

Estimación automática de la distancia de la visibilidad en carreteras para maniobras de adelantamiento

Felipe Jiménez-Alonso¹, Juan Ruiz-García¹

¹INSIA, Universidad Politécnica de Madrid, España. Email: felipe.jimenez@upm.es

Resumen

Los nuevos sistemas de asistencia, como paso previo hacia la conducción automatizada, requieren un conocimiento completo del entorno. Para ello, se recurre a sensores de percepción, pero también el posicionamiento sobre mapas digitales supone una herramienta de gran valor. En este sentido, los mapas digitales deben contener cada vez mayor precisión y detalle. Una variable que no se suele incluir es la distancia de visibilidad, que está condicionada por elementos estáticos y dinámicos. En este artículo se presenta un método para su estimación considerando la geometría de la carretera y otros elementos que pueden interferir en la visión. El método es aplicado a datos de una carretera real con la ventaja de poder trabajar en tiempo real con lo que podría obtener resultados en función de los elementos dinámicos detectados los sensores del vehículo. A partir de la distancia de visibilidad, se estima la posibilidad de realizar maniobras de adelantamiento.

Palabras clave: distancia visibilidad; geometría de la carretera; sensores de percepción; maniobra de adelantamiento.

Abstract

New assistance systems, as a preliminary step towards automated driving, require a complete knowledge of the environment. To do this, perception sensors are used, but positioning on digital maps is also a valuable tool. In this sense, digital maps must contain increasingly greater precision and detail. A variable that is not usually included is the sight distance, which is conditioned by static and dynamic elements. This paper presents a method for its estimation considering the road geometry and other elements that can interfere with driver or sensors vision. The method is applied to data from a real road with the advantage of being able to work in real time so results could be obtained based on the dynamic elements detected by the vehicle's sensors. From the sight distance information, the possibility of carrying out overtaking manoeuvres is estimated.

Keywords: sight distance; road geometry; perception sensors; overtaking manoeuvre.

1. Introducción

Los nuevos sistemas de asistencia, como paso previo hacia la conducción automatizada, requieren un conocimiento más completo del entorno. Para ello, se recurre a sensores de percepción, pero también el posicionamiento sobre mapas digitales supone una herramienta de gran valor que complementa la información de la conciencia situacional. En este sentido, los mapas digitales deben contener cada vez mayor precisión y detalle [1].

Si bien los medios empleados para la construcción de mapas digitales permiten el almacenamiento de los datos de geometría de la carretera [2], la distancia de

visibilidad no suele obtenerse de forma directa, pero resulta de vital importancia en escenarios como frenadas de emergencia o maniobras de adelantamiento, entre otras [3]. Debe entenderse la visibilidad en una carretera como la distancia hasta la cual un observador puede distinguir objetos, tales como la propia carretera, otros vehículos, señales, obstáculos, etc. Esta visibilidad está muy influenciada por cambios en el entorno, como la geografía del terreno, la vegetación, la geometría de la carretera, la aparición de obstáculos que obstruyen la línea de visión, la climatología de la zona, la luminosidad de cada hora del día, etc. Para que las distintas maniobras a realizar en una carretera puedan efectuarse en condiciones de comodidad y seguridad, se necesitará

una visibilidad mínima que dependerá de la velocidad de los vehículos y del tipo de dichas maniobras.

La Instrucción [4] recoge, de forma teórica, condiciones de diseño de trazado de carreteras en cuanto a distancias de frenada y adelantamiento, y visibilidades. También plantea consideraciones geométricas sobre visibilidad en curvas circulares y acuerdos verticales. Además, indica que los trazados en planta y alzado deben estar coordinados con el fin de que no se produzcan pérdidas de trazado, es decir, que se puedan ver dos tramos de carretera, pero no uno intermedio, lo que implica una serie de consideraciones que, en algunos casos, no se cumple totalmente en la práctica.

En [5], se clasifican los métodos entre aquellos que obtienen modelos de visibilidad en 2D, tanto del plano horizontal de la carretera como del plano respectivo a las elevaciones de la misma, y aquellos que obtienen modelos en 3D, combinando los métodos utilizados en 2D con una mayor capacidad de procesamiento de datos conforme al desarrollo tecnológico.

Se destacan estudios como [6, 7] en los que se presentan métodos para estimar la distancia de visibilidad en base a datos previamente obtenidos de la geometría de la carretera.

Otro enfoque es el presentado en [8] en el que, a partir de datos incluidos en un Sistema de Información Geográfica (GIS), se pueden elaborar zonas de visibilidad de un vehículo en función de su posición GPS.

En este artículo se plantea un algoritmo geométrico que permite realizar una estimación de esta distancia de visibilidad a partir de la información de una ruta sobre el mapa, la cual puede actualizarse en tiempo real ante la presencia de obstáculos detectados en la marcha del vehículo con el fin de que se pueda determinar en cada punto de la carretera la posibilidad o no de realizar un adelantamiento. Así, se puede dar soporte a la toma de decisiones de los sistemas de asistencia al conductor y a niveles avanzados de conducción automatizada. También resulta de utilidad para el estudio de la infraestructura desde el punto de vista de la ingeniería civil.

El algoritmo propuesto permite el cálculo en tiempo real de la distancia de visibilidad y es posible la adaptación de los parámetros intrínsecos de cálculo en función de las detecciones de los sensores de percepción como el LiDAR (por ejemplo, por la presencia de obstáculos en los laterales de la carretera o un obstáculo delante del propio vehículo que dificulta la visión del carril adyacente previo a una maniobra de adelantamiento). Esta flexibilidad aumenta su campo de aplicación frente a algoritmos que únicamente

trabajan offline sobre el mapa de la carretera y no tienen capacidad de adaptarse a situaciones cambiantes de elementos dinámicos ni tener en cuenta la influencia de elementos críticos para la maniobra de adelantamiento como el obstáculo a sobrepasar.

2. Método

El método planteado parte del conocimiento de la geometría en planta y alzado de la carretera. Aunque los primeros mapas digitales partían de información muy precaria e imprecisa basada en mapas en papel o fotografías aéreas, desde hace años se ha extendido el uso de vehículos instrumentados. Existen métodos sencillos de medición de estas coordenadas basados en realizar el recorrido con un vehículo grabando las coordenadas obtenidas por GPS, para después hacer un procesado suavizando los datos en crudo [9], obteniendo de forma muy precisa la línea que define la carretera. También se pueden utilizar los Sistemas de Información Geográfica, los cuales son sistemas existentes que proporcionan la información geográfica ya sin necesidad de medirla previamente.

En el caso de este artículo, este mapa digital se obtiene empleando un vehículo instrumentado [10] con un receptor GPS, un sistema inercial y sensores de percepción como cámaras y LiDAR. De esta forma, mediante la fusión de los dos primeros sistemas se reducen las imprecisiones y pérdidas de señal propias del posicionamiento por satélite y los errores acumulativos de los sistemas inerciales. Por otra parte, las cámaras identifican la señalización horizontal y vertical y el LiDAR permite obtener variables como las dimensiones de la sección transversal de la carretera, localización de las marcas viales o identificación de elementos en los laterales de la carretera [11]. De esta forma, en cuanto a la geometría, se obtienen las coordenadas (x, y, z) de la línea media de uno de los carriles de circulación y, mediante el conocimiento de la anchura de los carriles y la calzada total, es posible la reconstrucción de la línea media de la carretera, el resto de carriles y los bordes de la calzada.

El cálculo de la visibilidad se divide entre planta y alzado ya que los resultados no se espera que difieran en exceso respecto al estudio tridimensional y es un enfoque que facilita la aplicación en tiempo real sobre datos del entorno percibidos por sensores como el LiDAR. Tras realizar los cálculos por separado, la distancia de visibilidad limitada por la geometría de la carretera será la mínima distancia de ambas y, ésta deberá compararse con las distancias impuestas por otros condicionantes como el obstáculo a ser sobrepasado en la maniobra de adelantamiento o el rango de los sensores de percepción embarcados. El método se plantea de forma genérica con el fin de que sea adaptable a puntos de visión variables, tanto en vertical (altura del conductor o posición del sensor

sobre el techo del vehículo o en el frontal) como transversal.

2.1. Cálculo de la visibilidad en planta

Los cálculos hechos en planta se refieren a la visibilidad de la carretera debida a sus coordenadas x-y, que será función de la curvatura de la carretera en cada tramo y de los obstáculos que se puedan localizar en los laterales de la vía.

En el plano horizontal, se dispone de las coordenadas x-y del eje central de la carretera. Según la Norma 3.1-IC [4], el punto de vista está situado a una distancia de 1.5 m respecto al eje de la carretera, dato configurable en el programa de cálculo. Además, se han utilizado unos bordes de la carretera ajustables en la distancia respecto del eje, a modo de pasillo, a partir del cual es donde se considera que no hay visión a causa de obstáculos situados en los laterales de la vía. Estos límites laterales a la visión son una fuerte simplificación de la realidad, dado que no se puede tener en todas las carreteras un ancho fijo de visión, debido a las características heterogéneas del terreno, la vegetación, o de otras construcciones adyacentes a la carretera. Sin embargo, este enfoque presenta dos ventajas: por un lado, se puede obtener una medida conservadora empleando valores pequeños para el ancho de ese pasillo; y, por el otro, el procedimiento es generalizable en tiempo real a anchuras variables del pasillo en función de lo detectado por los sensores embarcados del vehículo como el LiDAR.

De esta manera, la visión queda limitada por los bordes derecho e izquierdo de la carretera, y su alcance es hasta donde se divisa de forma continua la línea central del carril izquierdo, que se estima situado a 1.5 metros del centro del eje como se muestra en la Figura 1.

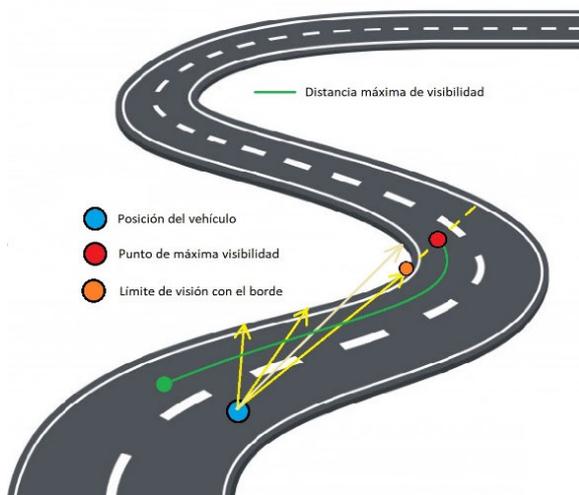


Figura 1. Esquema del algoritmo para determinar la distancia de visibilidad en planta

2.2. Cálculo de la visibilidad en alzado

Los cálculos hechos en alzado se refieren a la visibilidad de la carretera en su perfil de alturas, que será función de los cambios de rasante en cada tramo. Según la Norma 3.1-IC [4], el punto de vista está situado a una altura de 1.1 m respecto del suelo, al igual que la altura mínima a la que es detectable un vehículo que circula en sentido opuesto. Sin embargo, en el algoritmo, la altura de visión y la altura de los vehículos opuestos y obstáculos se ha hecho variable para poder comparar la visibilidad que ofrece la carretera ante distintas situaciones (por ejemplo, diferentes posiciones de los sensores embarcados en el vehículo).

La figura 2 muestra el concepto para el cálculo de la visibilidad en alzado con el que se persigue hallar la distancia mínima a la que un vehículo opuesto dejaría de ser visto al intersectar la visión del vehículo con la propia carretera. De esta forma, se busca con el siguiente algoritmo el punto más cercano en la carretera que haría que la altura del vehículo contrario no fuera suficiente para ser divisado en una línea recta.

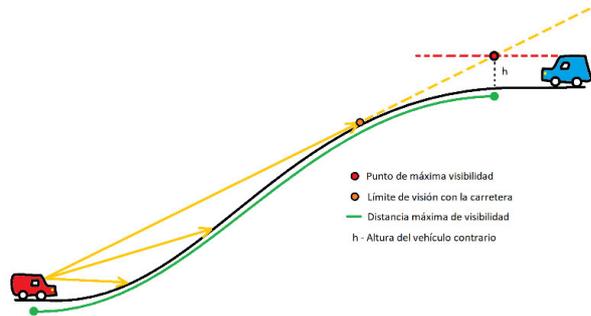


Figura 2. Esquema del algoritmo para determinar la distancia de visibilidad en alzado

2.3. Intersección con el obstáculo

El algoritmo también tiene en cuenta las restricciones de visibilidad que implica el propio obstáculo que se desea adelantar como muestra la Figura 3. En este caso, se identifican los puntos más cercanos de la línea media del carril contiguo al vehículo que dejan de ser percibidos desde el punto de vista. Variables como la distancia al obstáculo o las dimensiones del mismo tienen gran influencia.

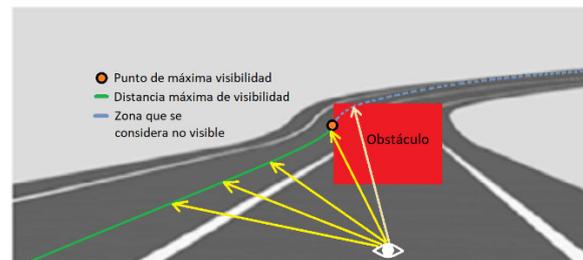


Figura 3. Restricciones de visibilidad impuestas por el obstáculo a adelantar

2.4. Factores que condicionan la distancia de visibilidad

Tras obtener la visibilidad de la carretera en función de su geometría, se contemplan distintos factores adicionales que pueden modificar la visibilidad de la misma. Dichos factores, configurables en tiempo real en el algoritmo de cálculo, son:

- El ancho de los pasillos laterales que establecen el límite de visión lateral.
- La altura de un hipotético vehículo que circula en dirección opuesta.
- La altura del punto de vista del conductor (o de los sensores en el caso de sistemas de asistencia o vehículos autónomos).
- La presencia de un obstáculo y de sus características (cercanía del obstáculo y dimensiones).
- El rango de los sensores, en el caso de sistemas de asistencia o vehículos autónomos.

Se considera como hipótesis el hecho de que no existen obstáculos en el carril contiguo que reduzcan la distancia de visibilidad. Esto es razonable ya que el uso de la estimación de la distancia de visibilidad está orientada a la determinación de las zonas en las que es posible una maniobra de adelantamiento por lo que la distancia a la que el obstáculo en ese carril contiguo es detectado debería ser comparada directamente con la distancia necesaria para el adelantamiento.

2.5. Maniobra de adelantamiento

Un adelantamiento en carreteras convencionales de doble sentido es una maniobra que consiste en sobrepasar a otro vehículo que circula en el mismo sentido que el vehículo propio, pero con velocidad inferior, y que se sitúa en una posición adelantada a la propia. Tanto para un conductor humano como para un sistema de asistencia o de conducción automatizada, la evaluación de la posibilidad de completar dicha maniobra pasa por estimar la distancia requerida, comprobar que se percibe de forma íntegra una distancia tal que se incluya la propia maniobra y la circulación en sentido opuesto de otros vehículos y, por último, la presencia o no de dicho vehículo en el carril contrario.

La norma 3.1-IC [4] incluye tablas en las que se determinan las distancias necesarias para realizar un adelantamiento, en función de la velocidad de proyecto del tramo considerado de la carretera y se considera la velocidad de proyecto (velocidad límite en un tramo de la carretera), la distancia mínima de visibilidad que tiene que haber para colocar la señal de prohibición de adelantamiento, y la distancia mínima de visibilidad que tiene que haber tras la prohibición para colocar la señal de permitir adelantar de nuevo.

Sin embargo, más allá de los condicionantes que llevan a la señalización horizontal o vertical de la posibilidad de adelantamiento, en función de la percepción de obstáculos en el carril contrario, el conductor debe decidir cuándo puede realizar la maniobra. En este punto, el presente algoritmo ayuda a definir si la distancia percibida libre de obstáculos es suficientemente grande para la realización de la maniobra de adelantamiento, tanto para un sistema de asistencia como para primeros pasos de un sistema automático.

Así, la distancia mínima de visibilidad necesaria corresponde a la que recorre el vehículo que adelanta y el que circula por el carril contrario en el tiempo que dura la maniobra mostrada en la Figura 4.

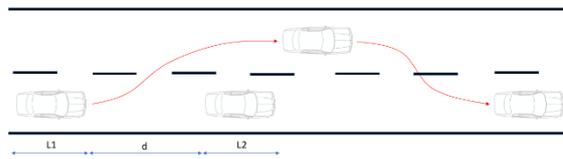


Figura 4. Esquema de la maniobra de adelantamiento

Existen numerosos modelos de cambio de cambio de carril que permiten determinar el tiempo y distancia empleadas. En este caso, se toma el presentado en [12]. A partir de éste, la distancia de visibilidad está dada por la ecuación (1)

$$d_v \geq (v + v_{cont}) \cdot \left(\frac{d + L_1 + L_2}{v - v_{obs}} + \pi \cdot \sqrt{\frac{w_0}{2a_{Lmax}}} \right) \quad (1)$$

donde v es la velocidad del propio vehículo que va a adelantar, v_{cont} es la velocidad del vehículo que circula por el carril contrario, v_{obs} es la velocidad del vehículo que va a ser adelantado, d es la distancia entre la parte delantera de vehículo que adelanta y la trasera del que es adelantado, L_1 es la longitud del primero, L_2 es la longitud del segundo, w_0 es el movimiento transversal del vehículo y a_{Lmax} es la aceleración lateral máxima admisible por cuestiones de confort en la maniobra. Obsérvese que todos los parámetros pueden estimarse o percibirse mediante sensores embarcados de forma continua.

3. Resultados

El algoritmo se ha aplicado sobre carreteras reales y se realiza un análisis sobre la contribución sobre la limitación de la visibilidad de cada uno de los desarrollos (planta y alzado), así como la forma en la que parámetros como la altura del punto de vista y el

tamaño del obstáculo a detectar o las dimensiones de un obstáculo que obstruya la línea de visión o elementos junto a la carretera modifican la distancia de visibilidad. Cabe indicarse que los cálculos se realizan para toda la ruta, pero el método también puede ser empleado en tramos concretos o ser actualizados los datos en tiempo real.

Los datos utilizados para la realización de este trabajo son los de la carretera española M-104, en la Comunidad de Madrid, que conecta las localidades de Colmenar Viejo y San Agustín de Guadalix. Es una carretera convencional de doble sentido, con un carril por sentido, con la particularidad de presentar gran diversidad de radios de curvatura (incluyendo valores bastante reducidos) y cambios de rasante, sin poderse calificar como carretera de montaña, y disponiendo también de zonas diáfanas donde es posible alcanzar velocidades altas. La Figura 5 muestra los trazados en planta y alzado de la ruta y la Figura 6 los resultados de visibilidades por cada uno de los perfiles calculadas por criterios geométricos de la carretera considerando pasillos laterales de 5 metros.

Esta anchura del pasillo lateral de sección libre a ambos lados de la carretera influye en el cálculo de la distancia de visibilidad en planta. Se comprueba una tendencia casi lineal entre la distancia de visibilidad promedio y el ancho del pasillo, de forma que la condición más limitante la impone el trazado en planta frente al de alzado cuando se estrecha el pasillo (Tabla 1).

Tabla 1. Influencia de la anchura del pasillo libre lateral

Factor limitante visibilidad	Ancho		
	3 m	5 m	7 m
Curvas	85,48%	78,77%	74,92%
Cambios de rasante	14,52%	21,23%	25,08%

En el funcionamiento en tiempo real, la anchura del pasillo se considera variable a lo largo de la distancia en función de la detección del LiDAR por lo que se pueden caracterizar obstáculos en los márgenes de la carretera que se detecten y posicionen en el mapa digital.

Respecto a la altura del vehículo en el sentido contrario, la distancia de visibilidad se ve muy afectada por variaciones alrededor de valores pequeños y tiende a hacerse más insensible con variaciones sobre valores grandes en el entorno de los 3 metros. Una situación análoga resulta de la posición vertical del sensor en el propio vehículo; son preferibles posiciones elevadas, aunque esos valores tienen límites prácticos de implementación claros dado que, hasta la fecha, la integración natural de los sensores de percepción es el el frontal, salvo caso de cámaras en la parte alta el parabrisas o los sensores para conducción automatizada en el techo.

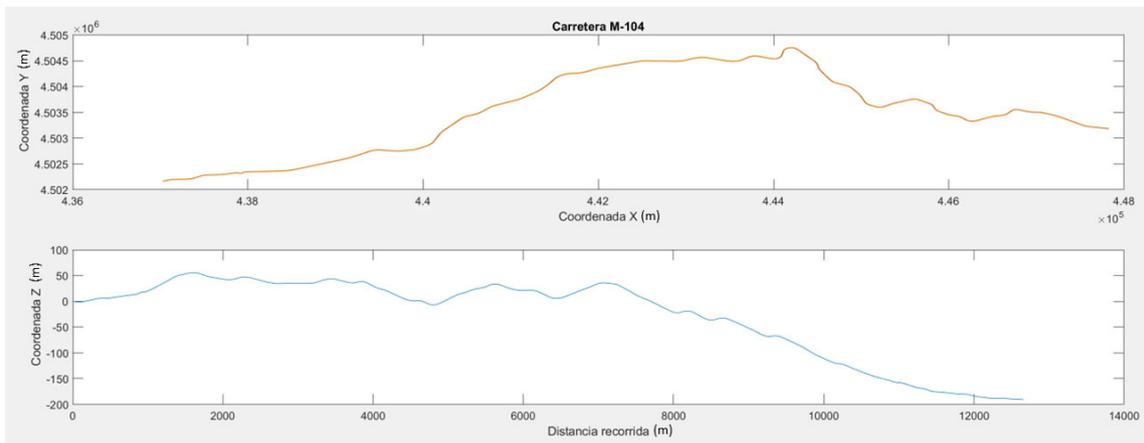


Figura 5. Geometría de la carretera M-104.

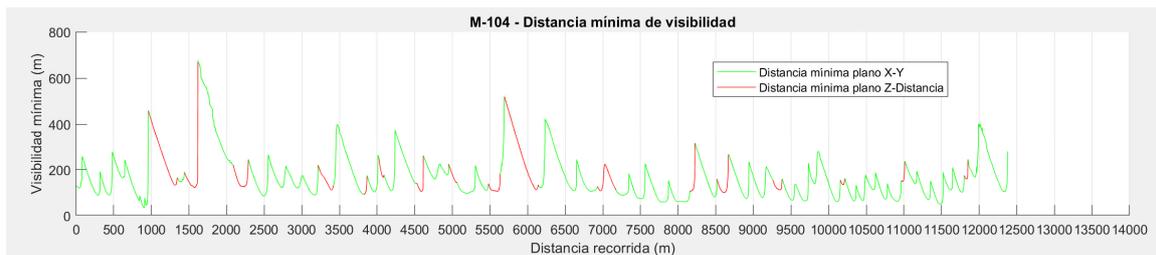


Figura 6. Distancia de visibilidad limitada por el trazado en planta (verde) o por el alzado (rojo)

Por otra parte, se analizan los tramos en los que la distancia de visibilidad detectada es superior al rango de medida de los sensores que embarcan los vehículos con sistemas de asistencia o conducción parcialmente automatizada. Tomando un alcance promedio de 250 metros, en la carretera analizada, se comprueba que el 14% de la distancia total tendía limitada la visibilidad por el rango del sensor al calcularse distancias de visibilidad por la geometría de la carretera superiores.

Por otra parte, en la maniobra de adelantamiento, el vehículo que debe ser rebasado supone un obstáculo para el campo de visión del que adelanta. En tal caso, tanto la distancia entre ambos vehículos como la dimensiones del primero son variables relevantes. La Tabla 2 muestra los resultados de la influencia de la presencia de un turismo que debe ser adelantado que circula por la línea media del carril. Como se puede ver, la cercanía del obstáculo influye mucho en la visibilidad, sobre todo a cortas distancias del mismo. Principalmente la influencia más grande está en distancias pequeñas de hasta 50-60 metros. La Tabla 3 tiene en cuenta la influencia del tamaño del obstáculo a ser rebasado.

Tabla 2. Efecto en la distancia de visibilidad del obstáculo en el propio carril.

Distancia obstáculo (m)	50	75	100	Sin obst.
Visibilidad media carretera (m)	134,54	149,38	157,16	168,66
Visibilidad limitada por geometría	58,34%	71,10%	80,69%	100%
Visibilidad limitada por obstáculo	41,66%	28,90%	19,31%	-

Tabla 3. Influencia del tamaño del obstáculo

Tamaño obstáculo (m)	0,7x0,7	1,8x1,5	2,5x4	Sin obst.
Visibilidad media carretera (m)	155,27	134,54	119,50	168,66
Visibilidad limitada por geometría	72,35%	58,34%	48,80%	100%
Visibilidad limitada por obstáculo	27,65%	41,66%	51,20%	-

4. Conclusiones

En este artículo se ha presentado un algoritmo para el cálculo automático y geométrico de la distancia de visibilidad en carretera, que puede ser implementado en tiempo real e integrado junto a los sistemas de percepción para modificar parámetros que influyen en el cálculo.

El estudio de la influencia de diversos parámetros sobre los resultados en una carretera convencional pone de manifiesto la importancia de detectar en cada momento esas variables, como puede ser el pasillo transversal libre que sería fácilmente detectable por tecnologías de percepción como LiDAR (por ejemplo, por la presencia de obstáculos en los laterales de la carretera o un obstáculo delante del propio vehículo que dificulta la visión del carril adyacente previo a una maniobra de adelantamiento). Esta flexibilidad aumenta su campo de aplicación frente a algoritmos que únicamente trabajan offline y no tienen capacidad de adaptarse a situaciones cambiantes. Por otra parte, sobre la influencia de la altura del obstáculo, se pueden adoptar criterios más o menos conservadores para la toma de decisiones.

De esta forma, el algoritmo puede dar soporte en la toma de decisiones de sistemas de asistencia al conductor o, incluso, para niveles avanzados de conducción automatizada. En este sentido, cabe indicarse que la distancia de visión de los sensores tiene un alcance máximo que, en muchos casos, limitan la distancia de visibilidad detectada por la geometría de la carretera, lo cual supone una limitación relevante y que podría motivar que, para realizar de forma efectiva estas maniobras de adelantamiento, sea necesario recurrir a otro tipo de tecnologías como las comunicaciones V2X en el marco de los vehículos conectados y la conducción cooperativa [13].

5. Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado parcialmente por la ayuda de MCIN/ AEI /10.13039/501100011033, PID2019-104793RB-C33.

6. Referencias

- [1] eSafety Forum. “Digital Maps Working Group Final Report”. European Commission, Brussels (2005)
- [2] F. Jiménez, F. Aparicio, F., G. Estrada. “Measurement uncertainty determination and curve fitting algorithms for development of accurate digital maps for Advanced Driver Assistance Systems”. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 17(3), 225-239 (2009)

- [3] L. Iglesias, M. Castro, V. Pascual, C. De Santos-Berbel. "Estimation of sight distance on highways with overhanging elements". International conference on traffic and transport engineering. Belgrade, 24-25 November 2016
- [4] MOPU. "Trazado. Instrucción de carreteras. Norma 3.1-IC". Madrid: Centro de publicaciones del Ministerio de Fomento (2000).
- [5] Y. Hassan, S. Easa, A. El Halim. "State of the art of three-dimensional highway geometric design" *Canadian Journal of Civil Engineering* 25(3), 500-511, (1998)
- [6] A. J. Khattak, H. Shamayleh. "Highway safety assessment through geographic information system-based data visualization", *Journal of Computing in Civil Engineering*, 19(4), 407-411 (2005)
- [7] M. Castro, A. J. Anta, L. Iglesias, J. A. Sánchez. "GIS-based system for sight distance analysis of highways", *Journal of Computing in Civil Engineering*, 28(3): 04014005 (2014).
- [8] M. Castro, L. Iglesias, J. A. Sánchez, L. Ambrosio. "Sight distance analysis of highways using GIS tools" *Transportation Research Part C-Emerging Technologies*, 19(6), 997-1005, (2011).
- [9] . Castro, L. Iglesias, R. Rodríguez-Solano, J. A. Sánchez. "Geometric Modelling of Highways Using Global Positioning System (GPS) Data and Spline Approximation". *Transportation Research Part C—Emerging Technologies*, 14, 233-243, (2006).
- [10] F. Jiménez. "Improvements in road geometry measurement using inertial measurement systems in datalog vehicles" *Measurement*, 44(1), 102-112 (2011)
- [11] F. Jiménez, M. Clavijo, F. Castellanos, C. Álvarez. "Accurate and detailed transversal road section characteristics extraction using laser scanner". *Applied Sciences*, 8(5), 724, pp 1-13, (2018)
- [12] M. Durali, G. Javid, A. Kasaiezadeh. "Collision Avoidance Maneuver for an Autonomous Vehicle". In Proceedings of the 9th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control, Istanbul, Turkey, 27–29 March 2006
- [13] Talavera, E., Anaya, J. J., Gómez, O., Jiménez, F., Naranjo, J. E. "Performance comparison of Geobroadcast strategies for winding roads". *Electronics*. 7, nº 3, 15 p. (2018)