

Seguimiento de trayectorias con evasión de colisiones para un robot autominy 4.0 Trajectory tracking with collision avoidance for a robot autominy 4.0

D. G. Hernández-Montalvo , J. Santiaguillo-Salinas , H. N. García-Lozano , R. F. González-Zárate 

Departamento de Ingeniería en Mecatrónica, Universidad del Papaloapan, 68400, Loma Bonita, Oaxaca, México

Resumen

En este trabajo se presenta el diseño, simulación e implementación de un control para el seguimiento de trayectorias, considerando evasión de colisiones, para un robot móvil AutoMiny versión 4.0. El control de seguimiento está acotado por una función tangente hiperbólico y para la evasión de colisiones se utiliza un campo vectorial repulsivo. Los resultados teóricos obtenidos son validados a través de una simulación numérica y de manera experimental. La implementación se llevó a cabo mediante ROS y un sistema de cámaras OptiTrack.

Palabras Clave: Robótica Móvil, AutoMiny 4.0, Seguimiento de Trayectorias, Evasión de Colisiones, Campo Vectorial Repulsivo.

Abstract

This paper presents the design, simulation and implementation of a control for trajectory tracking, considering collision avoidance, for a mobile robot AutoMiny version 4.0. Tracking control is bounded by a hyperbolic tangent function and a repulsive vector field is used for collision avoidance. The theoretical results obtained are validated through numerical simulation and experimentally. The implementation was carried out using ROS and an OptiTrack camera system.

Keywords: Mobile Robotics, AutoMiny 4.0, Trajectory Tracking, Collision Avoidance, Repulsive Vector Field.

1. Introducción

El automóvil es uno de los grandes inventos que cambió la historia de la humanidad, no solo revolucionó la forma en que los seres humanos se transportan, si no que condujo a un futuro más productivo para la humanidad. Hoy en día es fácil ver el avance que se ha tenido en materia vehicular, con vehículos cada vez más inteligentes y capaces de realizar diferentes tipos de acciones en forma independiente. Por ejemplo, los elementos de seguridad en los vehículos, se encargan de prevenir los accidentes; y cuando estos suceden, buscan salvaguardar la vida de los pasajeros.

En los últimos años se ha optado por equipar a los vehículos con mejores elementos de seguridad activa, como lo son las bolsas de aire (Naranjo y Angulo, 2016), el ABS (Sistema antibloqueo de frenos), el ESP (Control electrónico de estabilidad), GPS, sensores de distancia a otros vehículos y asistencia para estacionar (Noroña y Gómez, 2019), indicador de mantenimiento, control de presión de los neumáticos, entre otros, con el fin de disminuir el riesgo de accidentes automovilísticos

(Pérez-Darquea, 2018). Por lo tanto, resulta relevante el estudio de nuevas estrategias de seguridad vehicular. Estas estrategias deben ser estudiadas en centros de investigación antes de ser implementadas en vehículos comerciales.

Con este fin se han desarrollado diversas plataformas experimentales como lo es el AutoMiny versión 4.0. Esta plataforma es un modelo de vehículo autónomo a escala 1:10 desarrollado en la Freie Universität Berlin, con fines educativos y de investigación (AutoMiny, 2022). En esta se han desarrollado numerosos trabajos de investigación como el estudio del control de seguimiento de trayectorias (Santiaguillo-Salinas *et al.*, 2021), control de cruce adaptativo basado en lógica difusa (Alomari *et al.*, 2020), detección de semáforos por medio de visión artificial para modelos de autos (Andreesen, 2020), navegación autónoma sin obstáculos, con un obstáculo estático y estacionamiento autónomo a través de visión artificial (Borges-Monsreal, 2021), siendo este último donde la evasión de obstáculos toma más relevancia.

Este problema es un tema actual de interés, en donde, a fin

*Autor para correspondencia: jsantiaguillo@outlook.com

Correo electrónico: darielgustavo@hotmail.com (Dariel Gustavo Hernández-Montalvo), jsantiaguillo@outlook.com (Jesús Santiaguillo-Salinas), garcia.hiram@gmail.com (Hiram Netzahualcōyotl García-Lozano), rafaelfgz.unpa@gmail.com (Rafael Fernando González-Zárate).

Historial del manuscrito: recibido el 26/10/2022, última versión-revisada recibida el 26/10/2022, aceptado el 07/11/2022, publicado el 11/11/2022. **DOI:** <https://doi.org/10.29057/icbi.v10iEspecial5.10125>



de aportar en su solución se han desarrollado distintas estrategias como: un controlador difuso para la navegación autónoma en robots móviles con evasión de colisiones de obstáculos fijos (Kornuta *et al.*, 2015), esquema de evasión de colisiones basado en funciones potenciales repulsivas (García-Delgado *et al.*, 2014; Cárdenas-Millán, 2021), evasión de colisiones mediante el uso de campos vectoriales repulsivos del tipo foco inestable (Santiaguillo-Salinas y Aranda-Bricaire, 2017; Santiaguillo-Salinas, 2017), o la evasión de colisiones usando aprendizaje reforzado profundo (Villagrán-Escobar, 2022), entre otros.

En este trabajo se presenta el modelado, simulación e implementación de un sistema de control para el seguimiento de trayectorias, con evasión de colisiones mediante la utilización de campos vectoriales repulsivos, en un robot AutoMiny 4.0, realizando la detección del obstáculo mediante un sensor LIDAR (Laser Imaging Detection and Ranging).

Este trabajo se organiza de la siguiente manera. En la sección II se presenta el modelo cinemático del AutoMiny y el planteamiento del problema. La sección III detalla el diseño de las estrategias de control para el seguimiento de trayectoria y evasión de colisiones. En la sección IV se presentan los resultados de una simulación numérica y en la sección V la validación experimental de los resultados teóricos obtenidos. Finalmente, la sección VI presenta las conclusiones y trabajos futuros.

2. Preliminares

2.1. Modelo Cinemático del Robot AutoMiny 4.0

Sea el AutoMiny un robot tipo carro como el mostrado en la Figura 1; el cual puede direccionar sus llantas delanteras y las traseras permanecen fijas.

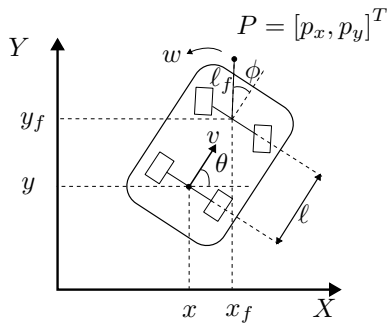


Figura 1: Esquema del robot AutoMiny 4.0.

A partir de (Santiaguillo-Salinas *et al.*, 2021) el modelo cinemático considerando tracción trasera y un punto P como salida del sistema esta dado por

$$\begin{bmatrix} \dot{p}_x \\ \dot{p}_y \\ \dot{\theta} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta - \tan \phi (\sin \theta + \ell_f \frac{\sin \delta}{\ell}) & -\ell_f \sin \delta \\ \sin \theta + \tan \phi (\cos \theta + \ell_f \frac{\cos \delta}{\ell}) & \ell_f \cos \delta \\ \frac{\tan \phi}{\ell} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ w \end{bmatrix} \\ = \begin{bmatrix} A(\theta, \phi) \\ \frac{\tan \phi}{\ell} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ w \end{bmatrix}, \quad (1)$$

donde $[p_x, p_y]^T$ son las coordenadas del punto frontal P , θ es el ángulo de orientación del robot con respecto a X , ϕ es el ángulo de dirección, ℓ es la distancia entre los ejes de las ruedas, v es la velocidad del punto medio del eje de las ruedas traseras y w es la velocidad angular de dirección, $\ell_f \neq 0$ es la distancia del punto medio de las ruedas delanteras del robot al punto frontal P a controlar, $\delta = (\theta + \phi)$, $A(\theta, \phi)$ es la matriz de desacoplamiento, la cual es no singular ya que $\det(A(\theta, \phi)) = \ell_f / \cos \phi \neq 0$ debido a que en la mayoría de los casos prácticos $-\frac{\pi}{2} < \phi < \frac{\pi}{2}$. Para el AutoMiny esta restricción física está dada por $-0,37\text{rad} \leq \phi \leq 0,37\text{rad}$.

2.2. Planteamiento del problema

Sea $m(t) = [m_x(t), m_y(t)]^T$ una trayectoria preestablecida continuamente diferenciable, ξ_o la posición de un obstáculo en el plano y d la distancia a dicho obstáculo. El objetivo de este trabajo es diseñar una estrategia de control $u = f(P(t))$ para un robot AutoMiny, tal que

- Se logre el seguimiento asintótico de una trayectoria deseada, es decir, control de seguimiento

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (P(t) - m(t)) = 0. \quad (2)$$

- Se logre la evasión de colisiones contra un obstáculo fijo a la vez.

$$\|P(t) - \xi_o(t)\| \geq d, \forall t \geq 0. \quad (3)$$

3. Diseño de las estrategias de control

3.1. Control para el seguimiento de trayectorias

Para el seguimiento de trayectorias proponemos una ley de control acotada basada en (Santiaguillo-Salinas *et al.*, 2021) dada por

$$\begin{bmatrix} v \\ w \end{bmatrix} = A(\theta, \phi)^{-1} (\dot{m}) = A(\theta, \phi)^{-1} (-K \tanh(P - m) + \dot{m}) \quad (4)$$

donde $A(\theta, \phi)^{-1}$ es la inversa de la matriz de desacoplamiento, $m(t)$ es la trayectoria deseada, $\dot{m}(t)$ es la velocidad deseada, y $K = \text{diag}(k_x, k_y)$ es una matriz de ganancias de control.

Proposición 1. Considere el sistema (1) y la ley de control (4). Suponga que $k_x, k_y > 0$. Entonces en el sistema en lazo cerrado (1)-(4) el robot converge a la trayectoria deseada de navegación, i.e. $\lim_{t \rightarrow \infty} (P(t) - m(t)) = 0$.

Demostración: Sustituyendo la ley de control (4) en (1) se obtiene

$$\dot{P} = -K \tanh(P - m) + \dot{m}. \quad (5)$$

Los errores del sistema están dados por

$$\begin{bmatrix} e_x \\ e_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_x - m_x \\ p_y - m_y \end{bmatrix} \implies e = P - m, \quad (6)$$

por lo que la dinámica del error esta dada por

$$\dot{e} = -K \tanh(e), \quad (7)$$

Proponemos una función candidata de Lyapunov dada por $V = \frac{1}{2} e^T K^{-1} e$ y evaluando con respecto al tiempo a lo largo de las trayectorias del sistema tenemos $\dot{V} = -e^T K^{-1} \dot{e} = -e^T \tanh(e) < 0 \forall e$ con $e \neq 0$. Por lo que los errores convergen a cero.

Proposición 2. Considere el sistema (1) y la ley de control (4), entonces en el sistema de lazo cerrado (1)-(4) la velocidad del punto P está acotada por $k\sqrt{2} + \eta$.

Demostración: De la ecuación (5) tenemos

$$\begin{aligned} \|\dot{P}\| &= \|-K \tanh(P - m) + \dot{m}\| \\ &\leq \|-K\| \|\tanh(P - m)\| + \|\dot{m}\|, \end{aligned} \quad (8)$$

donde $\|-K\| = \rho(K) = \max(k_x, k_y) = k$ de la cual $\rho(K)$ es el radio espectral de K , $\|\tanh(P - m)\| = \sqrt{2}$ y $\|\dot{m}\| = \eta$ con η la velocidad máxima de la trayectoria, por lo que

$$\|\dot{P}\| \leq k\sqrt{2} + \eta. \quad (9)$$

3.2. Estrategia para la evasión de colisiones

Con la estrategia de control diseñada para el seguimiento de trayectorias, se aborda el problema de evasión de colisiones entre el robot y un obstáculo fijo, mediante el diseño de una ley de control complementaria basada en campos vectoriales repulsivos. Esta ley de control complementaria depende de la distancia entre el robot y el objeto.

Sea $P(t) = [p_x, p_y]^T$ las coordenadas del punto frontal seleccionado en el robot y $\xi_o(t) = [x_0, y_0]^T$ las coordenadas cartesianas de un obstáculo, la distancia entre estos puntos es $\|P(t) - \xi_o(t)\|$. Entonces el robot está en peligro de colisión cuando

$$\|P(t) - \xi_o(t)\| \leq d \quad (10)$$

donde d es la mínima distancia permitida entre el robot y el objeto. Con el fin de evitar colisiones, proponemos campos vectoriales repulsivos dados por

$$\beta = \begin{bmatrix} \beta_x \\ \beta_y \end{bmatrix} = \epsilon \delta \begin{bmatrix} (p_x - x_0) - (p_y - y_0) \\ (p_x - x_0) + (p_y - y_0) \end{bmatrix} \quad (11)$$

donde $\epsilon > 0$ y el parámetro δ está dado de la siguiente manera

$$\delta = \begin{cases} 1 & \text{si } \|P(t) - \xi_o(t)\| \leq d \\ 0 & \text{si } \|P(t) - \xi_o(t)\| > d \end{cases} \quad (12)$$

Los campos vectoriales se proponen de tal manera que exista un foco inestable que gira en sentido contrario a las manecillas del reloj (Figura 2), centrado en la posición del objeto con el que existe riesgo de colisión.

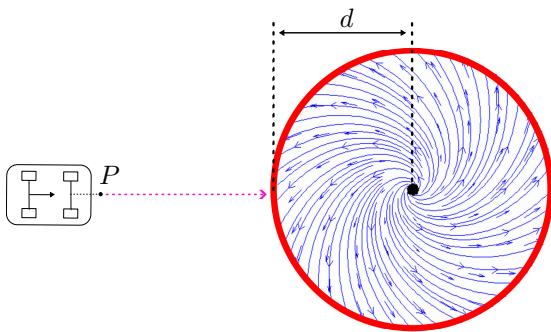


Figura 2: Campo vectorial repulsivo.

Se asume que las posiciones iniciales del robot satisfacen $\|P(0) - \xi_o(0)\| > d$, es decir, no hay riesgo de colisión en $t = 0$.

La estrategia de control para el seguimiento de trayectorias con evasión de colisiones está dada por

$$\begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{w} \end{bmatrix} = A(\theta, \phi)^{-1} (\lambda + \beta). \quad (13)$$

El sistema en lazo cerrado (1) y (13) queda como

$$\dot{P} = -K \tanh(P - m) + \dot{m} + \beta, \quad (14)$$

por lo tanto la dinámica del error resulta en

$$\dot{e} = -K \tanh(e) + \beta. \quad (15)$$

Proposición 3. Considere el sistema (1) y la ley de control (13). Suponga que existe riesgo de colisión con el objeto en el instante t donde se satisface $\epsilon > \frac{(k\sqrt{2} + \eta)}{d}$. Entonces, en el sistema en lazo cerrado (1)-(13) se logra mantener una distancia mayor o igual a d , $\forall t \geq 0$.

Demostración: Para mostrar que el AutoMiny evitará colisionar con el obstáculo y se mantendrá a una distancia mínima de él, se define una superficie dada por

$$\sigma = (p_x - x_0)^2 + (p_y - y_0)^2 - d^2 = 0 \quad (16)$$

Para determinar el comportamiento bajo la acción de los campos vectoriales repulsivos proponemos una función candidata de Lyapunov

$$V = \frac{1}{2} \sigma^2, \quad (17)$$

cuya derivada con respecto al tiempo está dada por $\dot{V} = \sigma \dot{\sigma}$. Entonces la derivada de (16) a lo largo de las trayectorias del sistema en lazo cerrado es

$$\dot{\sigma} = 2(p_x - x_0)\dot{p}_x + 2(p_y - y_0)\dot{p}_y, \quad (18)$$

como se analiza el caso cuando se presenta colisión, sustituyendo $\delta = 1$ y la ley de control (13)

$$\begin{aligned} \dot{\sigma} &= 2 \begin{bmatrix} (p_x - x_0) & (p_y - y_0) \end{bmatrix} (-K \tanh(P - m) + \dot{m} + \beta) \\ &= 2 \begin{bmatrix} (p_x - x_0) & (p_y - y_0) \end{bmatrix} (-K \tanh(P - m)) \\ &\quad + \dot{m} + 2\epsilon \left[(p_x - x_0)^2 + (p_y - y_0)^2 \right]. \end{aligned} \quad (19)$$

Por lo tanto, $\dot{V} \leq 0$ se logra si $\sigma \dot{\sigma} \leq 0$. Si existe riesgo de colisión, $((p_x - x_0), (p_y - y_0))$ se encuentra en la región interior de $\sigma = 0$, es decir $\sigma \leq 0$, entonces el análisis se reduce para mostrar que $\dot{\sigma} \geq 0$. Eso significa que los campos vectoriales resultantes dentro el círculo apuntan hacia afuera, es decir, a la región libre de colisión. Usando la definición del producto cruz $\vec{A} \times \vec{B} = \|\vec{A}\| \|\vec{B}\| \cos \theta$ tenemos

$$\begin{aligned} \dot{\sigma} &= -2 \sqrt{(p_x - x_0)^2 + (p_y - y_0)^2} (k\sqrt{2} + \eta) \\ &\quad + 2\epsilon \left[(p_x - x_0)^2 + (p_y - y_0)^2 \right] > 0 \end{aligned} \quad (20)$$

Resolviendo para ϵ tenemos que, si

$$\epsilon > \frac{2 \sqrt{(p_x - x_0)^2 + (p_y - y_0)^2} (k\sqrt{2} + \eta)}{2 \left[(p_x - x_0)^2 + (p_y - y_0)^2 \right]} = \frac{(k\sqrt{2} + \eta)}{d}, \quad (21)$$

entonces $\dot{\sigma} > 0$. Esto implica que el robot se alejará del objeto hasta una distancia d . Como $\|P(0) - \xi_o(0)\| \geq d$, entonces el robot no solo evita la colisión sino que también $\|P(t) - \xi_o(t)\| \geq d$ $\forall t \geq 0$.

4. Simulación numérica

La simulación numérica se realizó utilizando la estrategia de control (13) y los parámetros reales del robot. El punto P a controlar se encuentra a una distancia $\ell_f = 0,1m$ del punto medio del eje de las ruedas delanteras, y la distancia entre los ejes trasero y delantero es $\ell = 0,26m$, las ganancias de control y repulsión son $k_x, k_y = 0,8$ y $\epsilon = 1,2(k\sqrt{2} + \eta)/d = 3,0169$. El obstáculo tiene coordenadas $\xi_o = [-0,95, 0]^T$ y la distancia mínima donde entra en acción el campo vectorial repulsivo es $d = 0,5m$. Se agregó la restricción del ángulo ϕ , la cual como se mencionó anteriormente, tiene un valor de $\pm 0,37$ radianes.

La trayectoria deseada es un círculo dado por

$$m(t) = \left[1,2\cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right), 1,2\sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \right]^T, \quad (22)$$

con periodo $T = 60s$, donde la velocidad máxima de la trayectoria es $\eta = 0,1257$. Los resultados se presentan a continuación. En la Figura 3 se muestra la trayectoria descrita por el robot. El robot sigue la trayectoria, cuando se encuentra a $0,5m$ del obstáculo entra en funcionamiento el campo vectorial repulsivo evitando que el robot colisione. Una vez que evade el obstáculo, regresa a la trayectoria original. La Figura 4 muestra la distancia lineal entre el punto frontal y el obstáculo, a lo largo de toda la simulación se puede apreciar como el robot siempre permanece a una distancia mayor o igual a $0,5m$, con lo que se evita el riesgo de colisión con el obstáculo. Posteriormente, en la Figura 5 se muestran los errores de posición del robot en ambos ejes. Se puede observar que entre los segundos 26-35, el robot tiene un error grande debido a la evasión del obstáculo, sin embargo, vuelve a retomar la trayectoria establecida una vez que logra evadirlo. En la Figura 6 se muestran los ángulos de orientación del robot y de dirección de las ruedas, observando que el ángulo de dirección alcanza el valor de saturación, provocando maniobras extras en el robot para volver a tomar la trayectoria. Por último se muestran las señales de control en la Figura 7.

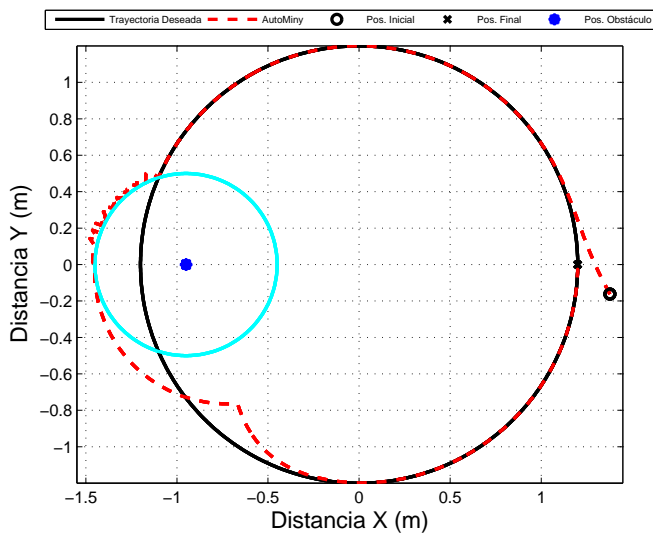


Figura 3: Trayectoria del robot en el plano.

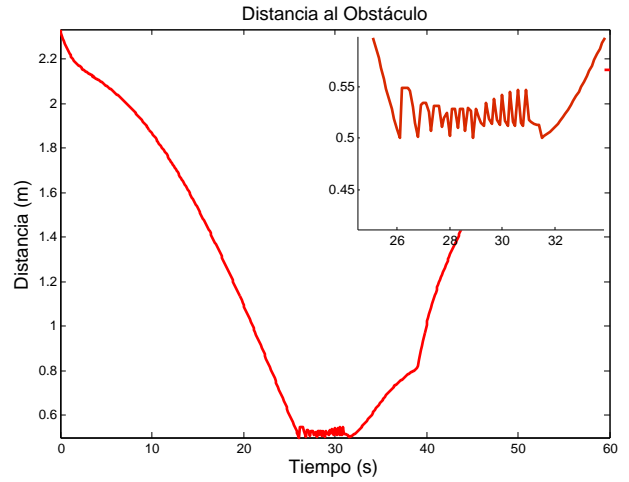


Figura 4: Distancia entre el punto frontal y el obstáculo.

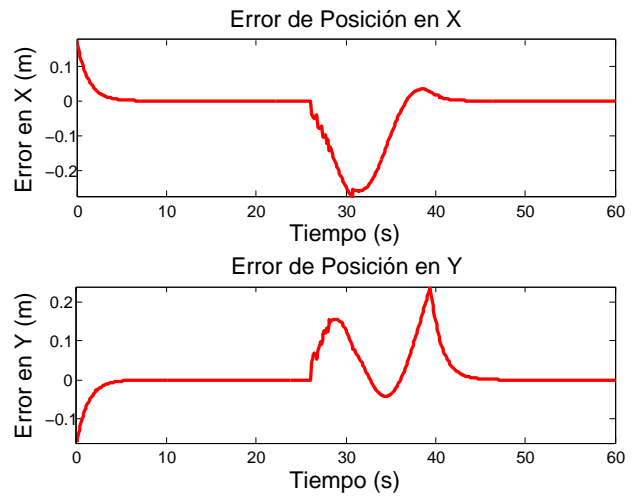


Figura 5: Errores de posición del robot.

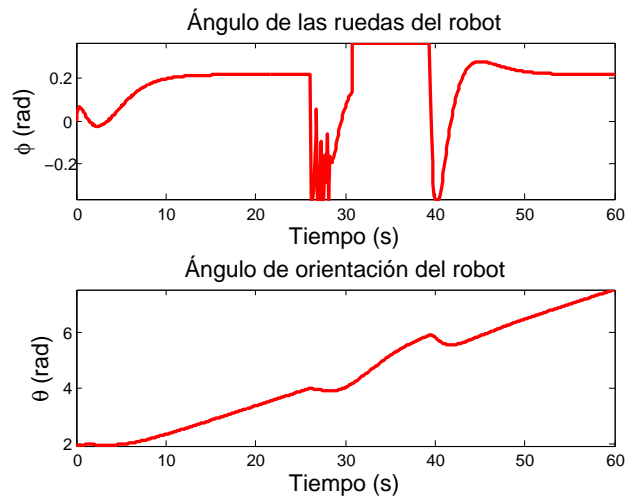


Figura 6: Ángulos de orientación y dirección del robot.

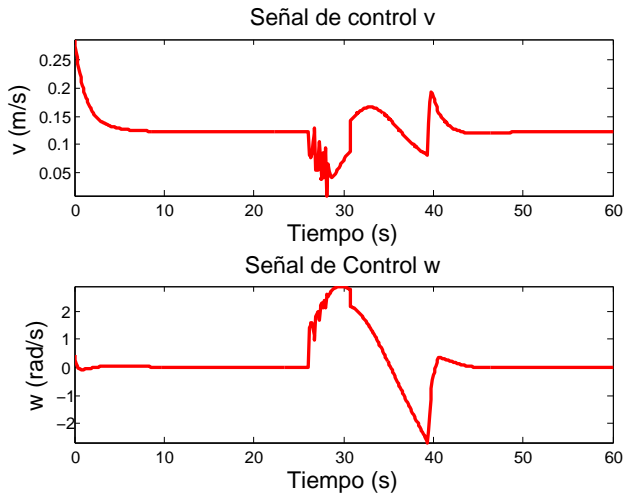


Figura 7: Señales de control.

5. Resultados Experimentales

5.1. AutoMiny

El AutoMiny (Figura 8) es un sistema completo a bordo, provisto de una CPU y GPU de alto poder de cómputo, complementado con sensores de percepción (una cámara estéreo infrarroja y LIDAR), sensores de retroalimentación (sensor de posición del ángulo de dirección y encoder incremental del motor). Funciona con ROS Melodic Morenia en Ubuntu 18.04. El AutoMiny se basa principalmente en dos módulos de procesamiento separados: una placa controladora con un microprocesador (Arduino nano) además de una Unidad de Medición Inercial (IMU) y una computadora Intel NUC. La placa controla la velocidad del motor de DC para la tracción y el ángulo del Servomotor para la dirección. La información de la placa controladora se envía a través de una comunicación serial a la computadora NUC para publicar topics en el entorno ROS (AutoMiny, 2022). Para conceptos propios de ROS, véase (ROS, 2022).

Realizando pruebas de funcionamiento previas a los experimentos, se obtuvo que el robot tiene una velocidad máxima de $\pm 2,5\text{m/s}$ y un ángulo de dirección máximo de las ruedas delanteras de $\pm 0,37$ radianes. Además, se tiene que a velocidades entre $-0,06\text{m/s}$ y $0,06\text{m/s}$ se entra en la zona muerta del motor de tracción, por lo que en este rango de velocidades el robot no alcanza a desplazarse.

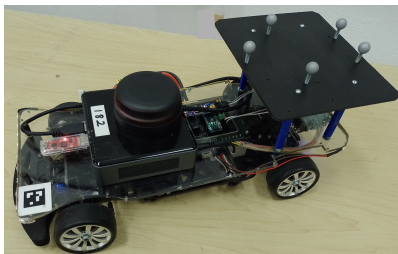


Figura 8: AutoMiny 4.0.

5.2. OptiTrack

OptiTrack es un sistema de captura de movimiento desarrollado por NaturalPoint. Consiste en una serie de cámaras infra-

rojas que pueden ser configuradas para la detección de marcadores reflejantes (Rigid Bodies, marcadores individuales o esqueletos de varios marcadores) cuyo propósito es trasladar el movimiento real a un modelo virtual con el cual se pueda trabajar con la información adquirida. Por medio de este sistema y colocando marcadores sobre el AutoMiny es posible obtener la posición y orientación del eje trasero del robot y así determinar la posición del punto frontal P .

5.3. Funcionamiento de la plataforma

La plataforma experimental consiste en un sistema de cámaras Optitrack las cuales dan la posición y orientación del robot en un área específica, la información es recibida en una computadora con sistema operativo Windows 11 y el software Motive, dicho equipo envía la información a través de una red wifi a otra computadora con sistema operativo Ubuntu 20.04 comunicadas a través de ROS. En la computadora con Ubuntu se implementa un nodo de ROS en C/C++ para el control del AutoMiny, dicho nodo recibe la posición y orientación del robot, así como la posición del obstáculo mediante topics. La posición del obstáculo es determinada por medio del LIDAR del AutoMiny, dicho sensor entrega un vector de tamaño 360, un dato por cada grado alrededor del robot, donde cada dato da la distancia que hay a un objeto en esa posición angular (ver Figura 9). Con toda esta información recibida del LIDAR y las cámaras es posible implementar las estrategias de control diseñadas. Se calculan las señales de control en el nodo de ROS, las cuales se envían al robot por medio de topics, dichas señales corresponden a la velocidad lineal y angular del robot, sin embargo, como entradas de control el robot recibe la velocidad lineal y el ángulo de dirección de las ruedas delanteras, por lo que es necesario integrar la velocidad angular para obtener el ángulo de dirección y así mandarlo al robot.

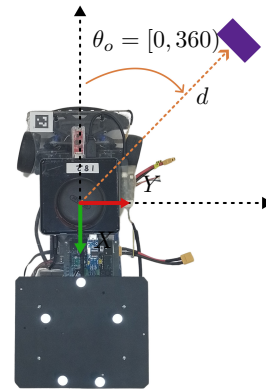


Figura 9: Marco de referencia del LIDAR.

5.4. Experimentación

A continuación se muestran los resultados experimentales obtenidos utilizando la estrategia de control (13). El punto P que se desea controlar se encuentra a una distancia $\ell_f = 0,1\text{m}$ al frente del punto medio del eje de las ruedas delanteras y la distancia entre los ejes trasero y delantero es $\ell = 0,26\text{m}$, la distancia mínima permitida entre el punto frontal y el obstáculo es $d = 0,5\text{m}$.

La trayectoria deseada es un círculo dado por

$$m(t) = \left[0,5 + 1,2\cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right), 1,2\sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \right]^T \quad (23)$$

con periodo $T = 60s$, donde la velocidad máxima de la trayectoria es $\eta = 0,1257$. Las ganancias de control son $k_x, k_y = 0,8$ y $\epsilon = 1,2 \frac{(k\sqrt{2}+\eta)}{d} = 3,0169$. La Figura 10 muestra la trayectoria descrita por el robot en el plano. En esta figura se observa como el robot sigue la trayectoria deseada. En el momento en que el punto frontal se encuentra a 0,5m del obstáculo entra en acción el campo vectorial repulsivo, provocando que el robot lo evada. Sin embargo, se observa que la trayectoria del robot al evadir el obstáculo, difiere levemente a la trayectoria mostrada en la simulación. Actualmente se analizan las posibles causas de estas diferencias de distancia. Tenemos razones para pensar que las dinámicas no modeladas influyen en este punto. Una vez que el robot evita el obstáculo, retoma la trayectoria deseada. En la Figura 11 se muestra la distancia del punto frontal con respecto al obstáculo. En la Figura 12 se presentan los errores de posición del AutoMiny, los cuales oscilan dentro de una vecindad cercana a cero mientras no encuentre un obstáculo en la trayectoria. En la Figura 13 podemos ver el ángulo de orientación θ del robot y el ángulo de dirección ϕ de las ruedas delanteras durante el seguimiento de la trayectoria, tanto el obtenido por los sensores, como el utilizado en la entrada de control (integral). De igual forma podemos observar que durante la evasión del obstáculo el ángulo de dirección se satura. Por último, en la Figura 14 se muestran las señales de control que se envían al robot.

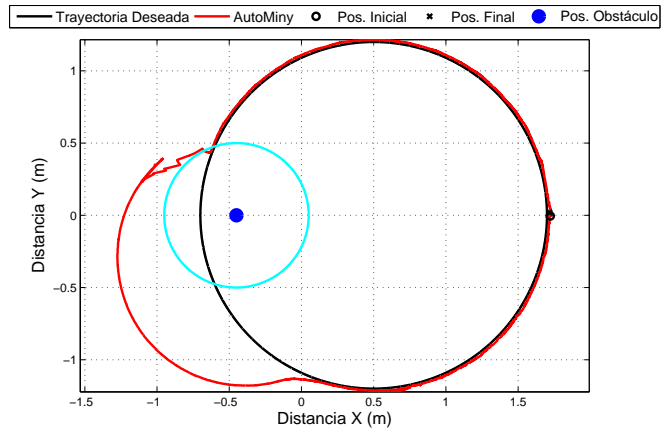


Figura 10: Trayectoria del robot en el plano.

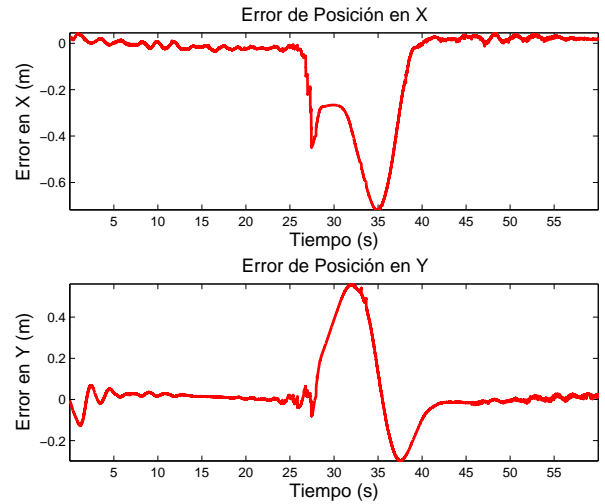


Figura 12: Errores de posición del robot.

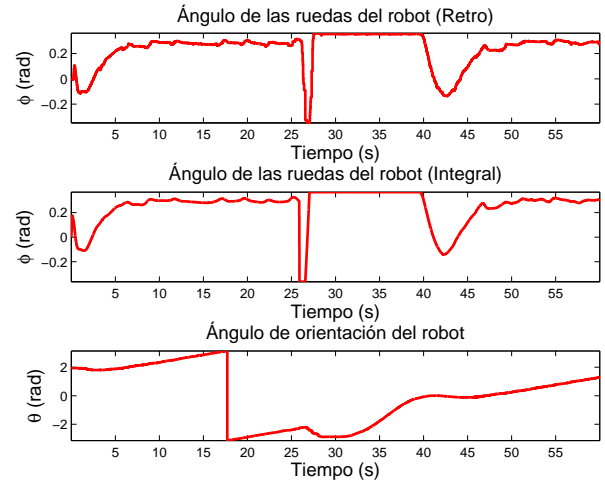


Figura 13: Ángulos de orientación y dirección del robot.

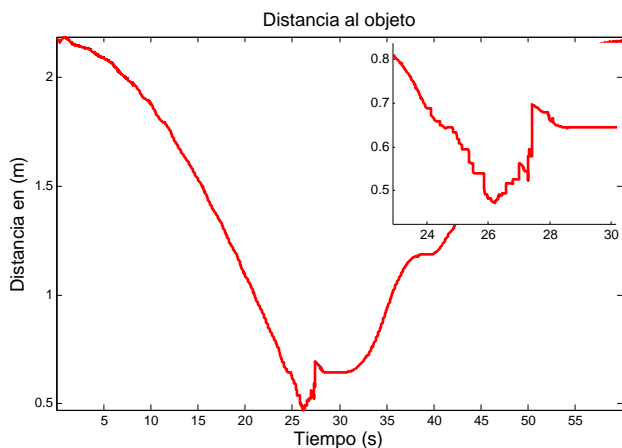


Figura 11: Distancia entre el punto frontal y el obstáculo.

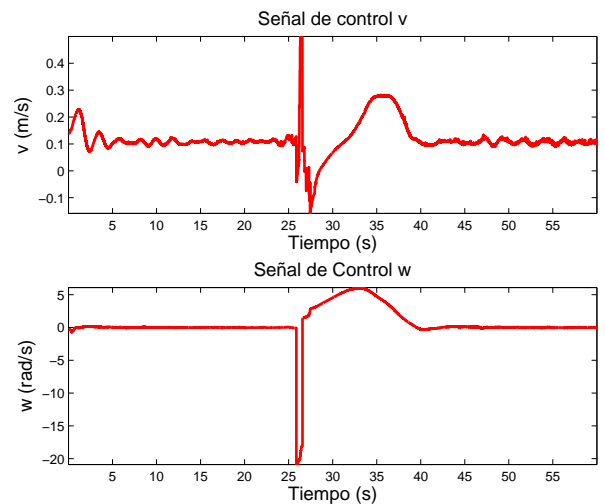


Figura 14: Señales de control.

6. Conclusiones

En este trabajo se presentó una estrategia de control para el seguimiento de trayectoria con evasión de obstáculos en un robot AutoMiny 4.0. Se propone un modelo matemático para el AutoMiny basado en el modelo cinemático de un robot tipo carro considerando tracción trasera y como salida a controlar un punto frontal P . Se presentó una estrategia de control acotada mediante la función tangente hiperbólico, que garantiza la convergencia del error a cero, entre el robot y la trayectoria deseada. Se diseñó una estrategia para la evasión de obstáculos utilizando campos vectoriales repulsivos. Se realizó la validación numérica y experimental de los resultados teóricos. Como se puede observar en las gráficas, los resultados experimentales son consecuentes con las simulaciones numéricas. Es importante continuar con el estudio y perfeccionamiento de este tipo de trabajos, con la finalidad de extender los resultados a automóviles comerciales, a fin de poder salvaguardar la integridad física de vehículos y conductores.

Como trabajo a futuro se pretende extender esta estrategia de evasión para considerar obstáculos en movimientos, así como varios obstáculos a la vez. También se pretende hacer uso de la cámara con la que cuenta el AutoMiny y utilizar algoritmos de visión para lograr la evasión.

Agradecimientos

Agradecimiento al fondo FORDECYT/07SE/2018/08/06-04 otorgado al proyecto CONACYT 296737 denominado “CONSORCIO EN INTELIGENCIA ARTIFICIAL”

Referencias

Alomari, K., Mendoza, R., Sundermann, S., Goehring, D., y Rojas, R. (2020). Fuzzy logic-based adaptive cruise control for autonomous model car. *In*

- Proceedings of the International Conference on Robotics, Computer Vision and Intelligent Systems (ROBOVIS 2020)*, pp. 121–130.
- Andresen, J. (2020). *Development of an image based traffic light detection for model cars*. Tesis doctoral, Freie Universität Berlin.
- AutoMiny (2022). Quick-Start Guide <https://autominy.github.io/AutoMiny/docs/quickstart-guide/>.
- Borges-Monsreal, G. (2021). Autonomous navigation of an autominy based on the “sliding window technique” and 2d detection. *En International Multidisciplinary Congress of Engineering*, pp. 1–6. ECORFAN.
- Cárdenas-Millán, I. (2021). Programación de robot móvil con prevención de colisiones copeliasim. *Departamento de ingeniería mecánica*.
- García-Delgado, L. A., Gómez-Fuentes, D. B.-M. R., Noriega, B., García-Juárez, A., Leal-Cruz, A., Vera-Marquina, A., y Rojas-Hernández, A. (2014). Función potencial repulsiva con ganancias de controlador variables. *Memorias del XVI Congreso Latinoamericano de Control Automático, CLCA 2014*, pp. 1289–1294.
- Kornuta, C., Cichanowski, M., y Marinelli, M. (2015). Inteligencia artificial aplicada a la navegación autónoma de robots móviles. *En XVII Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación (Salta, 2015)*.
- Naranjo, J. M. y Angulo, R. V. (2016). *Análisis de los sistemas de protección activa y pasiva del automóvil*. Tesis doctoral, Facultad de Mecánica Automotriz. UIDE. Quito.
- Noroña, M. y Gómez, M. (2019). Desarrollo e innovación de los sistemas mecatrónicos en un automóvil: una revisión. *Enfoque UTE*, 10(1):117–127.
- Pérez-Darquea, D. G. (2018). Evolución de los dispositivos electrónicos en un automóvil. *INNOVA Research Journal*, 3(2):1–7.
- ROS (2022). Why ROS, Sitio web: <https://www.ros.org/blog/why-ros/>.
- Santiaguillo-Salinas, J. (2017). *Coordinación de movimiento con no colisión para sistemas multi-agente*. Tesis doctoral, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional.
- Santiaguillo-Salinas, J. y Aranda-Bricaire, E. (2017). Time-varying formation tracking with collision avoidance for multi-agent systems. *IFAC-PapersOnLine*, 50:309–314.
- Santiaguillo-Salinas, J., García-Lozano, H., y Cruz-Herrera, G. (2021). Modelado y control para el seguimiento de trayectorias de un robot móvil autominy 4.0. *Memorias del XXIII Congreso Mexicano de Robótica 2021*, pp. 77–82.
- Villagrán-Escobar, J. M. (2022). Evasión de colisión para conducción autónoma en un ambiente urbano usando aprendizaje reforzado profundo y aprendizaje por representación. Tesis de Maestría. Universidad de Chile.