

Design and Prototyping of a Low-Cost Autonomous Vehicle

1st Eduardo Carrera

Facultad de Ingeniería Eléctrica
Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá, Panamá
eduardo.carrera@utp.ac.pa

Abstract—This paper presents the prototyping of a low-cost autonomous vehicle using a children's toy car as a platform and a GPS receiver for navigation. The prototype utilizes concepts such as Ackerman's geometry and circle calculations to determine the optimal trajectory for autonomous navigation along a predefined path. The results demonstrate the feasibility of developing a cost-effective autonomous vehicle using minimal components. The findings underscore the potential of utilizing a simple GPS receiver for navigation purposes. This work serves as a foundation for future studies aiming to optimize the performance and reliability of low-cost autonomous vehicles, contributing to advancements in autonomous vehicle technology.

Index Terms—autonomous navigation, microcontrollers, motors, algorithms, GPS, Ackerman geometry

I. INTRODUCCIÓN

La navegación autónoma ha emergido como un campo de investigación y desarrollo de gran relevancia a nivel mundial. Con avances significativos en los últimos años, se ha demostrado el potencial de los vehículos autónomos para transformar diversas industrias, como el transporte [1], la logística [2] [3] y la robótica [4] [5] [6]. Estos vehículos prometen mejorar la eficiencia, la seguridad y la comodidad en el desplazamiento de personas y mercancías.

Sin embargo, a pesar de los esfuerzos de empresas líderes en el campo de la navegación autónoma, como Tesla, Waymo, Motional, entre otras, los costos asociados a los vehículos autónomos continúan siendo bastante elevados, lo que restringe su adopción a gran escala. Por consiguiente, resulta imperativo seguir explorando soluciones que permitan reducir los costos de producción e investigación en este ámbito, con el propósito de mejorar la accesibilidad y viabilidad de esta tecnología en diversos contextos y aplicaciones.

Con este trabajo se busca aportar un primer paso en el prototipado de navegación autónoma de bajo costo, buscando demostrar que es posible alcanzar niveles aceptables de autonomía sin incurrir en altos costos, a partir de un enfoque orientado a la optimización de recursos y la utilización eficiente de tecnologías disponibles.

En este trabajo se aborda el análisis de la fusión de sensores y actuadores requerida para desarrollar un prototipo inicial de vehículo autónomo capaz de lograr una navegación completamente autónoma. Se busca que, al iniciar el algoritmo de navegación, el vehículo sea capaz de moverse de forma

independiente en un entorno controlado y predefinido, sin requerir intervención humana.

II. SENSORES Y ACTUADORES PARA LA NAVEGACIÓN AUTÓNOMA

El componente clave para determinar la posición del vehículo autónomo es un receptor GPS de bajo costo, específicamente el modelo UBX-G7020. Se ha ubicado en la parte superior del vehículo para garantizar una visión despejada hacia los satélites del sistema GPS. Es importante destacar que, en este trabajo, se ha optado por no utilizar sensores comúnmente empleados en este tipo de sistemas, como visión artificial [7], LiDAR, encoders o sensores de distancia ultrasónicos [8], con el fin de mantener los costos del primer prototipo en niveles reducidos.

Por otro lado, los componentes responsables de la conducción del vehículo, tanto la dirección como la velocidad, consisten en un motor paso a paso (también conocido como stepper motor) y dos motores de corriente continua (DC) de 12 V. Estos motores son controlados mediante una tarjeta de desarrollo Arduino UNO, que a su vez se comunica con una computadora central encargada de recopilar y procesar los datos provenientes del receptor GPS. La computadora envía las instrucciones de navegación al Arduino, el cual se encarga de regular los valores correspondientes de cada motor.

El sistema completo, a excepción de la computadora central, se alimenta mediante una batería de 12 V diseñada para motocicletas. Para alimentar adecuadamente el Arduino UNO, se utiliza un regulador de voltaje que suministra los 5 V necesarios para su correcto funcionamiento. Durante la construcción y las pruebas del prototipo, se identificó la necesidad de utilizar un segundo módulo de puente H para proporcionar un control dedicado a cada motor. Esto se debe a la demanda de corriente requerida por los motores en cuestión.

En cuanto a la carrocería del vehículo, se utilizó un carrito de juguete, cuyo propósito original era transportar, de manera entretenida, a niños de entre 3 a 5 años. Este carrito de juguete tenía la capacidad de ser controlado por el conductor o a través de control remoto. Sin embargo, este trabajo utilizó únicamente la carrocería y el sistema de dirección original del mismo, realizando pequeñas modificaciones a estos para conseguir el funcionamiento esperado. La carrocería del vehículo

se muestra en la Figura 1, mientras que la figura 2 muestra el diagrama de conexiones del prototipo propuesto.



Fig. 1. Carrocería del vehículo autónomo.

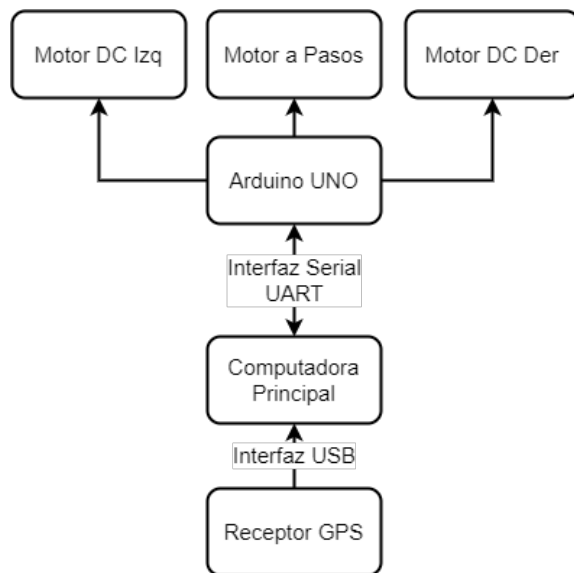


Fig. 2. Diagrama de conexiones del prototipo.

III. ALGORITMOS DE CONTROL DEL PROTOTIPO

A. Algoritmos dentro del Arduino UNO

Como se mencionó anteriormente, el Arduino UNO desempeña un papel fundamental en el control de los motores

para la navegación del vehículo autónomo. Es responsable de gestionar la dirección del vehículo mediante el uso de un motor a pasos. Este motor, conectado a un juego de engranajes en el eje de las ruedas, permite modificar la orientación de estas con respecto al vehículo. Para lograrlo, el Arduino envía un tren de pulsos al controlador del motor a pasos a una frecuencia de 1 kHz, junto con la información sobre la dirección del movimiento, la cual es controlada mediante un pin digital. La cantidad de pulsos y la dirección del movimiento son determinadas por las instrucciones recibidas de la computadora principal a través de la interfaz serial.

Del mismo modo, se aplica un enfoque similar al control de los motores DC. Según las instrucciones recibidas de la computadora principal, se controla tanto la dirección del movimiento de las ruedas traseras del vehículo como el ciclo de trabajo de la señal PWM que regula su velocidad. Para lograr esto, se utiliza la función *AnalogWrite()*, la cual permite ajustar el ciclo de trabajo en un rango de valores entre 0 y 255. Sin embargo, con el objetivo de simular el funcionamiento de una caja de cambios, los datos enviados para regular la velocidad de las ruedas se transmiten en un rango del 0 al 5. Teniendo esto en cuenta, se determinó el rango de ciclos de trabajo en el que los motores operaban y se asignaron los valores de velocidad del 1 al 5, correspondientes a un rango entre 100 y 255 en el ciclo de trabajo del PWM.

Finalmente, el algoritmo de control presente dentro del Arduino UNO se encuentra resumido en el diagrama de la Figura 3:

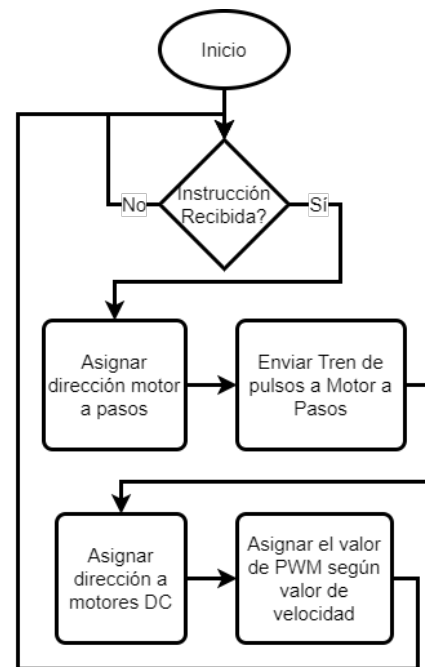


Fig. 3. Diagrama de conexiones del prototipo.

B. Algoritmos dentro de la computadora principal

Para determinar las instrucciones de navegación que debe enviar al Arduino UNO, la computadora adquiere los datos

del receptor GPS en formato de sentencias NMEA 0183, utilizando específicamente la sentencia "GPGGA" para obtener información relevante como la latitud, longitud y el número de satélites detectados. Para garantizar un procesamiento preciso de los datos, se realiza una conversión de los valores de latitud y longitud de grados y minutos a grados decimales, lo cual facilita las operaciones aritméticas necesarias para la navegación. Una vez que se obtiene la posición basada en los datos del receptor GPS, se realiza una comparación con una serie de puntos de referencia predefinidos en un circuito establecido. Esto permite calcular la trayectoria que el vehículo debe seguir para evitar posibles colisiones. Para determinar la posición dentro del circuito predefinido, se compara la distancia entre la ubicación real del vehículo y cada uno de los puntos del circuito. Finalmente, se selecciona el punto de referencia más cercano, el cual se convierte en la posición virtual del vehículo. Basándose en esta posición virtual, se determina la dirección de las ruedas y la velocidad adecuada para cada parte del recorrido.

Para determinar el ángulo de orientación de las ruedas con respecto a la línea vertical del vehículo, se emplean los principios de la Geometría de Ackerman [9]. Estos principios permiten calcular el ángulo de giro de las ruedas en función del radio de giro y las dimensiones del vehículo. La fórmula utilizada es la siguiente:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{L}{R - \frac{T}{2}}\right) \quad (1)$$

Donde α representa el ángulo de las ruedas con respecto a la dirección del vehículo, L indica la distancia entre las ruedas traseras y delanteras, R corresponde al radio de la trayectoria circular, y T representa la distancia entre las ruedas delanteras.

Para obtener el radio óptimo necesario para realizar estos cálculos, se ha decidido utilizar el punto virtual que representa la posición del vehículo, junto con los puntos que se encuentran 5 y 10 posiciones posteriores al punto actual. En este sentido, se emplea la fórmula general de la circunferencia [10] para dicho cálculo:

$$\begin{aligned} (x - h)^2 + (y - k)^2 &= r^2 \\ x^2 - 2xh + h^2 + y^2 - 2yk + k^2 - r^2 &= 0 \\ a = -h, b = -k, y c = h^2 + k^2 - r^2 & \\ x^2 + y^2 + 2ax + 2by + c &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

Donde x e y representan las coordenadas en el plano cartesiano de nuestros puntos, h y k indican las coordenadas x y y del centro de la circunferencia, y r representa el radio de la misma. Al sustituir las coordenadas de los puntos seleccionados en esta ecuación, podemos construir una matriz a la cual aplicaremos el método de Gauss-Jordan para determinar los valores de a , b y c , lo que nos permitirá obtener finalmente el radio de la circunferencia. La Figura 4 ejemplifica las trayectorias circulares trazadas en una curva del recorrido, calculadas cada cinco puntos del recorrido.

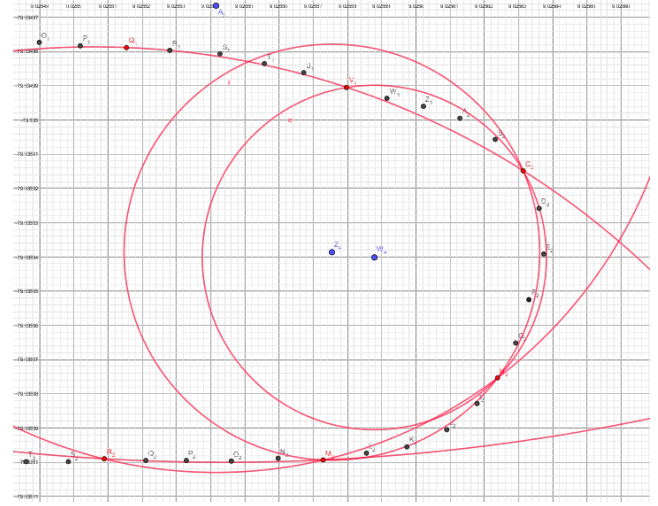


Fig. 4. Trayectorias circulares calculadas aplicando la ecuación 2.

IV. PRUEBAS DENTRO DEL CIRCUITO

El circuito utilizado para llevar a cabo las pruebas del prototipo se muestra en la Figura 5. Este circuito se encuentra ubicado dentro del terreno de la Universidad Tecnológica de Panamá y está diseñado como un boulevard, con carriles separados. Es importante destacar que este recorrido presenta un leve relieve. El circuito consta de una distancia aproximada de 160 metros, con dos vueltas en forma de U, lo que nos permite evaluar la capacidad del prototipo de vehículo autónomo para realizar giros de manera precisa.

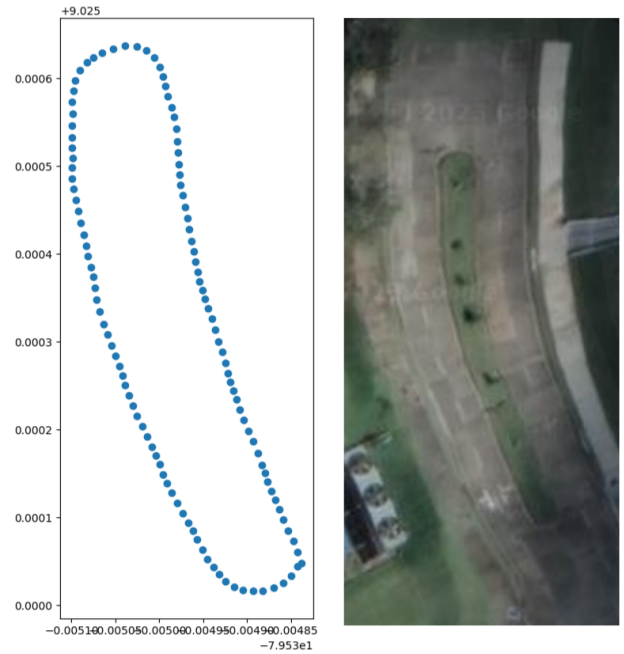


Fig. 5. Vista gráfica de puntos virtuales (izquierda), vista satelital del circuito de prueba (derecha).

Las pruebas de navegación se iniciaron mediante la cali-

bración precisa de la dirección del vehículo, asegurando que las ruedas estuvieran perfectamente alineadas con la línea vertical del mismo. Una vez completada la calibración, se puso en marcha el algoritmo de navegación desde la computadora principal y se dio inicio al recorrido.

Durante los diferentes recorridos de prueba, se observaron colisiones del vehículo contra la acera o el centro del boulevard, lo que reveló la existencia de ciertos errores tanto en el hardware como en los algoritmos. En primer lugar, se identificó un error en el cálculo de la relación entre los pasos del motor y el ángulo de orientación de las ruedas, lo que resultaba en giros excesivos del vehículo al tomar una curva, provocando colisiones innecesarias. Por otro lado, se detectaron discrepancias en los datos del receptor GPS en ciertos puntos del recorrido, indicando incorrectamente que el vehículo se encontraba virtualmente en el carril opuesto al que realmente estaba. Esto llevaba a un giro de las ruedas en dirección contraria, provocando nuevamente colisiones no deseadas del vehículo.

A pesar de esto, el vehículo era capaz de ejecutar las instrucciones de giro de las ruedas en los puntos del mapa donde eran necesarios, consiguiendo en una ocasión un giro casi perfecto en la parte superior del trayecto. Esto denota que el algoritmo de trayectorias circulares es capaz de entregar instrucciones precisas en estas circunstancias.

V. CONCLUSIONES

Tras analizar los resultados y los errores obtenidos durante las pruebas del prototipo, se concluye que se requiere la implementación de sensores más precisos para obtener datos de posicionamiento más precisos y así eliminar el error ocasionado por los datos del receptor GPS. Otra alternativa sería adquirir receptores GPS de mayor calidad, pero esto implicaría un incremento en los costos, lo cual no está alineado con el objetivo de mantener el prototipo de bajo costo.

Además, es necesario realizar un estudio más exhaustivo y una calibración precisa de la relación entre los pasos del motor y el ángulo de giro de las ruedas para mejorar la precisión en la dirección del vehículo y evitar colisiones innecesarias.

Se evidencia también la necesidad de incorporar sensores como LiDAR, cámaras estereoscópicas y sensores ultrasónicos de distancia como medidas preventivas para evitar colisiones en futuros casos. La integración y desarrollo de protocolos y funciones anti-colisión sería requerida con la adición de estos sensores.

Finalmente, como opción para mejorar la eficiencia en el procesamiento y la ejecución de instrucciones, se podría considerar reemplazar el Arduino UNO y la computadora central actuales con el uso de computadoras de una sola tarjeta que cuenten con capacidades para controlar señales PWM e interfaces USB. Esto permitiría que el procesamiento y la ejecución de instrucciones se realicen en una sola tarjeta, agilizando la toma de decisiones de manera más rápida y efectiva.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al profesor Danilo Cáceres por su asesoría durante la realización de este trabajo.

REFERENCES

- [1] Q. Li, N. Zheng, and H. Cheng, "Springrobot: A Prototype Autonomous Vehicle and Its Algorithms for Lane Detection," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 5, no. 4, pp. 300–308, Dec. 2004, doi: <https://doi.org/10.1109/tits.2004.838220>.
- [2] A. Ascencion Castillo, D. Beltrán Gomez, and E. A. Macias Romero, "INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA UNIDAD PROFESIONAL 'ADOLFO LÓPEZ MATEOS' ZACATENCO," Undergraduate, Instituto Politécnico Nacional, 2019.
- [3] G. Meneses Benavides, C. Velasquez Gómez, and R. Grisales Arboleda, "PROTOTIPO DE VEHÍCULO DE GUIADO AUTÓNOMO PARA SISTEMA DE ALMACENAMIENTO Y RECUPERACIÓN AUTOMÁTICO DE LIBROS," *Revista de Investigaciones Universidad del Quindío*, vol. 25, no. 1, pp. 73–79, Mar. 2014, doi: <https://doi.org/10.33975/riuq.vol25n1.156>.
- [4] T. Navarro Cosme, "Desarrollo de un Prototipo de Vehículo Autónomo Semi-Inteligente Basado en Arduino," Undergraduate, Universidad Politécnica de Valencia, 2016.
- [5] E. G. Hernández Vega, F. E. Garay Acuña, V. González Navarro, and M. Á. Gutiérrez Velázquez, "ANALYSIS OF PROTOTYPE OF AUTONOMOUS VEHICLE BASED ON VISION SYSTEM AND UNDER THE CONCEPT OF THE INTERNET OF THINGS IN INTEL EDISON'S PLATFORM," Nov. 2019.
- [6] E. García Cuadros, "Diseño de un Prototipo de Vehículo Autónomo," Undergraduate, Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Sistemas de Telecomunicación.
- [7] L. A. Flohr, "Prototyping Autonomous Vehicle Windshields with AR and Real-Time Object Detection Visualization: An On-Road Wizard-of-Oz Study," *Proceedings of the 2023 ACM Designing Interactive Systems Conference*, pp. 2123–2137, Jul. 2023, doi: <https://doi.org/10.1145/3563657.3596051>.
- [8] F. T. El-Hassan, "Experimenting with Sensors of a Low-Cost Prototype of an Autonomous Vehicle," *IEEE Sensors Journal*, vol. 20, no. 15, 2020, doi: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.3006086>.
- [9] J. Vogel, "Tech Explained: Ackermann Steering Geometry," *Racecar Engineering*, Apr. 06, 2021. <https://www.racecar-engineering.com/articles/tech-explained-ackermann-steering-geometry/>
- [10] J. H. Guzman, "Ecuación de la Circunferencia que Pasa por Tres Puntos," *Neurochispas*, Apr. 20, 2021. <https://www.neurochispas.com/wiki/ecuacion-de-la-circunferencia-que-pasa-por-tres-puntos/> (accessed Jul. 18, 2023).