

Incorporación de Sensores Acústicos en el Control de Regulación a un Punto de un Robot Móvil

C. A. Luna-Aguilar * M. Castelán * A. B. Morales-Díaz *
C. Nadeu **

* *Grupo de Robótica y Manufactura Avanzada, Centro de Investigación y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Unidad Saltillo. Ramos Arizpe, Coahuila, 25900, México.
(e-mail: mario.castelan@cinvestav.edu.mx)*

** *Departamento de Teoría de Señales y Comunicación, Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona, 08034, España.*

Resumen: Este artículo describe el método Diferencia de Tiempo de Llegada (TDOA) para estimar la localización de fuentes acústicas en aplicaciones de regulación a un punto de un robot móvil. Al localizar fuentes acústicas con TDOA el error de localización varía dependiendo de la distancia entre la fuente y el arreglo de micrófonos. Como una solución a este problema se propone la generación de un mapa de navegación acústica que indique el comportamiento de los errores de localización dentro de un área de trabajo. Nuestro método presenta la ventaja de que el control propuesto no depende de errores de las variables del robot, sino del gradiente del mapa de navegación acústica. Se realizaron simulaciones, en Matlab, que demuestran la aplicación exitosa del control en tareas de regulación a un punto.

Keywords: localización acústica, regulación a un punto, integración de campos gradientes

1. INTRODUCCIÓN

En el desarrollo de tareas de control, uno de los problemas comunes a los que se enfrenta la robótica móvil es lograr estimar la posición y orientación de cada robot con respecto a un marco de referencia fijo. A este problema se le conoce en la literatura como localización de robots móviles. La localización de un robot móvil puede ser representada por los parámetros (x, y, θ) , donde x, y y θ son, la posición y orientación de un robot respectivamente.

Idealmente, la localización puede ser estimada por medio de odometría, la cual utiliza información sobre la rotación de las ruedas obtenida por codificadores para estimar cambios en la posición y orientación a lo largo del tiempo, Elseberg et al. (2013), Martinelli et al. (2003). Sin embargo, este método no es confiable debido a que en recorridos largos es imposible evitar la acumulación del error provocado por el derrape de las ruedas o irregularidades en el terreno, Dudek y Jenkin (2010).

Por otro lado, la localización ha sido ampliamente estudiada en el área de la robótica móvil, en su mayoría utilizando sensores de visión. Uno de los métodos es la odometría visual, Scaramuzza y Fraundorfer (2011), Scaramuzza y Fraundorfer (2012), la cual es menos afectada por la propagación del error.

Sin embargo, al utilizar sensores de visión para localización de robots, el espacio de la tarea está restringido al campo de vista del sensor. Por ello se requiere desarrollar estrategias que incorporen nuevos sensores para eliminar las limitaciones existentes y así poder obtener datos sobre el estado actual del robot. En este sentido, vale la pena

explorar la capacidad de algoritmos que analicen señales acústicas para determinar la localización de la fuente de sonido, Chakraborty y Nadeu (2014), Macho et al. (2005). Aunque un único sensor acústico no puede sustituir a un observador humano y hay que utilizar un conjunto de ellos, el bajo costo es un factor de peso para ser considerados en situaciones donde el sensor de visión no resulta suficiente.

A diferencia de los sensores acústicos, algunas situaciones adversas a las que se enfrentan los sensores de visión son: la existencia de obstáculos que incapacitan la detección y el seguimiento del robot, el limitado campo de visión de los propios sensores y el exceso o déficit de iluminación.

Existen trabajos enfocados en resolver la tarea de localización que presentan alternativas basadas en técnicas de acústica, Hyup Ko et al. (1996), Valin et al. (2003), Guo et al. (2012). No obstante, ninguno de éstos incorpora el uso de control de regulación a un punto que puede ser de gran utilidad en casos donde se desea mover un robot de una posición inicial a una posición deseada sin la necesidad del conocimiento de trayectorias predefinidas, es decir, que puede moverse con libertad en cualquier parte del entorno. Algunas aplicaciones de este control pueden ser: trasladar a robots móviles a una estación de carga de batería, llevar a un robot a una condición de reposo, colocar robots en su localización correspondiente dentro de una formación de robots.

El problema que se aborda en este artículo es el control de regulación a un punto considerando un esquema de sensores acústicos y un mapa de navegación acústica. Para tal fin se propone un control de regulación a un punto

basado en descenso de gradiente del mapa de navegación. A través del método Diferencia de Tiempo de Llegada (TDOA, Omologo y Svaizer (1997), de las siglas en inglés *Time Difference of Arrival*) se procesan señales de audio para estimar la posición del robot, la cual alimenta al control para llevar al robot a una posición deseada en el área de trabajo.

La organización del presente artículo es descrita a continuación. En la sección 2 se presenta la revisión bibliográfica de los trabajos relevantes en localización acústica dentro del campo de la robótica; en la sección 3 se describe el método de localización acústica TDOA; el suavizado con integración de campos gradientes se presenta en la sección 4; en la sección 5 se propone un método para generar el mapa de navegación acústica a través de los errores de localización; la metodología para realizar la regulación a un punto con mapa de navegación acústica se presenta en la sección 6; los resultados de simulación son presentados en la sección 7; y en la sección 8 se describen las conclusiones y trabajo futuro.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

La localización acústica utiliza el sonido para determinar la distancia y la dirección de algún agente. La localización puede ser activa o pasiva. La localización acústica activa implica la creación de sonido para obtener un eco, permitiendo así su posterior análisis para determinar la posición de la fuente de sonido. Por otro lado, la localización acústica pasiva involucra la detección de sonido o vibración creada por la fuente descubierta.

Existe una amplia diversidad de métodos utilizados para localización de sonido. Éstos pueden ser divididos en tres categorías, Brandstein y Silverman (1997): métodos directos, Bangs y Schultheis (1973), Carter (1977), métodos basados en estimación espectral de alta resolución, Haykin (2014), Johnson y Dudgeon (1993) y métodos de diferencia de tiempo de llegada, Macho et al. (2005), Knapp y Carter (1976). Dos de los métodos de localización acústica más utilizados son: TDOA y potencia de respuesta dirigida con transformación de fase (SRP-PHAT, DiBiase et al. (2001), en inglés *Steered Response Power-Phase Transform*).

Aunque el método SRP-PHAT es más robusto que TDOA en condiciones de baja relación señal/ruido (SNR, del inglés *Signal to Noise Ratio*) y ha sido establecido como un estándar en localización de fuentes acústicas, Zhang et al. (2008), el fundamento geométrico de TDOA basado en la correlación cruzada de las señales, hace de este método una herramienta ideal en aplicaciones de robótica, por lo que es elegido en este trabajo. Uno de los primeros trabajos que utiliza TDOA en robótica se presenta en Hyup Ko et al. (1996), donde un robot móvil equipado con un sonar capaz de localizar reflectores acústicos, logra construir una trayectoria para realizar tareas de navegación utilizando la ubicación de los reflectores. Posteriormente en Valin et al. (2003) se presenta un método robusto de localización acústica en un espacio tridimensional basado en TDOA, con el cual se muestra cómo un robot móvil puede localizar fuentes de sonido en tiempo real. La localización acústica también ha sido explorada para tareas cooperativas; en Guo et al. (2012) se demuestra la utilidad del método TDOA en un expe-

rimento de formación simple con un grupo de tres robots móviles en entornos al aire libre.

Una característica en común de los tres trabajos mencionados es que para realizar la localización de la fuente de sonido se apoyan en información o procesos adicionales a TDOA, como son la posición del robot obtenida por medio de odometría y la determinación del retardo de llegada del sonido con otro tipo de dispositivos electrónicos como el Zig-Bee.

3. LOCALIZACIÓN ACÚSTICA CON TDOA

La localización de una fuente de sonido implica la estimación de retardos de tiempo mutuos entre la dirección de la trayectoria de la onda y los sensores. Una vez que se conocen los retardos, la posición de la fuente se puede deducir usando geometría.

Dado un arreglo lineal de micrófonos y una fuente acústica situada en la posición (x_s, y_s) , la señal $s_k(t)$ adquirida por el micrófono k se puede expresar como

$$s_k(t) = \alpha_k r(t - t_k) + n_k(t), \quad (1)$$

donde $r(t)$ indica la forma de la onda como fue generada en la fuente, α_k es un factor de atenuación debido a los efectos de propagación, t_k es el tiempo de propagación del frente de onda y $n_k(t)$ incluye todos los componentes no deseados, que en un medio ambiente reverberante también pueden estar correlados con $r(t)$.

Suponiendo que un modelo de propagación de onda planar local y una técnica de estimación de retardo temporal aplicada a las señales (s_{i_1}, s_{i_2}) del par i de micrófonos, ha proporcionado una estimación $\hat{\tau}_i$ del retardo mutuo $\tau_i = (t_{i_1} - t_{i_2})$, la dirección de llegada local de la onda indica el ángulo entre la normal de la onda y el eje x , y se deriva como

$$\hat{\theta} = \cos^{-1} \left(\frac{c\hat{\tau}_i}{d_i} \right), \quad (2)$$

donde c es la velocidad del sonido y d_i es la distancia entre los dos micrófonos.

Comúnmente para determinar un retardo de tiempo desconocido entre dos señales s_{i_1} y s_{i_2} , requiere una estimación de la función de correlación cruzada generalizada (GCC, en inglés *Generalized cross correlation*) para cada valor de retardo posible, τ :

$$\hat{R}_i(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} \psi_g(f) G_i(f) e^{j2\pi f\tau} df, \quad (3)$$

donde $G_i(f) = S_{i_1} S_{i_2}^*$ es el espectro de cruzado y $\psi_g(f)$ es una función de ponderación en frecuencia permite facilitar la estimación de retardo poniendo énfasis en ciertas bandas frecuenciales, dependiendo de las características de la fuente y el ruido. Además, $S_{i_2}^*$ representa el complejo conjugado de S_{i_2} .

Idealmente, con una apropiada función de ponderación $\psi_g(f)$, $\hat{R}_i(\tau)$ debería mostrar un pico, sobre un rango restringido de τ , que corresponde al TDOA entre el micrófono 1 y 2. El tiempo de retardo estimado es el que maximiza $\hat{R}_i(\tau)$:

$$\tau_i = \arg \max_x \hat{R}_i(\tau). \quad (4)$$

Las amplitudes y retardos de tiempo correspondientes de estos máximos dependen de una serie de factores. Estos factores incluyen la distancia de separación entre los micrófonos, la naturaleza de las señales de la fuente, el ruido y la elección de la función de ponderación $\psi_g(f)$.

La función de ponderación típicamente utilizada en el método de localización TDOA es la conocida como transformada de fase (PHAT, en inglés *Phase transform*), que elimina el efecto del módulo del espectro cruzado en 3, dejando sólo la fase. La función PHAT que se encuentra definida como

$$\psi_g(f) \equiv \frac{1}{G_i(f)} = \frac{1}{|S_1(f)||S_2(f)|} \quad (5)$$

es sub-óptima en condiciones libres de reverberación; sin embargo, rinde considerablemente mejor que la función de máxima probabilidad (ML, en inglés *Maximum likelihood*) en entornos reales. Es una forma popular de correlación cruzada generalizada debido a su robustez con respecto a la reverberación.

4. SUAVIZADO CON INTEGRACIÓN DE CAMPOS GRADIENTES

La importancia del suavizado en este artículo recae en la obtención de superficies continuas e integrables de un campo gradiente con discontinuidades. Esto es de utilidad para generar el mapa de navegación acústica a partir de la información de los errores obtenidos al estimar la localización de una fuente de sonido con el método TDOA.

Es posible reconstruir una superficie a partir del campo vectorial dado por sus derivadas parciales, conocido como campo gradiente. El conjunto de todas las antiderivadas de un campo vectorial es una integral indefinida, que corresponde a la superficie caracterizada por el campo. Sea $Z = Z(x, y)$ una función escalar, definida en el espacio cartesiano \mathbb{R}^3 , Z es una función de una superficie si existen las derivadas parciales $\left(\frac{\partial Z(x, y)}{\partial x}, \frac{\partial Z(x, y)}{\partial y}\right)$ y se cumple la condición de integrabilidad

$$\frac{\partial^2 Z(x, y)}{\partial x \partial y} = \frac{\partial^2 Z(x, y)}{\partial y \partial x}, \quad (6)$$

entonces el campo de gradientes es

$$\nabla Z(x, y) = \left[\frac{\partial Z(x, y)}{\partial x}, \frac{\partial Z(x, y)}{\partial y} \right]. \quad (7)$$

Cabe destacar que el gradiente de una función apunta en la dirección de máximo crecimiento de la misma.

Esencialmente existen dos tipos de aproximaciones conocidas en la literatura, integración local a lo largo de trayectorias o técnicas globales. A través de funciones base los métodos globales logran encontrar la mejor aproximación de un campo gradiente no integrable sobre el espacio de campos gradientes integrables generado por las funciones base elegidas para la integración. Lo anterior es equivalente a decir que existe un método capaz de cumplir la ecuación (6) sobre cualquier campo gradiente.

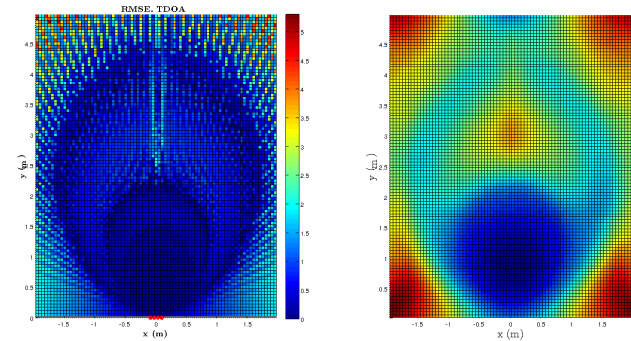
5. MAPA DE NAVEGACIÓN ACÚSTICA

Controlar la posición del robot implica estimar la solución del problema de localización de robots de manera robusta, para tal fin se considera el uso de un arreglo de micrófonos para detección de señales de audio generadas por el robot para que con el método de localización acústica TDOA ubicarlos en el entorno de trabajo.

En este artículo se propone un nuevo enfoque para el método de localización TDOA que construye un mapa de navegación acústica. El mapa de navegación acústica se genera a partir de errores de localización de una fuente de sonido colocada en cualquier punto del área de trabajo.

En la figura 1a se muestra el mapa de errores de localización. Para la generación de este mapa de errores, el área de trabajo es dividida en celdas de $5\text{cm} \times 5\text{cm}$. Dentro del área delimitada para cada celda se seleccionaron aleatoriamente 20 posiciones virtuales de la fuente de sonido. Estas fuentes de sonido emiten señales cuadradas de 2700 Hz de frecuencia. Utilizando TDOA en señales obtenidas por un arreglo lineal de cuatro micrófonos se estima la posición de las fuentes de sonido. Utilizando la métrica definida por la ecuación (8) el error de localización es calculado para cada celda del área de trabajo.

La separación entre los micrófonos del arreglo se eligió de 6.2cm con el fin de emular la separación física real de los micrófonos del sensor PS3Eye, el cual pretendemos usar en experimentaciones futuras.



(a) Mapa de errores de localización acústica. (b) Mapa suavizado de errores.

Figura 1. Mapa de errores de localización y mapa suavizado de errores.

Sin embargo, si se deseara generar una trayectoria de navegación con base en el descenso de gradiente del mapa de errores se encuentran problemas con el comportamiento del gradiente, ya que existen regiones de discontinuidad. Para solucionar estos problema se realiza un suavizado con integración de campos gradientes, de tal manera que se genere el mapa de navegación que conserve el comportamiento de los errores pero eliminando las discontinuidades existentes. En la figura 1b se muestra el mapa de navegación acústica generado a partir del mapa de errores de la figura 1a.

El mapa de navegación acústica está inspirado en el método SRP-PHAT, debido a que es conveniente conocer las regiones en las que la fuente de sonido se puede localizar de manera confiable al utilizar cualquier algoritmo acústico.

5.1 Métrica del error

La métrica del error utilizada para evaluar la posición estimada de una fuente de sonido a partir de TDOA es la de error cuadrático medio (RMSE, de las siglas en inglés *Root mean square error*) entre las distancias de la posición estimada y la de referencia y esta definida como

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\|x_i^{est}\| - \|x_i^{ref}\|)^2}, \quad (8)$$

donde: $x_i^{est} = (x_i^{est}, y_i^{est})^T \in \mathbb{R}^2$ es el vector de posición estimada de la fuente de sonido con TDOA, $x_i^{ref} = (x_i^{ref}, y_i^{ref})^T \in \mathbb{R}^2$ corresponde al vector de posición de referencia de la fuente de sonido, n es el número total de estimaciones durante la prueba y $\|\cdot\|$ denota la operación de la norma L_2 de un vector.

6. REGULACIÓN A UN PUNTO CON MAPA DE NAVEGACIÓN ACÚSTICA

En esta sección se presenta un esquema de combinación de datos provenientes de sensores acústicos con un mapa de navegación. Este esquema resulta de utilidad en problemas de robótica, específicamente en el problema de localización de robots para control de regulación a un punto.

La configuración cartesiana del robot móvil diferencial mostrado en la figura 2 es descrita por la triada (x, y, θ) , donde (x, y) es la posición del centro de masa del robot en el plano y θ es el ángulo de orientación. De esta manera, el robot móvil diferencial puede ser modelado considerando la restricción de no holonomía y no derrape lateral $\dot{x} \sin(\theta) - \dot{y} \cos(\theta) = 0$ como

$$\begin{aligned} \dot{x} &= v \cos(\theta), \\ \dot{y} &= v \sin(\theta), \\ \dot{\theta} &= \omega, \end{aligned} \quad (9)$$

donde v y ω son las entradas de control y representan las velocidades lineal y angular, respectivamente. Se eligió este esquema ya que posteriormente se utilizara un robot *Tortuga* que puede ser modelado de esta manera.

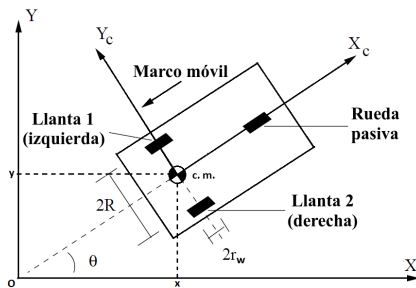


Figura 2. Esquema de un robot móvil diferencial.

Con la finalidad de realizar el control de regulación a un punto, se propone equipar un robot móvil, descrito por (9), con una bocina para emitir señales acústicas, así como contar con un arreglo de micrófonos fijos en el origen del área de trabajo para la detección de señales acústicas. Las señales de audio obtenidas por los micrófonos se procesan con el método de localización acústica TDOA,

determinando así una posición estimada de la fuente de sonido, que en este caso coincide con la posición del centro de masa del robot.

Contando con la información del robot y apoyados en el mapa de navegación acústica se propone una ley de control para regulación a un punto que indique la dirección de movimiento y velocidades que debe tomar el robot para que éste pueda llegar a una área confiable, es decir, el área donde la localización acústica cuenta con mayor precisión y representa el mínimo global del mapa de navegación, es decir, cuenta con un gradiente mínimo. Esta área se denomina zona de seguridad y se muestra en la figura 3. Esta metodología se presenta en forma de diagrama de flujo en la figura 3, donde se puede apreciar un acercamiento del mapa de error integrable en el que se observa el comportamiento del gradiente.

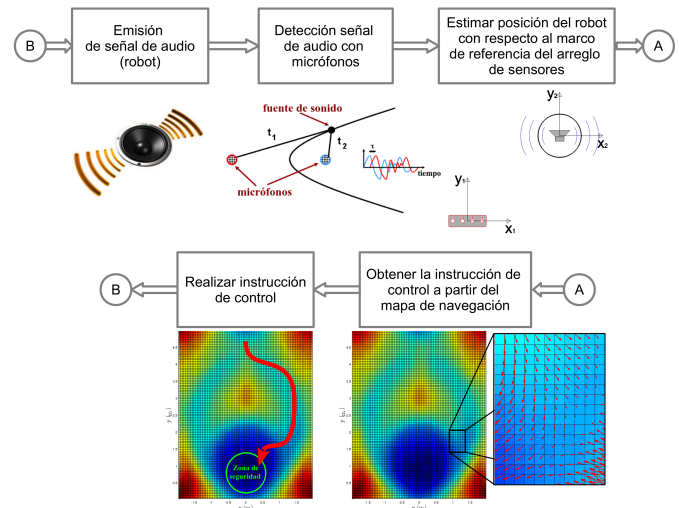


Figura 3. Metodología de regulación a un punto con mapa de navegación acústica.

6.1 Ley de control

La ley de control para regulación a un punto de un robot móvil diferencial con mapa de navegación acústica propuesta es:

$$\begin{aligned} v &= \gamma \|\nabla F(x, y)\|, \\ \omega &= -\delta \theta_e \left| \frac{\sin(\theta_e)}{\theta_e} \right|, \end{aligned} \quad (10)$$

donde: γ y δ son las ganancias del control, $F(x, y)$ es la función que describe el comportamiento del mapa de navegación acústica, $\nabla F(x, y) = \left[\frac{\partial F(x, y)}{\partial x}, \frac{\partial F(x, y)}{\partial y} \right]$ es el gradiente de la función F evaluada en (x, y) , $|\cdot|$ y $\|\cdot\|$ denotan el valor absoluto y la norma L_2 , respectivamente y θ_e es el error en orientación definido como

$$\theta_e = \theta - \tan^{-1} \left(\frac{\frac{\partial F(x, y)}{\partial y}}{\frac{\partial F(x, y)}{\partial x}} \right), \quad (11)$$

donde θ corresponde al ángulo de orientación del robot definido en (9) y el segundo término del lado derecho de la igualdad representa la dirección del gradiente medida con respecto al eje x positivo.

7. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

Para mostrar la capacidad del control presentado en la ecuación (10) han sido desarrolladas varias simulaciones, en Matlab, con un robot móvil localizado dentro del área del mapa de navegación acústica mostrado en la figura 1b. $p_d = (0.0 \text{ m}, 0.9 \text{ m})$ es la posición deseada, la cual se encuentra dentro de la zona de seguridad, además es el elemento de mínimo valor en el mapa de navegación acústica y cuenta con un gradiente mínimo. El punto p_d es considerado también una condición de paro, la cual depende de que el RMSE de la posición actual y la deseada sea menor que una tolerancia definida de 5 mm.

En la sintonización de ganancias se realizaron diversas pruebas en simulación, obteniendo que las siguientes ganancias de control: $\gamma = 10$ y $\delta = 1$, proporcionan un comportamiento favorable al robot para así llevar a cabo la tarea deseada. Para esto también se toma en cuenta que las velocidades de control se encuentren en un rango viable de aplicación en robots de manera experimental, en nuestro caso $-0.5 \frac{m}{s} \leq v \leq 0.5 \frac{m}{s}$ y $-1 \frac{rad}{s} \leq \omega \leq 1 \frac{rad}{s}$.

Se supone un robot móvil que se encuentra en reposo en tres diferentes configuraciones ubicadas fuera de la zona de seguridad del mapa de navegación acústica, para que así el control permita al robot desplazarse a una posición dentro de la zona de seguridad presentada en la figura 3.

En la primera prueba se tiene como configuración del robot en el instante cero

$$x(0) = 0.0 \text{ m}, y(0) = 3.0 \text{ m}, \theta(0) = -\frac{3\pi}{4} \text{ rad},$$

para este caso la trayectoria que es llevada a cabo por el robot se observa en la figura 4a, mientras que en la figura 4b son mostradas las velocidades lineal y angular con las que actúa el robot durante la tarea de control.

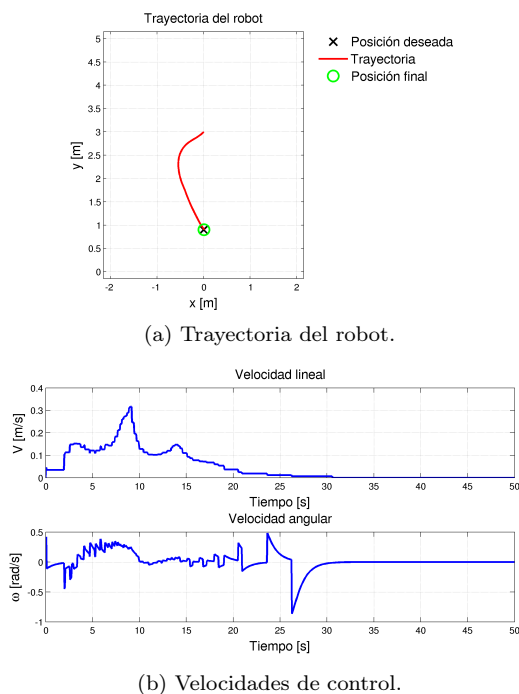


Figura 4. Resultados de simulación de la primer prueba.

Para la segunda prueba, la trayectoria que sigue el robot durante su acercamiento a la zona de seguridad es expuesta por la figura 5a y las velocidades de control se encuentran en la figura 5b. Para esto, el robot se coloca en las condiciones iniciales

$$x(0) = -1.8 \text{ m}, y(0) = 0.5 \text{ m}, \theta(0) = -\frac{3\pi}{4} \text{ rad}.$$

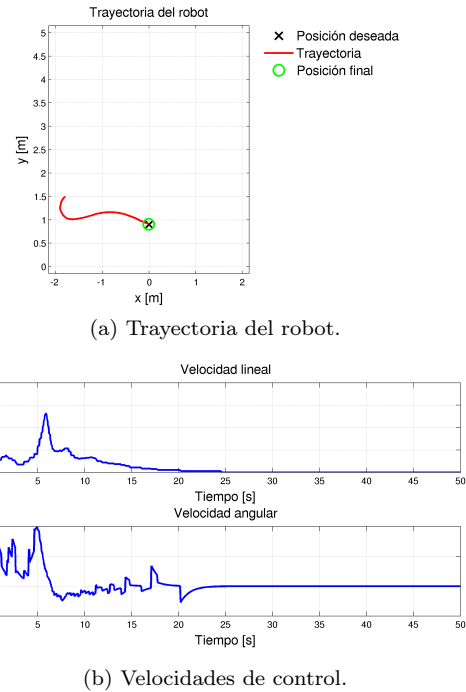


Figura 5. Resultados de simulación de la segunda prueba.

Finalmente, en una tercera simulación se considera que el robot se encuentra en la siguiente configuración

$$x(0) = 1.5 \text{ m}, y(0) = 3.5 \text{ m}, \theta(0) = \frac{\pi}{2} \text{ rad}.$$

En este caso el control logra el objetivo de dirigir al robot a la zona de seguridad por medio de las velocidades lineal y angular mostradas en la figura 6b, permitiendo así que el robot realice la trayectoria que se observa en la figura 6a.

7.1 Análisis de los resultados

Observando los resultados de las simulaciones se puede ver cómo al utilizar el mapa de navegación acústica como herramienta en el control de regulación a un punto, las trayectorias realizadas por el robot siguen el comportamiento del gradiente del mapa de navegación acústica.

Una característica importante en los resultados obtenidos en simulación son los cambios repentinos que tiene la velocidad angular, los cuales son causados por la constante variación en la dirección del gradiente del mapa de navegación acústica. Sin embargo, esto no ocasiona un cambio repentino en la orientación del robot, debido a que la velocidad angular en una iteración dada solo es aplicada al robot durante el tiempo de muestreo, y para este caso toma el valor de 0.05 segundos. De esta manera, en la siguiente iteración será calculada una nueva velocidad angular.

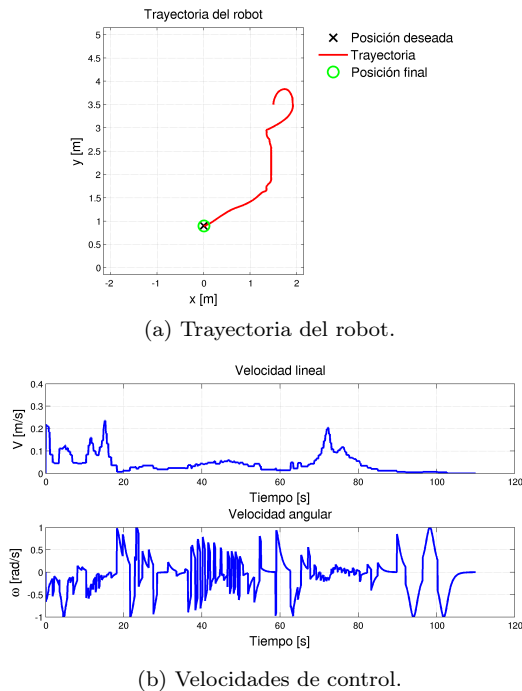


Figura 6. Resultados de simulación de la tercera prueba.

En los resultados mostrados, se observa que una vez que el robot ha llegado a la posición deseada, éste se detiene debido a la condición de paro propuesta. Sin embargo, si no se contara con esta condición, el robot continuaría en movimiento dentro del área de seguridad y a una distancia cercana al punto p_d .

8. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

En este artículo se presentó un novedoso enfoque del control de regulación a un punto en conjunto con el algoritmo de localización acústica TDOA, generando así una nueva herramienta de trabajo: el mapa de navegación acústica. Asimismo se han logrado incorporar con éxito métodos de integración de campos gradientes en aplicaciones poco convencionales, como el suavizado de un mapa de errores de localización acústica. Las simulaciones demuestran que al utilizar el mapa de navegación acústica como fuente de información de control es posible realizar una tarea de regulación a un punto sin contar con una trayectoria predefinida o con un control que dependa de errores en los estados del robot.

Como trabajo futuro se planea aplicar el mapa de navegación acústica en experimentos que validen los resultados obtenidos en simulación utilizando un robot *Tortuga* y los sensores acústicos del PS3Eye.

ACKNOWLEDGEMENTS

Se agradece el apoyo No. 367360 brindado por el CONACyT como beca de posgrado para Christian Alejandro Luna Aguilar.

REFERENCIAS

J. Elseberg, D. Borrmann and A. Nüchter. *Automatic and Full Calibration of Mobile Laser Scanning Systems*. In J.P. Desai, G. Dudek, O. Khatib and V. Kumar, editors, *Experimental Robotics: The 13th International Symposium on Experimental Robotics*,

Springer Tracts in Advanced Robotics, volume 88, pages 907-917, 2013.

A. Martinelli, N. Tomatis, A. Tapus and R. Siegwart. *Simultaneous Localization and Odometry Calibration for Mobile Robot*. In Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS, volume 2, pages 1499-1504, 2003.

G. Dudek and M. Jenkin. *Computational Principles of Mobile Robotics*. Cambridge University Press, second Edition, 2010.

D. Scaramuzza and F. Fraundorfer. *Visual Odometry: Part I - The First 30 Years and Fundamentals*. In IEEE Robotics and Automation Magazine, volume 18, issue 4, pages 80-92, 2011.

D. Scaramuzza and F. Fraundorfer. *Visual Odometry: Part II - Matching, Robustness, and Applications*. In IEEE Robotics and Automation Magazine, volume 19, issue 2, pages 78-90, 2012.

R. Chakraborty and C. Nadeu. *Sound-Model Based Acoustic Source Localization Using Distributed Microphone Arrays*. In IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, ICASSP, pages 619-623, 2014.

D. Macho, J. Padrell, A. Abad, C. Nadeu, J. Hernando, J. McDonough, M. Wölfel, U. Klee, M. Omologo, A. Brutti, P. Svaizer, G. Potamianos and S.M. Chu. *Automatic Speech Activity Detection, Source Localization, and Speech Recognition on the CHIL Seminar Corpus*. In IEEE International Conference on Multimedia Expo, ICME, pages 876-879, 2005.

J. Hyup Ko, S. Do Kim, M. Jin Chung. *A Method of Indoor Mobile Robot Navigation Using Acoustic Landmarks*. In Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, volume 2, pages 1726-1731, 1996.

J.M. Valin, F. Michaud, J. Rouat and D. Letourneau. *Robust Sound Source Localization Using a Microphone Array on a Mobile Robot*. In Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS, volume 2, pages 1228-1233, 2003.

J. Guo, Q.H. Meng, Y.X. Wu, W.X. Yang, M. Zeng and W. Li. *Hearing Based Relative Localization for Mobile Robots in Outdoor Environments*. In IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, ROBIO, pages 2126-2131, 2012.

M. Omologo and P. Svaizer. *Use of the Cross-Power Spectrum Phase in Acoustic Event Location*. In IEEE Transactions on Speech and Audio Processing, volume 5, issue 3, pages 288-292, 1997.

M.S. Brandstein and H.F. Silverman. *A Practical Methodology for Speech Source Localization with Microphone Arrays*. In Computer Speech & Language Journal, volume 11, issue 2, pages 91-126, 1997.

W. Bangs and P. Schultheis. *Space-Time Processing for Optimal Parameter Estimation*. In J. Griffiths, P. Stocklin and C.V. Schooneveld, editors, *Signal Processing*, New York Academic Press, pages 577-590, 1973.

G. Carter. *Variance Bounds for Passively Locating an Acoustic Source with a Symmetric Line Array*. In The Journal of the Acoustical Society of America, volume 62, issue 4, pages 922-926, 1977.

S. Haykin. *Adaptive Filter Theory*. Prentice Hall, fifth Edition, 2014.

D. Johnson and D. Dudgeon. *Array Signal Processing: Concepts and Techniques*. Prentice Hall Englewood Cliffs, NJ, first Edition, 1993.

C.H. Knapp and G.C. Carter. *The Generalized Correlation Method for Estimation of Time Delay*. In IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, TASSP, volume 24, issue 4, pages 320-327, 1976.

J.H. DiBiase, H.F. Silverman and M.S. Brandstein. *Robust Localization in Reverberant Rooms*. In M. Brandstein and D. Ward, editors, *Microphone Arrays: Techniques and Applications*, Springer-Verlag, pages 157-180, first Edition, 2001.

C. Zhang, D. Florencio and Z. Zhang. *Why Does PHAT Work Well in Low Noise, Reverberant Environments?* IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, ICASSP, pages 2565-2568, 2008.