

# Development of a positioning system using hybrid control to trace a fixed trajectory applied to a tracked mobile robot

Julio Artica, Estudiante<sup>1</sup>, Marco Klepatzky, Estudiante<sup>1</sup>, Leonardo Vinces, Bachiller (Ingeniero Electrónico)<sup>1</sup>,  
Christian del Carpio, Master<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú, u201212423@upc.edu.pe, u910469@upc.edu.pe,  
leonardo.vinces@upc.pe, pcelcdel@upc.edu.pe

*Abstract -- The current work proposes an optimization system in the positioning method for mobile robots which will allow to increase the accuracy in a previously defined trajectory. Mobile automatons with predefined routes tend to have cumulative error in their displacement. In this particular case, this will be reduced using landmarks as reference points, along with ultrasonic sensors and a control algorithm which will regulate the robot's position. Thus, the vehicle will travel its previously defined route through the landmarks and, doing so, will also correct its direction as it moves. The validation will be done through experimental tests on flat terrain and artificial grass without obstacles. The trajectory followed by the robot resembles a square, with 3.5 meters by side. The evaluation will be based on the difference between the robot's estimated and real position. The experimental results produced an error of approximately 3 and 15 centimeters on the "x" and "y" axis respectively.*

*Keywords – Tracked robot, landmark, localization, in-door robot, hybrid automaton, differential drive model, unicycle model.*

Digital Object Identifier (DOI):  
<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2019.1.1.357>  
ISBN: 978-0-9993443-6-1 ISSN: 2414-6390

# Desarrollo de un sistema de posicionamiento mediante control “híbrido” para el seguimiento de una trayectoria fija aplicado a un robot móvil con arquitectura oruga

Julio Artica, Estudiante<sup>1</sup>, Marco Klepatzky, Estudiante<sup>1</sup>, Leonardo Vinces, Bachiller (Ingeniero Electrónico)<sup>1</sup>, Christian del Carpio, Master<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú, u201212423@upc.edu.pe, u910469@upc.edu.pe, leonardo.vinces@upc.edu.pe, pcelcdel@upc.edu.pe

*Abstract— El presente trabajo propone un sistema de mejora en el método de posicionamiento para autómatas móviles que permitirá seguir con cierta precisión la trayectoria insertada. Los robots móviles con rutas predefinidas presentan errores acumulativos que, en este caso, se reducen haciendo uso de puntos de referencia (landmarks), sensores de ultrasonido, y un algoritmo de control que regularán la posición del autómata. Es así que el móvil recorrerá la ruta trazada pasando por los landmarks dispuestos a través de ella, y de este modo podrá corregir su posición y seguir recorriendo la trayectoria previamente programada. La validación se realizará mediante pruebas experimentales sobre terreno llano y grass sintético sin obstáculos. La trayectoria seguida por el robot fue de tipo cuadrada, de 3.50 m. por cada lado, de las que serán evaluadas en base a la diferencia con su posición estimada y la posición real. Los resultados experimentales produjeron, aproximadamente, errores de 3 cm. y 15 cm. en el eje “x” e “y” respectivamente.*

*Palabras clave* — Robot oruga, punto de referencia, localización, robot de interiores, autómata híbrido, modelo de motores diferenciales, modelo unicycle.

## I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad existen diversos mecanismos de locomoción para autómatas móviles, cada uno con diferente comportamiento frente al terreno donde son destinados. La elección del mecanismo correcto para una alta eficiencia se dará en función de la tarea que realizará, la carga que desplazará, el entorno sobre el cual realizará su desplazamiento, entre otros. Robot oruga, punto de referencia, localización, robot de interiores, autómata híbrido, modelo de motores diferenciales, modelo unicycle.

Uno de los problemas principales en el funcionamiento de robots móviles es determinar la localización del mismo. El robot deberá encontrarse en la capacidad de determinar su posición con respecto al ambiente en el cual se desplaza, pero debido a la existencia de la acumulación de error en el desplazamiento del autómata generada por la asimetría del chasis, el deslizamiento de las ruedas u orugas, y la irregularidad del terreno, es necesario el uso de elementos que

Digital Object Identifier (DOI):

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2019.1.1.357>

ISBN: 978-0-9993443-6-1 ISSN: 2414-6390

permitan medir variables del entorno en el área de trabajo de tal manera que permitan corregir la trayectoria inicial.

Los métodos más comunes hacen uso de cámaras, sensores tipo laser y DGPS (Differential Global Position System) dependiendo del entorno sobre el cual se trabajará y la arquitectura del robot a utilizar [1].

Marquez et al. en [2], proponen un sistema de posicionamiento para robots autónomos haciendo uso de un IMU (Inertial Measurement Unit) y las coordenadas 2D recibidas de anclajes de UWB (Ultra-wide-band) juntas en un filtro Kalman. El experimento fue realizado mediante 3 anclajes en distribución triangular ocupando 12m<sup>2</sup> de un ambiente cerrado, con un tiempo de 45seg y un muestreo de datos de 0.67Hz para el IPS (Indoor Positioning System) y 20Hz para el IMU logrando una precisión de 0.40cm para ambos ejes. El aporte presentado puede considerarse costoso si es que la trayectoria del robot es fija en un ambiente de trabajo conocido.

Mohd et al. en [3], proponen haciendo uso de landmarks, un sensor ultrasonido que apunte directamente a las paredes, la orientación del robot obtenida mediante los encoders y un IMU juntas en un filtro Kalman. El experimento fue evaluado en un terreno plano de área cuadrada de 1m<sup>2</sup> con un recorrido fijo de 10 ciclos continuos obteniéndose errores de 0.1m para ambos ejes y 0.06rad en la orientación. El aporte hace uso de componentes mínimos adaptables a varios ambientes, pero la investigación no cubre evaluaciones con arquitecturas más complejas con deslizamientos mayores y en terrenos más amplios, además de que esos landmarks pueden verse obstruidos por agentes externos.

Cantelli et al. en [4] desarrollan un algoritmo que, haciendo uso de encoders, un IMU y DGPS juntas en un filtro Kalman, trata de solucionar el problema de localización. La prueba se realizó en terreno irregular. Los resultados arrojados mostraron altas precisiones debido al aprovechamiento de las ventajas de cada uno de los componentes, por ejemplo, si ocurre una pérdida de señal de GPS, la lógica del IMU y encoder son las que rigen su posición actual. Si bien se logra gran precisión

haciendo uso de DGPS, el costo excesivo puede ser una de sus desventajas ya que el ambiente donde trabaje el robot puede ser amplio y con exigencias de velocidades bajas teniendo la necesidad de varios robots para que cubran más área.

Kim et al. en [5] desarrollan un algoritmo que hace uso de un escáner laser y visión artificial para localización de robots en un ambiente cerrado. Aprovechando el conocimiento de la distancia de los objetos respecto a la ubicación del escáner y el reconocimiento de objetos que se obtiene de la cámara, se crea un algoritmo capaz de tomar decisiones dependiendo del entorno. La principal desventaja de este sistema es la complejidad del algoritmo a usar lo que puede representarse como alta carga computacional dependiendo del ambiente a trabajar, además de ello, el uso de escáneres se ve afectado por la medición en ambientes con objetos reflejantes.

El sistema propuesto en este artículo está específicamente orientado a la calibración de la posición del robot haciendo uso de landmarks mediante ultrasonidos instalados en la carrocería de un robot con arquitectura oruga y trayectorias predefinidas. Los dispositivos que lo componen, el algoritmo de control y los resultados obtenidos se describen en las siguientes secciones.

## II. DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO PROPUESTO

El diagrama de bloques que permite la calibración del robot se muestra en la Fig. 1 y se describe a continuación.

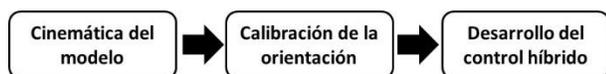


Fig. 1. Descripción del método propuesto

A manera de contexto se dará una breve mención del robot y los componentes. La Fig. 2 muestra la vista isométrica del robot con arquitectura oruga. Este robot se compone básicamente de 4 elementos importantes: motores de corriente continua, catalinas, faja transportadora y la estructura (chasis y carrocería). El chasis del robot está construido a partir de platinas, secciones planas y ángulos de aluminio forjado (aluminio 6061), mientras que la carrocería que cubre el robot está construida a partir de fibra de vidrio. El peso total del robot es de 12 kg con dimensiones de 45 (L) x 40 (W) x 50 (H) cm. El propósito de la carrocería es servir de punto de apoyo y proteger a los componentes que lo integran, además de que se buscó un material ligero que no genere mucha carga al motor.

En la Fig. 3 se presenta un diagrama de pictórico de los componentes que componen el robot como, controlador, sensores y actuadores. En cuanto a los equipos utilizados, se destacan los siguientes componentes:

Se utiliza un motor DC brushed de 45RPM, de 12V - 20A con encoder magnético. Además, se utiliza un driver dual para controlar la velocidad y el sentido de orientación para los motores. El controlador usado para el procesamiento es un ATmega 32U4.



Fig. 2. Vista isométrica del robot diseñado

Los sensores de ultrasonido utilizados para evitar obstáculos son los dispositivos de modelo "HY-SRF05".

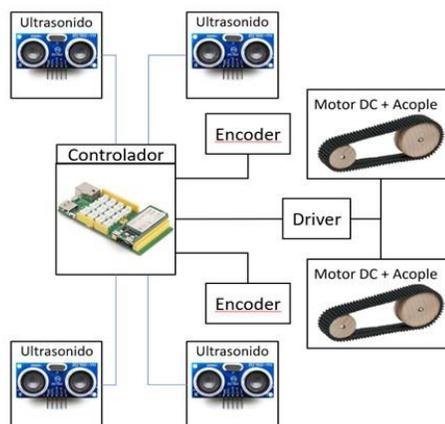


Fig. 3. Diagrama pictórico de los componentes del robot

### A. Cinemática del modelo

Para lograr que el robot realice los movimientos o desplazamientos requeridos, es necesario analizar su modelo matemático. Existen 2 modelos que permiten describir el movimiento del robot. El primero, es conocido como modelo de motores diferenciales (differential drive model), el cual tiene como entradas las velocidades independientes de cada motor. Por su parte, el segundo método es llamado modelo de tipo unicycle, el cual se presenta como la forma más natural de

calcular la posición y orientación del robot ya que sólo requiere introducir los datos de velocidad lineal y angular.

Para desplazar al móvil en este caso se utilizan los dos métodos descritos anteriormente. El modelo del unicycle sirve para los avances lineales mientras que el modelo de motores diferenciales destaca por la actualización de posiciones cuando el autómatas se desplaza hacia los lados.

Para la implementación y su buen funcionamiento, se introducen los valores deseados de velocidad lineal  $V_{lin}$  en cm/s y la velocidad angular  $\omega$  en Rad/s del robot, para hacer uso de las ecuaciones del modelo del unicycle. En el modelo dinámico se utiliza (1) y (2) para hallar las velocidades independientes de cada motor

$$\omega_R = \frac{2 \times V_{lin} + \omega \times L}{2 \times r} \quad (1)$$

$$\omega_L = \frac{2 \times V_{lin} - \omega \times L}{2 \times r} \quad (2)$$

Donde:

- $\omega_R$  = Velocidad angular de la rueda derecha
- $\omega_L$  = Velocidad angular de la rueda izquierda
- $V_{lin}$  = Velocidad lineal (en cm/s)
- $r$  = Radio de la rueda
- $\omega$  = Velocidad Angular (en rad/s)
- $L$  = Distancia axial entre las ruedas

Los valores obtenidos a partir de las ecuaciones servirán como entrada para asignar una velocidad angular a cada motor. Como paso siguiente se adiciona un controlador PID de velocidad, donde sus parámetros han sido hallados mediante un método de ajuste manual obtenido de diferentes pruebas realizadas, debido a la divergencia entre las características físicas propias del diseño ( $K_p = 10, K_i = 20, K_d = 0.5$ )

Como paso siguiente, se obtiene mediante (3), (4) y (5) los valores actualizados de posición y orientación. Para este fin se utilizan las ecuaciones del modelo de motores diferenciales ya que, al hacer uso de motores independientes, compensa los errores generados por la leve asimetría del comportamiento de los motores (ambos no tienen un comportamiento similar inicial).

$$x_{t+\Delta t} = x_t + \frac{r}{2} \times (\omega_R + \omega_L) \times \cos(\theta_t) \times \Delta t \quad (3)$$

$$y_{t+\Delta t} = y_t + \frac{r}{2} \times (\omega_R + \omega_L) \times \sin(\theta_t) \times \Delta t \quad (4)$$

$$\theta_{t+\Delta t} = \theta_t + \frac{r}{L} \times (\omega_R - \omega_L) \times \Delta t \quad (5)$$

Donde:

- $x_{t+\Delta t}$  = Posición actual en eje x (en cm)
- $y_{t+\Delta t}$  = Posición actual en eje y (en cm)
- $\theta_{t+\Delta t}$  = Orientación actual (en grados)
- $x_t$  = Posición anterior en el eje x (en cm)
- $y_t$  = Posición en el eje y (en cm)
- $\theta_t$  = Orientación relativa(en grados)
- $\Delta t$  = Gradiente de tiempo (en s)
- $V_R$  = Velocidad de la rueda derecha
- $V_L$  = Velocidad de la rueda izquierda

En la Fig. 4, se puede apreciar el modelo de movimiento del robot, con todas las variables previamente mencionadas.

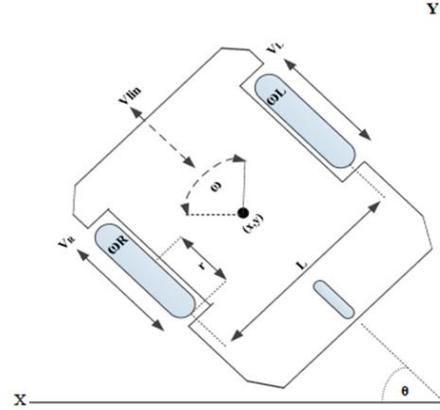


Fig. 4. Modelo del robot con variables cinemáticas

Este procedimiento nos permite aprovechar las bondades de ambos modelos matemáticos para obtener valores más similares a los reales.

## B. Calibración de la orientación

El método de determinación y calibración de posición será obtenido mediante el uso de los sensores de ultrasonido.

En la Fig. 5.a se aprecia al robot en un avance presuntamente recto. Sin embargo, se conoce que el robot perderá la orientación programada original (debido a factores externos como el terreno e internos como la simetría de las ruedas). Se propone calibrar la orientación del robot mediante la medición de las distancias entre los sensores y los muros (landmarks) colocados, los cuales poseen la orientación teórica que debería tener el robot. En la Fig. 5.b y Fig. 5.c, se aprecia al robot con una orientación relativa negativa y positiva, respectivamente, tomando como referencia el plano cartesiano.

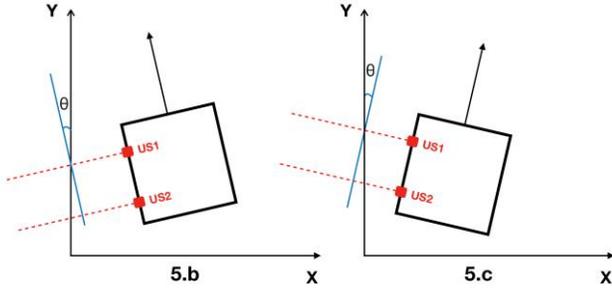
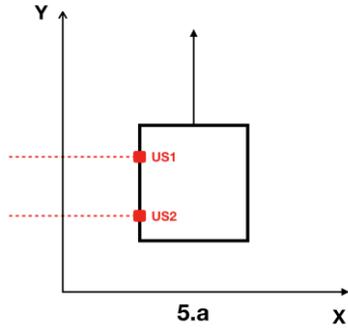


Fig. 5. Modelo del robot con variables cinemáticas, Fig. 5.a Orientación en línea recta, Fig. 5.b Orientación relativa negativa y Fig. 5.c Orientación relativa positiva

Para el caso en que la posición del autómata sea como la que se muestra en la Fig. 5b, su orientación estimada real está definida por (6).

$$\theta_t = -\arctan\left(\frac{US2 - US1}{dist}\right) \quad (6)$$

La posición del autómata sea como la se muestra en la Fig. 5c, su orientación estimada real está definida por (7).

$$\theta_t = \arctan\left(\frac{US1 - US2}{dist}\right) \quad (7)$$

Donde:

$US1$  = Distancia entre la pared y el ultrasonido 1 (en cm)  
 $US2$  = Distancia entre la pared y el ultrasonido 2 (en cm)  
 $dist$  = Distancia entre sensores (en cm)

En ese momento las ecuaciones que determinan la orientación entrarán a tallar, para definir la futura estimación del desplazamiento del robot. En caso el robot se encuentre en el último landmark, este recorrerá una distancia moderada para eliminar el error acumulado durante toda la trayectoria recta.

En caso que el robot requiera girar  $90^\circ$ , se calcularán la distancia lateral de cualquiera de los sensores de ultrasonidos con motivo de actualizar la posición relativa del robot respecto al landmark. En la Fig. 6 se muestra el giro del automata descrito por (8).

$$x_t = x_{lan} - US1 \quad (8)$$

Donde:

$x_{lan}$  = Posición relativa del landmark respecto al eje x  
 $USY$  = Distancia entre la pared y el sensor frontal (en cm)

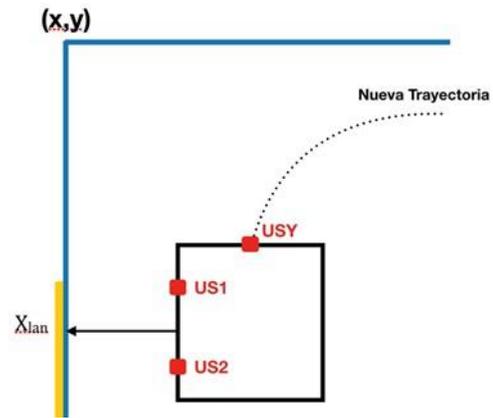


Fig. 6. Calibración de posición ante una esquina

### C. Desarrollo del control híbrido

En la Fig. 7. se muestra el desarrollo del control híbrido o máquina de estados finita. La importancia de realizar este control radica en la necesidad de conocer los posibles escenarios o casos en los que se pueda encontrar el autómata durante su funcionamiento, así como las medidas de contingencia que tomará.

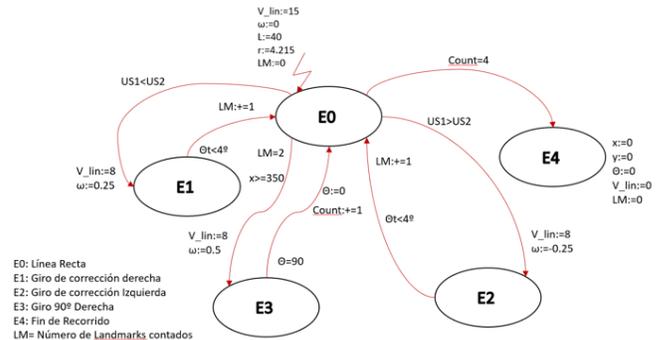


Fig.7 Máquina de estados Control Híbrido propuesto

Se plantean 5 estados básicos. El primero  $E0$  es un avance lineal que se mantendrá a menos que detecte algún landmark. El segundo y tercero estado se activará en caso el autómata

detecte un landmarks lateral ya sea por derecha o izquierda dependiendo de la trayectoria trazada y haciendo uso de las ecuaciones de corrección de ángulos obtenidas mediante los sensores de ultrasonido. El cuarto estado se encargará de realizar giros a 90° y acumular una variable que servirá de contador. Por último, el quinto estado se encargará de detener al robot al contar 4 giros y resetear las variables iniciales dando por terminado el recorrido de la trayectoria.

### III. RESULTADOS

En este apartado se muestran las pruebas reales llevadas a cabo con el robot móvil tomando como referencia la trayectoria ingresada. En este caso fue una trayectoria cuadrada de 4 x 4 m, utilizando el algoritmo de control propuesto.

En la Fig 8. y en la Fig. 9 se muestran los terrenos de prueba. En la Fig. 8 se muestra sobre una superficie de concreto y en la Fig. 9 sobre una superficie de grass sintético.



Fig. 8 Circuito de prueba sobre superficie de concreto



Fig. 9 Terreno de prueba de grass sintético

En la Fig. 10 y en la Fig. 11 se muestran la trayectoria teórica y las trayectorias reales con y sin asistencia de landmarks sobre una superficie de concreto y de grass sintético, respectivamente. Para estas pruebas se realizaron 13 corridas de 10 vueltas cada una mostrándose en las figuras los valores promedio para cada caso usando el mismo sistema de control.

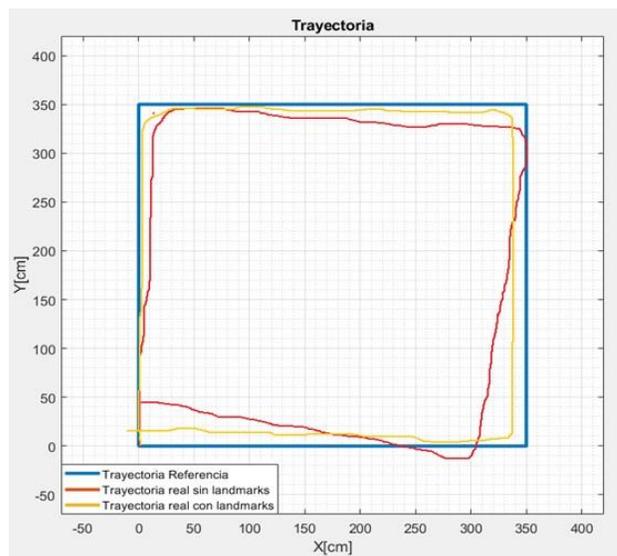


Fig. 10 Trayectoria cuadrada (velocidad lineal de 15 [cm/s] y angular de 3 y 10 [°/s]) sobre una superficie de concreto

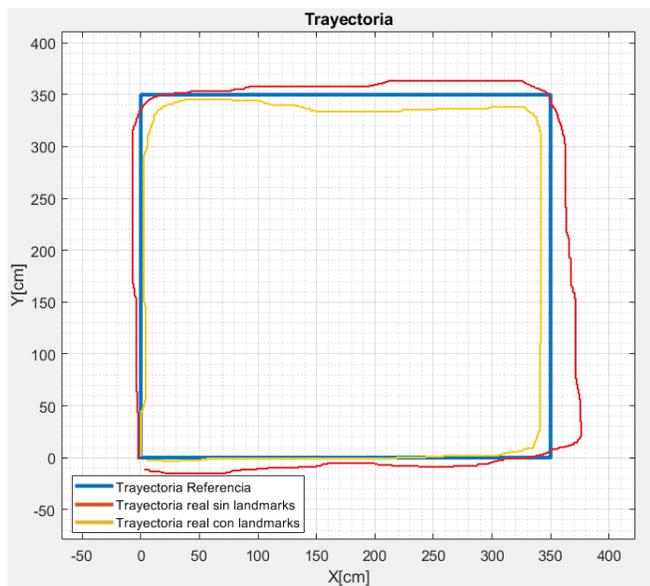


Fig. 11 Trayectoria cuadrada (velocidad lineal de 15 [cm/s] y angular de 3 y 10 [°/s]) sobre una superficie de grass sintético

Las corridas del robot con la inserción de landmarks mejoraron el recorrido de trayectorias en comparación a las corridas sin el uso de estos puntos de referencia. El error acumulado se aprecia a partir del segundo giro que realiza el autómata, llegando a desplazarse en promedio 50cms de distancia en comparación a la trayectoria real.

En general, el error desplazamiento sin landmarks fue 14.8%, mientras que el error de desplazamiento con landmarks fue con 4.28%. Hubo una mejora de 10% lograda mediante el uso de puntos de referencia.

En la Tabla I se distingue el error acumulado por vuelta comparando el punto de finalización de trayectoria teórico con el punto de finalización de trayectoria experimental realizado sobre una superficie de concreto.

TABLA I  
Validación de recorrido del autómata sobre superficie de concreto

Número de vuelta	Recorrido Total (Error / vuelta)	
	Con Landmark (cm)	Sin Landmark (cm)
1	8	54
2	10	44
3	11	46
4	9	60
5	8	55
6	10	54
7	12	46
8	13	52
9	11	42
10	8	47
<b>Promedio</b>	10	50

En la Tabla II se distingue el error acumulado por vuelta comparando el punto de finalización de trayectoria teórico con el punto de finalización de trayectoria experimental realizado sobre una superficie de grass sintético.

TABLA II  
Validación de recorrido del autómata sobre superficie de grass sintético

Número de vuelta	Recorrido Total (Error / vuelta)	
	Con Landmark (cm)	Sin Landmark (cm)
1	11	56
2	8	48
3	11	52
4	13	45
5	12	54
6	11	55
7	10	51
8	8	44
9	7	61
10	11	47
<b>Promedio</b>	10.2	51.3

En los resultados presentados en ambas tablas se aprecia que el uso de landmarks cumple en disminuir el error acumulado por cada vuelta. Del mismo modo, se puede verificar que la superficie de cada tipo de terreno brinda valores más o menos dispersos. En el caso de la superficie de concreto, este posee menor deslizamiento debido a la fricción generada por el caucho de las fajas contra la superficie.

Por su parte, los resultados obtenidos en la superficie de grass sintético presentaron valores más dispersos, esto debido a tratarse de un ambiente exterior, con presencia de más ruido que puede haber alterado el rango de medición de los sensores utilizados. Es importante recalcar que dicho sensor está limitado a un alcance de entre 3cm a 60cm en su rango de medición óptima.

## CONCLUSIONES

Es importante calibrar correctamente los sensores de ultrasonido para la detección de landmarks, ya que en caso de exceder el valor ideal de calibración pueden tomar falsas medidas y reaccionar de una manera indebida ante un obstáculo no previsto. Del mismo modo, el insertar un valor menor al ideal puede derivar en la incorrecta detección del landmark (por encontrarse muy lejos del autómata)

Del mismo modo, se deben considerar los factores físicos del terreno en el momento de la carga de trayectorias. Consideraciones como el deslizamiento de las orugas, el coeficiente de fricción, la humedad y temperatura del ambiente

pueden alterar o variar ligeramente los valores esperados y generar errores acumulados en la trayectoria.

Los resultados obtenidos permitieron establecer que es posible trazar una trayectoria y seguirla mediante únicamente sensores ultrasonidos. Posible mejoras o temas de investigación se basan en ampliar la distancia de desplazamiento y aumentar el número de robots sobre un circuito, esto permitiría evaluar el uso de este tipo de robots, que miden solamente una variable externa para su locomoción, en ambientes estrechos e inhóspitos.

## REFERENCIAS

- [1] R. Gonzáles, F. Rodríguez y J. Guzmán, “Robots Móviles con Orugas. Historia, Modelado, Localización y Control”. Rev. Iberoamericana de Automática e Informática Industrial Vol. 12, 2015, págs: 3-12
- [2] A. Marquez et al., “Accurate UWB and IMU based Indoor Localization for Autonomous”. IEEE 30th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, 2017
- [3] N. Mohd et al., “Autonomous mobile robot localization using Kalman filter” MATEC Web of Conferences, 2017.
- [4] L. Cantelli, “Auto-Calibration Methods of Kinematic Parameters and Magnetometer Offset for the Localization of a Tracked Mobile Robot”, Dipartimento di Ingegneria Elettrica Elettronica e Informatica, Università degli Studi di Catania, Agosto de 2016
- [5] B. Kim, “Indoor Localization using Laser Scanner and Vision Marker for Intelligent Robot”, School of Electrical & Electronic Engineering, Yonsei University, 12th International Conference on Control, Automation and Systems, 2012