

# Sistema de posicionamiento absoluto mediante triangulación infrarroja para robot móvil

Bigliani Juan Cruz

Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales  
Universidad Nacional de Córdoba, UNC  
Córdoba, Argentina  
jbigliani@efn.uncor.edu

Chesini Ezequiel

Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales  
Universidad Nacional de Córdoba, UNC  
Córdoba, Argentina  
echesini@efn.uncor.edu

**Resumen**— En este trabajo se presenta el desarrollo de un sistema de posicionamiento absoluto como parte de un proyecto cuyo objetivo es diseñar un robot móvil capaz de navegar por un recinto de forma autónoma. El sistema está compuesto por tres emisores infrarrojos fijos situados en la habitación y un receptor móvil que debe montarse sobre el robot. Este receptor barre la zona en busca de la señal de las bases emisoras y al encontrarlas, calcula las coordenadas mediante triangulación. El objetivo de este desarrollo fue diseñar un sistema de posicionamiento con la precisión suficiente como para guiar a un robot en la navegación dentro de instalaciones domésticas o industriales. Luego de construido el sistema, se hizo un análisis de error caracterizando su funcionamiento para distintas habitaciones. El sistema construido consiguió calcular las coordenadas dentro de una habitación de 7 metros de lado con un error menor al 2.5% con respecto a las dimensiones de esta en el 85% del área ensayada.

**Palabras clave**—triangulación, posicionamiento absoluto, radiación infrarroja, corrección de curso

## I. INTRODUCCIÓN

Se dice que un robot móvil es autónomo si tiene la capacidad de alcanzar un objetivo con muy poca (o sin) intervención humana, a diferencia de las máquinas teleoperadas, que son manejadas a distancia por un operador[1].

El conocimiento de la posición y orientación de un robot móvil es uno de los aspectos fundamentales para la navegación autónoma [2]. Esto permite conocer la posición absoluta del robot en cada momento, permitiendo la realización de tareas como planificar caminos, generar trayectorias, evitar obstáculos y controlar la ejecución de movimientos. Uno de los métodos de posicionamiento es el llamado “posicionamiento relativo”. Este método está basado en la medición del movimiento del robot colocando por ejemplo encoders en las ruedas o ejes de movimiento lo que permite estimar la posición relativa al punto de partida con solo sumarle a este la trayectoria realizada. Sin embargo, esta estimación no resulta suficientemente precisa para la mayoría de las aplicaciones ya que los errores que se producen se van acumulando durante el recorrido. Esto provoca una desviación que muchas veces es inaceptable en el cálculo de la posición final. Es por eso que el robot necesita de algún sistema de posicionamiento absoluto que reduzca el error.

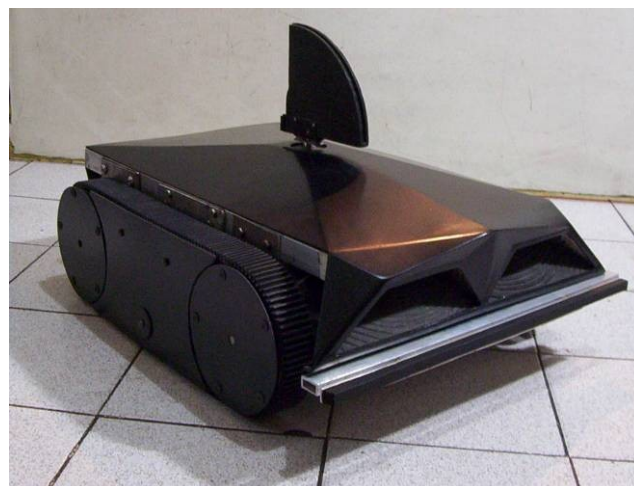


Fig. 1. Reobot movil con rceptor infrarrojo

Existen diversos sistemas y técnicas para realizar el posicionamiento absoluto de un robot móvil y cada uno de ellos proporciona las coordenadas absolutas de la posición con respecto a un sistema de referencia preestablecido.

En este trabajo se presenta el desarrollo de un sistema de posicionamiento absoluto de bajo costo, versátil y de fácil implementación que permita disminuir el error durante la navegación de un robot móvil (Fig. 1).

## II. DESARROLLO

El sistema de posicionamiento absoluto está compuesto por tres emisores de radiación infrarroja (ERI) que se encuentran en puntos fijos y conocidos de la habitación y un receptor infrarrojo (RIR) giratorio que se debe montar sobre el robot. El RIR detecta las señales de los tres EIR al girar y el sistema registra la posición angular del RIR para cada señal detectada. De esta manera, con estos datos angulares y la información de las coordenadas donde se encuentran los EIR dentro de un plano (x,y) establecido se pueden calcular las coordenadas del RIR mediante triangulación.

### A. Emisores infrarrojos

Los EIR que se utilizan como balizas de referencia son fijos y se encuentran distribuidos estratégicamente dentro de la habitación en que se moverá el robot para garantizar la recepción de señal infrarroja por parte del robot en todo momento. Es indispensable que este reciba las señales de los EIR ya que el algoritmo de cálculo de coordenadas así lo requiere.

Las frecuencias portadoras de los EIR son de 40 Khz y se encuentran moduladas en OOK (On-Off Keying) con diferentes frecuencias para cada uno. Los receptores infrarrojos utilizados poseen un filtro interno de 40 Khz para recibir la portadora. Con esta configuración, el receptor puede identificar al EIR que emite la señal al detectar las diferentes frecuencias. Para aumentar el alcance de los EIR, la señal portadora que alimenta los emisores infrarrojos posee un ciclo de trabajo de 0.1 lo que permite aumentar la potencia de emisión de cada pulso.

### B. Sistema de recepción infrarroja

El RIR se encuentra ubicado sobre un sistema giratorio que se ubica sobre el robot móvil, y que barre el entorno en busca de señales emitidas por los EIR. Este receptor está ubicado dentro de una rendija semicircular a través de la cual llega la señal a un sensor de radiación infrarroja. Un motor paso a paso hace girar la rendija para la búsqueda de señal y un sensor óptico detecta la posición angular del motor.

La rendija, que se observa en la fig. 2, está compuesta por dos láminas semicirculares formando una cavidad que permite la entrada de radiación infrarroja solo cuando se alinea con los EIR y el sensor se encuentra ubicado detrás de la rendija. Ambas láminas, internamente, poseen una superficie rugosa de color negro para evitar que la radiación infrarroja llegue al receptor debido a reflexiones, sin estar la rendija alineada. Igualmente, la recepción de radiación no se dará solamente en la dirección de alineación, sino que existe un intervalo dentro del cual se recibe señal y esto es uno de los factores que introducen error en el cálculo de las coordenadas. Este intervalo de recepción será menor, cuanto más angosta y más profunda sea la rendija. En este caso, el ancho de la rendija (5 mm) está limitado por el tamaño del receptor y el radio (12 cm) por una solución de compromiso entre precisión y tamaño del sistema.

El control del motor que hace girar el receptor y el análisis de las señales recibidas es llevado a cabo por un DSP.

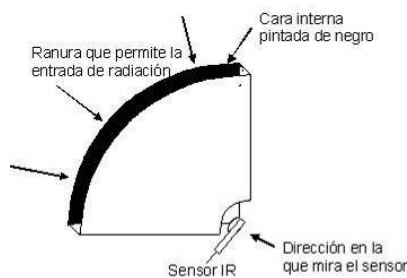


Fig. 2. Receptor infrarrojo

### C. Funcionamiento del sistema

Al activarse el sistema de posicionamiento absoluto el motor busca la posición de origen a partir de la cual se medirán los ángulos y luego se comienza la búsqueda de la señal proveniente de los EIR. Al recibir señal infrarroja, el DSP analiza si la señal proviene de un EIR y de ser así determina cual es el EIR detectado. Seguidamente, se almacena el ángulo inicial y el final durante el cual se recibió la señal. Finalmente se calcula el ángulo medio y se lo guarda como la ubicación del EIR. El receptor seguirá girando en busca de las otras dos balizas, realizando el mismo procedimiento y una vez detectados los tres EIR los datos se transmiten a una PC a través de un enlace Bluetooth. En la PC se realizan los cálculos para determinar las coordenadas del lugar mediante triangulación y se muestra en un plano la posición detectada.

### III. CÁLCULO DE TRIANGULACION

Dado un plano (x,y) y tres puntos de coordenadas fijas (B1, B2 y B3) pertenecientes a él como muestra la fig. 3, se puede conocer la orientación y las coordenadas del origen de un vector cualquiera dentro plano a partir de un cálculo matemático conociendo las distancias entre los puntos fijos y los ángulos entre los tres segmentos formados al unir el origen del vector con los tres puntos fijos[3]- [4]. En nuestro sistema los tres puntos fijos en el plano están formados por los EIR y el origen del vector representa el RIR que se encuentra sobre el robot. Las coordenadas de los emisores infrarrojos son conocidas, y los ángulos  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\sigma$  son calculados por el RIR. Con estos datos se pueden calcular las coordenadas del receptor (Rx, Ry) como muestran las ecuaciones 1 y 2.

$$Rx = B \times \cos(\mu) \tag{1}$$

$$Ry = B \times \sin(\mu) \tag{2}$$

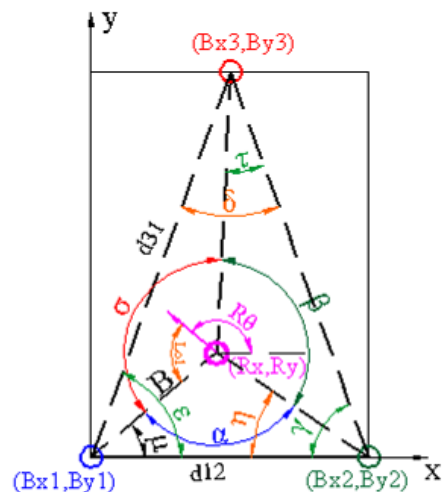


Fig. 3. Triangulación

Y los valores de  $\mu$  y  $B$  se calculan como muestran las ecuaciones 3 y 4.

$$\mu = \text{tg}^{-1} \left\{ \frac{\left[ -\frac{d12 \times \text{sen}(\sigma)}{\text{sen}(\alpha) \times d31} \right] \times \text{sen}(\beta + \sigma + \delta + \varepsilon + \gamma) + \text{sen}(\sigma + \varepsilon)}{\cos(\sigma + \varepsilon) - \left[ \frac{d12 \times \text{sen}(\sigma)}{\text{sen}(\alpha) \times d31} \right] \times \cos(\beta + \sigma + \delta + \varepsilon + \gamma)} \right\} \quad (3)$$

$$B = \frac{d12}{\text{sen}(\alpha)} \times \text{sen}(\omega - \mu) \quad (4)$$

#### IV. CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA

Existen zonas en las cuales un mínimo error en la medición de los ángulos entre bases emisoras infrarrojas provoca una zona de incertidumbre mayor, dependiendo de en qué parte de la habitación se encuentre el robot.

Analizándolo gráficamente, cuando el RIR mide el ángulo entre dos EIR (base 1 y 2), para este mismo ángulo existen infinitos puntos en los que podría estar ubicado el RIR. Dichos puntos pertenecen a la circunferencia que contiene los dos EIR medidos y el RIR. Esto mismo ocurre cuando se mide el ángulo entre las bases 2 y 3 y de esta forma se obtiene otra circunferencia de puntos posibles en la que puede encontrarse el robot. Finalmente, el robot se encontrará en la intersección de estas dos circunferencias como se muestra en la fig. 4.

Existe también una circunferencia que pasa por las tres bases a la que llamaremos zona prohibida como se muestra en la fig. 5. Para cualquier punto sobre esta circunferencia donde se posicione el robot, los pares de ángulos alfa y beta vistos son iguales, por lo que no se puede determinar en cuál de todos estos puntos se encuentra el robot.

Según los ensayos realizados, el error del sistema de medición de los ángulos entre las bases emisoras infrarrojas es de un paso del motor paso a paso ( $1,8^\circ$ ). Por consiguiente, al hacer una lectura, los puntos posibles de la ubicación del robot ya no están sobre una circunferencia sino que pertenecen a un área limitada por cuatro circunferencias, como se ilustra en la fig. 6. Esto genera áreas de incertidumbre (zonas sombreadas) cuyo tamaño y forma varían según la zona de la habitación donde se encuentren.

Para distintas configuraciones de los EIR en la habitación, la disposición y forma de las áreas de incertidumbre cambian. De esta manera, los EIR deberán colocarse estratégicamente dependiendo el lugar en donde el robot se moverá.

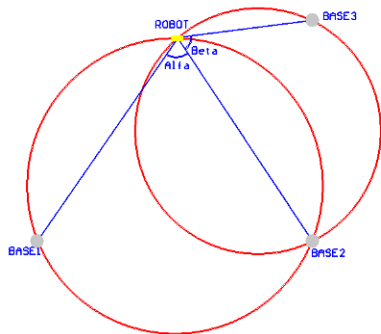


Fig. 4. Zona de puntos posibles.

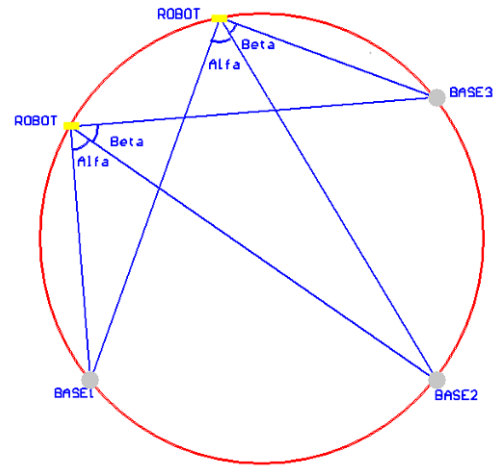


Fig. 5. Círculo de zona prohibida.

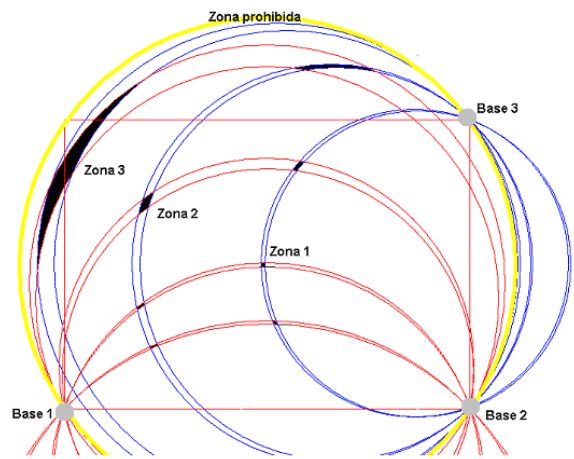


Fig. 6. Zonas de incertidumbre en el cálculo de coordenadas.

#### V. MEDICIONES Y RESULTADOS

Para analizar el comportamiento del sistema de posicionamiento absoluto y analizar la precisión del robot se realizaron ensayos en dos habitaciones distintas de diferentes dimensiones.

En la primera habitación se realizaron mediciones en 6 puntos para dos configuraciones diferentes de los EIR y en la segunda habitación se realizó el ensayo para una sola disposición de estos.

##### A. Ensayo N° 1

Para realizar este ensayo se colocaron los EIR como se muestra en la fig. 7 y se realizaron mediciones en seis puntos diferentes de la habitación. Para cada uno de los puntos se tomaron 4 mediciones, variando el ángulo de orientación del RIR ( $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  y  $270^\circ$ ).

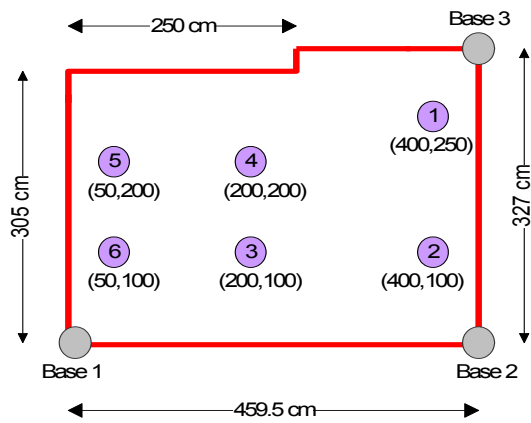


Fig. 7. Ensayo N°1

En el gráfico a escala de la fig. 8 pueden verse todos los puntos de medición realizados para esta configuración.

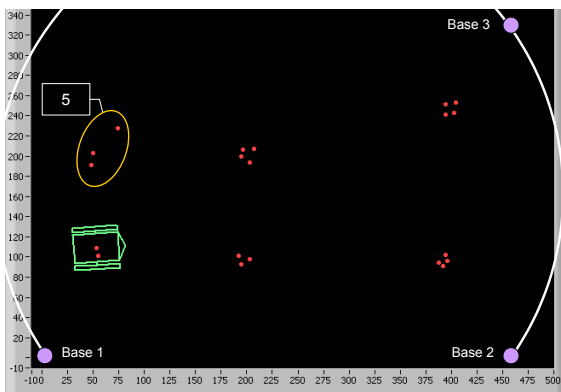


Fig. 8. Ensayo N°1

En la tabla 1 se muestran los errores máximos cometidos para cada punto de medición al realizar el ensayo. En esta pueden verse los errores absolutos y los errores porcentuales con respecto a las dimensiones de la habitación.

TABLA I

Punto	Errores(cm)		Errores (%)	
	X	Y	X	Y
1	6	9	1,3	2,8
2	12	9	2,6	2,8
3	7	7	1,5	2,1
4	8	7	1,7	2,1
5	24	28	5,2	8,6
6	5	9	1,1	2,8

**B. Ensayo N° 2**

Para efectuar este ensayo se modificó la posición de la base 3 como muestra la fig. 9, y el procedimiento de medición fue idéntico al realizado en el ensayo anterior. Los resultados pueden verse en la fig. 10 y en la tabla 2.

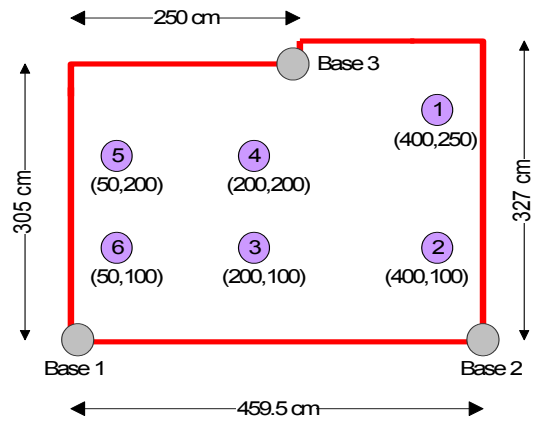


Fig. 9. Ensayo N°2

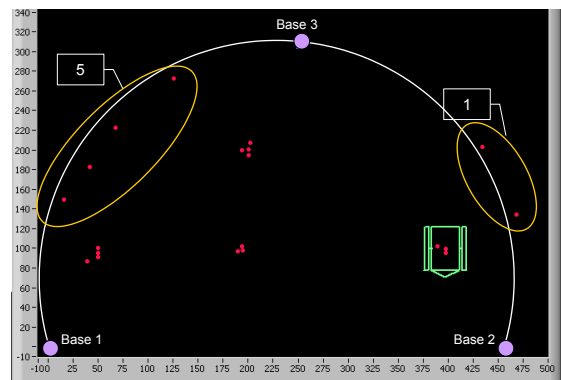


Fig. 10. Ensayo N°2

TABLA II

Punto	Errores(cm)		Errores (%)	
	X	Y	X	Y
1	68	283	14,8	86,5
2	11	5	2,4	1,5
3	6	7	1,3	2,1
4	10	3	2,2	0,9
5	79	201	17,2	61,5
6	11	14	2,4	4,3

**C. Ensayo N° 3**

Este ensayo se realizó en una habitación cuadrada de 7 metros de lado y las bases infrarrojas se colocaron como se muestra en la fig. 11.

Para realizar este ensayo se tomaron mediciones en dieciocho puntos diferentes de la habitación y para cada uno de los puntos se tomaron 6 mediciones, variando el ángulo de orientación del RIR (0°, 60°, 120°, 180°, 240° y 300°). En la fig. 12 pueden observarse los resultados en forma gráfica y los valores se muestran en la tabla 3.

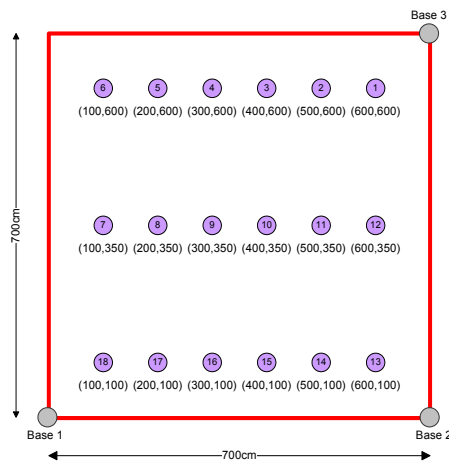


Fig. 11. Ensayo N°3

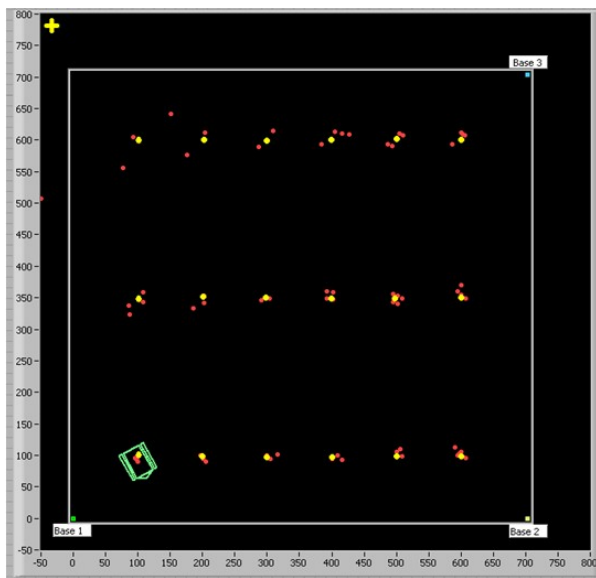


Fig. 12. Ensayo N°3

TABLA III

Punto	Errores(cm)		Errores(%)	
	X	Y	X	Y
1	14	12	2,0	1,7
2	11	10	1,6	1,4
3	16	13	2,3	1,9
4	13	14	1,9	2,0
5	23	23	3,3	3,3
6	51	41	7,3	5,9
7	14	27	2,0	3,9
8	14	17	2,0	2,4
9	9	4	1,3	0,6
10	7	10	1,0	1,4
11	9	10	1,3	1,4
12	7	15	1,0	2,1
13	9	8	1,3	1,1
14	8	10	1,1	1,4
15	16	7	2,3	1,0
16	16	5	2,3	0,7
17	4	9	0,6	1,3
18	4	10	0,6	1,4

## VI. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Los ensayos N° 1 y N° 2 se realizaron con el objetivo de analizar las zonas de incertidumbre para distintas configuraciones y comprobar lo predicho por la teoría con respecto al círculo prohibido y al aumento de la incertidumbre al acercarse a él. En ambos ensayos se puede observar como los puntos en los que se obtuvo mayor error pertenecen a zonas cercanas al círculo prohibido. En el ensayo N° 1 el punto 5 es el que tuvo mayores errores durante las mediciones y al analizar la fig. 6 donde se muestran las zonas de incertidumbre puede verse que este punto se encuentra en una zona muy desfavorable ya que las intersecciones de las zonas de incertidumbre generan una zona de error alargada que incluso coincide con la forma de la zona en donde se encuentran las mediciones.

En el ensayo N° 2 las mediciones con mayor error corresponden a los puntos 1 y 5. Para esta configuración de EIR la zona prohibida pasa muy cerca de estos puntos como puede verse en la fig. 10 y a esto se debe el gran error en ellos. Para ambos puntos las zonas de incertidumbre teóricas forman bandas alargadas muy similares al área donde se encuentran las mediciones realizadas.

En el ensayo N° 3 se realizó para analizar el comportamiento del sistema en una habitación de mayor tamaño y se utilizó la configuración de EIR usada en el ensayo N° 1 ya que esta solo produce una zona de gran incertidumbre en una esquina de la habitación. En este ensayo puede observarse nuevamente la coincidencia entre las zonas de gran incertidumbre que resultan del análisis teórico con las zonas en donde los errores en las mediciones son mayores (puntos 5, 6 y 7).

## VII. CONCLUSIONES

Los resultados de los ensayos muestran que el sistema de posicionamiento absoluto puede calcular las coordenadas con un error que depende de la zona en donde se encuentre el RIR. La posición en donde se colocan los EIR es crucial ya que de esto dependerá el lugar, la forma y el tamaño de las zonas de incertidumbre.

La configuración de los EIR utilizada en el ensayo 1 y 3 resultó la más conveniente para cubrir habitaciones rectangulares ya que la zona prohibida queda fuera de la habitación y solo aparecen grandes incertidumbres en una esquina de esta. Para esta configuración de EIR, dado que los emisores están en las esquinas de la habitación, estos deben cubrir un ángulo de emisión de radiación de 90 grados y si bien existe la posibilidad de utilizar otras configuraciones, para ellas este ángulo debería aumentar teniendo que aumentar también la potencia total radiada para llegar a cubrir las mismas superficies.

Al analizar el ensayo N° 3 donde se realizaron más mediciones puede verse que solo en el punto 6 los errores aumentaron considerablemente por sobre la media del resto de la habitación aunque en el punto 5 y 7 ya se ve un aumento de la zona de incertidumbre. En el punto 6 los errores máximos son de 51cm y 41cm para las coordenadas X e Y respectivamente pero si descartamos la zona de los puntos 5, 6

y 7 para la navegación, en el resto de la habitación los errores no superan los 17cm.

El motor utilizado para hacer girar el RIR posee un ángulo entre pasos de 1.8° y esto es lo que produce mayor error en el ángulo detectado traduciéndose luego en errores en el cálculo de coordenadas de mayor o menor magnitud dependiendo de la zona en donde se encuentre el robot. El error de cálculo puede disminuirse mejorando el sistema pero la zona prohibida y las zonas de gran incertidumbre próximas a esta siempre aparecerán. Para evitar los grandes errores en el cálculo de coordenadas en zonas de alta incertidumbre se podrían colocar cuarto o más EIR y programar el sistema para que decida cuales se usaran para el cálculo tras analizar la incertidumbre teórica de las opciones posibles.

Son muchas las mejoras que pueden hacerse para disminuir la incertidumbre de las mediciones pero el sistema construido es capaz de obtener las coordenadas en una habitación como la del ensayo N° 3 con un error que no supera el 2,5% en el 85% del área del recinto.

La eficiencia del sistema queda resaltada al analizar el bajo costo de los EIR construidos con dos leds infrarrojos y un oscilador y el RIR con un receptor infrarrojo comercial.

El algoritmo utilizado y el software implementado son muy flexibles y cumplen con el objetivo que requería un sistema de

fácil implementación. El sistema de posicionamiento absoluto diseñado se adapta fácilmente a las distintas zonas que se desean cubrir ya que solo se deben introducir las coordenadas del lugar en donde se colocaron los EIR y el robot estará listo para navegar.

#### REFERENCIAS

- [1] Álvaro Arranz Aranz, Jorge Balañas Santos, Sebastián Bronte Palacios, Josué García Sánchez, Daniel González Rodríguez, Javier Gutiérrez González, Ángel Llamazares Llamazares, Fernando Rojas Sánchez, and Víctor Sanz Blanco, "Aplicaciones de robots móviles", Universidad de Alcalá, noviembre - 2006.
- [2] Borenstein, Johann, H. R. Everett, and Liqiang Feng. "Where am I? Sensors and methods for mobile robot positioning." University of Michigan, 1996, vol. 119, no 120, p. 27.
- [3] Cohen, Charles J., and Frank V. Koss. "Comprehensive study of three-object triangulation." *Applications in Optical Science and Engineering*. International Society for Optics and Photonics, 1993, pp. 95-106.
- [4] Javier González Jiménez -Anibal Ollero Baturone, "Estimación de la Posición de un Robot Móvil", *Informática y Automática, Asociación Española de Informática y Automática*, Vol.29, pp.3-18, Abril - 1996.
- [1] D. R. Sokoloff and R. K. Thornton, "Using interactive lecture demonstration to create an active learning environment" *The Physics Teacher*, vol. 36: 6, 340 (1997)
- [2] D. R. Sokoloff and R. K. Thornton, "Interactive lecture demonstration", Hoboken, N. J. Wiley, 2004.