



## Scale Self-Driving Lane Line Tracking Algorithm: a Hybrid Approach

---

Javier Saldivar Pérez, Eduardo de Avila Armenta,  
José María Celaya Padilla, Hamurabi Gamboa Rosales,  
Huizilopoztli Luna García, Jorge Issac Galván Tejada and  
Carlos Eric Galván Tejada

EasyChair preprints are intended for rapid  
dissemination of research results and are  
integrated with the rest of EasyChair.

April 18, 2021

# Algoritmo de seguimiento de carril para conducción autónoma a escala: un enfoque híbrido

Javier Saldivar Pérez, Eduardo de Avila Armenta,  
José María Celaya Padilla, Hamurabi Gamboa Rosales,  
Huizilopoztli Luna García, Jorge Issac Galván Tejada,  
Carlos Eric Galván Tejada

Universidad Autónoma de Zacatecas,  
Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica  
Zacatecas, Zacatecas, México  
javersaldivar28@gmail.com,  
{edavilaa,jose.celaya,hamurabigr,hlugar,gatejo,ericgalvan}@uaz.edu.mx

**Resumen.** Actualmente, en consecuencia del gran avance en las ramas de las tecnologías de la información y comunicación (TIC), tales como, inteligencia artificial (AI), aprendizaje automático (ML) y visión computacional (CV); la utilización de robots y sistemas autónomos se ha extendido a diversos sectores del conocimiento humano. Uno de los sectores que se ha visto con mayor influencia de los sistemas autónomos es el automotriz, en donde, uno de los objetivos fundamentales es lograr una conducción completamente autónoma. Una de las bases para lograr una conducción autónoma, consiste en la detección y el seguimiento de las líneas de carril, para ello, en la literatura se han propuesto diversos métodos de procesamiento de imágenes y visión computacional. En el presente artículo, se da a conocer una novedosa propuesta de un algoritmo capaz de realizar dichas tareas para vehículos autónomos a escala, con modelo AutoNOMOS, realizados para competencia en categorías AutoModelCar. Dicha propuesta consta de un método híbrido, en donde se hace la conjunción de técnicas de procesamiento de imágenes y un control proporcional derivativo (PD).

**Palabras clave:** Seguimiento de carril, conducción autónoma, visión computacional, control PD, AutoNOMOS, AutoModelCar.

**Abstract.** Nowadays, as a result of the advancements in branches of information and communication technologies (ICT), such as artificial intelligence (AI), machine learning (ML) and computer vision (CV); the usage of robots and autonomous systems has spread to various sectors of human knowledge. One of the sectors that has been seen with greatest influence of autonomous systems is the automotive industry, where one of the fundamental objectives is the achievement of completely autonomous driving. One of the bases to achieve autonomous driving consists of detection and tracking of lane lines, thus, various methods of image processing

and computer vision have been proposed in the state of the art. In this paper, is presented a novel proposal for an algorithm capable of performing these tasks for scale autonomous vehicles, with the AutoNOMOS model, carried out for competition in AutoModelCar categories. This proposal consists of a hybrid method, where the combination of image processing techniques and a proportional derivative control (PD) is made.

**Keywords:** Lane line detection, self-drivinga, computer vision, PD controller, AutoNOMOS, AutoModelCar.

## 1 Introducción

En la actualidad, la utilización de robots y sistemas autónomos no es propiamente un tema especial para la automatización de procesos industriales [10], de lo contrario, en las últimas décadas, debido al crecimiento acelerado de la tecnología y la reducción de costes en producción de hardware y software especializado [10][11]; la autonomía se ha extendido ampliamente a diversos sectores, como lo son salud, aviación, industria agrícola, entre otros, mismos que buscan el cumplimiento de tareas cotidianas con una mínima intervención humana [12][13]. El sector automotriz, es también uno de los sectores en donde ha arribado la autonomía, de hecho, hoy en día existen prototipos de vehículos autónomos probados en ciudades y carreteras.

En los últimos años, la conducción autónoma ha tenido un gran impulso, evolucionando constante y rápidamente, esto debido al avance en las Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC), más precisamente en las ramas de Inteligencia Artificial (AI, por sus siglas en inglés), aprendizaje automático (ML, por sus siglas en inglés) y la Visión Computacional (CV, por sus siglas en inglés) [14]. En efecto, grandes empresas globales y la comunidad científica están realizando grandes inversiones en investigación y desarrollo (I+D) sobre conducción autónoma, con la finalidad de introducir vehículos de conducción totalmente autónoma en el mercado general [15][16][9].

La conducción autónoma implica un entorno altamente dinámico, en donde se vuelve necesaria la extracción y procesamiento de características, para posteriormente llevar a cabo la toma de decisiones con la mayor rapidez posible [20]. Uno de los temas fundamentales en los procesos de conducción autónoma es la detección automática y el seguimiento de líneas de carril. Con el objetivo de ejecutar tareas de ésta índole, es necesaria la implementación de técnicas de procesamiento de imágenes y visión computacional [9] [17] Es necesario destacar que, apuntando a que la conducción autónoma se dote de una mayor seguridad, es fundamental que diversos controles sean implementados, es posible observar la necesidad de dichos controles cuando es requerido hacer constantes correcciones en la posición relativa entre el vehículo y la línea central del carril de la carretera[19]. En el estado del arte existe una amplia variedad de algoritmos propuestos para realizar tareas de detección y seguimiento de líneas de carril, así como de corrección de posición y dirección, por medio de diversos tipos de controles.

En [17], los autores presentan un método de procesamiento de imágenes, basado en el mapeo de perspectiva inversa y técnicas de contornos activos, permitiendo así el reconocimiento de líneas de carril. Sin embargo, debido a escenarios de malas condiciones de luz, reportaron algunos puntos falsos positivos. Por otro lado, los autores en [9], proponen un algoritmo de detección de líneas de carril utilizando técnicas de visión artificial como Mapeo de Perspectiva Inversa, estadísticas de histograma, filtrado de áreas blancas y ventanas deslizantes, en el artículo en cuestión no son reportados problemas relacionados con escenarios de malas condiciones lumínicas.

Los autores en [18], proponen un criterio de conducción confortable utilizando aceleraciones y desaceleraciones de vehículos de transporte público autónomos para el mejoramiento de la experiencia de los pasajeros, para ello, hacen uso de un controlador proporcional derivativo, el cual fue verificado en función de una prueba software-in-the-loop (SIL) en tiempo real. Reportan que dicha implementación resulta en un rendimiento relativamente mejor y permite una experiencia más cómoda, comparada con otros métodos utilizados.

En México, se tiene la competencia denominada AutoModelCar, ésta misma es realizada por el Torneo Mexicano de Robótica, con la finalidad de dar un seguimiento al proyecto de dualidad internacional Alemania México denominado “Visión de Movilidad Urbana”, promovido por el Dr. Raúl Rojas con la finalidad de promover la investigación de la autonomía en el sector automotriz.

En el presente artículo, se da a conocer la propuesta de un método para la detección y seguimiento de líneas de carril, para efectos de una conducción autónoma en vehículos a escala de competencia. Dicho método consiste en un enfoque híbrido entre la implementación de técnicas de procesamiento de imágenes, tales como filtrado y detección de bordes; para después, realizar una corrección de dirección, mediante la utilización de un control proporcional derivativo. En el documento en cuestión se presentan los materiales, de los cuales se compone el coche a escala; se da a conocer la metodología implementada para realizar una detección de carril mediante técnicas de visión computacional y la aplicación de un control PD. Además, se muestran los resultados obtenidos en la experimentación y se concluye con un análisis de dichos resultados y los trabajos a futuro.

## 2 Materiales

El vehículo autónomo usado en el presente trabajo corresponde a los coches autónomos a escala de la serie AutoNOMOS, donado por la Universidad Libre de Berlín con el proyecto “Visiones de movilidad urbana” liderado por el Dr. Raul Rojas. El coche AutoNOMOS está equipados con los sensores necesarios para poder crear heurísticas de conducción autónoma. El vehículo a escala 1:10 tiene las medidas de 40 cm de largo y 20 de ancho, cuenta con una batería Li-Po de 14.8 V de 4 celdas, a bordo, cuenta con una computadora de espacio reducido Odroid XU4 con un sistema operativo Ubuntu 16.04 y la distribución ROS Indigo instalada. Por la parte de sensores, porta una cámara Intel Realsense SR300, un

Rplidar A2, un acelerómetro y giroscopio MPU6050 controlado ArduinoNANO. En la Figura 1, se muestra el vehículo autónomo a escala, además, son destacados sus componentes principales.

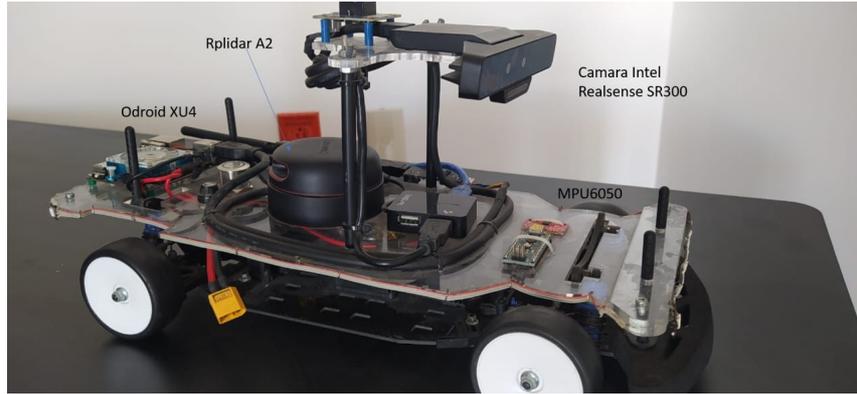


Fig. 1. Vehículo a escala AutoNOMOS.

### 3 Metodología.

#### 3.1 Corrección Gamma.

El algoritmo de corrección gamma, es una transformación no lineal entre los valores de entrada y los valores de salida mapeados, por tanto, es utilizada para la saturación de brillo causada por reflejos en la pista debido a escenarios de malas condiciones de luz, mejorando así la imagen considerablemente, mediante reducción de ruido y resaltando mayormente las líneas de los carriles. Eso viene dado por expresión matemática [1]:

$$O = I^{1/G} \quad (1)$$

Donde "I" es la entrada de píxeles y "G" es el valor Gamma que puede cambiar constantemente. La "O" representa la salida de la matriz en el rango de [0-255].

#### 3.2 Detección de Bordos.

La detección de bordes consiste en la combinación de la primera derivada horizontal ( $G_x$ ) y la primera derivada vertical ( $G_y$ ), de esto, se vuelve posible la obtención correspondiente a el gradiente y la dirección del píxel. La dirección del degradado, cuenta con la propiedad de perpendicularidad a los bordes representados por cuatro ángulos, correspondientes a las direcciones vertical, horizontal y dos diagonales [2].

$$\text{Gradien}(G)t = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (2)$$

$$Angle = Tan^{-1} \left( \frac{G_y}{G_x} \right) \quad (3)$$

Es necesario utilizar umbrales para el gradiente de borde, pues, como se menciona con anterioridad, la imagen es distribuida en un rango de 0 a 255. Los umbrales son denominados valor máximo y valor mínimo, mientras que, cualquier valor dentro de dicho rango, se le denominará “borde clasificado”.

### 3.3 Transformada Hough.

Este algoritmo tiene la funcionalidad principal correspondiente a la detección de figuras en una imagen que se pueden expresar como líneas, circunferencias o elipses. Para representar las posibles líneas en una imagen, la ecuación de la línea se implementa en coordenadas polares. Siendo entonces:

$$\rho = x \cos \theta + y \sin \theta \quad (4)$$

Obteniendo el rango natural de:

$$\theta \in [0, 2\pi] \quad (5)$$

Los puntos (x, y) se transforman en el llamado espacio de Hough para el conjunto de líneas y dos dimensiones, donde se observa la intersección de los puntos que corresponden a una línea en la imagen.

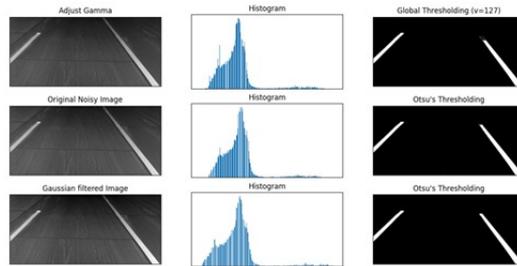
Al obtener las líneas, es necesario llevar a cabo un procedimiento de eliminación de aquellas líneas que no brindan información, como son las horizontales, siendo entonces que se ignoren, para de esta forma, tener un resaltado en las líneas verticales, ya que, el grosor de la marca del carril marca dos líneas las cuales están ponderadas para mostrar solo una línea central. obteniendo así dos líneas que marcan el carril [3].

### 3.4 Control Proporcional Derivativo

El sistema del control PD se opone a la desviación de entrada con una respuesta proporcional a la rapidez con la que ocurre. Donde  $y(t)$  es la salida diferencial,  $e(t)$  es el error, representado por la diferencia entre la medida, y finalmente,  $T_d$  es el tiempo diferencial, el cual se utiliza para dar mayor o menor tiempo a la acción derivada. La salida del bloque de control corresponde a la siguiente ecuación:

$$y(t) = K_p \cdot T_d \cdot \frac{de(t)}{dt} + K_p \cdot e(t) \quad (6)$$

Donde la señal de error se basará en la mitad del carril teniendo en cuenta la parte delantera del vehículo y analizando el recorrido de las líneas del carril.



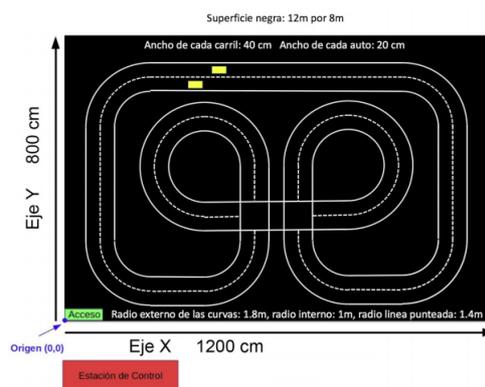
**Fig. 2.** Comparativa de algoritmos para detección de carril.

## 4 Resultados

Para la detección y el seguimiento de carril, fue necesario la implementación de las metodologías antes dichas obtenidas por las pruebas para determinar el procesamiento más óptimo, para de esta forma, después implementarlo.

En la Figura 2, se observa la imagen de entrada que recibe el vehículo a escala previamente invertida y de donde se aplican 3 tipos de algoritmos ajuste gamma, otsu's y un filtro Gaussiano con otsu's, donde el que mas resultados dio a la hora de la detección de líneas con un cambio constante de iluminación, fue el ajuste gamma seguido de el Otsu's.

Las pruebas fueron realizadas en un tramo de pista, el cual contenía rectas y curvas, con medidas específicas para, de esta forma, presentar un mayor parecido a la pista original dada por la Federación Mexicana de Robótica (véase Figura 3). Además, es necesario destacar que, la pista utilizada fue diseñada para contar con variantes de entorno, contemplando la iluminación y/o reflejos en la pista.



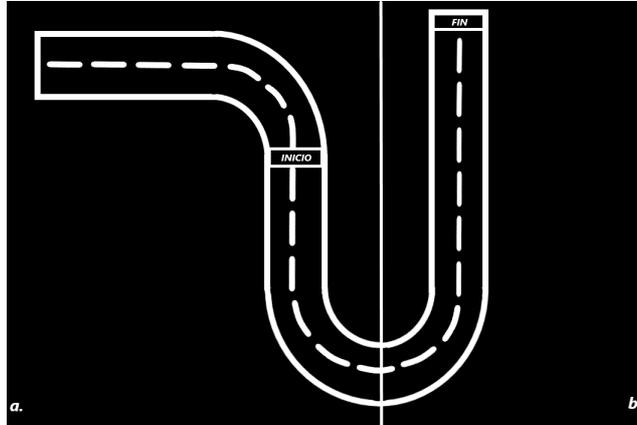
**Fig. 3.** Especificaciones de pista dados por la Federación Mexicana de Robótica.

Para llevar a cabo la validación del algoritmo propuesto, fueron realizadas un total de 3 etapas, cada una de ellas con 5 pruebas, las etapas fueron dadas por las velocidad probadas, siendo estas una etapa con un 30% de su velocidad máxima, otra con un 40%, y finalmente la etapa con velocidad del 50% de la velocidad máxima; es necesario destacar que se optó por usar dichas velocidades para tener un mayor detalle en las métricas resultantes. Una de las métricas obtenidas corresponden a el tiempo total transcurrido en el que fue completado el recorrido autónomo en el segmento de la pista, con una distancia total de 10.8 metros. Otra métrica corresponde a los errores, en donde, se considera error cuando algún neumático del vehículo autónomo en cuestión, sale del carril por hasta un segundo.

**Tabla 1.** Tiempos de transcurso de recorrido

Velocidad (%)	Tiempo (s)	Errores
30	17.49	0
30	20.65	0
30	19.07	0
30	19.45	0
30	19.06	0
40	15.86	0
40	16.4	1
40	15	0
40	15.48	0
40	15.49	0
50	13.9	0
50	13	0
50	12.95	0
50	12.95	0
50	13.22	0

En la tabla 1 se muestran las métricas obtenidas, correspondientes a los tiempos adquiridos en la prueba de velocidad donde se probó la viabilidad del algoritmo a la hora de competencia, resaltando en los cambios de iluminación que podría tener la pista. Con dichas métricas es posible demostrar que el algoritmo implementado presenta una gran viabilidad, pues solamente fue un error el obtenido, el cual, es necesario destacar, que el coche corrigió dicho error con una respuesta menor a un segundo. En la figura 4 se muestra un modelo digital de la pista de pruebas utilizada, donde la parte “a” corresponde a la zona con iluminación ideal y la parte “b” con ambientes de iluminación escasa, ello pensado para observar más a fondo los efectos de ambientes con estas características en trabajos a futuro.



**Fig. 4.** Pista de experimentación.

## 5 Conclusión

Se ha presentado un método eficaz para el seguimiento de carril, siendo esta la primer etapa para llegar a un sistema completamente autónomo capaz de realizar detección de carril. Siendo la base para futuras implementaciones como lo son la detección de obstáculos en el carril, e inclusive, el estacionamiento autónomo, el cual ya esta presente en la competencia organizada por la Federación Mexicana de Robótica.

Se ha demostrado la eficiencia del algoritmo en distintas velocidades en un tramo de pista con las especificaciones de la pista proporcionada por el Federación Mexicana de Robótica(FMR) dando buenos resultados al cambio de inecuación que es un problema constante en este tipo de torneos debido a que no siempre se tiene una iluminación o una pista ideal que no refleje la luz.

## References

1. Ballard, D. and Brown, C., 1982. Computer Vision. Englewood Cliffs: Prentice-Hall.
2. Li, Q., Wang, B., Fan, S. (2009). Browse Conference Publications Computer Science and Engineer.
3. D.H. Ballard, "Generalizing the Hough Transform to Detect Arbitrary Shapes", Pattern Recognition, Vol.13, No.2, p.111-122, 1981.
4. Brechtel, S., Gindele, T. and Dillmann, R., 2014. Probabilistic decision-making under uncertainty for autonomous driving using continuous POMDPs. 17th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC),.
5. Correa, A., Boquet, G., Morell, A. and Lopez Vicario, J., 2017. Autonomous Car Parking System through a Cooperative Vehicular Positioning Network. Sensors, 17(4), p.848.

6. Ortiz-Esquivel, A., Diaz-Hernandez, R. and Altamirano-Robles, L., 2018. A method for lane recognition using active contours model in vehicular roads. 2018 International Conference on Electronics, Communications and Computers (CONIELECOMP),.
7. Palma, J., Bonilla, M. and Grande, R., 2020. Lane Line Detection Computer Vision System Applied to a Scale Autonomos Car: AutoModelCar. 2020 17th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control (CCE),.
8. Reuschenbach, A., Wang, M., Ganjineh, T. and Gohring, D., 2011. iDriver - Human Machine Interface for Autonomous Cars. 2011 Eighth International Conference on Information Technology: New Generations,.
9. Sanchez-Buelna, J., Acosta-Lua, C., Sanchez-Morales, M., Navarrete-Guzman, A. and Di-Gennaro, S., 2019. Nonlinear control with experimental identification applied to an scale electric vehicle. 2019 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC),.
10. Cuebong, W., Erfu, Y., Xiu-Tian, Y. Dongbing. G., (2018) Autonomous robots for harsh environments: a holistic overview of current solutions and ongoing challenges. *Systems Science Control Engineering*, 6:1, 213-219,.
11. Harel, D., Marron, A., Sifakis, J., (2020) Autonomics: In search of a foundation for next-generation autonomous systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117 (30) 17491-17498,.
12. Zhang, T., Li, Q., Zhang, Cs. et al. Current trends in the development of intelligent unmanned autonomous systems. *Frontiers Inf Technol Electronic Eng* 18, 68–85 (2017).
13. Shahrdar, S., Menezes, L., Nojournian, M. (2019) A Survey on Trust in Autonomous Systems. In: Arai K., Kapoor S., Bhatia R. (eds) *Intelligent Computing*. SAI 2018. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol 857. Springer, Cham.
14. Manfreda, A., Ljubi, K., Groznik, A., (2021) Autonomous vehicles in the smart city era: An empirical study of adoption factors important for millennials, *International Journal of Information Management*, Volume 58.
15. Gogoll, J., Müller, J.F. (2017) Autonomous Cars: In Favor of a Mandatory Ethics Setting. *Sci Eng Ethics* 23, 681–700.
16. Im, G., Kim, M., Park, J. (2019) Parking Line Based SLAM Approach Using AVM/LiDAR Sensor Fusion for Rapid and Accurate Loop Closing and Parking Space Detection. *Sensors* 2019, 19, 4811.
17. Ortiz-Esquivel, A., Díaz-Hernández, R., Altamirano-Robles, L., (2018) A method for lane recognition using active contours model in vehicular roads. *International Conference on Electronics, Communications and Computers (CONIELECOMP)*, pp. 37-43,
18. Bae, I., Moon, J., Seo, J. (2019) Toward a Comfortable Driving Experience for a Self-Driving Shuttle Bus. *Electronics* 2019, 8, 943.
19. Farag, W. (2020) Complex Trajectory Tracking Using PID Control for Autonomous Driving. *Int. J. ITS Res.* 18, 356–366.
20. Mora, L., Wu, X., Panori, A., (2020) Mind the gap: Developments in autonomous driving research and the sustainability challenge, *Journal of Cleaner Production*, Volume 275.