

Guiado de vehículos autónomos mediante lidar 3D siguiendo un elemento de referencia



Reference element guidance of autonomous vehicles using 3D laser scanner



José E. Naranjo-Hernández, Felipe Jiménez-Alonso, Miguel Clavijo-Jiménez y Óscar Gómez-Casado

Universidad Politécnica de Madrid. Instituto Universitario de Investigación del Automóvil (INSIA). Campus Sur de la UPM. Carretera de Valencia, km. 7 - 28031 Madrid. Tfno: +34 91 336 52 87

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8054> | Recibido: 12/05/2016 • Evaluado: 12/05/2016 • Aceptado: 11/07/2016

ABSTRACT

- Every transportation plan in the medium and long term consider autonomous vehicles as a key solution for transport, which will reduce to a minimum traffic accidents and congestion, maximizing the use of the road. However, at present, these vehicles are still under development and they are not with acceptable figures for the placing on the market. A fundamental element on today obstacle detection is the laser scanner, which provides a three dimensional mesh that can represent all objects that are at a distance of 200 meters from the vehicle. Furthermore, the combination of GPS with inertial systems allows precise positioning on the road, if necessary reinforced with computer vision to achieve lane level positioning. However, there are situations, such as tunnels or urban roads with poor reception of GPS signals that make this positioning can be complicated, so much so that the autonomous vehicle requires human intervention to maintain the trajectory. This article describes a use of laser scanner technology to support positioning and maintaining the position even when the GPS and inertial systems are not sufficient to maintain the route. This system will be complementary to conventional guidance systems and works in parallel without interference obstacle detection system for autonomous vehicles. It has also been tested and validated in real situations autonomous vehicles driving at high speeds on real roads.
- Keywords: Autonomous vehicle, laser scanner, LiDAR, GPS positioning.

RESUMEN

Los estudios sobre transporte a medio y largo plazo consideran la conducción autónoma como una solución clave, que reducirá a un mínimo los accidentes y la congestión del tráfico, potenciando el uso de la carretera. Sin embargo, en la actualidad, estos vehículos están todavía en desarrollo y, aunque existen numerosos desarrollos parciales, aún no se encuentra en situación aceptable para la puesta en el mercado. Un elemento fundamental hoy día para la detección de obstáculos es el láser 3D, que proporciona una nube de puntos de tres dimensiones que puede representar todos los objetos que se encuentran a una distancia máxima de 200 metros del vehículo. Además, la combinación de GPS con sistemas inerciales permite un posicionamiento preciso sobre la carretera, incluso si es necesario, reforzado con visión artificial para lograr un posicionamiento a nivel de carril. Sin embargo, hay situaciones, tales como túneles o vías urbanas con mala recepción de las se-

ñales GPS que hacen que este posicionamiento pueda ser complicado, tanto es así que el vehículo autónomo requiera intervención humana para mantener la trayectoria. Este artículo describe un uso de la tecnología LiDAR 3D como apoyo en el posicionamiento y el mantenimiento de la trayectoria incluso cuando el GPS y los sistemas inerciales no son suficientes para mantener la ruta. Este sistema sería complementario a los sistemas de guiado convencionales y trabaja en paralelo sin interferir en el sistema de detección de obstáculos para vehículos autónomos. También se ha probado y validado en situaciones reales de conducción de vehículos autónomos a altas velocidades en carreteras reales.

Palabras clave: Vehículo autónomo, láser escáner, LiDAR, posicionamiento GPS.

1. INTRODUCCIÓN

Los vehículos autónomos son un área consolidada en el ámbito de los sistemas inteligentes de transporte [1], que ha tomado gran interés a partir de las recientes presentaciones de los coches de Google. Sin embargo, diversos grupos de investigación han estado trabajando en este campo durante más de 20 años. Destacamos los trabajos de INRIA [2], Autopia [3], CMU [4], PATH [5] o Parma [6], entre otros. Por otro lado, sigue siendo una tecnología en pleno crecimiento, donde grandes empresas, además de Google, como Tesla, Audi, BMW, Ford, Volvo, entre otras, están tomando partido, no sólo a la hora de seguir desarrollando este tipo de vehículos, sino también elaborando un marco legal que facilite la investigación e implantación de esta nueva solución de transporte [7]. De esta forma, los diferentes fabricantes han demostrado las funcionalidades de prototipos de vehículos autónomos, si bien todavía resta bastante trabajo para llegar a la automatización total Nivel 5 [1], principalmente en entornos complicados y a un coste asequible.

Estos vehículos autónomos tienen en común la capacidad de realizar dos tareas distintas: la identificación de obstáculos para evitar accidentes y el posicionamiento para realizar un seguimiento de una ruta. Estos dos problemas siguen en desarrollo desde los primeros estudios, y, sin embargo, todavía no existe una solución general para ambos, en cuanto al cumplimiento de los requisitos de fiabilidad, robustez, eficiencia y costo asequible, sobre todo en entornos de carretera complejos.

Para la detección de obstáculos se utilizan diferentes tecnologías como el radar [8, 9], visión artificial [10, 11] o láser 2D y 3D [12-14], incluso combinando dos o más de los mismos, siendo la

solución más extendida la fusión de escáner láser y visión artificial [15-17]. Adicionalmente, se integran sistemas de detección de corto alcance como ultrasonidos [18]. Cada tecnología de detección de obstáculos tiene sus ventajas e inconvenientes desde el punto de vista de la fiabilidad, la cobertura, los requisitos de procesamiento, la robustez y el coste [19], pero en los últimos tiempos el sensor más extendido en vehículos autónomos es el láser 3D que es capaz de generar una malla tridimensional de 360° que representa el entorno de un vehículo a una distancia entre 100 y 200 metros [20].

El otro elemento clave para situar el vehículo autónomo en la carretera es el posicionamiento preciso. Localizar un vehículo autónomo con una precisión de un carril es fundamental para garantizar un guiado seguro. En este caso, el principal sensor que asegura este posicionamiento es el receptor GPS, que puede llegar a proporcionar posiciones con una precisión de hasta 1 cm [21]. Sin embargo, es común encontrar situaciones en las que la recepción de la señal GPS sea pobre e, incluso, llega a perderse, como en tráfico urbano o túneles. Para esos casos, el posicionamiento GPS se suele complementar con sistemas inerciales que pueden mantener la posición con la precisión adecuada durante un corto periodo de tiempo [22, 23]. Este tiempo depende del tipo de carretera por la que se hace circular, el número de curvas, radio de éstas y los diferentes peraltes en la trayectoria del vehículo, siendo ineficaces en túneles de gran longitud [24]. Para superar esta limitación, algunos vehículos autónomos equipan los sistemas de visión artificial para detectar las líneas de la carretera [25, 26], que son capaces de ayudar al sistema de guiado para mantener el vehículo en el carril, pero con un posicionamiento muy precario.

En este artículo se presenta un sistema complementario para mantener la posición de los vehículos autónomos sin añadir elementos adicionales a la arquitectura estándar de sensores, empleando un láser 3D, utilizado para la detección de obstáculos, para posicionar el vehículo en situaciones en las que el receptor GPS falla o da una precisión por debajo de la requerida. Este uso no interfiere con la detección de obstáculos por lo que se asigna una función dual para este sensor, que puede detectar los bordes de la carretera o elementos que la delimiten, según el caso, para calcular la posición relativa en el carril del vehículo con suficiente garantía de seguridad y robustez. Así, se propone un método complementario a las formas clásicas de guiado basadas en GPS empleando un láser que, aunque resulta costoso, es más económico que los empleados comúnmente por los fabricantes que son de 64 capas. Para probar este sistema, se ha implementado un vehículo autónomo con este equipo y ha sido probado a alta velocidad en túneles y carreteras.

2. PERCEPCIÓN MEDIANTE ESCÁNER LÁSER

El láser 3D es un sensor utilizado en automoción para detectar objetos que puedan aparecer en 360° alrededor de un vehículo. Este sensor utiliza la tecnología LiDAR para detectar la distancia a un obstáculo, así como la intensidad de su reflectividad. El láser escáner 2D convencional equipa un prisma de rotación que permite la separación de haces consecutivos un mismo ángulo, detectando los obstáculos situados en el mismo plano. En los sensores 3D, se añade un grado de libertad adicional, haciendo la detección sobre superficies cónicas de vértice el propio sensor, generando la vista 3D de los alrededores. En este artículo se plantea el desarrollo de algoritmos de detección del elemento de referencia para el guiado empleando un láser 3D, y se hace su aplicación práctica con un sensor de 16 capas, que pasarán a describirse a continuación.

2.1. EQUIPO EMPLEADO PARA LA PERCEPCIÓN

Se utiliza como sensor de referencia un *Velodyne VLP-16*, un sensor láser 3D, con un máximo de 16 planos distribuidos verticalmente en 30° de campo visual, proporcionando hasta 300.000 puntos por segundo, 360° de campo de visión horizontal y una resolución máxima de 0,1°. El sensor se ha montado en la parte superior de un vehículo (Figura 1).



Fig. 1: Vehículo autónomo de INSIA equipado con sensor láser 3D Velodyne VLP-16

Con este equipo es posible detectar nubes de puntos tridimensionales que representan obstáculos, vehículos, peatones y otros elementos de la carretera. Sin embargo, la información generada por este sensor, también se puede utilizar para detectar los límites de la carretera, así como la separación entre los carriles usando la información de la reflectividad.

A continuación, se ha desarrollado un algoritmo de detección y seguimiento del elemento de referencia de la carretera (barrera lateral o línea del carril) empleado para el guiado autónomo. Así, se han de detectar y seguir dos elementos distintos: las barreras laterales, con el fin de calcular el error angular y lateral del vehículo desde el borde de la carretera, y la ubicación del vehículo entre los carriles de la carretera. Estas dos variables son las necesarias para garantizar un seguimiento de la ruta correcta para la navegación autónoma [27].

2.2. ALGORITMO DE SEGUIMIENTO DE LOS LÍMITES DE LA CARRETERA

La detección de las líneas de la carretera resulta sencilla a partir de la medida de la reflectividad por parte de un escáner láser debido al alto contraste entre el asfalto y la pintura blanca. Resulta más compleja la delimitación de la ruta en base a la detección de barreras laterales como, por ejemplo, quitamiedos o barreras New Jersey, caso para el que se define un algoritmo específico. Éste permite al vehículo estimar una ecuación de segundo grado que representa la trayectoria que debe seguir el vehículo en función de la representación 3D de las barreras laterales de la carretera. El algoritmo tiene que funcionar en un amplio rango de velocidades de circulación, hasta un máximo de 120 km/h.

Se trata de un algoritmo de seis pasos que es capaz de calcular el vector de trayectoria del vehículo en función de la localización de las barreras laterales de la carretera haciendo uso de la nube de puntos obtenida por los 16 canales suministrados por el VLP-16.

Paso 1: En esta primera etapa se define la región de interés (RoI) en función de la distancia de anticipación que depende de la velocidad del vehículo [28], tal y como se define en la Figura 2, donde L es la distancia de anticipación y v es la velocidad del vehículo. Por lo tanto, con esta operación, la carga computacional

se reduce drásticamente debido a que los puntos láser no pertinentes a esta región se descartan. Debe tenerse en cuenta que no se filtran los puntos laterales, sino el alcance en la dirección longitudinal de avance del vehículo. Realmente, el filtro se aplica tanto hacia adelante como hacia atrás y la idea que subyace es el hecho de los puntos detectados más alejados del sensor están sujetos a mayores errores, por lo que se intentan obviar en el ajuste del elemento de referencia si es posible cuando se necesita una menor distancia de anticipación por circular a bajas velocidades.

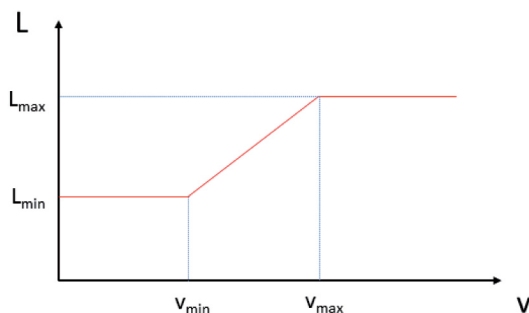


Fig. 2: Descripción del funcionamiento del algoritmo de seguimiento de los límites de la carretera

Paso 2: Tras un primer filtrado de los puntos relevantes, éstos se agrupan en conjuntos de tres según la distancia entre ellos mediante la triangulación de Delaunay. Esta primera agrupación permite la representación de los objetos detectados como un conjunto de superficies, cuyas características permiten su posterior análisis y clasificación.

Paso 3: Una vez que la malla se ha triangulado, la ecuación y el vector normal de cada triángulo se calcula con el fin de tener en cuenta la orientación de la superficie definida. Para cada triángulo con tres vértices $(x_i, y_i, z_i) / i \in [1..3]$ su vector unitario normal se puede calcular en cada uno de ellos (u_x, u_y, u_z) . En primer lugar, los vectores que forman el triángulo están dados por la Ecuación 1.

$$\begin{aligned}\overrightarrow{AB} &= (x_2 - x_1, y_2 - y_1, z_2 - z_1) \\ \overrightarrow{AC} &= (x_3 - x_1, y_3 - y_1, z_3 - z_1)\end{aligned}\quad (1)$$

El vector normal unitario u se calcula mediante el producto vectorial, según la Ecuación 2:

$$\vec{u}_\perp = \frac{\overrightarrow{AB} \times \overrightarrow{AC}}{\|\overrightarrow{AB} \times \overrightarrow{AC}\|}\quad (2)$$

Finalmente, con la Ecuación 3 se calcula el ángulo de este vector normal con los tres ejes de coordenadas (Figura 3) con el fin de comparar el ángulo γ (ángulo formado entre el vector y el eje Z) con los límites establecidos para determinar si un triángulo puede considerarse que forma parte de una barrera o no.

$$\left. \begin{aligned}\alpha &= \arccos(\vec{u} \cdot \vec{i}) \\ \beta &= \arccos(\vec{u} \cdot \vec{j}) \\ \gamma &= \arccos(\vec{u} \cdot \vec{k})\end{aligned}\right\}\quad (3)$$

Paso 4: Con la información suministrada por los vectores normales de cada superficie, se ejecuta una operación de filtra-

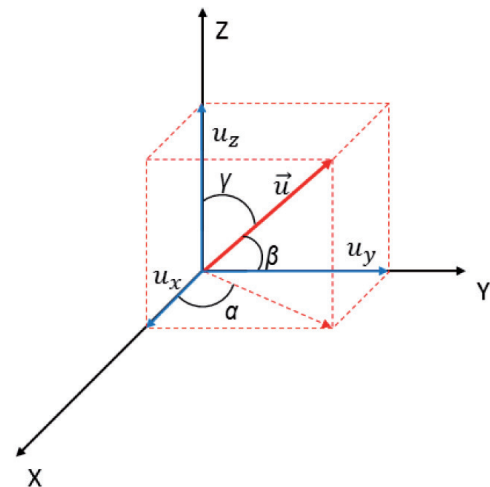


Fig. 3: Sistema de referencia y ángulos del vector normal unitario a un triángulo

do mediante la eliminación de los triángulos cuyo ángulo γ están fuera de un umbral prefijado. En el caso de las barreras verticales New Jersey, los límites del umbral han sido definidos entre 75° y 90° [29]. Si la condición se cumple, los tres vértices del triángulo proyectados sobre el plano horizontal se incluyen como puntos en la lista de candidatos. Por tanto, el cálculo para determinar la segmentación y la forma de la barrera se continúa usando puntos bidimensionales.

Paso 5: El siguiente paso es la segmentación o agrupación de las diferentes nubes de puntos que se detectan como candidatos para representar las barreras laterales. Esta agrupación se basa en la distancia euclídea entre los puntos y su densidad, utilizando el algoritmo de *clustering* DBSCAN (*Density-based spatial clustering of applications with noise*) [30]. Puesto que ya se había hecho una preselección de los puntos del obstáculo, este algoritmo de *clustering* ofrece una baja carga computacional y no se requieren prestaciones superiores. La nube de puntos queda, por tanto, segmentada en los distintos candidatos a formar la barrera. Una vez que esta clasificación es completada, y con el fin de poder realizar la navegación y el posicionamiento del vehículo autónomo, el conjunto seleccionado de puntos será el situado lateral y longitudinalmente al vehículo.

Paso 6: Por último, una vez seleccionada la nube de puntos que identifica la barrera, la función matemática f que define la forma de ésta y, en consecuencia, la ruta que debe seguir el vehículo se calcula utilizando una regresión cuadrática. En este punto, cabe indicarse que los puntos cercanos al escáner láser tienen una mayor influencia en el ajuste de la función, al existir en esa zona una mayor densidad de puntos detectados y asociados a la barrera que delimita la carretera. Con el fin de homogeneizar la relevancia relativa de todos los puntos detectados, se ha definido una función peso a la nube de puntos que incrementa su valor cuanto más lejano del vehículo se encuentre el punto en cuestión.

En este punto es posible calcular las dos principales variables necesarias para asegurar el seguimiento de la trayectoria del vehículo: el error lateral y angular. Para el cálculo de ambos errores, primero se calcula el punto $P(x_o, y_o)$. Este punto forma parte de la regresión (por tanto de la barrera de separación) y una perpendicularmente ésta con el origen de coordenadas $(0, 0)$, donde está situado el sensor, tal y como se aprecia en la Figura 4.

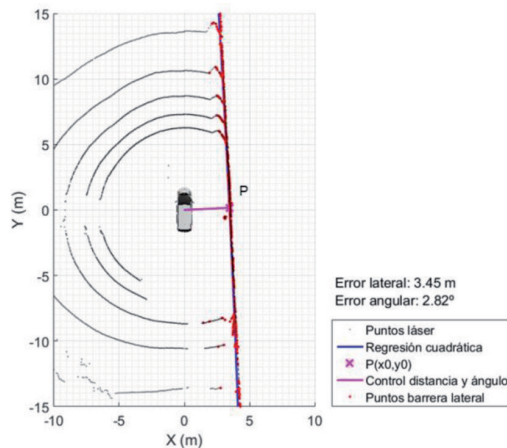


Fig. 4: Comportamiento algoritmo detección y cálculo de errores lateral y angular

Usando la ecuación de la recta tangente a la regresión que corta por el punto P (Ecuación 4), es posible calcular su pendiente con $m_t = f'(x_0)$.

$$y = f'(x_0) \cdot (x - x_0) + f(x_0) \quad (4)$$

A continuación, la pendiente de la recta perpendicular debe verificar que $m_n = -1/m_t$. Como esta recta debe cortar el punto (0, 0), localización del láser, es posible obtener el valor de (x_0, y_0) sustituyendo en la curva de regresión de los puntos seleccionados. Con este parámetro, es posible calcular los errores angulares y laterales dados por la Ecuación 5, siendo d la distancia que se pretende mantener con el elemento de referencia.

$$Error\ Lateral = \sqrt{x_0^2 + y_0^2} - d \quad (5)$$

$$Error\ Angular = \arcsin\left(\frac{y_0}{Error\ Lateral}\right)$$

3. RESULTADOS

Se han realizado dos pruebas con el fin de obtener los resultados del algoritmo de posicionamiento basado en láser. La primera prueba ha sido llevada a cabo en las instalaciones del INSIA, utilizando un circuito privado de 300 m y un vehículo autónomo basado en posicionamiento por GPS. En este caso, se ha configurado una ruta en paralelo a una pared recta de 150 m, tal y como se muestra en la Figura 5a. Con el fin de extender y generalizar estos

resultados, el sistema ha sido probado en un segundo conjunto de ensayos, pero, en este caso en condiciones reales. En concreto, las pruebas se han realizado en la autovía A-6 de Madrid, donde hay un acceso restringido a 16 km de carriles reversibles, abierto sólo para vehículos de alta ocupación y al transporte público (Bus-VAO). Este carril se separa del tráfico regular a través de barreras y sólo está abierta en las horas punta de tráfico. Este carril reversible cumple con los requisitos para la realización de la segunda prueba del sistema de posicionamiento basado en láser (Figura 5b). En los marcos de tiempo en que se cierra el carril Bus-VAO, la Dirección General de Tráfico Española (DGT) ha autorizado al INSIA para desarrollar experimentos que involucran la conducción autónoma y las tecnologías relacionadas. Durante los ensayos, el vehículo es conducido de forma manual, con el fin de no tener la posible influencia del controlador automático, ya que el objetivo de las pruebas es comparar las señales de control que proporcionarían los dos métodos de posicionamiento.

En ambos casos, el objetivo es comparar la información proporcionada por el receptor GPS y el láser para calcular el error angular y lateral de la trayectoria con el fin de verificar la fiabilidad de los datos *láser* frente a los del GPS para este fin, aún con buena cobertura de señal.

En el primer ensayo, el mapa de la trayectoria se ha obtenido utilizando un GPS diferencial con una precisión centimétrica, mientras que el vehículo es posicionado con un receptor GPS con corrección diferencial WAAS, con una precisión submétrica. La velocidad de circulación del vehículo ha sido de 20 km/h. En la Figura 6 se muestran los resultados de este ensayo controlado. Está representada la evolución de los errores laterales y angulares durante estas pruebas, calculados utilizando la información del receptor GPS y la información del LiDAR 3D. Se observa que la evolución durante el recorrido de ambos errores utilizando los dos sensores diferentes es equivalente, pero, en el caso de los GPS, estas magnitudes sufren un importante nivel de ruido en sus valores, causada por los errores de posicionamiento inherentes por la naturaleza del receptor GPS. En particular, el cálculo del error angular es especialmente ruidoso debido a la influencia de estos errores en el cálculo de la guiñada. Los valores obtenidos utilizando el láser 3D cuando se detecta la pared junto a la pista está sujeto a un bajo nivel de ruido, manteniendo los mismos niveles de precisión, incluso mejor que el GPS.

La segunda prueba consiste en un recorrido de 16 km que circulan por el carril derecho de la Bus-VAO a velocidades cercanas a 100 km/h para comparar la evolución de los errores laterales y angulares en función del sensor empleado para su cálculo. En este caso, el lá-

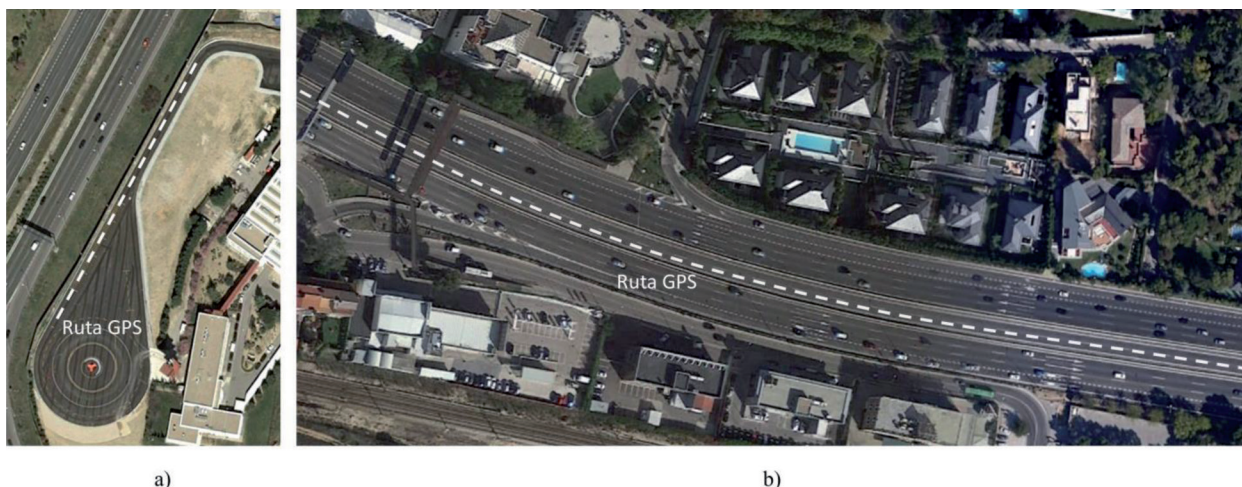


Fig. 5: a) Pista de pruebas de INSIA y ruta de referencia; b) Zona de pruebas en carril Bus-VAO de A6

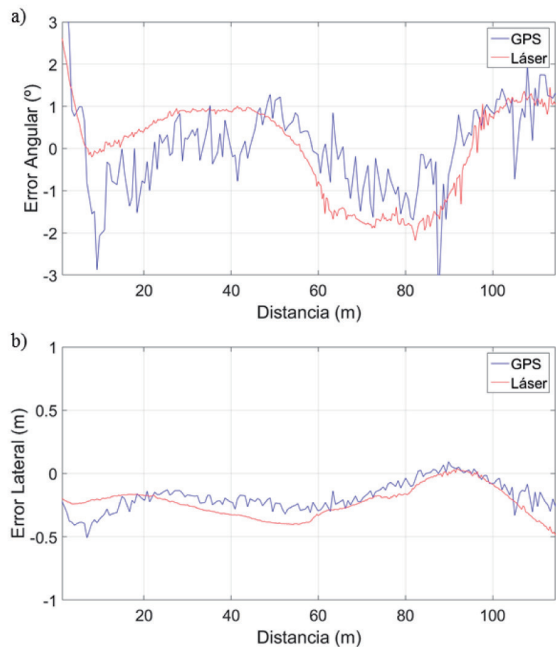


Fig. 6: Comparación de cálculo errores angulares (a) y laterales (b) en el entorno controlado de la pista de INSIA

ser detecta las barreras laterales de la vía de circulación. En la Figura 7 se muestran los resultados de un tramo de 600 metros con los dos sensores de adquisición de datos y el cálculo de error lateral y angular. En este caso, se trabaja con un receptor GPS con corrección diferencial nuevamente. Además de las conclusiones antes alcanzadas en el ensayo previo, también se puede observar otra limitación de los receptores GPS, ya que, en los puntos correspondientes a las distancias de 180 m y 500 m, la señal GPS se pierde debido a la circulación del vehículo bajo dos puentes que cruzan la carretera. Estas circunstancias, aparte de otras perturbaciones presentes a lo largo de la trayectoria, impiden disponer de precisión submétrica en todo punto con el receptor GPS. En este caso, el láser mantiene el posicionamiento y no se ve afectado por estos elementos.

La Tabla 1 muestra las desviaciones típicas de las señales de error angular y lateral para los dos ensayos. Se observa que, en todos los casos, éstas son menores en el caso de la detección me-

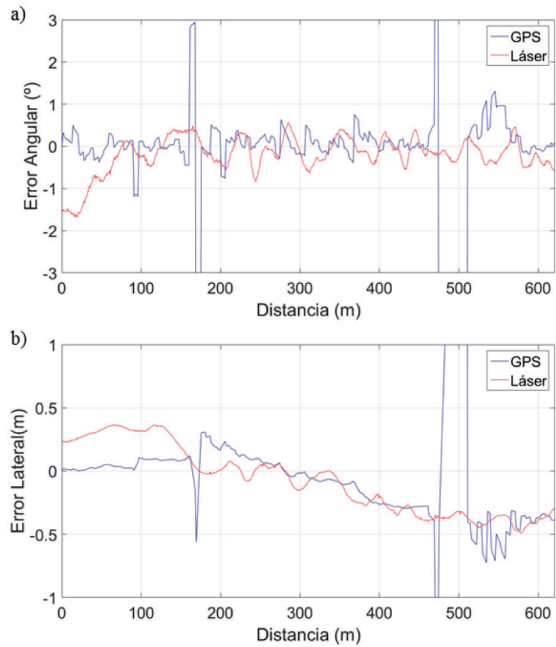


Fig. 7: Comparación de cálculo de los errores angulares (a) y laterales (b) en un segmento del carril bus VAO de la autovía A-6 de Madrid

diente el escáner láser que con el GPS lo que reafirma la conclusión cualitativa obtenida de las figuras anteriores. Además, al estudiar las componentes frecuenciales de las señales de error, se comprueba que, para las obtenidas a partir del láser 3D, dichas componentes se atenúan a niveles inferiores al 5% de su máximo ya por debajo de 1 Hz, mientras que las componentes de las señales obtenidas con el GPS no alcanzan ese nivel de atenuación ni para 5 Hz. Nótese que las componente de frecuencias bajas se pueden asociar a la forma de circular con el vehículo frente al elemento de referencia, siendo las componentes altas las debidas a las oscilaciones de los sistemas de posicionamiento.

	Error ANGULAR		Error LATERAL	
	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 1	Ensayo 2
GPS	0,7659	1,4616	0,0609	0,3421
Láser	0,1921	0,0610	0,0141	0,1459

Tabla 1: Valores de desviaciones típicas (m) en las señales de error para el control del vehículo

Así, los resultados anteriores han demostrado que el sensor láser 3D se puede utilizar como sensor redundante para calcular la posición de un vehículo autónomo para su navegación, sin incurrir en los saltos que puede tenerse en una señal de un receptor GPS, por ejemplo al modificase el número de satélites vistos. De esta forma, el LiDAR, utilizado generalmente para la detección de obstáculos, también se puede utilizar como elemento para el posicionamiento sin necesidad de añadir un nuevo sensor, con una exactitud aceptable para apoyar la navegación de vehículos autónomos y una robustez de respuesta superior a los receptores GPS, aún con correcciones diferenciales.

4. CONCLUSIÓN

El seguimiento de elementos de referencia ya se emplea para funciones automáticas en vehículos de carretera. Un ejemplo claro es el sistema de mantenimiento en el carril mediante visión artificial. Sin embargo, se ha presentado el desarrollo sobre tecnología LIDAR, más robusta ante cambios de iluminación y más versátil para proporcionar información de obstáculos durante la marcha con un coste computacional reducido.

En este artículo se presenta un método para apoyar la información de posicionamiento a partir de los datos suministrados por un láser 3D y que sirve de complemento al receptor GPS en los vehículos autónomos. Este método permite reutilizar la información espacial del sensor láser para una operación adicional detectando las barreras laterales o paredes de túneles, con el fin de complementar la información de navegación proporcionada por el GPS en situaciones en las que la cobertura de la señal es mala o la precisión del posicionamiento es baja, incluso si la señal no está disponible como en túneles. Este método se basa en un algoritmo que utiliza la nube de puntos suministrada por el LiDAR Velodyne VLP-16 para detectar y realizar un seguimiento de dichos elementos de referencia para calcular las dos variables principales de navegación para vehículos autónomos en esos entornos: el error lateral y angular. Este método ha sido comparado con el seguimiento GPS con el fin de estimar el grado de precisión y robustez de las mediciones. Las pruebas se han realizado, en primer lugar, en las instalaciones de INSIA con vehículos reales y posteriormente, circulando en tráfico cerrado por autovía a altas velocidades. Se ha demostrado que la información del escáner láser es suficiente para realizar el guiado de un vehículo autónomo que se mantenga en el carril. Es más, se comprueba en escenarios reales que este

tipo de guiado mediante LIDAR es más robusto y fiable que otras soluciones y funciona sin problemas donde otros sistemas dejan de proporcionar información o la proporcionan con baja calidad. Por ello, el guiado del vehículo autónomo de INSIA basado en la señal del láser ha sido implementado con resultados satisfactorios sobre los dos sitios de ensayo considerados.

Aunque los ensayos presentados se han realizado tomando como referencia muros laterales, ya que su detección y procesamiento implica la ejecución de todos los pasos del algoritmo, como se ha indicado anteriormente, el mismo método de guiado también podría emplearse para el seguimiento de las líneas que delimitan los carriles, aunque los pasos 2 al 4 del método se eliminarían. En este caso, la detección del elemento de referencia se basa en el contraste de reflectividad de la calzada y dichas líneas, contraste que es aún patente con cambios severos de iluminación. Como limitación en este caso se tiene la divergencia de los rayos emitidos por el escáner láser que hace que las líneas dejen de ser percibidas a distancias relativamente cercanas al vehículo. Tal limitación obliga a la estimación de la ecuación de la función del elemento de referencia en el Paso 6 utilizando puntos que el vehículo ya ha superado con el fin de aumentar la estabilidad de la estimación.

Cabe indicarse que este sensor empleado para el guiado sería el mismo que se emplearía para la detección de obstáculos en la trayectoria del vehículo autónomo, con lo que no se requiere equipamiento adicional y las dos funciones de navegación y evitación de colisiones se integran en el mismo dispositivo. Esta ventaja económica puede ser esencial para que se popularice este tipo de guiado en los vehículos autónomos, reduciéndose notablemente los requerimientos sobre los mapas electrónicos y los receptores GPS embarcados.

Por último, nótese que, al igual que se plantean algoritmos de fusión de información entre la señal GPS y los sensores inerciales para la reconstrucción de trayectorias, en este caso, se podría plantear una situación equivalente. Sin embargo, en este caso no es crítico, ya que, en la reconstrucción de la trayectoria, los sistemas inerciales presentan un error acumulativo que el GPS no tiene. En el caso que nos ocupa en este artículo, los cálculos de los parámetros de referencia no tienen ese error acumulativo ya que se calculan en cada punto. Por ello, la fusión en un sentido continuo no tiene sentido, más allá de comprobaciones para aumentar la robustez en caso de pérdidas de datos por malas recepciones por parte del láser.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Aranda MB. La Conducción automatizada. Sistemas de asistencia al conductor y de gestión inteligente del tráfico. Madrid: ASEPA. 2014. p. 175-189. ISBN: 978-84-941859-6-0
- [2] Nashashibi F, Resende P, Charlot F, et al. "A cooperative personal automated transport system: A CityMobil demonstration in Rocquencourt". 2012 12th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision, ICARCV 2012. 2012. Vol. 2012. p. 644-649. doi: <http://dx.doi.org/10.1109/ICARCV.2012.6485233>.
- [3] Naranjo JE, González C, García R, et al. "Using Fuzzy Logic in Automated Vehicle Control". IEEE Intelligent Systems. 2007. Vol. 22. p. 36-45.
- [4] Urmson C, Bak C, Dolan J, et al. "Autonomous Driving in Traffic: Boss and the Urban Challenge". Journal of Field Robotics. 2008. Vol. 22. p. 425-466.
- [5] Nowakowski C, Shladover S, Lu XY, et al. "Cooperative Adaptive Cruise Control (CACC) for Truck Platooning: Operational Concept Alternatives". PATH Research Report. 2015. 37p.
- [6] Broggi A, Medici P, Zani P, et al. "Autonomous vehicles control in the VisLab Intercontinental Autonomous Challenge". Annual Reviews in Control. 2012. Vol. 36. p. 161-171. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.arcontrol.2012.03.012>.
- [7] Greenblatt NA, King JD. "Self driving cars and the law". IEEE Spectrum. 2016. Vol. 53. p. 46-51.
- [8] Tokoro S, Kuroda K, Nagao T, et al. "Pre-crash sensor for pre-crash safety". Proceedings of International Conference on Enhanced Safety of Vehicles. Gothenburg, Sweden, 8-11 June. 2015.

- [9] Polychronopoulos A, Tsogas M, Amditis AJ, et al. "Sensor fusion for predicting vehicles' path for collision avoidance systems". IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2007. Vol. 8. p. 549-562. doi: <http://dx.doi.org/10.1109/TITS.2007.903439>.
- [10] Caraffi C, Cattani S, Grisleri P. "Off-road path and obstacle detection using decision networks and stereo vision". IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2007. Vol. 8. p. 607-618. doi: <http://dx.doi.org/10.1109/TITS.2007.908583>.
- [11] Hernández-Aceituno J, Acosta L, Piñero JD. "Pedestrian Detection in Crowded Environments through Bayesian Prediction of Sequential Probability Matrices". Journal of Sensors. 2016. Vol. 2016.
- [12] Guo J, Tsai M, Han J. "Automatic reconstruction of road surface features by using terrestrial mobile lidar". Automation in Construction. 2015. Vol. 58. p. 165-175. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2015.07.017>.
- [13] García F, Jiménez F, Naranjo JE, et al. "Environment perception based on LIDAR sensors for real road applications". Robotica. 2011. Vol. 30. p. 185-193. doi: <http://dx.doi.org/10.1017/S0263574711000270>.
- [14] Ramírez-Pedraza A, González-Barbosa JJ, Ornelas-Rodríguez, FJ, et al (2015). "Detección de Automóviles en Escenarios Urbanos Escaneados por un Lidar". Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI, 2015. Vol. 12(2), p. 189-198. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.riai.2015.03.003>
- [15] Tan J, Li J, An X, He H. "Robust Curb Detection with Fusion of 3D-Lidar and Camera Data". Sensors. 2014. Vol. 14. p. 9046-9073. doi: <http://dx.doi.org/10.3390/s140509046>.
- [16] Zhang X, Zhang A, Meng X. "Automatic fusion of hyperspectral images and laser scans using feature points". Journal of Sensors. 2015. Vol. 2015. doi: <http://dx.doi.org/10.1155/2015/415361>.
- [17] Jiménez F, Naranjo JE, Gómez Ó. "Autonomous collision avoidance system based on accurate knowledge of the vehicle surroundings". IET Intelligent Transport Systems. 2015. Vol. 9. p. 105-117. doi: <http://dx.doi.org/10.1049/iet-its.2013.0118>.
- [18] Jiménez F, Naranjo JE, Gómez Ó, et al. "Vehicle tracking for an evasive manoeuvres assistant using low-cost ultrasonic sensors". Sensors. 2014. Vol. 14. p. 22689-22705. doi: <http://dx.doi.org/10.3390/s141222689>.
- [19] Jiménez F, Naranjo JE. "Improving the obstacle detection and identification algorithms of a laserscanner-based collision avoidance system". Transportation Research Part C: Emerging Technologies. 2011. Vol. 19. p. 658-672. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.trc.2010.11.001>.
- [20] Guizzo E. "How Google 's Self Driving Car Works". IEEE Spectrum. 2011. p. 1-9.
- [21] Naranjo JE, Jiménez F, Aparicio F, et al. "GPS and inertial systems for high precision positioning on Motorways". Journal of Navigation. 2009. Vol. 62. p. 351-363. doi: <http://dx.doi.org/10.1017/S0373463308005249>.
- [22] Jiménez F, Naranjo JE, García F, et al. "Limitations of positioning systems for developing digital maps and locating vehicles according to the specifications of future driver assistance systems". IET Intelligent Transport Systems. 2011. Vol. 5. p. 60-69. doi: [10.1049/iet-its.2010.0042](http://dx.doi.org/10.1049/iet-its.2010.0042).
- [23] Roth S, Singh S. "Application of robust, high-accuracy positioning for autonomous ground vehicles". AUVSI's Unmanned Systems North America 2004: Proceedings. 2004.
- [24] Jiménez F, Naranjo JE, García F, et al. "Can low-cost road vehicles positioning systems fulfil accuracy specifications of new ADAS applications?". Journal of Navigation. 2011. Vol. 64. p. 251-264. doi: <http://dx.doi.org/10.1017/S0373463310000470>.
- [25] Du X, Tan KK. "Vision-based approach towards lane line detection and vehicle localization". Machine Vision and Applications. 2015. Vol. 27. p. 175-191. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s00138-015-0735-5>.
- [26] De-La-Escalera A, Armingol JM, Pastor JM, et al. "Visual sign information extraction and identification by deformable models for intelligent vehicles". IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2004. Vol. 5. p. 57-68. doi: <http://dx.doi.org/10.1109/TITS.2004.828173>.
- [27] Fernández C, Domínguez R, Fernández-Llorca D. "Autonomous navigation and obstacle avoidance of a micro-bus" International Journal of Advanced Robotic Systems. 2013. Vol. 10. p. 1-9. doi: <http://dx.doi.org/10.5772/56125>
- [28] Broggi A, Bertozzi M, Fascioli A, et al. "The ARGO Autonomous Vehicle's Vision and Control Systems". International Journal of Intelligent Control and Systems. 1999. Vol. 3. p. 409-441.
- [29] McDevitt CF. "Basics of Concrete Barriers". Public Roads. March/April 2000. Vol. 63.
- [30] Ester M, Kriegel HP, Sander J, et al. "A Density-Based Algorithm for Discovering Clusters in Large Spatial Databases with Noise". KDD-96 Proceedings. Portland, Oregon, USA, 2-4 August. 1996.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha recibido el apoyo del Ministerio de Economía y Competitividad (TRA2013-48314-C3-2-R), y la Comunidad de Madrid a través de la Red de Excelencia SEVAUTO-TRIES.