



Artículo de investigación

# Control de seguimiento de robot móvil rodante en campo de velocidad con evasión de obstáculos

## *Tracking control of a wheeled mobile robot in a velocity field with obstacle avoidance*



Luis Arturo García , Ricardo Pérez Alcocer , Gilberto Ramos 

Universidad de Sonora, Boulevard Luis Encinas Jhonson Sn, 83000 Hermosillo, Sonora, México

**Autor de correspondencia:** Gilberto Ramos, Universidad de Sonora, Boulevard Luis Encinas Jhonson Sn, 83000 Hermosillo, Sonora, México. Correo electrónico: [brtdevkit@gmail.com](mailto:brtdevkit@gmail.com). ORCID: 0000-0003-1627-0577

**Enviado:** 19 de Julio del 2023

**Aceptado:** 3 de Octubre del 2023

**Publicado:** 5 de Octubre del

2023

**Resumen.** – *Los vehículos no holonómicos, es decir, aquellos vehículos que tienen restricciones de movimiento o no pueden seguir cualquier trayectoria deseada, son empleados en una amplia gama de actividades, tanto en la vida cotidiana como en ambientes industriales. En este trabajo se presenta una estrategia de navegación para vehículos tipo unicyclo, basada en campos potenciales de velocidad. La validación de la estrategia de navegación se realizó empleando simulación numérica y experimentos en la plataforma de prueba. Los resultados obtenidos muestran que el método estudiado cumple con la tarea asignada.*

**Palabras clave:** Campos potenciales de velocidad; Evasión de obstáculos; Robot móvil rodante (WMR).

**Abstract.** *Non-holonomic vehicles, that is, vehicles with movement constraints or unable to follow any desired path, are used in a wide range of activities, both in everyday life and in industrial environments. This paper presents a navigation strategy for unicycle-type vehicles based on velocity potential fields. The validation of the navigation strategy was carried out using numerical simulation and experiments on the test platform. The results obtained demonstrate that the studied method fulfills the assigned task.*

**Keywords:** Velocity field; Obstacle avoidance; Wheeled Mobile Robot (WMR).



## 1. Introducción

La navegación autónoma es un problema que ha capturado mucho interés actualmente debido a que ya es una realidad presente en los vehículos totalmente autónomos [1]. Los enfoques para generación de trayectorias son un aspecto estudiado en los centros de investigación y universidades, y precisamente esa temática se aborda en el trabajo presentado en este artículo. Se utilizarán herramientas de la robótica para abordar el problema.

Los vehículos para ser considerados autónomos deben ser capaces de desplazarse en diferentes lugares con poca o nula intervención humana, para ello deben tener la capacidad de decidir qué ruta tomar hacia la posición o trayectoria deseada, a la vez que evita colisionar con obstáculos [2]. Existen distintas metodologías para resolver este problema, sin embargo, una que llama la atención por simplicidad matemática es la teoría de campo potencial [3]-[4]. Los campos de velocidad para guiado de robots se han estudiado a través de ecuaciones de hidrodinámica [5]. Lo que se plantea en este proyecto es estudiarlos desde un enfoque más propio de la robótica, utilizando herramientas de esta última área de estudio, para abordar el problema de una manera más sencilla y entendible.

Campo potencial (potential field). El enfoque estándar de campo potencial artificial se basa en la aplicación del gradiente negativo de una función potencial artificial (APF) como entrada de control para conducir a un vehículo a una posición deseada. Este método es particularmente atractivo debido a su elegancia matemática y simplicidad [3]. Para lograr un guiado más flexible, se han propuesto diferentes leyes de control basadas en el método de campo vectorial. Otro aspecto importante en la

generación de trayectorias es la evasión de colisiones.

## 2. Antecedentes

Muchas estrategias para evasión de colisiones se basan en campos potenciales [6], como la función repulsiva convencional, la cual es adecuada para implementación en tiempo real ya que sólo requiere información del gradiente local y no requiere información global [7]. Sin embargo, su principal desventaja es la presencia de mínimos locales que pueden ocasionar que el vehículo no llegue a la posición meta [2]. Para mejorar el esquema repulsivo básico, han surgido diferentes métodos basados en campos potenciales. Algunos ejemplos de esto son: el método de Objetivos No Alcanzables con Obstáculos Cercanos (GNRON) [8], Funciones Potenciales Harmónicas (HPF) [2], Campo Potencial Híbrido [9], Campos Potenciales Artificiales Evolucionarios [10] y el Campo de Potencial Artificial Mejorado [11]. Una manera de evitar la principal desventaja de los campos estáticos, a saber, la presencia de mínimos locales que imposibiliten la realización de la tarea es la utilización de campos potenciales de velocidad [2]. Mediante esta técnica, es posible utilizar la teoría hidrodinámica para crear un campo evasivo que evite colisiones de una manera más adecuada y natural. De acuerdo con esta información, existen algunos campos de oportunidad en el desarrollo de un control de seguimiento de trayectorias generadas por el método de campos de velocidad.

Como se puede ver en los trabajos mencionados anteriormente el problema de navegación en los vehículos autónomos ha sido y continúa siendo del interés de la comunidad científica, la cual ha propuesto variedad de soluciones aplicadas en distintos tipos de vehículos. En este trabajo se aplica la bien conocida técnica de navegación



basada en campos de velocidad en un vehículo con ruedas tipo uniciclo para que realice una ruta preestablecida. Las principales contribuciones de este trabajo radican en el estudio e implementación de un control de seguimiento basado en campo de velocidad con evasión de obstáculos para un vehículo autónomo tipo uniciclo, la integración de los componentes de la plataforma experimental y la validación en simulación numérica y también experimentalmente del método estudiado.

El resto del documento está organizado de la siguiente manera: El modelo cinemático del robot móvil, la generación de trayectoria atractiva y evasiva por campos de velocidad, además de la estrategia de control se describen en la sección 3. En la sección 4 se presentan los resultados obtenidos tanto en simulación como experimentalmente. Finalmente, las conclusiones y trabajo futuro se establecen en la sección 5.

### 3. Metodología

Para generación de trayectorias se utilizará el enfoque de campos potenciales de velocidad. Una vez que se tienen los campos de velocidad de acercamiento y evasivos, se deben obtener sus derivadas temporales, que servirán como referencias al controlador de seguimiento de trayectoria implementado en el vehículo. Como controlador para el vehículo se propone utilizar un simple control PD de velocidad, el cual demuestra ser asintóticamente estable para seguimiento de trayectorias. Se probaron los resultados mediante simulación y se implementaron experimentalmente en el robot móvil AmigoBot.

#### 3.1 Modelo cinemático del Robot Móvil Rodante

Considere un robot móvil con ruedas (WMR), del tipo uniciclo como el de la Figura 1.

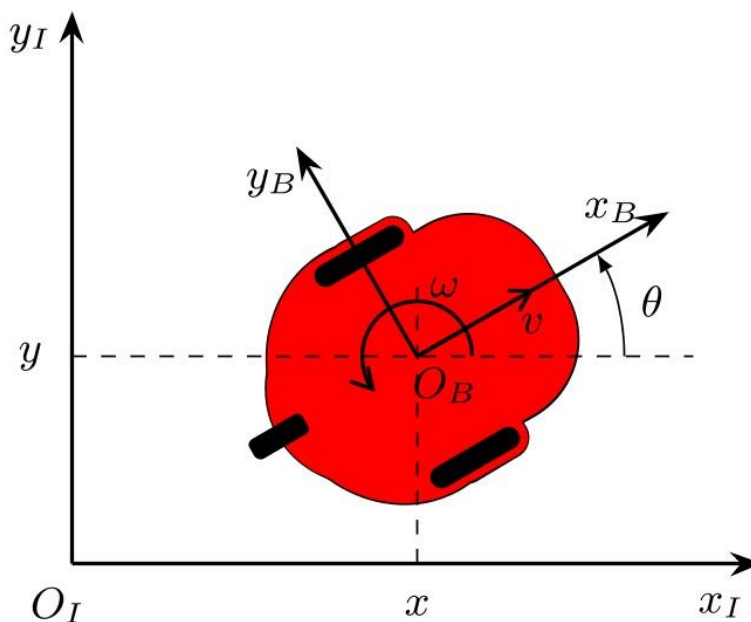


Figura 1. WMR Amigobot y sus marcos de referencia.



Se asume que el plano de cada rueda es perpendicular al suelo y que la restricción de movimiento entre las ruedas y el suelo es de *puro rodamiento no deslizamiento*, es decir, la velocidad del centro de masa del robot es ortogonal al eje de las ruedas. La posición del robot en un marco Cartesiano  $\{I\}$  se especifica completamente mediante el vector de coordenadas generalizadas  $\mathbf{q} = [x, y, \theta]^T$ , donde  $x, y$  son las coordenadas del centro de masa del vehículo, y  $\theta$  es la orientación del eje  $x_B$  del marco de referencia del cuerpo  $\{B\}$  fijo al vehículo y se mueve con respecto al marco inercial.

El modelo cinemático más comúnmente utilizado para representar el movimiento de un robot tipo unicycle está dado por

$$\begin{aligned} \dot{x} &= v \cos \theta, \\ \dot{y} &= v \sin \theta, \\ \dot{\theta} &= \omega, \end{aligned} \quad (1)$$

donde  $x$  e  $y$  denotan la posición actual del marco de referencia unido al cuerpo,  $\theta$  denota el ángulo de dirección, el vector de velocidad  $\mathbf{v} = [v, \omega]^T$ , donde  $v$  y  $\omega$  denotan la velocidad lineal y angular del origen del marco de referencia del cuerpo  $\{B\}$  con respecto al marco inercial  $\{I\}$ .

### 3.2 Generación de trayectoria atractiva por campos de velocidad

El objetivo del método de campos de velocidad en este caso en particular es seguir una trayectoria predeterminada. Para generar un campo de velocidad en trayectoria circular, es necesario calcular dos campos vectoriales, el *campo de aproximación*  $\mathbf{V}_{ac}$  y el *campo tangencial*  $\mathbf{V}_{tg}$ . El campo de aproximación está definido por vectores los cuales apuntan directamente a la trayectoria, en la que cada  $\mathbf{V}_{ac}$  se obtiene mediante la sustracción normalizada

del punto más cercano a la trayectoria, como es propuesto por [12]. La trayectoria que se desea seguir es un círculo de radio  $r_{tr}$  y el centro está localizado en el punto  $(o_x, o_y)$ , el cual está expresado por

$$(x - o_x)^2 + (y - o_y)^2 = r_{tr}^2. \quad (2)$$

Para calcular el campo de aproximación, es necesario encontrar el punto más cercano desde cualquier punto del espacio de trabajo hacia la trayectoria. Este punto cercano es calculado por

$$\min (\sqrt{(x - x_{tr})^2 + (y - y_{tr})^2}),$$

donde  $x_{tr}$  e  $y_{tr}$  son los puntos que conforman la trayectoria, *i. e.* el grupo de puntos que satisfacen la Ecuación (2). Para este caso específico, definamos los vectores:

$$\begin{aligned} \bar{\xi} &= \begin{bmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x - o_x \\ y - o_y \end{bmatrix}, & \tilde{\xi} &= \begin{bmatrix} \tilde{x} \\ \tilde{y} \end{bmatrix} \\ & & &= \begin{bmatrix} x_{cl} - x \\ y_{cl} - y \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (4)$$

donde  $\bar{x}, \bar{y}$  denotan la diferencia entre cualquier punto del área de trabajo y el centro de la trayectoria circular, a su vez  $\tilde{x}, \tilde{y}$  son los errores de posición desde cualquier punto del espacio de trabajo y su punto más cercano dentro de la trayectoria deseada. Las coordenadas del punto más cercano a la trayectoria son

$$x_{cl} = o_x + r_{tr} \cos(\alpha_{cl}), \quad (5)$$

$$y_{cl} = o_y + r_{tr} \sin(\alpha_{cl}), \quad (6)$$

donde  $\alpha_{cl}$  denota el ángulo desde la posición actual hasta el punto más cercano de la trayectoria.

El ángulo  $\alpha_{cl}$  se obtiene mediante



$$\alpha_{cl} = \text{atan2}(\bar{y}, \bar{x}). \quad (7)$$

Tomando las Ecuaciones (5)-(6) para calcular  $x_{cl}$  e  $y_{cl}$ , podemos definir la distancia entre la posición actual y el punto más cercano a la trayectoria como

$$\|\tilde{\xi}\| = \sqrt{\tilde{x}^2 + \tilde{y}^2}. \quad (8)$$

El campo de aproximación se define como

$$\mathbf{V}_{ac} = \frac{\tilde{\xi}}{\|\tilde{\xi}\|}. \quad (9)$$

Denotemos el vector de las derivadas parciales de  $x_{cl}$  e  $y_{cl}$  como  $\mathbf{v}_c = [v_{x_c}, v_{y_c}]^T$ , entonces el campo tangencial se define mediante

$$\mathbf{V}_{tg} = \frac{\mathbf{v}_c}{\|\mathbf{v}_c\|}. \quad (10)$$

El campo de velocidad  $\mathbf{V} = [V_x, V_y]^T$  se obtiene por medio de la suma ponderada normalizada

$$\mathbf{V} = \frac{F_1 \mathbf{V}_{ac} + F_2 \mathbf{V}_{tg}}{\|F_1 \mathbf{V}_{ac} + F_2 \mathbf{V}_{tg}\|}, \quad (11)$$

donde  $F_1$  y  $F_2$  son funciones de la distancia euclidiana entre un punto en el espacio y la trayectoria deseada, que vienen dadas por:

$$F_1 = \frac{2}{1 + e^{-\gamma \|\tilde{\xi}\|}} - 1, \quad F_2 = 1 - F_1 \quad (12)$$

### 3.3 Campo de velocidad para evasión de obstáculo

La evasión de obstáculos se logra mediante el uso de la teoría hidrodinámica, específicamente mediante el flujo ideal generado alrededor de un cilindro, como se muestra en la Figura 2.

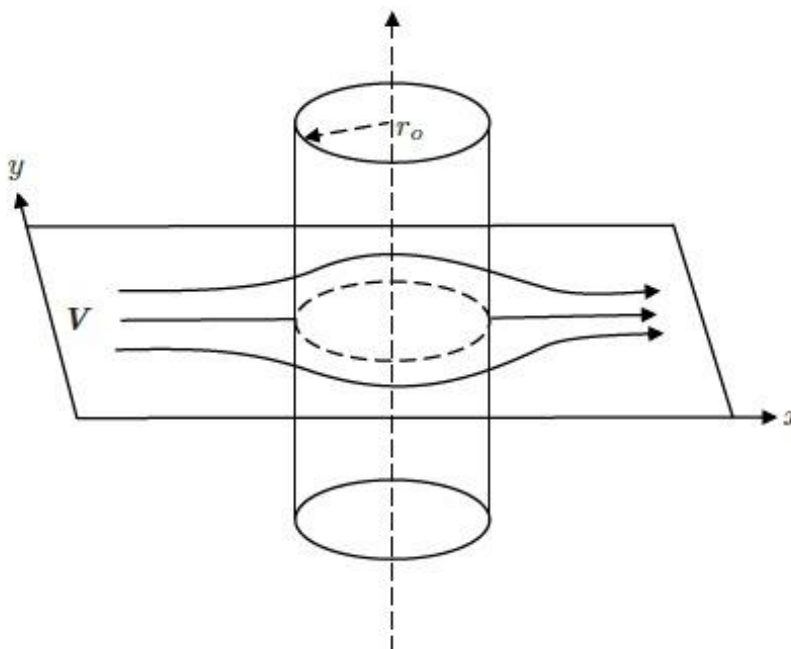


Figura 2. Flujo ideal generado alrededor de un cilindro



Definimos el flujo de un fluido plano en estado estacionario, mediante un campo de velocidad

$$\mathbf{v}(\mathbf{p}) = \begin{bmatrix} u(x, y) \\ v(x, y) \end{bmatrix}, \quad (13)$$

en el punto

$$\mathbf{p} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \in \Omega, \quad (14)$$

donde  $\Omega \subset \mathbb{R}^2$  es el dominio ocupado por el fluido.

$$\phi(\tilde{\xi}_o) = \left( 1 + \frac{r_o^2}{\tilde{x}_o^2 + \tilde{y}_o^2} \right) (\tilde{x}_o \cos \beta + \tilde{y}_o \sin \beta), \quad (16)$$

donde

$$\beta = \text{atan2}(V_y, V_x) \quad (17)$$

es el ángulo del vector de campo de velocidad en ese punto. La velocidad de flujo alrededor del

$$V_{ev_x} = \frac{-2r_o^2}{(\tilde{x}_o^2 + \tilde{y}_o^2)} (\tilde{x}_o c_\beta + \tilde{y}_o s_\beta) \tilde{x}_o + \left( 1 + \frac{r_o^2}{\tilde{x}_o^2 + \tilde{y}_o^2} \right) c_\beta, \quad (18)$$

donde  $c_\beta = \cos \beta$  y  $s_\beta = \sin \beta$ . La función de velocidad en la coordenada y es

$$V_{ev_y} = \frac{-2r_o^2}{(\tilde{x}_o^2 + \tilde{y}_o^2)} (\tilde{x}_o c_\beta + \tilde{y}_o s_\beta) \tilde{y}_o + \left( 1 + \frac{r_o^2}{\tilde{x}_o^2 + \tilde{y}_o^2} \right) s_\beta. \quad (19)$$

Entonces, el vector velocidad para la maniobra evasiva es

$$\mathbf{V}_{ev} = \begin{bmatrix} V_{ev_x} \\ V_{ev_y} \end{bmatrix}. \quad (20)$$

Una forma de visualizar el efecto del campo evasivo es redireccionar la dirección del vector del campo atractivo, redirigiendo la referencia de velocidad para intentar rodear el obstáculo. Por

Usando un obstáculo circular, el cual interfiere con el campo de flujo vectorial, donde  $(x_o, y_o)$  es la posición central del obstáculo, con radio  $r_o$ , definimos el error de posición con respecto del centro del obstáculo como

$$\tilde{\xi}_o = \begin{bmatrix} x - x_o \\ y - y_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{x}_o \\ \tilde{y}_o \end{bmatrix}. \quad (15)$$

La función potencial de velocidad propuesta para un fluido ideal alrededor de un obstáculo circular es

cilindro está definida como el gradiente de la función  $\phi$ , es decir  $\mathbf{V}_{ev} = \nabla \phi$ .

Entonces, la componente  $x$  del campo vectorial de velocidad es

lo tanto, el vector de velocidad evasiva reemplaza el vector de velocidad previo, y también se normaliza mediante

$$\mathbf{V} = \frac{\mathbf{V}_{ev}}{\|\mathbf{V}_{ev}\|}, \quad (21)$$

este vector de velocidad se definió mediante coordenadas rectangulares  $x$  e  $y$ , sin embargo, para dar dichas referencias de velocidad al



vehículo, se necesita el vector de velocidad en componentes polares de magnitud y ángulo.

Note que el vector de velocidad  $V$  está dado por (11) en ausencia de obstáculos en el ambiente de trabajo. Posteriormente, el vector de velocidad es actualizado de manera iterativa empleando (17)-(21) por cada obstáculo en el ambiente.

### 3.4 Estrategia de control

En las Ecuaciones (1) que expresan el modelo cinemático del WMR, las velocidades del robot móvil están relacionadas con el vector de velocidad lineal y angular  $[v, \omega]$ . Por lo tanto, para ejercer un control sobre el vehículo, estas variables  $v$  y  $\omega$  serán las entradas de control.

A partir del campo de velocidad generado  $V$ , la entrada de velocidad lineal  $v$ , se encuentra mediante la norma del vector de velocidad  $V$ , es decir

$$v = \sqrt{V_x^2 + V_y^2}. \quad (22)$$

El ángulo dado por el vector de velocidad  $V$ , expresa el ángulo de dirección deseado  $\theta_d$ ,

$$\theta_d = \text{atan2}(V_x, V_y), \quad (23)$$

por lo que, para hacer un control de seguimiento de velocidad angular, se debe obtener primero la derivada del vector  $V$ , mediante lo cual se puede obtener la velocidad angular deseada

$$\omega_d = \frac{V_x \dot{V}_y - V_y \dot{V}_x}{\|V\|^2}. \quad (24)$$

Finalmente, el control de velocidad estará dado por

$$\omega = k_p(\theta_d - \theta) + \omega_d. \quad (25)$$

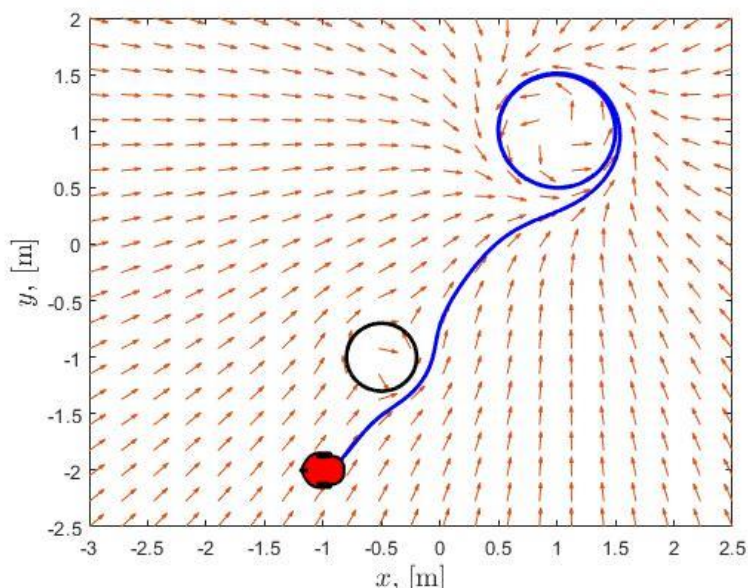
## 4. Resultados y Discusiones

### 4.1 Simulación

Para realizar la simulación numérica se utilizaron funciones de solución de ecuaciones diferenciales ODE de MATLAB. La simulación consistió en lo siguiente. Se supone una postura inicial del vehículo, es decir posición y orientación inicial, se supone también un obstáculo de radio y posición conocidas. El objetivo es realizar una trayectoria circular moviéndose a velocidad constante. Partiendo de estos datos conocidos, el programa grafica las líneas de flujo de campo de velocidad que atraen el vehículo a la trayectoria deseada mientras rodea los obstáculos. Finalmente se desarrolla la simulación del movimiento del vehículo desde su postura inicial hacia la trayectoria deseada.

La Figura 2 muestra el resultado de simulación del vehículo dentro del campo de velocidad generado, el cual lo atrae desde cualquier posición inicial hacia la trayectoria circular, evitando cualquier obstáculo que interfiere su trayecto. En dicha simulación la postura inicial del vehículo es  $x(0) = -1$ ,  $y(0) = -2$ ,  $\theta(0) = 0$ . La trayectoria es un círculo centrado en el punto  $(1,1)$  y de radio  $r_c = 0.5$ . El obstáculo tiene coordenadas  $(-0.5, -1)$  y de radio  $r_o = 0.3$ . Las unidades de distancia se consideran en metros. Finalmente, la ganancia proporcional para el control angular utilizada fue  $k_p = 10$ .

De la Figura 3 se logra observar que el vehículo alcanza perfectamente la trayectoria circular deseada a la vez que evade el obstáculo que se encuentra en el camino hacia ella.



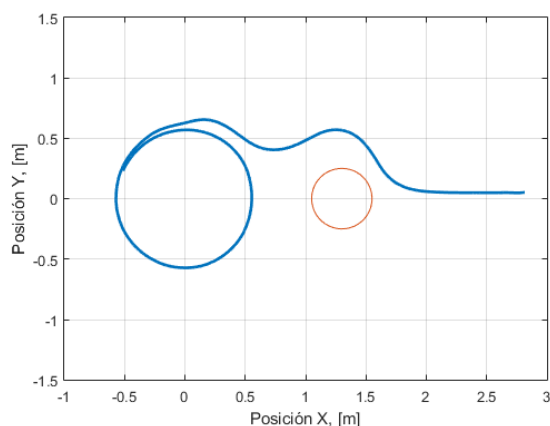
**Figura 3.** Simulación de la ruta seguida por el vehículo desde su postura inicial hasta alcanzar su trayectoria deseada.

#### 4.1 Resultado experimental

Para llevar a cabo la realización experimental, se utilizó la plataforma de robot móvil Amigobot, de la marca Mobile Robots. La captura de movimiento se realizó mediante un sistema de visión Optitrack de 6 cámaras Flex 13. Se desarrolló una interfaz en Simulink para la implementación del control propuesto. Simulink tiene la ventaja de que al mismo tiempo puede leer la información de posición obtenida mediante el sistema de visión, realizar todos los

cálculos necesarios para formular el campo de velocidad y traducirlo a consignas de velocidad, y finalmente enviar dichas consignas inalámbricamente al vehículo.

Una vez generadas las consignas, estas son enviadas mediante comunicación Wi-Fi al robot, para lograr esta comunicación se empleó la librería de programación Aria del fabricante, esta librería se ejecuta sobre la plataforma ROS (Robot Operative System).



**Figura 4.** Ruta seguida por el WMR en su prueba experimental.





Como experimento se propuso que el robot móvil, partiendo de una posición inicial, realice una trayectoria circular, donde el círculo de referencia está centrado en el origen, con radio 0.5 m. Se consideró un obstáculo que interfiere la trayectoria del vehículo, con coordenadas (1.6, 0) y radio  $r_o = 0.25$ . En el caso experimental, la ganancia proporcional para el control angular utilizada fue  $k_p = 4.45$ . En la Figura 3 se muestra el camino seguido por el vehículo, así como el obstáculo intermedio que evade. De la figura 4 se observa que efectivamente se logró realizar la evasión del obstáculo a la vez que seguía la trayectoria circular deseada.

## 5. Conclusiones

La teoría de campos potenciales de velocidad prueba ser muy efectiva tanto en la generación de trayectorias, así como evasión de obstáculos, debido a que genera referencias continuas que son fáciles de seguir mediante un controlador de seguimiento. El arreglo experimental que se tiene implementado en las instalaciones de Ingeniería Electrónica en la Universidad de Sonora es muy sencillo de utilizar y permite probar controladores de forma muy similar a las simulaciones. Esto abre la puerta a futuras mejoras y aplicaciones en áreas como la navegación autónoma, la robótica colaborativa y la interacción humano-robot. Usando el arreglo experimental se evaluó el desempeño del algoritmo de navegación estudiado. Los resultados obtenidos tanto en simulación como experimentalmente demuestran el cumplimiento de la tarea con el esquema de navegación y control propuesto.

Como trabajo futuro, se tiene previsto escalar la propuesta presentada a un esquema de múltiples agentes, donde se explorarán diversas estrategias, como la formación y el trabajo colaborativo entre

vehículos. Además, se pretende implementar la generación de campos de evasión en tiempo real, con el objetivo de lograr una evasión eficiente de obstáculos variables, es decir, obstáculos que cambien de posición con el tiempo.

## 6. Agradecimientos

Los autores desean agradecer el apoyo brindado por la Facultad Interdisciplinaria de Ciencias Exactas y Naturales, de la Universidad de Sonora, por haber brindado la beca de ayudantía 2022-2 y 2023-1.

## 7. Agradecimiento de autoría

*Luis Arturo García Delgado*: Conceptualización; Recursos; Ideas; Metodología; Análisis formal; Investigación; Recursos; Análisis de datos; Borrador original; Revisión y edición. *Ricardo Ramon Pérez Alcocer*: Conceptualización; Recursos; Ideas; Metodología; Análisis formal; Investigación; Recursos; Análisis de datos; Borrador original; Revisión y edición. *Gilberto Ramos Valenzuela*: Conceptualización; Ideas; Metodología; Análisis formal; Investigación; Análisis de datos; Escritura; Borrador original; Revisión y edición.

## Referencias

- [1] B. Li, H. Du, and W. Li, "A potential field approach-based trajectory control for autonomous electric vehicles with in-wheel motors," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 18, no. 8, pp. 2044-2055, 2016. <https://doi.org/10.1109/TITS.2016.2632710>
- [2] S. Ionita, "Autonomous vehicles: from paradigms to technology," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 252, no. 1, p. 012098, October 2017. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/252/1/012098>
- [3] J. Kim and P.K. Khosla, "Real-time obstacle avoidance using harmonic potential functions," *IEEE Transactions on*



Robotics and Automation, vol. 8, pp. 338-349, 1992.  
<https://doi.org/10.1109/70.143352>

[4] Gan, L., Yan, Z., Zhang, L., Liu, K., Zheng, Y., Zhou, C., and Shu, Y. "Ship path planning based on safety potential field in inland rivers," *Ocean Engineering*, vol 260, pp. 111928, 2022.  
<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111928>

[5] Z. Ye, S. Régner, and M. Sitti, "Rotating magnetic miniature swimming robots with multiple flexible flagella," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 30, no. 1, pp. 3-13, 2013.  
<https://doi.org/10.1109/TRO.2013.2280058>

[6] Lin, P., Yang, J. H., Quan, Y. S., and Chung, C. C. "Potential field-based path planning for emergency collision avoidance with a clothoid curve in waypoint tracking," *Asian journal of control*, vol 24, no 3, pp. 1074-1087, 2022. <https://doi.org/10.1002/asjc.2778>

[7] L. A. García-Delgado, J. R. Noriega, D. Berman-Mendoza, A. L. Leal-Cruz, A. Vera-Marquina, R. Gómez-Fuentes, ... I. E. Zaldívar-Huerta, "Repulsive function in potential field based control with algorithm for safer avoidance," *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, vol. 80, pp. 59-70, 2015. <https://doi.org/10.1007/s10846-014-0157-z>

[8] Wahab, S. H. A., Saudi, A., Saad, N., and Chekia, A. "UAV Path Planning using Rotated TOR in Structured Environment.2 In 2022 IEEE International Conference on Artificial Intelligence in Engineering and Technology

(IICAIET) (pp. 1-6). September 2022.  
<https://doi.org/10.1109/IICAIET55139.2022.9936757>

[9] Chen, X., Huang, Z., Sun, Y., Zhong, Y., Gu, R., and Bai, L. "Online on-road motion planning based on hybrid potential field model for car-like robot," *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, vol. 105, no. 1, 7, 2022.  
<https://doi.org/10.1007/s10846-022-01620-5>

[10] P. Vadakkepat, K. C. Tan, and W. Ming-Liang, "Evolutionary artificial potential fields and their application in real-time robot path planning," in *Proceedings of the 2000 Congress on Evolutionary Computation, CEC00 (Cat. No. 00TH8512)*, vol. 1, pp. 256-263, July 2000.

[11] Puriyanto, R. D., Wahyunggoro, O., and Cahyadi, A. I. "Implementation of improved artificial potential field path planning algorithm in differential drive mobile robot," In *14th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE)* (pp. 18-23), October 2022.  
<https://doi.org/10.1109/ICITEE56407.2022.9954079>

[12] C. Pérez-D'Arpino, W. Medina-Meléndez, L. Fermín, J. Guzmán, G. Fernández-López, and J.C. Grieco, "Dynamic Velocity Field Angle Generation for Obstacle Avoidance in Mobile Robots Using Hydrodynamics," in *Advances in Artificial Intelligence - IBERAMIA 2008*; H. Geffner, R. Prada, I. Machado Alexandre, N. David (Eds.); Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg, 2008; pp. 372-381. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-88309-8\\_38](https://doi.org/10.1007/978-3-540-88309-8_38)

Derechos de Autor (c) 2023 Luis Arturo García, Ricardo Pérez Alcocer, Gilberto Ramos



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Usted es libre para compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato— y adaptar el documento —remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumen de licencia](#) - [Texto completo de la licencia](#)