

Evaluación del desempeño de sensores infrarrojo, ultrasónico y visión para el conteo de vehículos

Juan José Lozano Barrón, Osslán Osiris Vergara Villegas,
Salvador Noriega Morales, Vianey Guadalupe Cruz Sánchez

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez,
Instituto de Ingeniería y Tecnología,
México

al194485@alumnos.uacj.mx,
{overgara, snoriega, vianey.cruz}@uacj.mx

Resumen. El tráfico vehicular es un problema social típico de las grandes urbes y su solución no es fácil, aunque si es necesaria. Una forma de comenzar a plantear soluciones consiste en realizar un análisis de tráfico en las zonas donde se presentan las congestiones. Una tarea importante de dicho análisis consiste en el conteo de los vehículos que circulan en determinados horarios. En el presente artículo se aborda una propuesta para desarrollar un prototipo para simular diferentes condiciones de tráfico vehicular en una avenida con tres carriles. Primero, se explica la conceptualización del prototipo y se ofrecen detalles sobre su construcción. Después, se presentan los algoritmos para el conteo de vehículos por medio de un sensor infrarrojo, un ultrasónico, visión y sus combinaciones. Posteriormente, se ofrecen explicaciones de las tres pruebas realizadas para evaluar el desempeño de cada uno de los sensores en la tarea de conteo de tres, cinco y nueve vehículos, para finalmente realizar una recomendación de uso. Después de las pruebas con tres y cinco vehículos el mejor desempeño se obtuvo con visión con una precisión de 100% y 96.66%, respectivamente. Para la prueba con nueve vehículos la mejor precisión de 80% se obtuvo con la combinación de sensores infrarrojo y visión.

Palabras clave: Conteo de Vehículos, Sensor Infrarrojo, Sensor Ultrasónico, Sensor de Visión, Simulación de Tráfico.

Performance Evaluation of Infrared, Ultrasonic, and Vision Sensors for Vehicle Counting

Abstract. Vehicle traffic is a typical social problem in large cities, and its solution is not easy, although it is necessary. One way to start proposing solutions is to carry out a traffic analysis in the areas where congestions occur. An essential task of this analysis consists of counting the vehicles that circulate at certain times. In this paper, we present a proposal to develop a prototype to simulate different vehicular traffic conditions on a three-lane avenue. First, we offer the conceptualization of the prototype and the details on its construction. Next, we present the algorithms for vehicle counting using sensors such as

infrared, ultrasonic, vision, and their combinations. Then, explanations of the three tests conducted to evaluate the performance of each sensor in the task of counting three, five, and nine vehicles are offered, to make finally a recommendation for use. After testing with three and five vehicles, the best performance was obtained with a vision sensor with an accuracy of 100% and 96.66%, respectively. For the test with nine vehicles, the accuracy of 80% was obtained with the combination of infrared and vision.

Keywords: Vehicle Counting, Infrared Sensor, Ultrasonic Sensor, Vision Sensor, Traffic Simulation.

1. Introducción

Debido a la reducción de precios y a la alta demanda, la industria de producción automotriz proyecta que la congestión vehicular aumentará año con año, lo que constituye un peligro para la calidad de vida urbana [1]. Efectivamente, en casi todo el mundo la congestión vehicular ha ido en aumento debido al crecimiento de la población y su necesidad de desplazarse a diferentes lugares. Debido al tráfico, a una persona puede tomarle un tiempo considerable el trasladarse con su vehículo de un punto a otro, aun cuando la distancia sea relativamente corta [2].

El tráfico vehicular conlleva a diversas implicaciones físicas y sociales, por ejemplo, aumenta la probabilidad de accidentes, genera problemas económicos, de contaminación, de salud, entre otros, por lo que vale la pena realizar esfuerzos para reducirlo [3]. La construcción de caminos y autopistas de alta capacidad puede ser una solución para la reducción de tráfico, sin embargo, es muy costosa y no es viable en ciudades que cuentan con poco espacio [4]. Otra alternativa consiste en utilizar tecnologías como satélites, cámaras, y redes de sensores, para obtener datos y analizarlos con el objetivo de informar a los conductores sobre las condiciones de un camino y desviarlos o redirigirlos en tiempo real hacia vías menos congestionadas [5].

Una de las tareas esenciales para proponer estrategias de reducción de tráfico consiste en la vigilancia y análisis de la cantidad de vehículos que circulan por un camino en un horario en particular [6]. Para realizar la vigilancia se deben detectar los vehículos y además contarlos para posteriormente analizar los datos obtenidos y proponer estrategias de mitigación [7].

El conteo de vehículos se puede realizar de manera manual o automática. El conteo manual es realizado de forma visual por una o varias personas especializadas. Desafortunadamente, suele ser costoso e impreciso debido a condiciones como el cansancio, distracciones y errores en la captura de información. Por otro lado, el conteo automático consiste en recopilar la información durante largas jornadas por medio de un equipo especializado. Los sensores son los equipos que se utilizan para los conteos, y la información adquirida es transferida a un sistema para su almacenamiento y procesamiento [8]. Los sensores que frecuentemente se utilizan para resolver la tarea de conteo de vehículos son: lazo inductivo, flujo magnético, radar de microondas, ultrasónico, radar láser, lidar, infrarrojo, mangueras neumáticas, cámaras digitales, y combinaciones de diferentes tecnologías [9]. De acuerdo con la literatura, los sensores magnéticos, ultrasónicos, infrarrojos y de microondas son los más utilizados para el conteo de vehículos, sin embargo, tienen limitaciones cuando

se quiere obtener información detallada [10]. En los últimos años, las cámaras digitales se han utilizado para la detección y conteo de vehículos, sin embargo, presentan la desventaja de necesitar un gran poder de cómputo para extraer la información necesaria [11].

El procedimiento general que se sigue para el conteo es el de instalar los instrumentos de captura en un lugar en particular y comenzar la adquisición de los datos. Sin embargo, se deben realizar varias pruebas antes de definir el lugar correcto para colocar los sensores, por lo que se puede recurrir a simulaciones para comenzar a detectar cómo sobrellevar las condiciones del entorno [12].

En el presente artículo se describen los detalles para la construcción de una plataforma para simular las condiciones de tráfico vehicular en una avenida con tres carriles. Posteriormente, se plantea un algoritmo para el conteo de vehículos por medio de tres sensores: visión, ultrasónico e infrarrojo y sus respectivas fusiones.

La gran ventaja de contar con un prototipo, a diferencia de lo que sucede con las pruebas en un ambiente real, es que se reduce la incertidumbre sobre la implementación de software, se obtiene un mayor conocimiento del sistema con una curva de aprendizaje menor, y se puede entender mejor el problema antes de implementarlo a la realidad. En la plataforma propuesta se pueden controlar la ubicación y el número de vehículos para observar cuál sensor tiene el mejor desempeño en la tarea de conteo. Además, se puede controlar la iluminación, se pueden agregar otros sensores y probar otros algoritmos de conteo. Las principales contribuciones del presente artículo son:

1. Se describen los detalles para la construcción de un prototipo para simular las condiciones de un camino.
2. Se desarrolla un algoritmo para el conteo de vehículos con tres tipos de sensores y sus respectivas combinaciones.
3. Se presenta una evaluación del desempeño de tres tipos de sensores para el conteo de vehículos.
4. Se ofrece una recomendación del tipo de sensor a utilizar correspondiente al tamaño del flujo vehicular.

El resto del artículo se encuentra organizado de la siguiente manera. En la sección 2 se presenta la explicación de los materiales utilizados para la construcción del prototipo y las estrategias para el conteo de vehículos. Los experimentos realizados y los resultados obtenidos se muestran en la sección 3. Finalmente, en la sección 4 se muestran las conclusiones obtenidas del proceso de investigación.

2. Materiales y métodos

La metodología del presente artículo se compone principalmente de dos etapas, en la primera, se explican los detalles para la construcción del prototipo y en la segunda se implementan los algoritmos para el conteo de vehículos.

2.1. Desarrollo del prototipo

Para diseñar la arquitectura del prototipo se utilizó el software SolidWorks y la base de su funcionamiento es el de una banda transportadora. El objetivo es, que los autos se puedan colocar en tres diferentes carriles con diferentes configuraciones. Después, se definieron los componentes para la construcción, divididos en la parte mecánica y la parte electrónica.

Para construir la parte mecánica se utilizó aluminio extruido de 40mm x 40mm. Para la fabricación de la base del motor que moverá las bandas y el semáforo se empleó delrin color negro. Además, se utilizó una placa de ABS negro, seis baleros y tres bandas para simular los carriles, mientras que, para los ejes del mecanismo se utilizó acero A2. Las dimensiones del prototipo son 35.56 cm de largo, 11.05 cm de ancho y 11.05cm de alto sin tomar en cuenta el semáforo y soporte de los sensores. El semáforo tiene una altura de 10.79 cm con respecto a la base del prototipo. En la Fig. 1a, se muestra la versión final del prototipo en 3D.

Para la colocación de los autos se utilizaron nueve imanes de neodimio de 8mm x 8mm x 12mm, que se pueden colocar en diferentes posiciones. También, se colocó una estructura de aluminio tipo soporte universal para posicionar la cámara, que consta de dos varillas de aluminio, una de 1.27 cm de diámetro y 26 cm de largo, la segunda tiene el mismo diámetro y su longitud es de 20 cm, y dos adaptadores para el ajuste de la posición y ángulo de la cámara. La cámara utilizada es una logitech c270.

El control electrónico del mecanismo se realizó con un microcontrolador Arduino uno, junto con un relevador para activar/desactivar la banda transportadora. Además, se utilizó un motor tipo “D” que trabaja a 12 VCD dando 62 RPM, con un torque de 4.9 kgf/cm y un regulador de velocidad. En el semáforo se colocó un sensor ultrasónico HC-SR04, y tres sensores infrarrojos E18-D80NK. En la Fig. 1b, se muestra una imagen real del prototipo final.

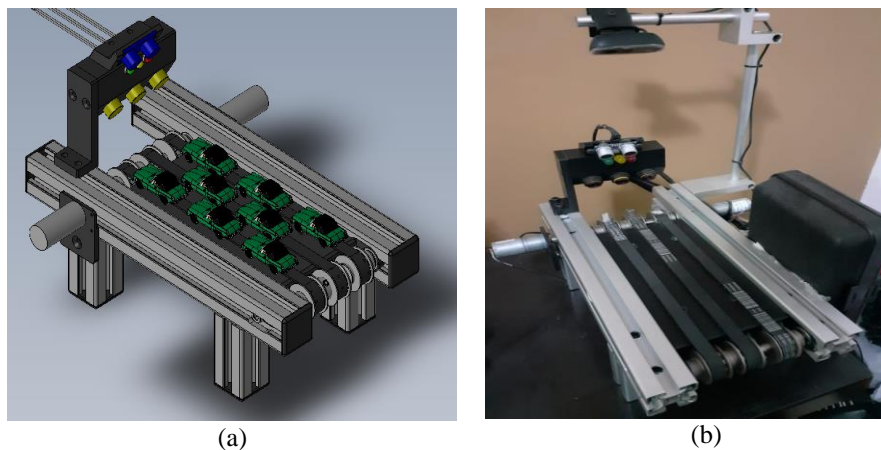


Fig. 1. Prototipo para simulación de tráfico. (a) 3D, y (b) real.

2.2. Algoritmos para el conteo de vehículos

Después de la construcción del prototipo se realizó la implementación de los algoritmos de conteo con los diferentes sensores mencionados en la subsección 2.1. Además, se desarrolló una interfaz gráfica de usuario (GUI, por sus siglas en inglés) para seleccionar los algoritmos que el usuario quiera probar como se muestra en la Fig. 2. Las combinaciones que se pueden seleccionar son: sensor ultrasónico, sensor infrarrojo, visión, infrarrojo + visión, ultrasónico + visión e infrarrojo + ultrasónico visión.

Los sensores infrarrojos se colocaron a una distancia de 6.7 cm a un ángulo de 60° con respecto a la base del prototipo. Los sensores infrarrojos son dispositivos electrónicos que miden y detectan la radiación de los objetos dentro de su campo de visión, por lo que al momento en que se interrumpe dicha radiación se logra la detección del objeto, en este caso un vehículo [13]. Para la implementación, se agregó en el algoritmo una secuencia para contar una sola vez cuando se detecta el objeto, ya que si no se podría estar contando en repetidas ocasiones el mismo objeto.

Un sensor ultrasónico es una tecnología relativamente barata que se utiliza para medir la distancia hacia un objeto mediante el uso de ondas [14]. Los sensores ultrasónicos transmiten ondas de energía en una frecuencia entre 25 y 50 Khz. Para su funcionamiento el cabezal del sensor emite una onda ultrasónica y recibe la onda reflejada por el objeto. La distancia se calcula al medir el tiempo que pasa entre la emisión y la recepción de la onda ultrasónica. El sensor fue instalado a 11.04 cm con respecto a la base del prototipo y con un ángulo de 30°. Para realizar el conteo en tiempo real se obtiene un valor análogo del sensor y se realiza su respectiva interpretación. Además, se estableció una condición para discernir cuando se sensa un objeto de cuando se sensa el carril.

Por otra parte, los sensores de visión capturan imágenes para analizarlas mediante un software. Para detectar un vehículo dentro de una escena primero se debe segmentar, es decir, saber dónde está localizado y el área que ocupa, y posteriormente se puede realizar el conteo [15]. El sensor de visión se colocó a 27 cm de distancia con respecto a la base del prototipo. Debido a que el sensor de visión se encuentra colocado en una posición fija conocida, y dado que las condiciones de iluminación no fueron controladas, el algoritmo de conteo representó un reto significativo.

Primero, se toma una fotografía de la escena que contiene los vehículos. Después la imagen obtenida en RGB (Red, Green, Blue por sus siglas en inglés) es transformada a su representación en escala de gris. La conversión es realizada debido a que el color de un vehículo no fue tomado en cuenta para el conteo. Para realizar la conversión se separó cada uno de los planos, por lo que se obtienen tres imágenes en escala de gris.

Luego se procede a calcular el valor del umbral global por medio del método de Otsu. El algoritmo de Otsu permite obtener de manera automática un umbral que produzca la mejor separación entre clases mediante la maximización de la varianza. El umbral óptimo k^* que maximiza la varianza entre clases σ_B^2 se calcula mediante la ecuación 1:

$$\sigma_B^2(k^*) = \max_{1 \leq k \leq L} \frac{[\mu_T \omega(k) - \mu(k)]^2}{\omega(k)[1 - \omega(k)]}, \quad (1)$$

donde μ_T es la media total de la imagen original, $\omega(k)$ es la probabilidad de ocurrencia de una clase, y $\mu(k)$ es la media de la clase. Los resultados obtenidos fueron 0.1247 para la matriz roja, 0.0706 para la matriz verde y 0.0353 para la matriz azul. Después, cada imagen es binarizada con respecto al umbral calculado, y finalmente las tres imágenes resultantes son sumadas para obtener la imagen binarizada total.

Como resultado de la binarización se logra desaparecer el fondo de las imágenes. Posteriormente, se realiza un proceso de definición de regiones de interés (ROI). La ROI es definida de manera automática, debido a que se conoce dónde se encuentra colocado el sensor de visión, por lo que el recorte de la imagen que define la ROI, y que siempre permite conservar la zona donde los vehículos están colocados, se realiza siempre en el mismo lugar. Posteriormente, se ensacharon las líneas en la imagen para poder tener una mejor visualización de los vehículos. Lo anterior, se realizó por medio de una operación de dilatación, que empleó una línea vertical como elemento estructural, como se muestra en la ecuación 2:

$$A \oplus B = \left[(\hat{B})_z \cap A \right] \subseteq A, \quad (2)$$

donde A y B son conjuntos en Z^2 . Se comienza con la reflexión de B desde su origen desplazado por z , entonces, la dilatación se obtiene del conjunto de todos los desplazamientos z tal que \hat{B} y A se superponen en al menos un elemento.

Después, se utilizó un algoritmo de etiquetado que utiliza las componentes conectadas de un objeto (8 vecino). Se comienza con la definición de un píxel de inicio y se establece la primera etiqueta en 1. Si el píxel es parte del objeto y no ha sido etiquetado, entonces se le asigna la etiqueta actual y se agrega como primer elemento de la cola. Si el píxel es parte del fondo o ya fue etiquetado se revisa el siguiente píxel. Se revisa el píxel de la cola y se revisan sus vecinos, si el vecino no es parte del fondo, y no se ha etiquetado, se le asigna la etiqueta actual y se añade a la cola. El proceso se repite hasta que no hay elementos en la cola. Finalmente, se revisa el siguiente píxel y se incrementa la etiqueta en 1. Como resultado se pudo determinar si un píxel pertenece al mismo objeto o no, y así poder discernir entre el espacio ocupado por un vehículo y por otro, con lo que concluye la etapa de localización del vehículo. Después, se calculan los centroides de cada objeto detectado y a partir de allí se dibuja una caja (bounding box) para encerrar el objeto. Finalmente, se calcula el área ocupada por el objeto dentro de la caja para determinar si es un vehículo, y a partir de esa región se realiza el conteo final.

3. Experimentación y resultados

Para comenzar la experimentación, se realizaron pruebas preliminares con uno y dos vehículos, para observar si efectivamente se realizaba el conteo. Para el caso del sensor de visión, se introdujeron objetos más pequeños y más grandes que los vehículos para asegurar que no eran contados. Posteriormente, se realizaron las pruebas finales.

En total se realizaron tres pruebas diferentes para observar la robustez de los algoritmos implementados.

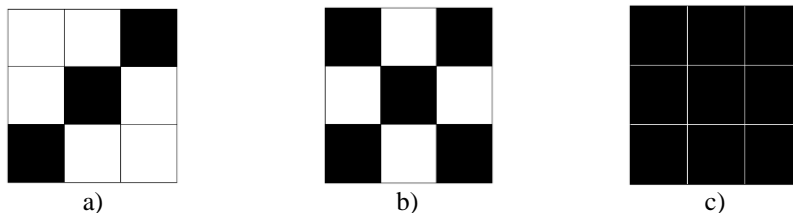


Fig. 3. Configuración de vehículos para las pruebas. (a) tres vehículos, (b) cinco vehículos y (c) nueve vehículos.

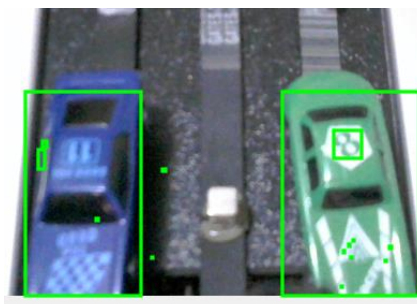


Fig. 4. Ejemplo del conteo de vehículos con el sensor de visión.

Tabla 1. Resultados obtenidos para las pruebas de conteo de vehículos.

No. de vehículos	IR	US	VIS	IR+VIS	US+VIS	IR+US+VIS
3	93.33%	0%	100%	93.3%	13.33%	20%
5	90%	10%	96.66%	93.33	3.33%	6.66%
9	0%	0%	60%	80%	23.3%	66.6%

Para la experimentación se definió una velocidad constante del mecanismo de 0.234 km/h. Además, para cada prueba se utilizaron tres (uno por carril), cinco (dos en los laterales y uno al centro), y nueve (tres en cada carril) autos con diferentes configuraciones como se puede observar en la Fig. 3.

Cada una de las pruebas consiste en tres vueltas de los vehículos pasando por enfrente de los sensores, además, cada prueba se realizó 30 veces y cada vez se contabilizaron los aciertos y errores. Debido a motivos de espacio, en el presente artículo no se muestran todos los datos obtenidos, sin embargo, se encuentran disponibles si se solicitan a los autores. En la Fig. 4 se muestra un ejemplo del conteo de vehículos con visión. Se debe observar que, aunque se detectan diferentes objetos, solamente se cuentan los que corresponden al área de un vehículo.

Como se puede observar en la figura 4 se detectan algunas pequeñas áreas que deben ser consideradas como errores debido a que no representan un vehículo. Dichas áreas son detectadas como parte de la región de interés en la búsqueda de píxeles contiguos en la vecindad 8. Sin embargo, fueron descartadas debido a sus tamaños ya que en el algoritmo cualquier área que es igual a uno es descartada y solamente se conservan las áreas correspondientes a los vehículos.

En la Tabla 1 se muestra un resumen de los resultados obtenidos. Es importante mencionar que se utilizaron las abreviaciones IR para infrarrojo, US para ultrasónico y VIS para visión. Los resultados de la Tabla 1 fueron obtenidos después de varias pruebas exhaustivas, aunque por motivos de espacio no se muestran los datos completos (resultados de cada corrida), los presentados explican el comportamiento del sistema ante situaciones particulares. Como se puede observar, para el caso con tres vehículos, cuando interviene el sensor US los resultados no son favorables, debido a que no se logró contar ningún vehículo. Sin embargo, se puede observar que usando sólo visión se obtiene el mejor conteo, seguido por el sensor IR y la integración IR+VIS para los cuales sólo se produjeron dos fallas. Vale la pena destacar que como resultado del conteo se pueden obtener tres opciones, una que se cuenten todos los vehículos, otras en el que se cuenten más, y otra en la que se cuenten menos.

Para el caso del conteo de cinco vehículos se puede observar que nuevamente es con el sensor US con el que se obtienen los resultados más desfavorables. Además, con el sensor de visión se obtienen los mejores resultados, solamente se comete una falla, seguido por el sensor IR.

La prueba de conteo con nueve vehículos es la más difícil de las tres debido a que los vehículos están muy juntos. Se debe tomar en cuenta que el algoritmo debe realizar la localización y determinar correctamente la separación de los vehículos, de lo contrario se podría confundir y determinar que solamente hay un objeto. En la Tabla 1, se puede observar que los sensores IR y US no pudieron contar ningún vehículo. Mientras que, el mejor resultado se obtiene con la combinación de IR + VIS seguido de IR + US + VIS.

3.1. Discusión

Con las pruebas presentadas se determinó que el prototipo puede ser utilizado efectivamente para simular tráfico en un ambiente controlado. Gracias al uso del *Arduino uno*, es posible agregar más sensores a la plataforma. Otra de las ventajas es que la plataforma se puede programar en distintos lenguajes o intérpretes de código, con lo cual se vuelve un prototipo flexible en cuestiones de programación.

En lo que se refiere a la tarea de conteo de vehículos se observó que diversos factores pueden afectarlo o beneficiarlo. En general, el sensor de visión es el que ofrece mejores resultados para la prueba de conteo con tres y cinco vehículos. Debe destacarse, que el sensor ultrasónico es el que presenta el peor desempeño para las tres pruebas. Además, se observa que el uso del sensor infrarrojo combinado con el sensor de visión ofrece el mejor resultado en la prueba con nueve vehículos, en donde se observó que el resto de los métodos no fueron tan efectivos.

La prueba con nueve vehículos es importante porque permite simular un escenario con congestión vehicular en la que, por la cercanía, incluso, se podría tener una situación de oclusión de algunos de los vehículos.

Una de las ventajas de crear un prototipo además de la simulación es la versatilidad que ofrece para poder agregar sensores y para futuros trabajos y pruebas se sugiere agregar sensores como lidar, radares y tal vez neumáticos.

El prototipo se puede utilizar para realizar el conteo de vehículos en un entorno controlado, además, se puede explotar de manera didáctica para que los estudiantes

puedan experimentar con más sensores o métodos de procesamiento digital de imágenes. El prototipo es funcional y gracias a la plataforma usada para el microcontrolador se puede programar en distintas interfaces de desarrollo.

Como resultado de las pruebas se recomienda que para un conteo de tráfico en un escenario real se utilice una combinación de un sensor infrarrojo y un sensor de visión. La fusión de la información de los dos sensores permite compensar los errores cometidos y generar un conteo robusto.

Es importante resaltar que, los resultados son específicos para cada sensor con el fin de aumentar las probabilidades de que las pruebas en campo den mejores resultados y no tener que realizar todas las pruebas directamente en un ambiente real de tráfico vehicular.

4. Conclusiones

En el presente artículo se mostraron los detalles para construir un prototipo para simular diferentes condiciones de tráfico vehicular en una avenida con tres carriles. El prototipo fue utilizado para observar y comparar el desempeño de los sensores infrarrojo, ultrasónico y visión en la tarea de conteo de vehículos.

Una de las grandes ventajas del prototipo es que se tiene la capacidad de correr pruebas en cualquier momento, y de simular distintos escenarios de congestión vehicular. Como resultado del experimento, se observó que en la prueba con nueve vehículos que simula congestión vehicular, lo mejor es utilizar una fusión de los sensores infrarrojo y visión.

Para trabajos futuros se recomienda evaluar el prototipo a diferentes velocidades y además trabajar con visión nocturna, ya que el prototipo fue evaluado siempre con luz natural. Además, se realizarán pruebas de los algoritmos propuestos en escenarios de tráfico reales. Finalmente, sería recomendable adaptar la plataforma para incluir más sensores como los lidar y radar, y después desarrollar sus respectivos algoritmos para conteo.

Referencias

1. Zheng, H., Chang, W., Wu, J.: Traffic flow monitoring systems in smart cities: Coverage and distinguishability among vehicles. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 127, pp. 224–237 (2019)
2. Li, Z., Huang, J.: How to mitigate traffic congestion based on improved ant colony algorithm: A case study of a congested old area of a metropolis. *Sustainability*, 11(1140), pp. 1–15 (2019)
3. Wen, L., Kenworthy, J., Guo, X., Marinova, D.: Solving traffic congestion through street renaissance: A perspective from dense asian cities. *Urban Science*, 3(18), pp. 1–21 (2019)
4. Reza, M., Zarrabi, H., Hafeez, R., Shamshirband, S., Raymond, K.: Applications of computational intelligence in vehicle traffic congestion problem: A Survey *Soft Computing*, 22, pp. 2299–2320 (2018)
5. Meneguette, R., Filho, G., Guidoni, D., Pessin, G., Villas, L., Ueyama, J.: Increasing intelligence in inter-vehicle communications to reduce traffic congestions: Experiments in urban and highway environments, *Plos One*, 11(8), pp. 1–25 (2016)

6. Shen, Z., Wang, W., Shen, Q., Zhu, S., Fardoun, H., Lou, J.: A novel learning method for multi-intersections aware traffic flow forecasting. *Neurocomputing*, 398, pp. 477–484 (2020)
7. Walid, B., Refai, H.: Intelligent vehicle counting and classification sensor for real-time traffic surveillance. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 19(6), pp. 1784–1794 (2018)
8. Rosas-Arias, L., Portillo-Portillo, J., Hernandez-Suarez, A., Olivares-Mercado, J., Sanchez-Perez, G., Toscano-Medina, K., Perez-Meana, H., Sandoval, A., García, L.: Vehicle counting in video sequences: An incremental subspace learning approach. *Sensors*, 19, pp. 1–16 (2019)
9. Taghvaeeyan, S., Rajamani, R.: Portable roadside sensors for vehicle counting, classification and speed measurement. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 15(1), pp. 73–83 (2014)
10. Dai, Z., Song, H., Wang, X., Fang, Y., Yun, X., Zhang, Z., Li, H.: Video-based vehicle counting framework. *IEEE Access*, 7, pp. 64460–64470 (2019)
11. Yang, H., Qu, S.: Real-time vehicle detection and counting in complex traffic scenes using background subtraction model with low-rank decomposition. *IET Intelligent Transport Systems*, 12, pp. 75–85 (2017)
12. Xia, Y., Shi, X., Song, G., Geng, Q., Liu, Y.: Towards improving quality of video-based vehicle counting method for traffic flow estimation. *Signal Processing*, 120, pp. 672–681 (2016)
13. Ai, H., Zheng, Y.: Characterization of a traffic management system using pyroelectric infrared sensors. *Instrumentation Science & Technology*, 43, pp. 319–333 (2015)
14. Liu, J., Han, J., Lv, H., Li, B.: An ultrasonic sensor system based on a two-dimensional state method for highway vehicle violation detection applications. *Sensors*, 15, pp. 9000–9021 (2015)
15. Rabbouch, H., Saâdaoui, F., Mraïhi, R.: Unsupervised video summarization using cluster analysis for automatic vehicles counting and recognizing. *Neurocomputing*, 260, pp. 157–173 (2017)