas a 3 metros el emisor está situado con respecto a superficies de reflexión (paredes) a 72 y 70 cm formando una esquina, y el detector llega a estar a 76 y 50 cm aproximadamente. En estas circunstancias de fuerte multicamino por un lado, y de SNR más reducido de la señal recibida por otro, los resultados del sistema lo hacen válido para el posicionamiento con alta precisión.

En la figura Fig. 11 se muestra la función de distribución acumulada (CDF) del error en el posicionamiento medido como la distancia euclídea entre la posición medida y la real.

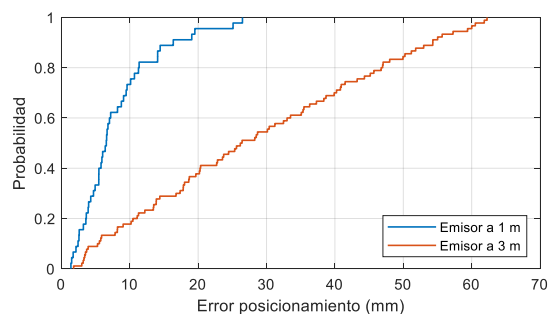


Fig. 11. CDF del error en el posicionamiento medido como la distancia euclídea entre la posición medida y la real.

## IV. CONCLUSIONES

Se ha desarrollado un sistema de posicionamiento basado en LED y un método de calibración que permite obtener la posición del PSD de forma precisa sin conocer a priori los parámetros del sistema, a partir de muy pocos puntos de medida en el entorno de movimiento.

Los errores de posición absoluta obtenidos sin efectos fuertes de multicamino están por debajo de 2.5 cm. En el caso de estar en presencia de fuertes efectos de MP (por la cercanía a una pared o superficie reflectante) los errores mayores obtenidos son de, como máximo 4.5 cm en el 80% de las medias.

Se ha comprobado que el sistema obtiene medidas precisas con una tasa de refresco de 50 kHz, pudiéndose mejorar la precisión promediando más medidas.

## 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 de Posicionamiento y Navegación en Interiores y Exteriores Delimitados (REPIN+) (Ref.: TEC2017-90808-REDT). Álvaro De La Llana Calvo agradece al programa de Formación del Profesorado Universitario (FPU) del Ministerio de Educación, Cultura y Deporte de España (Ref. BOE-A-2015-12849).

## REFERENCIAS

- Gu, X.; Ekambaram, 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.
- Harle, R. A Survey of Indoor Inertial Positioning Systems for Pedestrians. *IEEE Commun. Surv. Tutor.* 2013, 15, 1281–1293.
- Ahson, S.A.; Ilyas, M. Location-Based Services Handbook: Applications, Technologies, and Security; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2010.
- 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.
- 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.
- 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.
- Pérez, L.; Rodríguez, I.; Rodríguez, N.; Usamentiaga, R. Robot Guidance Using Machine Vision Techniques in Industrial Environments: A Comparative Review. *Sensors* 2016, 16, 335.
- Ruiz, A.R.J.; Granja, F.S. Comparing Ubisense, BeSpooon, and DecaWave UWB Location Systems: Indoor Performance Analysis. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 2017, 66, 2106–2117.
- 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.
- Priyantha, N.B. The Cricket Indoor Location System. Ph.D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, USA, 2005.
- Rodríguez-Navarro, D.; Lázaro-Galilea, J.L.; De-La-Llana-Calvo, Á.; Bravo-Muñoz, I.; Gardel-Vicente, A.; Tsigotis, 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.
- Kuang, J.; Niu, X.; Chen, X. Robust Pedestrian Dead Reckoning Based on MEMS-IMU for Smartphones. *Sensors* 2018, 18, 1391.
- Lee, J.G.; Kim, D.M.; Suk, J.Y. Development of A 3D Position Determination Device Using PSD Sensor. In Proceedings of the 2010 International Conf. on Control Automation and Systems (ICCAS), Gyeonggi-do, Korea, 27–30 October 2010; pp. 1733–1736.
- Ramirez-Aguilera, A.M.; Luna-Rivera, J.M.; Guerra, V.; Rabadan, J.; Perez-Jimenez, R.; Lopez-Hernandez, F.J. "A Review of Indoor Channel Modeling Techniques for Visible Light Communications", *Communications (LATINCOM) 2018 IEEE 10th Latin-American Conference on*, pp. 1-6, 2018.
- Kowalczyk M.; and Siuzdak J.; "Channel modeling and characterization for VLC indoor transmission systems based on MMC ray tracing method", *Proc. SPIE 10808, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2018*, 1080803 (1 Oct. 2018); doi: 10.1117/12.2326282
- Hua, L.; Zhuang, Y.; Qi, L.; Jun Yang, J.; and Shi. L. Noise Analysis and Modeling in Visible Light Communication Using Allan Variance *IEEE Access*, vol 6, 2018
- Ajmani, M.; Sinan Sinanovic, S; and Boutaleb, T. Optical Wireless Communication Based Indoor Positioning Algorithms: Performance Optimisation and Mathematical Modelling *Computation* 2019, 7, 1; doi:10.3390/computation7010001
- Tran, HQ; and Ha, C. Fingerprint-Based Indoor Positioning System Using Visible Light Communication—A Novel Method for Multipath Reflections *Electronics* 2019, 8, 63; doi:10.3390/electronics8010063
- 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.
- De-La-Llana-Calvo, Á.; Lázaro-Galilea, J.-L.; Gardel-Vicente, A.; Rodríguez-Navarro, D.; Bravo-Muñoz, I.; Espinosa-Zapata, F. Characterization of Multipath Effects in Indoor Positioning Systems by AoA and PoA Based on Optical Signals. *Sensors* 2019, 19, 917.
- Popoola, O.R.; Popoola, WO; and Ramirez-Iniguez, R; and Sinanović, S. Design of improved IR protocol for LED indoor positioning system. In: 2017 13th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference, IWCMC 2017. IEEE, Piscataway, NJ, pp. 882-887. ISBN 9781509043729.
- Alam, F.; Parr B. and Mander, S. "Visible Light Positioning Based on Calibrated Propagation Model," in *IEEE Sensors Letters*, vol. 3, no. 2, pp. 1-4, Feb. 2019, Art no. 6000204. doi: 10.1109/LSENS.2018.2889270
- Yasir, M.; Ho, S.-W and Vellambi, B., "Indoor positioning system using visible light and accelerometer" *Lightwave Technology, Journal of*, vol. 32, no. 19, pp. 3306–3316, Oct 2014.
- Huynh, P.; Yoo, M. VLC-Based Positioning System for an Indoor Environment Using an Image Sensor and an Accelerometer Sensor. *Sensors* 2016, 16, 783.
- Costanzo, A and Loscri, V. Visible Light Indoor Positioning in a Noise-aware Environment. WCNC 2019 - IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Apr 2019, Marrakesh, Morocco. <hal-02022610>
- Xu, J.; Gong C. and Xu, Z. "Indoor Visible Light Positioning with Centimeter Accuracy Based on a Commercial Smartphone Camera," 2018 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps), Abu Dhabi, United Arab Emirates, 2018, pp. 1-6. doi: 10.1109/GLOCOMW.2018.8644462
- Masaki, Y.; Shinichiro, H.; Masao, N. High-accuracy positioning system using visible LED lights and image sensor. In Proceedings of the 2008 IEEE Radio and Wireless Symposium, Orlando, FL, USA, 22–24 January 2008; pp. 439–442.
- Cincotta, S; He, C; 1, Neild, A; and Armstrong, J. Indoor Visible Light Positioning: Overcoming the Practical Limitations of the Quadrant Angular Diversity Aperture Receiver (QADA) by Using the Two-Stage QADA-Plus Receiver *Sensors* 2019, 19, 956; doi:10.3390/s19040956
- Quan Pham, N; Pradana Rachim, V and Chung, W.Y. High-accuracy VLC-based indoor positioning system using multi-level modulation *OPTICS EXPRESS* Vol. 27, No. 5 | 4 Mar 2019 | /doi.org/10.1364/OE.27.007568
- Lin, B.; Tang, X.; Ghassemlooy, Z.; Lin, C.; Li, Y. Experimental Demonstration of an Indoor VLC Positioning System Based on OFDMA. *IEEE Photonics J.* 2017, 9, 1–9.