

Tratamiento digital de un pulso ultrasónico para la navegación de un robot autónomo móvil mediante análisis geométrico

Digital treatment of an ultrasonic pulse for autonomous mobile robot navigation through geometrical analysis

Javier Romero-Perigault¹, Nielsen Rodríguez¹, Dania Rodríguez¹, Luis Custodio¹, Danilo Cáceres Hernandez¹, Fernando Merchán^{2*}

¹Laboratorio de Sistemas Inteligentes, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad Tecnológica de Panamá, ²Grupo de Investigación de Sistemas de Comunicaciones Avanzados, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad Tecnológica de Panamá

Resumen En este artículo se explican los fundamentos y consideraciones necesarias para la implementación de dos o más sensores ultrasónicos HC-SR04, con disposición distinta a configuraciones de posiciones convencionales para sensores de detección y distancia, en vehículos autónomos y robots. Se propone un método de distinción de pulsos ultrasónicos emitidos y reflejados, realizando una comparación de patrones de señales digitales recibidas por los sensores en base a dichos pulsos, con diferentes ángulos de incidencia y reflexión; para, luego, procesar dichas señales mediante un método de tratamiento de señal digital elemental implementada en una plataforma computacional incorporada a un robot autónomo. Con este trabajo se busca contribuir a la elaboración de un posible prototipo de mapa de escenarios de laberinto recorrido por el vehículo. Se concluye que el robot está en plena capacidad de distinguir distintos escenarios de un laberinto, sin importar el parecido de los patrones de señal digital de distancia o la posición de los sensores presentada en este artículo.

Palabras clave Análisis geométrico, ángulo de incidencia, ángulo de reflexión, correlación cruzada, HC-SR04, procesamiento digital de señales, pulso ultrasónico, navegación, reverberación, robótica autónoma móvil.

Abstract This article explains the necessary fundamentals and considerations for the implementation of two or more HC-SR04 ultrasonic sensors, with different arrangement than conventional position configurations for detection and distance sensors, in autonomous vehicles and robots. A method of distinguishing emitted and reflected ultrasonic pulses is proposed, making a comparison on the patterns of the digital signals received by the sensors based on such pulses, with different angles of incidence and reflection; to later process such signals by means of an elemental digital signal treatment method, implemented on a computing platform carried by an autonomous robot. It is sought, with this work, to contribute to the development of a possible map prototype of a maze environment travelled by the vehicle. It is concluded that the robot is fully able to distinguish different maze scenarios, no matter the likeliness of the patterns of distance digital signals or the sensors arrangement presented in this article.

Keywords Geometrical analysis, angle of incidence, angle of reflection, cross correlation, HC-SR04, Digital signal processing, reverberation, ultrasonic pulse, navigation, mobile autonomous robotics.

* Corresponding author: fernando.merchan@utp.ac.pa

1. Introducción

En los últimos años se han logrado grandes avances tecnológicos que promueven una cuarta revolución industrial. Esta nueva revolución trae consigo una diversidad de áreas innovadoras, entre ellas la robótica y la inteligencia artificial. En este artículo nos enfocaremos en la robótica móvil, la cual ha sido pieza fundamental en el desarrollo de varias industrias en la actualidad.

La robótica móvil es el uso de la locomoción automática programable, capaz de desarrollar diversas tareas. Esta puede dividirse en tres subsistemas fundamentales: reconocimiento, control y movimiento [1, 2]. El subsistema de reconocimiento

abarca el uso de sensores para adquirir información del robot y del entorno que lo rodea. El subsistema de control regula y monitorea el subsistema de movimiento con los datos suministrados por el subsistema de reconocimiento. Y el subsistema de movimiento es la estructura física del robot que tiene contacto directo con su entorno.

En este artículo el enfoque va dirigido al desarrollo de un subsistema de reconocimiento basado en distancias, cuyo elemento más importante es el sensor ultrasónico. El sensor empleado en este trabajo es el HC-SR04, el cual es capaz de emitir y recibir pulsos a distancias tan cortas como 2 cm y tan largas como 400 cm.

El objetivo de implementar los sensores en este artículo es construir un mapa de trayectoria, basado en patrones de emisión-detección directa. Luego, con la información de distancias descrita en el mapa, es posible la posterior resolución de un laberinto.

Vale la pena hacer la salvedad de que este trabajo no ofrece ningún elemento sustancialmente nuevo al lector; ya que se han realizado, a lo largo de la historia de la electrónica moderna (2002-actualidad), varios manuscritos mencionando los lineamientos y técnicas para vehículos robots en la resolución de laberintos [3, 4]. Entre estos, se menciona una rama particular de la robótica de la navegación autónoma: La localización y mapeo simultáneo (SLAM: “*Simultaneous Localization and Mapping*”), que se trata del estudio a nivel computacional de la confección de algoritmos que permiten la construcción de un mapa de un entorno desconocido, al mismo tiempo que se mantiene un registro del movimiento y trayectoria de la entidad que se encuentra en navegación y que, por lo general, guarda dichos parámetros (vehículo robótico en este caso) [5-8]. Con este documento, se tiene como objetivo la contribución a este campo de análisis, marcando las consideraciones básicas que puedan afectar el funcionamiento del vehículo robot con la configuración sensorial aquí descrita.

El resto del artículo está organizado de la siguiente manera: La sección 2 presenta los elementos, casos de estudio previo a la recolección de datos, descripciones geométricas del pulso ultrasónico e implementación de correlación cruzada. La sección 3 muestra los resultados y la sección 4 concluye el artículo.

2. Materiales y métodos

A continuación, se presentan los elementos y consideraciones que se emplearon en la etapa experimental de este trabajo.

2.1 Características del sensor HC-SR04

El sensor ultrasónico HC-SR04 cuenta con un ángulo de acción efectivo de 15° a cada lado del centro del sensor, donde la emisión-detección directa del pulso ultrasónico es óptima. Adicionalmente, cuenta con un ángulo de acción absoluto de 22.5°, donde se encuentra una cantidad reducida de eventos de emisión-detección directa.

Este módulo se energiza con 5 V en corriente directa, consume una corriente menor a 2 mA cuando no está activo y demanda una corriente de 15 mA cuando está activo. El patrón de emisión ultrasónico, estandarizado a 40 kHz, es emitido en un tren de 8 pulsos simétricos, espaciados a 25 μs. Dicho patrón es activado por un pulso de disparo (*trigger*) de 10 μs, como se observa en la figura 1, el cual puede ser emitido por cualquier microprocesador o microcontrolador.

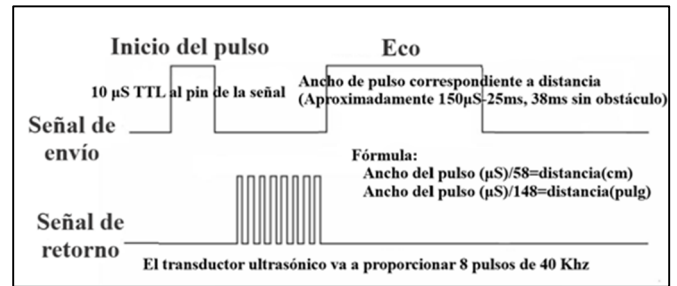


Figura 1. Esquema de funcionamiento del sensor ultrasónico HC-SR04. Fuente: iteadstudio.com.

La recepción del pulso de disparo se da cuando este ha rebotado en algún objeto localizado dentro del ángulo de acción del sensor. El pulso es luego detectado por el mismo sensor como un “eco” (*echo*) recibido, cuyo ancho o duración siempre dependerá de la distancia que recorra el pulso de disparo, que se ubica normalmente entre 150 μs – 25 ms. En caso de recibir un pulso vacío, es decir un pulso emitido por el sensor que no tiene “eco” o retorno, la duración del envío del pulso será alrededor de 38 ms. Cada vez que se transmite un pulso vacío, el sensor emite otro tren de pulsos con las mismas características luego de transcurridos 50 ms.

Los parámetros de distancia se calculan a partir de la ecuación (1), establecida por el fabricante durante la construcción del sensor [9]. Es evidente que la distancia es proporcional al ancho de pulso, sin embargo, esto no ofrece una medida exacta de la distancia. Esta ecuación puede servir como base para establecer una referencia sujeta a programación en código fuente dirigida a un microcontrolador o cualquier otra tarjeta de desarrollo.

$$D_{[cm]} = \frac{\text{Tiempo}[s] \cdot V_{\text{SONIDO}}[m/s]}{2} \quad (1)$$

2.2 Descripción de vehículo y pruebas de recolección de datos

El vehículo utilizado en este trabajo de investigación es construido con ruedas y chasis de acrílico, ensamblado mediante tornillos y ajustado para locomoción tipo triciclo. En la figura 2 se muestra la estructura física del vehículo con el arreglo de tres sensores ultrasónicos HC-SR04. El vehículo es controlado por un Arduino Uno, con una tarjeta de expansión para aumentar la capacidad de conexión de componentes. La locomoción hacia adelante y hacia atrás es posible debido a un actuador de motor L293D con el clásico diseño puente H. Este actuador es alimentado con 3.7 V por tres baterías apiladas de Polímero de Litio.

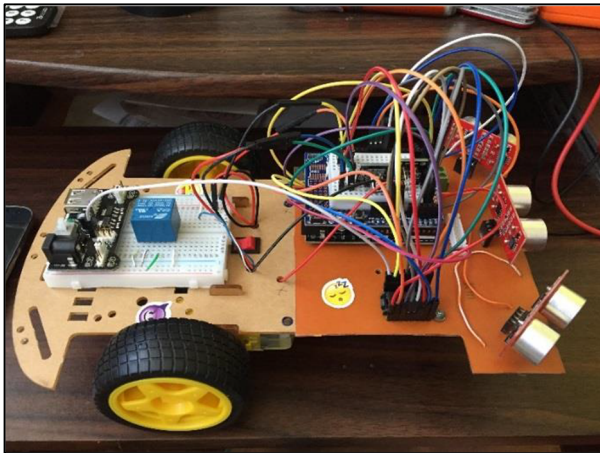


Figura 2. Estructura del vehículo "CarBot".

Un laberinto pone a prueba todos los parámetros de sensado ultrasónico que posee el vehículo. Este puede configurarse de varias formas, utilizando muros reflectores y opacos. Estos se seleccionaron debido a su propiedad física de reflejar y opacar los pulsos de emisión y recepción. Para emular dichos muros, se utilizaron mosaicos cuadrados de 30cm x 30cm, como se observa en la figura 3, contruados a base de MDF (*Medium-Density Fibreboard* o Tablero de Fibra de Densidad Media).

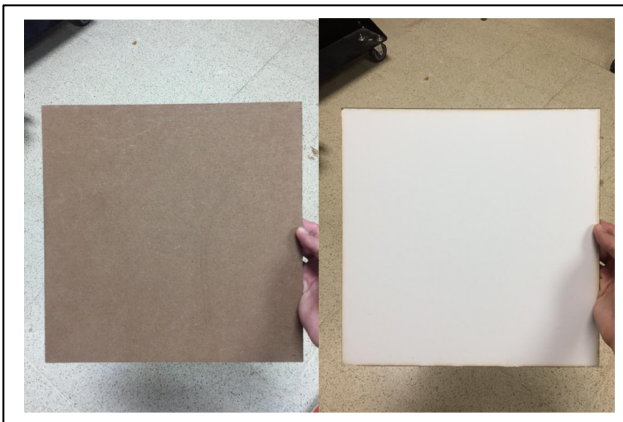


Figura 3. Caras del mosaico construido a partir de MDF y que sirve como muro para las pruebas. La cara del mosaico en la imagen izquierda es cartón (muro opaco) y la cara de la imagen derecha es cartón con una capa de pintura (muro reflector).

La prueba realizada consistió en recolectar información de los sensores ultrasónicos. Para esto, se trabajó en los dos escenarios más críticos de los cinco posibles para un laberinto presentados en la figura 4: los escenarios C y D con los muros puestos en modo opaco y luego en modo reflector.

Los datos se recolectaron con un código ejecutado en la tarjeta Arduino y un software de comunicación serial llamado "PLX-DAQ" de Parallax^{INC}. Luego, la información se organizó en una hoja de Excel, de manera que el microcontrolador

ATMEGA328P de la tarjeta Arduino solo ejecutará el proceso de transducción de los pulsos ultrasónicos a señales de distancias. El ciclo de emisión-detección de los pulsos procedentes de los sensores se configuró en la tarjeta Arduino para ejecutarse cada 10ms.

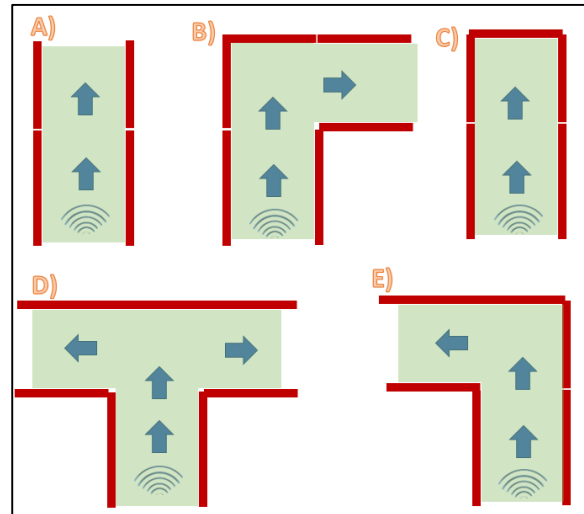


Figura 4. Escenarios en los que se pone a prueba al robot.

2.3 Descripción geométrica de los pulsos ultrasónicos

Los pulsos ultrasónicos son ondas longitudinales que se propagan en la distancia y se disipan al transcurrir del tiempo. Estas ondas se rigen por la ecuación diferencial general de onda lineal (2) y esta, a su vez, es desglosada para describir a la onda de sonido longitudinal mediante la ecuación (3). De igual manera, la ecuación (3) se puede reescribir en términos de un factor de número de onda angular "k", mostrado en la ecuación (4), que corresponde a la longitud de onda angular y equivale a $2\pi/\lambda$. Para la ecuación (2), el término antes de la igualdad representa la curvatura natural de la onda sonora $y(x,t)$. El término después de la igualdad representa la aceleración de la onda sonora, multiplicado por el recíproco del cuadrado de su velocidad de fase. Para el resto de las ecuaciones presentadas (3) y (4), la frecuencia angular de la onda está representada por " ω ", la velocidad de la onda por " c ", la distancia que implica el recorrido de la onda está representado por " x " y la amplitud de la onda sonora está representado por " y_0 ".

$$\frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial x^2} = \frac{k^2}{\omega^2} \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} \quad (2)$$

$$y(x,t) = y_0 \cos\left(\omega\left(t \pm \frac{x}{c}\right)\right) \quad (3)$$

$$y(x,t) = y_0 \cos(\omega t \pm kx) \quad (4)$$

Naturalmente, los pulsos de ultrasonido transmitidos en el aire suponen su posterior decaimiento de onda o atenuación en grandes distancias; considerándose dicho fenómeno, como la

disminución en 6 dB por distancia duplicada, para efectos del nivel de presión sonora (en este trabajo, el decaimiento se considera desde 2 m en adelante en un espacio completamente abierto, entre el sensor y el objeto medido). Es importante mencionar que las distancias estudiadas en los escenarios del laberinto no exceden los 0.95m y, por ende, la atenuación puede ser descartada. La emisión-detección de los pulsos por parte del sensor se consideran óptimos y, a consecuencia, el tren de pulsos es proyectado en línea recta. En la ecuación (5), el cambio en decaimiento de la amplitud de la onda de sonido (presión sonora) está descrito por un factor exponencial, cuyo valor depende de la distancia “x” y un coeficiente de atenuación “α” que depende siempre de la velocidad del sonido en el aire (340 m/s).

$$y(x,t)=y_0 e^{-\alpha x} \cos(kx-\omega t) \quad (5)$$

Las trazas o haces ultrasónicos, tratados como un conjunto de ondas con propagación en líneas rectas (debido a que se tiene un frente de ondas), obedecen a las leyes de la reflexión de ondas (ver figura 5): 1) El ángulo de incidencia, ángulo de reflexión y la normal; se encuentran todas en el mismo plano y punto de incidencia. 2) El ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión respecto a la normal. 3) El ángulo de incidencia y el ángulo de reflexión se encuentran en lados opuestos respecto a la normal.

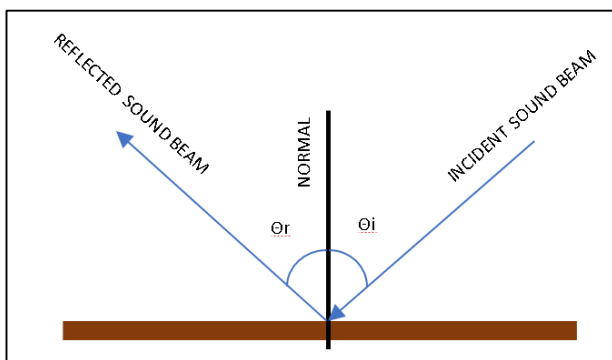


Figura 5. Ángulo de incidencia y reflexión aplicables a las ondas sonoras.

Aparte de tener estas características, las ondas ultrasónicas se propagan en 3D y al momento de considerar espacios cerrados, como los de un laberinto, las dos situaciones más probables a presentarse son: 1) Que estas ondas reboten y retornen, idealmente, como ecos. 2) Que sean reflejadas varias veces en dichos espacios (fenómeno conocido como reverberación) [14].

Cuando un sensor lateral emite hacia un muro un pulso ultrasónico con un ángulo de 45° respecto al eje longitudinal de avance del vehículo, este muro puede provocar reverberación del pulso y posiblemente, completar el ciclo de

emisión-detección directa varias veces; registrando al final un conjunto de distancias falsas o inconsistentes respecto a la medida o distancia verdadera entre el sensor lateral y el muro (ver figura 6). Por otra parte, en el escenario D sucede exactamente la misma situación, pero con una distancia verdadera mucho mayor, como se muestra en la figura 7.

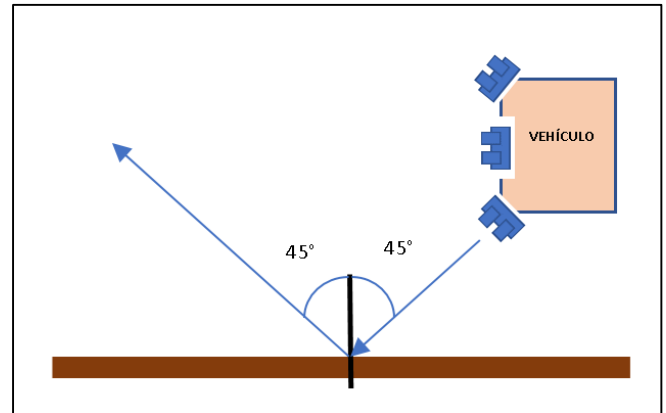


Figura 6. Ángulo de incidencia y reflexión aplicables a las ondas sonoras. Esta imagen representa la situación en la que un sensor lateral del vehículo emite, naturalmente, un pulso ultrasónico hacia un muro, a 45° respecto al eje longitudinal de avance del mismo.

El sistema de procesamiento del vehículo debe ser capaz de diferenciar, a base de parámetros específicos que ofrezcan todos los escenarios, cuándo se tiene un obstáculo justo en frente, diagonal o a un lado del vehículo. De obtener los resultados esperados, es posible realizar, posteriormente, un prototipo de mapa recorrido por el vehículo en base a las distancias medidas en un tiempo dado.

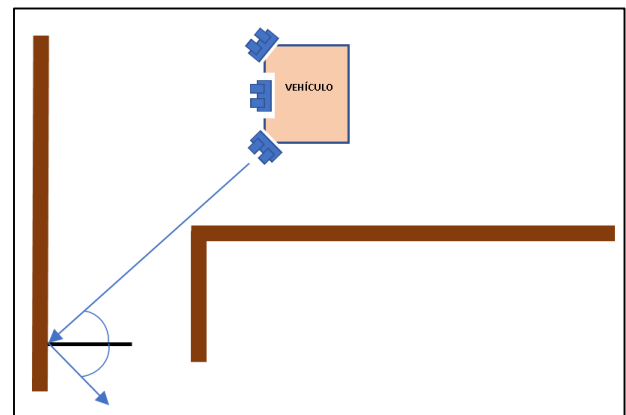


Figura 7. Ángulo de incidencia y reflexión aplicables a las ondas sonoras. Esta imagen representa la situación alternativa a la de la figura 6 en la que un sensor lateral del vehículo emite, un pulso ultrasónico a 45° respecto al eje longitudinal de avance del mismo, pero a una distancia mucho mayor.

Respecto a la reverberación misma, en modelos de demostración, ya sea de pequeña escala o gran escala, se pueden apreciar diversos efectos de acústica de habitación que

involucran múltiples interferencias entre las ondas sonoras incidente y reflejada, provocando ondas estacionarias y estas, a su vez, generan zonas de presión sonora en los nodos de dichas ondas estacionarias [12].

Ya que los sensores ultrasónicos trabajan con una serie de pulsos de 40KHz (clasificado en la escala de ultrasonido como baja frecuencia, ver figura 8), el tiempo de reverberación es más consistente en base a la resonancia formada en el espacio pequeño del laberinto; siempre asumiendo que dicho espacio pequeño es completamente cerrado, esto es, que existe un techo teórico en el mismo. Se pueden estimar los tiempos de reverberación por resonancia a baja frecuencia, para cada escenario en el laberinto según el modelo de respuesta de una habitación (“Room Response”), determinado por la ecuación de Schroeder (6) que establece el umbral de frecuencia sobre el que son posibles estas reverberaciones [4].

Esta frecuencia de reverberación tiene relación directa con las dimensiones (volumen “V”) de la habitación, comparable con la longitud de onda de sonido; y es capaz de determinar el tiempo de reverberación “Tr₆₀”, que en términos técnicos y mediante el uso de un medidor, es el tiempo que toma la onda de sonido en disminuir su nivel de presión sonora por 60dB antes de desaparecer de manera abrupta.

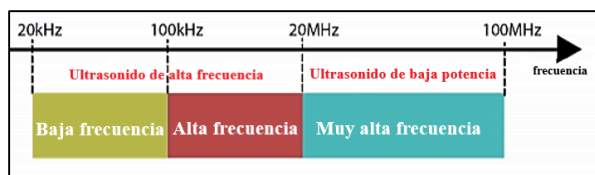


Figura 8. Tabla de clasificación para frecuencias ultrasónicas.

Fuente: A. Franco y C. Bartoli: “The ultrasounds as a mean for the enhancement of heat exchanger performances: an analysis of the available data”, Agosto 2018.

$$f_{\text{schroeder}} \approx 2000 \sqrt{\frac{T_{r60}}{V}} \quad (6)$$

Otra manera teórica de medir el tiempo de reverberación [10] es mediante la ecuación de “Curva de Decaimiento de Energía” (“EDC” en inglés) (7) que no es más que el nivel RMS (eficaz) del remanente de una onda sonora detectada por un transductor sónico justo después de que dicha onda desaparece completamente. Esta EDC describe, en pocas palabras, la energía restante en una respuesta al impulso luego de un tiempo “t”, para cuando la señal de onda es filtrada en el mencionado transductor, en una banda de frecuencias específica. El tiempo de reverberación se ubicará, de esta manera, en: $t < T_{r60} < \infty$.

$$EDC_h(t) = \int_t^{+\infty} h^2(\tau) d\tau \quad (7)$$

2.4 Implementación de correlación cruzada

Como ya se ha mencionado, se realizaron dos pruebas correspondientes a los dos escenarios ya mencionados (C y D, vistos en la figura 4). Estas pruebas se realizaron con los muros en modo opaco y en modo reflector, con el único propósito de verificar que exista un patrón de distinción entre los pulsos ultrasónicos de 45°, emitidos a los muros a corta distancia y a larga distancia (tal cual como se explican en las figuras 6 y 7). Para lograr esto, se utilizó la técnica de correlación cruzada para los escenarios C y D, tanto con muros opacos como reflectores. El propósito final de esta correlación es demostrar que existen discrepancias suficientes entre ambos escenarios, sin importar la influencia de los tipos de muros utilizados en un laberinto.

Para los datos de distancia obtenidos (trabajados siempre en centímetros), se busca primeramente una correlación que demuestre que los sensores laterales son capaces de mostrar una ligera pero significativa diferencia en el comportamiento de los pulsos o haces ultrasónicos en todos los posibles escenarios de laberinto de la figura 4 a partir de lo mostrado en los escenarios C y D. Todos los datos colectados por la tarjeta Arduino y enviados a la hoja de excel, son sometidos a procedimientos de correlación llevados a cabo por el programa de cómputo numérico MATLAB. El fundamento teórico de la correlación cruzada lineal aplicada, considerando el procesamiento de una señal en un entorno digital, se basa en la ecuación (8). La razón de la aplicación de este tipo de correlación a este trabajo se deba a que no se trata con señales propiamente digitales, sino con valores de distancia arrojados de manera digital por el microcontrolador como patrones de puntos digitales, vistos en las figuras 9 y 10, sobre los que se pueden construir “trazas” de distancias.

$$r = \text{xcorr}(x, y) \quad (8)$$

3. Resultados y discusión

Para las correlaciones llevadas a cabo, se muestra la tabla 1, que indica las discrepancias entre los escenarios de laberinto C y D, tanto con los muros opacos como con los muros reflectores, indicando de esta manera que el robot está en la capacidad de detectar los espacios en los escenarios probados, aun cuando se dé el fenómeno de reverberación por la emisión de pulsos laterales en 45° hacia los muros. Las señales captadas por los sensores y llevadas al entorno Excel-Matlab se pueden apreciar en las figuras 9 y 10.

Se obtienen diferentes comportamientos en los sensores, para ambos tipos de muros y esto sucede porque al momento de definir los recorridos con los muros (intento de emisión-detección directa del pulso ultrasónico), la distancia en la mayoría de los casos oscila entre los 100cm, esto debido a que el pulso se refleja y amplía su recorrido; y específicamente ocurre en los sensores laterales, con un ángulo x respecto al eje

longitudinal de avance del vehículo, siendo este caso, los sensores ubicados a 45° y 135° y no el sensor orientado perpendicularmente al muro. Estas cifras altas de distancias se deben, entonces, al fenómeno ya mencionado de reverberación; es decir, que el pulso no fue enviado y recibido en un período corto, sino que se dirigió a algún otro punto para chocar y volver al receptor. Para el caso del muro reflectivo, en particular, es más notable el hecho de que el pulso realizó más de un choque y volvió al punto de recepción del sensor, por el conjunto de distancias finales registradas en comparación a las distancias con el muro opaco.

Tabla 1. Correlación los escenarios para las señales de cada uno de los sensores del vehículo, tomando en cuenta la configuración de los muros de dichos escenarios. Estos valores de correlación cercanos a cero sirven como indicativos de que el sistema de procesamiento de distancias del vehículo está en la capacidad de distinguir y clasificar cada una de las señales de distancia detectadas sin importar el escenario o tipo de muro

		Sens. Izq.	Sens. Cen.	Sens. Der.
MURO OPACO	Escenario C	0.117	0.465	0.212
	Escenario D			
MURO REFLECTOR	Escenario C	0.02	0.108	0.058
	Escenario D			

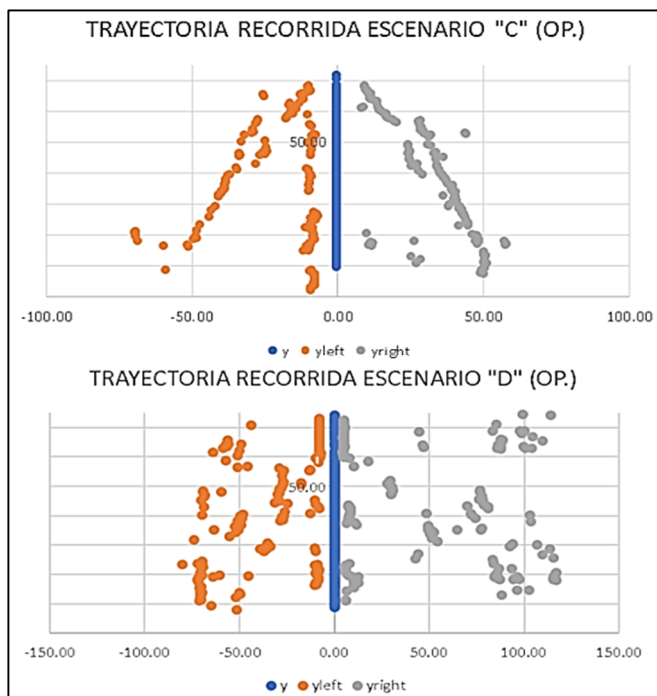


Figura 9. Trazas de los pulsos ultrasónicos para un escenario con muros opacos. La imagen de arriba pertenece al escenario “C” y la de abajo pertenece al escenario “D” (las medidas mostradas en los ejes son en centímetros)

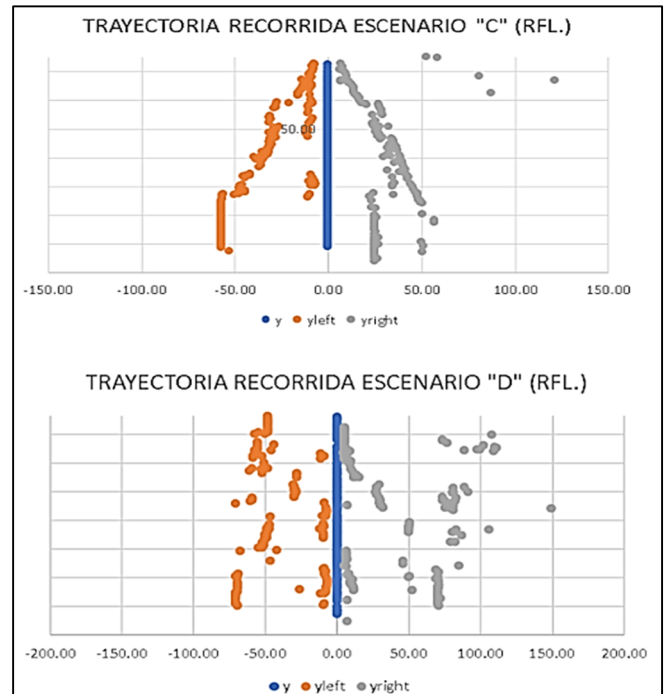


Figura 10. Trazas de los pulsos ultrasónicos para un escenario con muros reflectores. La imagen de arriba pertenece al escenario “C” y la de abajo pertenece al escenario “D” (las medidas mostradas en los ejes son en centímetros).

4. Conclusiones

En este trabajo se demuestra que el uso de sensores de ultrasonido implica la observación de todos los aspectos que alteran su medición de distancias, haciendo especial énfasis en la capacidad de los muros de absorber o reflejar los pulsos.

Además, se puede demostrar que, a pesar de que el fenómeno de la reverberación puede alterar significativamente las distancias tomadas por el sensor; el vehículo/robot está en la plena capacidad de tomar la información pertinente al entorno en que se encuentra sin que su lógica programable entre en una relativa “confusión”, siempre basándose en el comportamiento de las señales ultrasónicas emitidas y recibidas; permitiendo esto, una posible construcción, a futuro, de un algoritmo de mapeo que muestre el camino que ha recorrido el vehículo dentro de un laberinto. Así mismo, con este trabajo se obtiene un método de toma de conjunto de datos bastante versátil, ya que el mismo puede funcionar en cualquier plataforma robótica programable en concepto de procesamiento de grandes cantidades de datos, siendo esto crucial en la implementación de algoritmos en la rama robótica del SLAM.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a los docentes de la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Tecnológica de Panamá (UTP), a la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación de Panamá (SENACYT), al Sistema Nacional de Investigación de

Panamá (SNI) (SNI Contrato 168-2017), por su asistencia y colaboración en el desarrollo de este trabajo de investigación.

REFERENCIAS

- [1] S. K. Saha, Subir Kumar, *Introducción a la Robótica*, 1ra ed., México D.F, México, McGraw-Hill, 2010.
- [2] J. J. Craig, *Robótica*, 3ra ed., México D.F, México, Pearson Prentice Hall, 2006.
- [3] B. Clough, "Rooter - A MicroMouse Maze Solving Robot", reporte de proyecto, Aberystwyth University, U.K., 2007.
- [4] A. Bakarsayutisaman y I. Abdramane, "Solving a Reconfigurable Maze using Hybrid Wall Follower Algorithm," *International Journal of Computer Applications*, vol. 82, no. 3, pp. 22–26, Nov. 2013.
- [5] H. Durrant-Whyte y T. Bailey, "Simultaneous localization and mapping: part I". *IEEE Robotics & Automation Magazine*. vol. 13, no. 2, pp. 99–110, Jun. 2006
- [6] T. Bailey y H. Durrant-Whyte, "Simultaneous localization and mapping (SLAM): part II". *IEEE Robotics & Automation Magazine*. vol. 13, no. 3, pp. 108–117, Aug. 2006.
- [7] C. Cadena, L. Carlone, H. Carrillo, Y. Latif, D. Scaramuzza, J. Neira, I. Reid y J.J. Leonard, "Past, Present, and Future of Simultaneous Localization and Mapping: Toward the Robust-Perception Age". *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 32, no. 6, pp. 1309–1332, Dec. 2016.
- [8] S. Perera, N. Barnes, y A. Zelinsky, "Exploration: Simultaneous Localization and Mapping (SLAM)", *Computer Vision: A Reference Guide*, K. Ikeuchi Ed., Springer US, pp. 268–275, 2014.
- [9] Ultrasonic ranging module: HC-SR04, Shenzhen, China, *ITEAD Studio*. (2010), Accessed: Aug. 24, 2020. [En línea]. Disponible: ftp://imall.iteadstudio.com/Modules/IM120628012_HC_SR04/D_S_IM120628012_HC_SR04.pdf
- [10] J.-M. Jot, L. Cerveau y O. Warusfel, *Analysis and Synthesis of Room Reverberation Based on a Statistical Time-Frequency Model*, Paris, France, IRCAM, Paris, Sep. 1997. [En línea]. Disponible: <http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=7150>
- [11] M. Valente, H. Hosford-Dunn y R J. Roeser, *Audiology Treatment*, 2nd ed., Thieme. pp. 425–426, Jun. 2008
- [12] J. António, Acoustic behaviour of fibrous materials, *In Woodhead Publishing Series in Textiles, Fibrous and Composite Materials for Civil Engineering Applications*, R. Figueiro Ed., Woodhead Publishing, 2011, pp. 306-324, 2011.