



ALGORITMOS PARA LA DETECCIÓN DE OBSTÁCULOS EN UN ENTORNO TODOTERRENO MEDIANTE LIDAR

MIGUEL CLAVIJO, FELIPE JIMÉNEZ, ALBERTO DÍAZ, ADRIÁN GORAK

Universidad Politécnica de Madrid (UPM)
Instituto Universitario de Investigación del Automóvil (INSIA)
Campus Sur UPM. Carretera de Valencia km 7, 28031 Madrid, España

(Recibido 30 de marzo de 2018, para publicación 15 de julio de 2018)

Resumen – Las funciones de conducción autónoma o semiautónoma de vehículos terrestres implican una supervisión precisa y detallada del entorno con el fin de detectar áreas transitables y posibles obstáculos. Para ello, se puede recurrir a diferentes tecnologías, entre las que se encuentra el LiDAR o láser rotativo. Para dicha tecnología, se han desarrollado en el pasado numerosos algoritmos que permiten la detección de obstáculos con robustez en entornos de carretera y urbanos. Sin embargo, no son tan comunes las aplicaciones en las que se trata de detectar obstáculos o zonas no transitables en entornos todoterreno. Además, el uso de sensores de coste más reducido, obliga a adoptar soluciones específicas que palien las limitaciones que pueden entrañar bajas resoluciones, por ejemplo. En este trabajo, se presentan los algoritmos para la detección de resaltes o zanjas en la circulación todoterreno con el fin de avisar al conductor o actuar automáticamente sobre el vehículo empleando un escáner láser 3D VLP-16. Estos algoritmos han sido implementados sobre un vehículo táctico militar con capacidades de movimiento teleguiado o autónomo guiado por *waypoints* y se han probado, mostrando su respuesta satisfactoria en entornos de carretera ante vehículos o peatones y en entornos fuera de carretera ante zanjas, montículos, fosos y otros elementos que impiden la circulación. De esta forma, el vehículo es capaz de navegar sin conductor y detectar zonas que estima que son potencialmente peligrosas, deteniéndose de forma automática y avisando a un operador que puede evaluar la situación de forma remota. La contribución novedosa del artículo reside en el desarrollo de una configuración de percepción para entornos todoterreno, teniendo en cuenta los obstáculos que se pueden encontrar y las características de la marcha, así como la programación e implementación y prueba en condiciones reales de algoritmos específicos. Esta configuración y algoritmos deben contemplar situaciones diferentes que la circulación por carretera, por lo que los algoritmos clásicos para tal entorno no son directamente extrapolables. Además, la solución ha sido ensayada sobre un vehículo automatizado por el equipo de investigación en sus capas de control de alto y bajo nivel.

Palabras clave – Conducción autónoma, vehículo autónomo, detección, LiDAR, obstáculo, todoterreno.

1. INTRODUCCIÓN

Tal y como se indica en SAE [1], los diferentes niveles de automatización están permitiendo una gradual acogida de la conducción autónoma en nuestras vidas. Actualmente existen vehículos comerciales con un nivel de automatización 2, y se están dando los primeros pasos para comercializar un vehículo nivel 3 [2]. Sin embargo, muchas de las aplicaciones directas de esta conducción autónoma están dirigidas a entornos urbanos o estructurados, y no es común encontrar desarrollos de aplicación a entornos complejos como zonas todoterreno. Cuando la finalidad última es conseguir un grado 5 de automatización, es necesario resolver cualquier situación. Uno de los aspectos más importantes y básicos de la conducción autónoma es la detección de obstáculos. Es de vital importancia desde el punto de vista de la seguridad, que los vehículos autónomos puedan detectar obstáculos de cualquier índole bajo cualquier circunstancia a fin de evitar una posible colisión o accidente.

Muchos de los enfoques para la detección de obstáculos en vehículos autónomos hacen uso de sensores como cámaras o stereo-visión. Aunque dichos sensores, no suponen un gran coste económico, sus carencias se hacen patentes ante cambios de luminosidad y contraste o bajo condiciones climáticas adversas, por lo que no es una solución definitiva bajo cualquier circunstancia. Otro de los enfoques utilizados hoy en día en vehículos comerciales es el radar. Este sensor de rango tiene un largo alcance de detección, es fácilmente integrable en el vehículo, pero no dispone de un gran campo de visión, que permita una com-

preensión fácil del entorno del vehículo. Por otro lado, los sensores LiDAR, en concreto, los LiDAR 3D, proporcionan una información completa del entorno del vehículo con un rango de visión horizontal de 360°, constan de un alcance entre 100 y 200 metros y permiten un análisis más robusto de los posibles obstáculos que se encuentren en las inmediaciones del vehículo. Además, este tipo de sensores, funcionan con el disparo de un haz de luz propio, por lo que no se ven afectados por cambios en la intensidad lumínica exterior y ante lluvia o niebla, es posible filtrar dicha distorsión. A pesar de un coste actual elevado, es una tecnología en pleno desarrollo y se están realizando avances para una disminución de costes para beneficiar la integración de estos sensores en el vehículo como son los LiDAR de estado sólido (*solid-state LiDAR*).

Cuando se trata de un entorno *off-road*, el enfoque de los algoritmos aplicados a entornos urbanizados no es directamente aplicable. Una zona todoterreno ofrece una información extraíble de los alrededores limitada, los obstáculos potenciales que pueden aparecer en la trayectoria del vehículo tienen cualquier aspecto y la diferenciación entre la zona viable de la no transitable, a veces no está totalmente definida. Algunos de los enfoques orientados a este propósito pueden ser [3], [4] donde se analiza los obstáculos negativos en entornos rurales. Los obstáculos se pueden dividir en dos tipos: positivos y negativos. Los primeros son aquellos que se encuentran por encima de la superficie de conducción o que tienen su centroide con la componente z positiva. Los segundos, por el contrario, se sitúan por debajo de la superficie. [5] ofrece dos posibles algoritmos de detección según la región de interés, analizando las distancias y los ángulos de los haces del láser LiDAR sobre los obstáculos. Los resultados de los ensayos ofrecen una efectividad del 100, 89, 78 y 31 (%) de detección para distancias vehículo-obstáculo de 6-8, 16-20, 30 y 50 (m) respectivamente. La velocidad del vehículo y la distancia al posible obstáculo son factores determinantes en la efectividad. Por otro lado, [6] también se centra en los obstáculos negativos y propone varios algoritmos con el uso de teoría estadística e información GPS. Los resultados son ofrecidos a través de las distancias máximas de detección según las dimensiones del obstáculo (profundidad y ancho). Mientras que en [7], se hace uso de la propia tecnología LiDAR para ofrecer una trayectoria libre de obstáculos para la conducción de un vehículo militar en entornos rurales.

En todos estos casos, la tecnología LiDAR sirve como medio y es una herramienta para el desarrollo del sistema inteligente del automóvil. Pero sólo es un captador de información. Es necesario establecer la lógica de funcionamiento ligada al reconocimiento del entorno y la toma de decisiones. Identificar correctamente un obstáculo, interpretar que no existe peligro en la trayectoria del vehículo o tomar una acción inmediata sobre el control, son algunas de las cuestiones que debe responder la unidad central de procesamiento acorde a los algoritmos implementados y a la información proporcionada por el láser. Y es este punto debe ser resuelto ya sea un medio urbano como no. Por tanto, el presente trabajo busca definir y desarrollar un algoritmo para la detección de obstáculos en la trayectoria del vehículo durante la conducción, de forma que el algoritmo permita distinguir posibles obstáculos y pueda definir un estado del escenario entre el vehículo y su entorno mediante el uso de un solo LiDAR 3D. El estado de alarma será definido bien como seguro, de aviso, o de parada.

El trabajo se organiza de la siguiente manera. En el apartado 2, se describe en primer lugar el set-up del láser sobre el vehículo. Debido al objetivo específico que se trata, se ha optado por una configuración y localización novedosa del LiDAR sobre el vehículo. A continuación, en el mismo apartado se describe el diseño del algoritmo que detecta posibles obstáculos y define un estado de alarma en relación al escenario en el que se encuentre. En el apartado 3, se procede a la descripción de los ensayos realizados. Decidir los parámetros configurables más adecuados permitirá un análisis exhaustivo de los resultados para lograr el objetivo principal. Para ello ha sido necesario reconocer los elementos reales del entorno durante los ensayos y etiquetarlos según su tipología. A partir de los resultados expuestos, y los parámetros de configuración del algoritmo, en el apartado 4, se plantean las conclusiones de este estudio y las posibles líneas futuras de investigación. Retroalimentar el algoritmo anterior con la modificación de sus parámetros atendiendo a procesos de prueba y error, además de otras consideraciones.

2. DETECCIÓN DE OBSTÁCULOS EN ENTORNOS TODOTERRENO

2.1. Set-up del lidar 3d sobre el vehículo

Una zona *off-road* es característica por la presencia de obstáculos tanto positivos como negativos, pudiendo presentar cualquier forma. Es por ello que, en este trabajo, se estudia una forma novedosa de instalar el láser VLP-16 de manera que se obtenga una mayor resolución de la orografía en este tipo de terrenos.

Se presentan a continuación los posibles lugares donde instalar el LiDAR sobre el vehículo, tal como se puede observar en la Fig. 1.

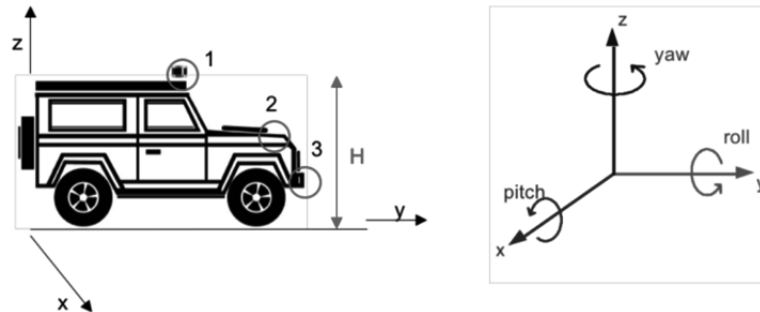


Fig. 1. Posibles instalaciones del LiDAR y los ángulos de orientación.

Varios factores son necesarios tener en cuenta para el emplazamiento del sensor. Por un lado, los sensores LiDAR proporcionan una información dispersa del entorno. Dicha dispersión entre puntos, es mayor conforme la distancia al punto aumenta. Por tanto, la altura a la que se sitúe el láser afectará directamente a la distancia mínima de los puntos sobre el terreno. Por otro lado, es fundamental sobre el estudio del emplazamiento de este tipo de sensores, las producidas por el propio vehículo. De esta manera, el láser situado sobre el techo podrá dar lugar a sombras sobre el terreno debido a aquellos puntos que reboten en el propio techo o capó del vehículo. Sin embargo, situando el láser sobre el parachoques delantero, el campo de visión se reducirá a la parte delantera, ya que el vehículo mismo evitará el campo de visión hacia la parte trasera.

Otro aspecto sobre el *set-up* del LiDAR sobre la plataforma todoterreno será la orientación del propio láser sobre el emplazamiento. El VLP-16, gira sobre sí mismo disparando haces a 16 alturas distintas, cada una de ellas llamadas capas. Cada revolución del láser por cada capa, produce una superficie de revolución cónica. Cada cono al ser cortado con el plano del suelo producirá las distintas curvas cónicas. En la Fig. 2, se puede ver los tres casos de estudio sobre la orientación del láser. Variando los ángulos de orientación del láser se obtendrán las curvas cónicas de las capas del láser tal cómo aclara la Fig. 3.

Conseguir una mayor definición de la orografía, implica buscar la menor dispersión posible entre los puntos LiDAR. Es por ello que, finalmente, se decidió situar en láser sobre el parachoques delantero del vehículo en posición vertical ($roll = 90^\circ$). De esta manera se obtiene una distancia entre capas menor, y los puntos quedan concentrados en mayor medida en la región de interés para el estudio de los obstáculos.

2.2. Descripción del algoritmo

Se presenta a continuación el algoritmo desarrollado para ejecución en tiempo real. Éste debe identificar y realizar el seguimiento (*tracking*) de los obstáculos tanto positivos como negativos que se encuentren en la trayectoria del vehículo y supongan una situación de peligro. Como salida global del sistema, se obtendrá un estado de alerta, que pasará de “OK” a “WARNING” o “STOP”, en función del análisis de peligrosidad que exista. Uno de los objetivos principales del mismo es la consecución de unos resultados precisos y robustos, a la vez que tenga una baja carga computacional y ser ejecutado en tiempo real. A continuación, se describen los pasos del algoritmo de detección del obstáculos *off-road*, Fig. 3.

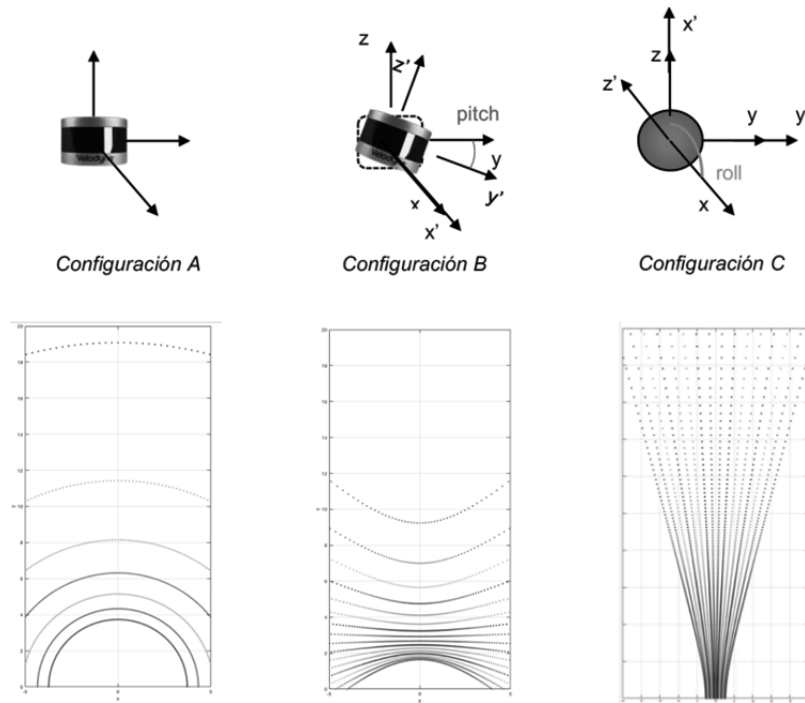


Fig. 2. Curvas cónicas producidas del corte de las capas láser con el plano suelo.



Fig. 3. Pasos del algoritmo.

En primer lugar, se define una zona de interés o ROI, por sus siglas en inglés (*Region Of Interest*). De esta manera, focalizamos la información proporcionada por el láser solo a la zona del entorno que nos interesa. En este caso el área inmediata delantera al vehículo. Definiendo un paralelepípedo con las coordenadas máximas y mínimas que pueden tener los puntos, descartamos aquellos puntos que no ofrecen información relevante para el cálculo.

A continuación, se procede a la identificación de posibles obstáculos. Para ello, el estudio se va a centrar en el comportamiento de puntos adyacentes dentro de cada una de las dieciséis capas del VLP-16. Debido a que el objetivo es identificar irregularidades significativas en la orografía, estudiando individualmente en cada capa del láser la evolución de los puntos adyacentes, será posible extraer aquellos que pertenezcan a un posible obstáculo. Por un lado, se estudia la *varianza* de la coordenada z de los puntos, con este filtro será fácilmente identificable todo aquello que se aleje de un valor z estándar. Por otro lado, se estudia la suavidad que presenta cada cadena “ S ” de puntos en cada capa. Este filtro es extraído de [8], donde se utiliza para sacar puntos característicos del entorno y se define bajo la ecuación (1), donde “ Q ” son las coordenadas de los puntos de “ S ” y “ Q_{centro} ” el punto central de ese grupo:

$$suavidad\ capa = \frac{\|\sum(Q_{centro} - Q)\|}{S \cdot \|Q_{centro}\|} \quad (1)$$

Cabe mencionar, que ambos filtros implican una baja carga computacional y, sin embargo, su respuesta ante la aparición de un obstáculo es muy representativa, tal como se observa en la Fig. 4. Estableciendo unos valores umbrales para cada uno de los filtros (*min.var* y *min.suavidad*), quedan identificados aquellos puntos que pertenecen a un obstáculo potencial.

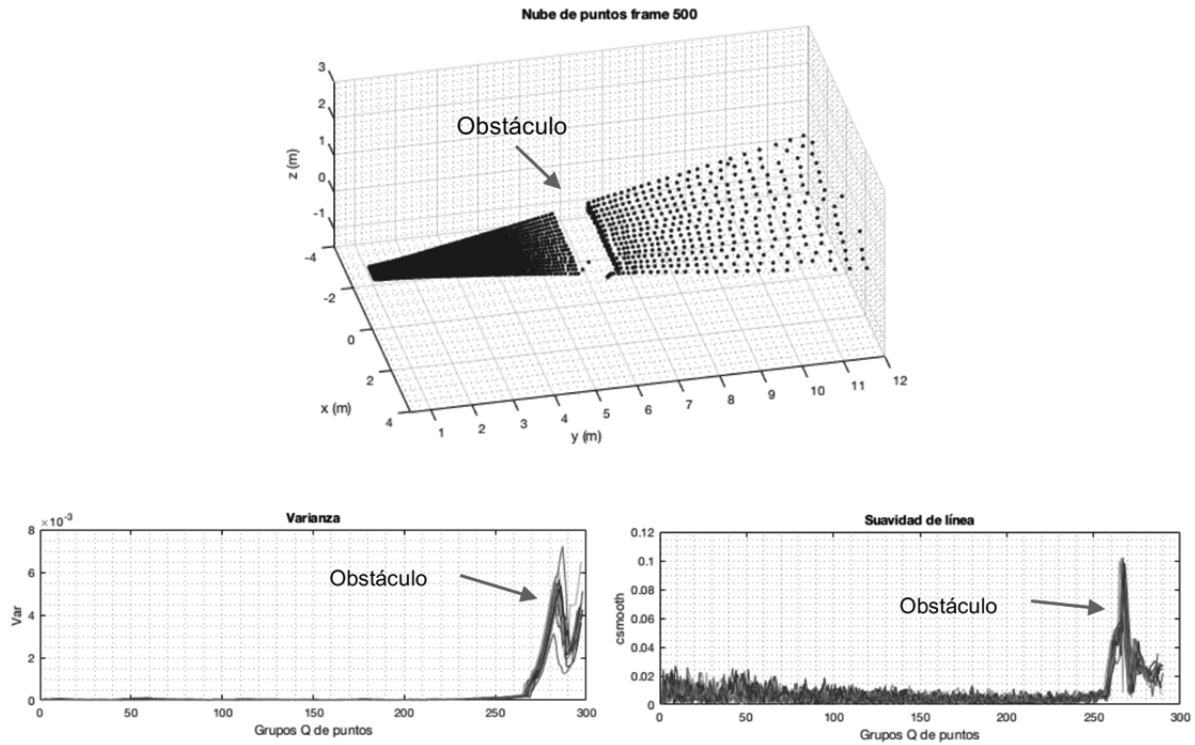


Fig. 4. Comportamiento filtros de identificación ante un obstáculo (representación de las variables en cada capa del LiDAR).

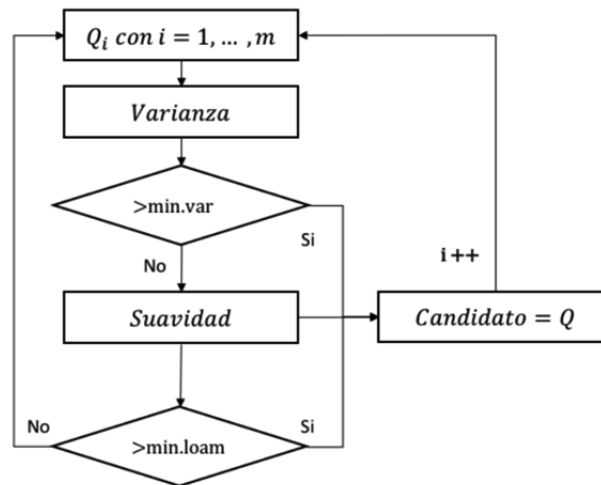


Fig. 5. Diagrama de flujo para considerar un punto perteneciente a obstáculo.

La identificación del punto como perteneciente a un obstáculo queda descrito en el diagrama de flujo representado en la Fig. 5. Estudiando el punto Q_i , dicho punto será candidato a obstáculo si supera el umbral de $min.var$ o bien el $min.suavidad$.

En tercer lugar, durante la etapa de segmentación, se hace uso del algoritmo de clusterización DBSCAN [9], basado en la densidad y cercanía de los puntos vecinos, y se calculan los diferentes clusters o “ruido” en su defecto. Una vez obtenidos los clusters, se caracterizan calculando el centroide de cada uno de ellos.

En la etapa de tracking de obstáculos, se estudia la evolución de todos los centroides de los posibles obstáculos obtenidos en el paso anterior. En este algoritmo se han tenido en consideración varios parámetros:

- **Cercanía.** Conociendo dónde se encuentra el centroide de un obstáculo en el instante de tiempo $t-1$, se puede estimar que un centroide similar en el instante de tiempo t , se encuentre a una distancia cercana a la anterior sabiendo que el periodo de muestreo es 0,1 segundos (frecuencia = 10 Hz). Se puede definir una región en el espacio donde estará el nuevo centroide. Puede ocurrir que en dicha región haya más de un centroide. En tal caso, el centroide con mayor probabilidad que corresponda al del frame anterior será el más cercano. El centroide de un obstáculo i en t se define como (c_{xi}, c_{yi}, c_{zi}) , mientras que su centroide asociado en $t-1$ será $(c'_{xi}, c'_{yi}, c'_{zi})$.
- **Desplazamiento.** El cálculo del centroide de un obstáculo puede no situarse en el mismo lugar de este en cada instante. Para eliminar esta vibración y poder discernir los obstáculos con velocidad relativa real, se establece un límite inferior de desplazamiento. Sólo se tendrá en cuenta para realizar el tracking, aquellos centroides que superen este límite y, por tanto, estén en movimiento.
- **Acercamiento.** Dos centroides consecutivos, similares y en movimiento, deben de cumplir además la condición de que el obstáculo al que pertenece se esté aproximando al vehículo.
- **Acercamiento en dirección al vehículo.** Si se cumple la condición anterior, se calcula el vector desplazamiento entre estos dos centroides. El punto de corte de dicho vector con el parachoques delantero determinará el punto de choque en caso de que la trayectoria se mantuviera rectilínea.

En la Fig. 6 se ilustran varias situaciones posibles en el tracking de obstáculos:

- AA': se acerca y además en dirección al vehículo.
- BB': se aleja.
- CC': se acerca y además en dirección al vehículo.
- DD': se acerca, pero no en dirección al vehículo.

Una vez realizado el tracking de los obstáculos y cumplido todas las premisas anteriores, es posible calcular el tiempo de colisión que determinará el estado de emergencia o salida del algoritmo, como se indica en (2):

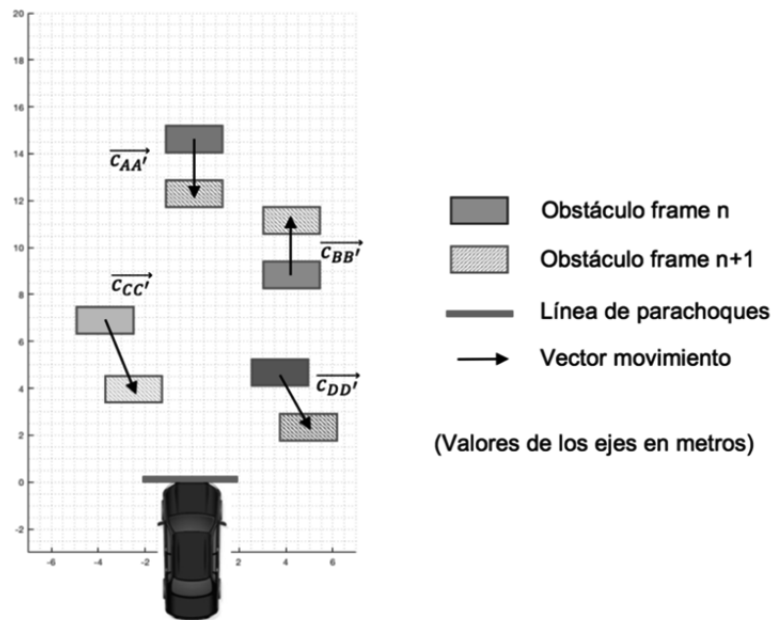


Fig. 6. Tracking de obstáculos.

$$\begin{aligned}
 ttc &= \frac{\text{distancia choque}}{\text{distancia desplazada} \cdot \text{frecuencia}} \\
 &= \frac{\sqrt{c_{xi}^2 + c_{yi}^2 + c_{zi}^2}}{\sqrt{(c_{xi} - c'_{xi})^2 + (c_{yi} - c'_{yi})^2 + (c_{zi} - c'_{zi})^2} \cdot 10} \quad (2)
 \end{aligned}$$

Todos los obstáculos se irán almacenando en una matriz donde aparecerá: las coordenadas del centroide, el tiempo de colisión y el número de stops, definido como el número de veces que un obstáculo ha cumplido todas las condiciones para establecer un estado de “STOP” como se describe más adelante:

$$\text{matriz de obstáculos} = \begin{pmatrix} c_{x1} & c_{y1} & c_{z1} & ttc_1 & stops_1 \\ c_{x2} & c_{y2} & c_{z2} & ttc_2 & stops_2 \\ \vdots & & & & \end{pmatrix} \quad (3)$$

Por último, se decide el estado o situación en que se encuentra el vehículo con respecto a los obstáculos. Los estados posibles son tres: “ok”, “warning” y “stop”, cuyos valores serán 0, 1 y 2, respectivamente. En el primer escenario, la situación es correcta y no existe peligro. En el segundo, se ha detectado un posible peligro y se envía una señal de advertencia. En el último, el peligro es inminente y la señal es de parada.

- **Estado “OK”.** Se parte de una situación “ok”. A continuación, se comprueba si existen obstáculos. Todos los obstáculos están almacenados en la matriz de obstáculos y son analizados uno por uno. Cada uno de ellos puede actualizar el estado. El estado más conservador prevalece sobre el resto. Es decir, si un obstáculo tuviera asociado un “warning” y otro un “stop”, el estado final o global es el de “stop”. Orden de más a menos conservador: “stop”, “warning” y “ok”.
- **Estado “WARNING”.** Se deben de cumplir las condiciones descritas a continuación. Si ambas condiciones se cumplen, el estado se actualiza y pasa a ser “warning”
 - a) $\text{Estado} \leq \text{“WARNING”}$: permite subir el estado a otro más conservador, pero no bajarlo.
 - b) $ttc < ttc_for_warning$: debe cumplir que el tiempo de colisión ttc sea inferior a $ttc_for_warning$, parámetro declarado previamente.
- **Estado “STOP”.** El obstáculo que se esté analizando ha provocado ya un estado de “warning”. Pero es posible que el mismo provoque bien un estado de “stop” o bien que su número de stops aumente en una unidad (como medida de fiabilidad se puede considerar que la detección del vehículo sólo se provoque cuando el estado de stop se repita un número predefinido de veces) Para cualquiera de las dos opciones anteriores, se deben cumplir la condición de “stop”:
 - a) $ttc < ttc_for_stop$

3. ENSAYOS Y RESULTADOS

El algoritmo descrito en este trabajo ha sido probado en un vehículo todoterreno utilizado como plataforma militar. En la Fig. 7, se puede observar además cómo queda situado el LiDAR VLP-16 en la defensa del vehículo, tal y como se ha descrito en el apartado 2.

Diferentes ensayos en terreno *off-road* se han llevado a cabo, verificando la precisión en la identificación de obstáculos y la actuación del mismo. Estos ensayos se han desarrollado en las instalaciones del INTA- ITM (Instituto Tecnológico La Marañosa).

Los ensayos realizados incluyen el paso por tipos específicos de obstáculos en las pistas de INTA-ITM:

- Zona 1: obstáculos negativos, tipo zanjas rectangulares con diferentes profundidades y longitudes.



Fig. 7. Plataforma militar utilizada en los ensayos.

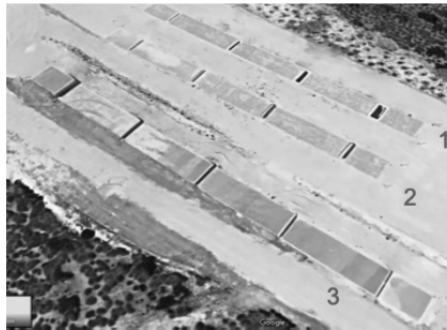


Fig. 8. Zona de obstáculos.

- Zanjas (identificador), largo x profundidad en cm: (1) 30x70, (2) 50x90, (3) 90x90 y (4) 150x130. Todas tienen el mismo ancho de 320 cm.
- Zona 2: obstáculos positivos, tipo resaltes con diferentes alturas.
 - Resaltes (identificador), largo x altura en cm: (1) 60x60, (2) 50x50, (3) 40x40 y (4) 30x30. Todos tienen el mismo ancho de 320 cm.
- Zona 3: obstáculos positivos y negativos, tipo escalones.
 - Escalones (identificador), altura en cm: (1) 90, (2) 60, (3) 50, (4) 40 y (5) 30. Todos con un ancho de 350 cm.

Para el análisis cuantitativo de la robustez y precisión del algoritmo, se ha procedido al análisis frame a frame sobre la existencia o no de un obstáculo de los anteriormente descritos dentro de la zona definida de interés (ROI), cuyo valores en metros para el ensayo fueron: $x_{min} = -4$; $x_{max} = 4$; $y_{min} = 0$; $y_{max} = 12$; $z_{min} = -1,5$; $z_{max} = 3$.

El ensayo completo comprende 7662 frames en total, de los cuales 4694 frames contienen algún tipo de detección, donde el obstáculo puede existir o no, en cuyo caso serían falsos positivos. El resto de frames no existe ningún tipo de detección y, de nuevo, el obstáculo puede existir o no.

En cuanto a los frames donde ha habido algún tipo de detección por parte del algoritmo, de los 4964 frames, 4778 han sido detecciones correctas y 186 han resultados falsos positivos, lo que resulta un 96.2% de precisión de falsos positivos. Por lo tanto, teniendo en cuenta el cómputo total de frames del ensayo, frente a las detecciones/no detecciones correctas, se obtiene un 97,6%.

A continuación, se expone un análisis pormenorizado de la detección de cada tipo de obstáculo. Se vuelve a tener en cuenta el análisis realizado frame a frame, dividiendo el número de frames donde el algoritmo ha detectado algún tipo de obstáculo, frente al total de frames donde debería de haber existido alguna detección dentro del ROI. Por ello, en este análisis se tendrá en cuenta los falsos negativos. Cabe mencionar que los valores obtenidos dependerán en gran medida del ROI seleccionado.

En la zona 1, existen cuatro tipos de zanjas. Cada zanja de diferente profundidad y longitud, siendo la primera de ellas la menor de todas. Cabe destacar cómo las zanjas 1 y 2, tienen un porcentaje bajo de detección, pero, a su vez, no suponían un peligro para la conducción. En cuanto a la zona 2, ésta consta de

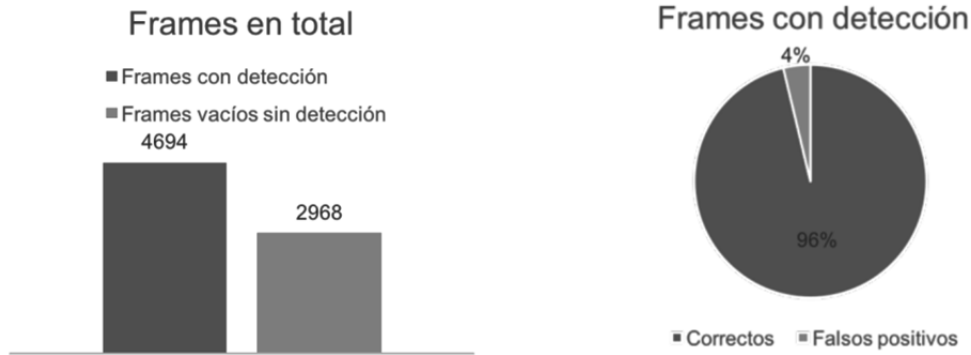


Fig. 9. Precisión frames con detección frente a total de frames de ensayo.

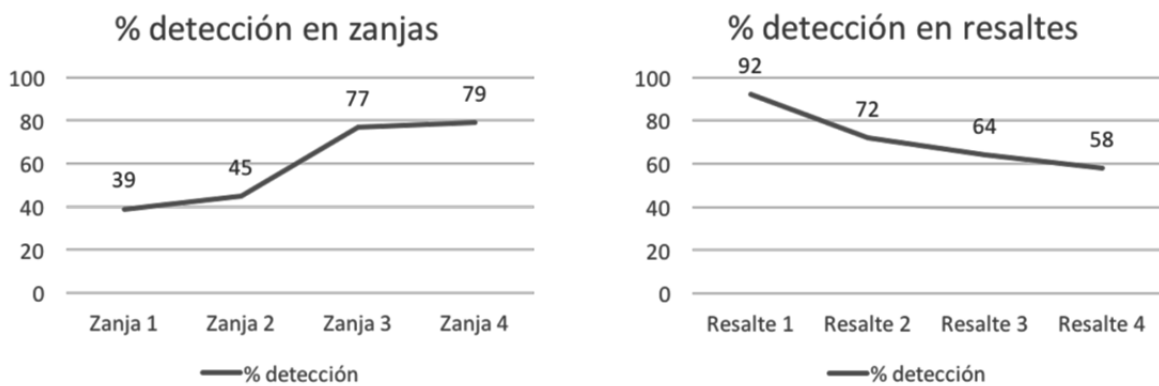


Fig. 10. Precisión detección obstáculos zanjas y resaltes.

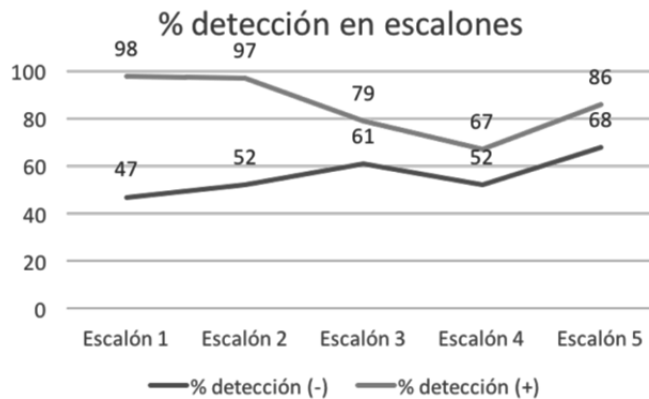


Fig. 11. Precisión detección obstáculos escalones en sentido positivo y negativo.

cuatro obstáculos positivos de tipo resalte, donde varía la altura de estos, siendo el resalte 1, el mayor de todos. De nuevo, se aprecia cómo la dificultad de detección aumenta conforme disminuye el tamaño del obstáculo (Fig. 10).

En el caso de la zona 3, se encuentran los obstáculos tipo escalón. Estos obstáculos se considerarán positivos o negativos, según el sentido de la marcha del vehículo hacia ellos. En la Fig. 11, se puede observar cómo existe una mayor dificultad a la hora de detectar este tipo de obstáculos cuando se afrontan en sentido negativo. En este caso, el tamaño del escalón no implica una variación pronunciada en la detección de los escalones.

Un parámetro a tener en cuenta para el output global del sistema es el número de stops previos a lanzar el estado “STOP”. Este parámetro se considera como un grado de certeza o confianza de que la detección es correcta antes de mandar un estado de emergencia de tipo parada. En las Figuras 12 y 13, se observa cómo afecta un valor de 1 a 5 del número de stops a la distancia de detección de cada uno de los obstáculos de cada zona del ensayo. Destacar que, para la zanja 1, la menor de todas, un valor mayor de 1 del parámetro hace imposible su detección.

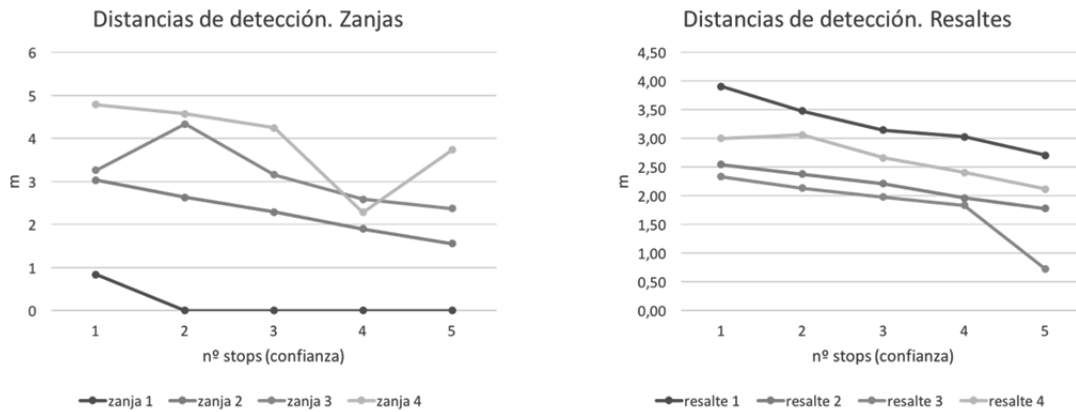


Fig. 12. Distancias de detección ante zanjas y resaltes en función del número de stops.

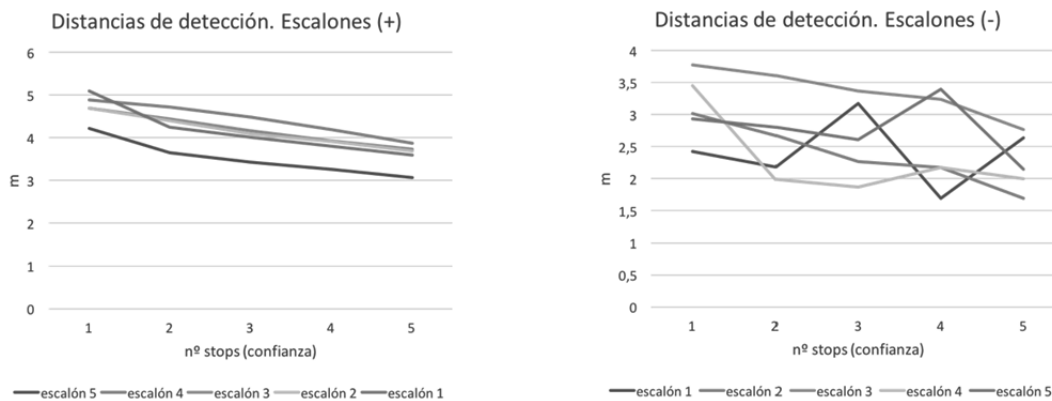


Fig. 13. Distancias de detección ante escalones en función del número de stops.

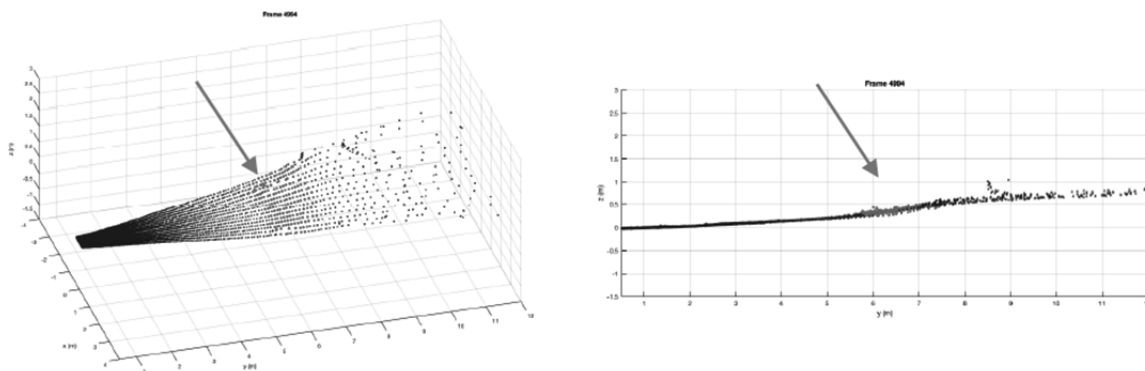


Fig. 14. Ejemplo de falso positivo.

Finalmente, mencionar el tipo de falsos positivos suelen ser detectados por el algoritmo. En la Fig. 14, se destaca en rojo, aquellos puntos que se identifican como posible obstáculo. Esto es debido a la irregularidad del terreno que se puede presentar en un entorno *off-road*. La mayor o menor sensibilidad con la que se hayan ajustado los parámetros de identificación de obstáculos (min.var y min.suavidad), hacen que estos cambios bruscos de pendientes puedan considerarse como pertenecientes a un obstáculo. Por lo tanto, hay que buscar un equilibrio entre seguridad y precisión.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta un algoritmo de detección de obstáculos para entornos todoterreno mediante sensor LiDAR 3D. Las principales bondades de este algoritmo son la robustez y precisión en la identificación, así como su baja carga computacional, lo que otorga un funcionamiento en tiempo real. Entornos complejos como el *off-road* carecen en la mayoría de casos de elementos estructurados y los obstáculos pueden tener cualquier aspecto y forma. El algoritmo aquí descrito ha sido probado en un vehículo autónomo todoterreno, obteniendo una precisión de detección de obstáculos, tanto positivos como negativos, del 97,6%, siendo los errores detectados falsos positivos, pero nunca falsos negativos, por lo que se mantiene un margen de seguridad. Por tanto, se demuestra la capacidad y funcionamiento en entornos reales complejos. La salida global del sistema es un aviso de emergencia que varía de “OK”, “WARNING” a “STOP”, en función del peligro potencial en la trayectoria del vehículo. Las posibilidades de este sistema pueden ser varias: en el caso de un vehículo totalmente autónomo, éste puede tomar una u otra decisión según el tipo de aviso de emergencia obtenido (e.g. parada de emergencia, cálculo de trayectoria de esquiva, etc.); en el caso de un vehículo tele-operado, este aviso de emergencia puede alertar al piloto remoto de un posible obstáculo, tomando las medidas de seguridad oportunas.

A raíz de los resultados obtenidos, descritos en el apartado 3, se plantean varias opciones de mejora en cuanto a la identificación de obstáculos. La mayor dificultad encontrada en este tipo de entornos todoterreno, son las irregularidades que presenta el terreno, por ello es de gran importancia determinar con precisión el valor de los parámetros configurables del algoritmo, a fin de minimizar los falsos positivos que se puedan obtener. Por otro lado, cuando el obstáculo es de menor tamaño implica forzosamente una detección más tardía. Ambos inconvenientes pueden ser subsanados con la fusión sensorial de otro VLP-16. De esta manera, se incrementaría la densidad de puntos que impactan sobre el obstáculo. Por otro lado, sería interesante discernir entre obstáculos móviles y estáticos, así como realimentar el lazo con la odometría del vehículo, aportando al sistema una mayor robustez en la etapa de tracking.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha contado con el apoyo del Ministerio de Economía y Competitividad (proyecto CAV TRA2016-78886-C3-3-R), la Red de Excelencia SEGVAUTO-TRIES de la Comunidad de Madrid y el Ministerio de Defensa de España (COINCIDENTE 2015/SP03390102/00000035).

REFERENCIAS

- [1] SAE, “Taxonomy and Definitions for Terms Related to On-Road Motor Vehicle Automated Driving Systems,” *Sae Int.*, (2016)
- [2] “The new Audi A8 – conditional automated at level 3 | Audi MediaCenter.” [Online]. Available: <https://www.audi-mediacycenter.com/en/on-autopilot-into-the-future-the-audi-vision-of-autonomous-driving-9305/the-new-audi-a8-conditional-automated-at-level-3-9307>. [Accessed: 03-Apr-2018].
- [3] Chu, K., Lee, M. Sunwoo, M., “Local path planning for off-road autonomous driving with avoidance of static obstacles,” *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, **13**(4), 1599–1616 (2012)
- [4] Caraffi, C., Cattani, S., Grisleri, P., “Off-road path and obstacle detection using decision networks and stereo vision,” *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, **8**(4), 607–618 (2007)

- [5] Larson, J., Trivedi, M., “Lidar based off-road negative obstacle detection and analysis,” *IEEE Conf. Intell. Transp. Syst. Proceedings, ITSC*, 192–197 (2011)
- [6] Shang, E., An, X., Wu, T., Hu, T., Yuan, Q., He, H., “LiDAR Based Negative Obstacle Detection for Field Autonomous Land Vehicles”, *Journal of Field Robotics*, **33**(5), 591–617 (2016)
- [7] Naranjo, J.E., Clavijo, M., Jimenez, F., Gómez, Ó., Rivera, J.L., Anguita, M., “Autonomous vehicle for surveillance missions in off-road environment,” in *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, 98–103 (2016)
- [8] Zhang, J., Singh, S., “LOAM : Lidar Odometry and Mapping in Real-time”, *Robotics Science Systems Conference* (2014)
- [9] Ester, M., Kriegel, H.-P., Sander, J., Xu, X., “A Density-Based Algorithm for Discovering Clusters in Large Spatial Databases with Noise,” in *KDD-96 Proceedings*, Portland, Oregon, USA, 2–4 August (1996)

ALGORITHMS FOR OBSTACLE DETECTION IN AN OFF-ROAD ENVIRONMENT USING LIDAR

Abstract – The functions of autonomous or semi-autonomous driving of vehicles involve precise and detailed monitoring of the environment in order to detect free and safe areas and possible obstacles. For this, it is possible to use different technologies, among which LiDAR or rotating laser provides good performance. For this technology, numerous algorithms have been developed in the past that allow the detection of obstacles with robustness in highways and urban environments. However, applications that try to detect obstacles in off-road environments are not so common. In addition, the use of low-cost sensors, forces to adopt specific solutions that mitigate the limitations that may involve low resolutions, for example. In this work, the algorithms for the detection of ditches in off-road scenarios are presented in order to warn the driver or automatically act on the vehicle using a VLP-16 3D laser scanner. These algorithms have been implemented on a military tactical vehicle with remote guided and autonomous movement capabilities and have been tested, showing their satisfactory response in road environments with other vehicles or pedestrians and in off-road environments with ditches, positive obstacles and other elements that impede circulation. In this way, the vehicle is able to navigate without a driver and detect areas that it considers to be potentially dangerous, stopping automatically and notifying an operator that the situation should be remotely supervised. The novel contribution of the paper lies in the development of a perception configuration for off-road environments, taking into account the obstacles that can be encountered, as well as the programming, implementation and testing in real conditions of specific algorithms. This configuration and algorithms must contemplate different situations, so the classical algorithms for a structured environment are not directly extrapolated. In addition, the solution has been tested on an autonomous vehicle developed by the research team.

Keywords – Autonomous driving, Autonomous vehicle, Detection, LiDAR, Obstacle, Off-road.