

Vehículo robotizado para el levantamiento automático de carreteras en 3D

Francisco-Ángel Moreno[†], Javier González[†], José-Luis Blanco[†] y Antonio Esteban[‡]

[†]Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática - Universidad de Málaga

[‡]Dirección Regional Sur - SACYR S.A.U.

{famoreno, jlblanco}@isa.uma.es, jgonzalez@ctima.uma.es, aesteban@gruposyv.com

Abstract—En este artículo se describe un vehículo eléctrico equipado con un escáner láser y un sistema de posicionamiento muy preciso diseñado para realizar levantamientos topográficos de carreteras. Las ventajas del sistema propuesto respecto al procedimiento topográfico convencional son el aumento de la densidad de puntos levantados y su eficiencia de operación, manteniendo una precisión similar (por debajo de dos centímetros de error absoluto). El proceso de captura de datos se controla mediante un ordenador que, de forma sincronizada, gestiona los barridos del láser y las medidas procedentes de tres receptores GPS-RTK. La posición y la orientación del vehículo (con 6 grados de libertad) se calcula *off-line* mediante un programa específicamente diseñado para esta aplicación y, a partir de esta información, se determinan las coordenadas medidas sobre la carretera.

I. INTRODUCCIÓN

El pavimento de las carreteras está expuesto a una continua degradación debido al tránsito de vehículos (especialmente vehículos pesados), la climatología (básicamente la lluvia y los cambios de temperatura) y, en ocasiones, pequeños movimientos del terreno. Aunque la inspección de las propiedades mecánicas y la calidad del asfalto (o cemento) son aspectos claves dentro del mantenimiento de carreteras, este artículo sólo se centra en el problema del levantamiento topográfico de su geometría 3D. Este levantamiento puede ser comparado con los planos originales, por ejemplo, para certificar las especificaciones de obra o detectar y localizar la existencia de deficiencias (baches y pequeños hundimientos) que ponen en peligro la seguridad vial. La obtención de esta información es crucial para los ingenieros civiles a la hora de planear las tareas de reparación y estimar sus costes. El método topográfico convencional para capturar datos 3D de la superficie de una carretera consiste en el levantamiento manual de un conjunto de puntos distribuidos regularmente a lo largo de la misma (típicamente, con 1 metro de separación entre ellos). Aunque este procedimiento genera puntos con coordenadas muy precisas, el conjunto de puntos adquiridos es muy disperso, el proceso consume mucho tiempo y es propenso a los errores debido al cansancio y el tedio del operario.

En este artículo se describe un sistema automático para capturar una malla densa y precisa de puntos 3D de la superficie de una carretera. El sistema consiste en un vehículo eléctrico equipado con un computador, un sistema de posi-

cionamiento muy preciso basado en GPS y un escáner láser radial que escanea la carretera transversalmente. Conforme el vehículo se mueve a lo largo de la carretera, se van capturando datos 3D referenciados localmente al vehículo, los cuales son transformados posteriormente a un sistema de referencia topográfico fijo. La precisión del sistema de posicionamiento es un aspecto crucial en esta aplicación ya que de ésta depende la precisión de los puntos escaneados sobre el suelo. La velocidad de movimiento del vehículo es aproximadamente de unos 5 km/h, suficiente para multiplicar por 10 la producción del método topográfico convencional de levantamiento de carreteras, manteniendo una gran densidad de puntos escaneados.

Dada la relevancia de esta aplicación, se han presentado anteriormente algunos sistemas que tratan este problema (por ejemplo, [1], [2], [3], [4]). Debido a sus prestaciones y similitud con nuestro trabajo, podemos destacar de entre ellos el sistema *Mobile-Road-Mapping-System* (MoSES) [4] desarrollado por la empresa "3D Mapping Solutions GmbH"¹, el cual, al igual que en este artículo presenta un levantamiento dinámico de carreteras usando escáneres láser, en su caso montados sobre un furgón. La mayor ventaja de nuestro sistema sobre MoSES es la precisión que alcanza en las coordenadas absolutas de los puntos levantados ya que, para el posicionamiento del vehículo, MoSES utiliza GPS diferenciales convencionales, mientras que en nuestro sistema se emplea una nueva tecnología GPS con precisión milimétrica desarrollada por la empresa Topcon².

II. VISIÓN GENERAL DEL SISTEMA

A. Vehículo

El sistema diseñado, denominado RoadBot (ver figura 1) se ha construido sobre un *buggy* eléctrico comercial Yamaha G22, el cual ha sido adaptado para albergar todos los dispositivos electrónicos y computacionales. Se ha colocado junto al volante un control manual que puentea el acelerador del vehículo proporcionando al operario la opción de fijar una velocidad constante sin tener que mantener accionado continuamente el acelerador. Además, se ha situado en el salpicadero una pantalla táctil y un pequeño teclado para

¹<http://www.3d-mapping.de/>

²<http://global.topcon.com/>



Fig. 1. El vehículo RoadBot con los sensores.

facilitar al operario el manejo del sistema. Las baterías originales del vehículo le proporcionan una autonomía de hasta 5 horas. A su vez, el sistema completo (incluyendo los sensores, el ordenador y el resto de dispositivos) está alimentado mediante un conjunto de ocho baterías de 12V/8Ah adicionales combinadas en una configuración serie/paralelo para obtener un conjunto de baterías de 24V/32Ah, proporcionando una autonomía similar a la del vehículo. Estas baterías, junto con los convertidores de tensión, los fusibles, el ordenador de a bordo y la circuitería necesaria están situados en un rack estándar de 19U en la parte trasera del vehículo.

B. Sistema sensorial y de posicionamiento

El sistema sensorial del vehículo está compuesto por un escáner láser radial SICK LMS221-30106³, y un conjunto de tres receptores GPS Topcon. El escáner láser está situado en la parte trasera del vehículo apuntando hacia abajo de manera que escanea de forma perpendicular la superficie de la carretera. Está colocado a unos 2 metros de altura y se ha configurado para escanear a una frecuencia de hasta 37.5Hz. La resolución angular se ha fijado a 0.5° mientras que el campo de visión es de 180°, aunque estos valores pueden ser modificados por *software*. Las tres antenas GPS están situadas en la parte más alta del vehículo como se muestra en la figura 1. Por último, se ha colocado una cámara de vídeo en la parte trasera del vehículo, aunque no se utiliza para la

³<https://www.mysick.com/partnerPortal/ProductCatalog/DataSheet.aspx?ProductID=33769>

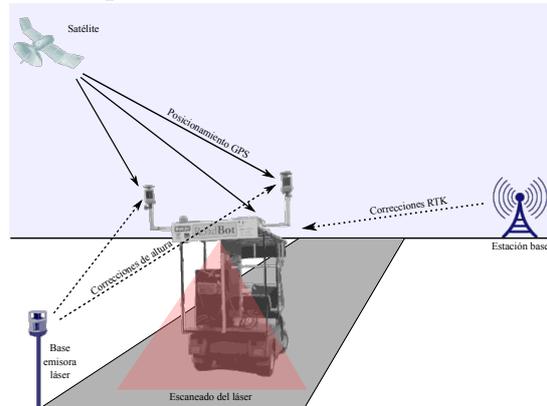


Fig. 2. Esquema de funcionamiento de las tecnologías RTK y mmGPS.

inspección del firme sino para proporcionar al operario una realimentación visual de la superficie escaneada.

C. Control del sistema

El sistema RoadBot está controlado por un ordenador portátil *core-2 duo* situado en el rack trasero en el que se ejecuta una aplicación multihilo (denominada RoadBotGUI) especialmente diseñada para realizar la configuración y la sincronización de los sensores, así como la grabación de los datos capturados, incluyendo las imágenes de la cámara de vídeo. Las medidas de posicionamiento provenientes de los receptores GPS se procesan en tiempo real para obtener una estimación de la pose del vehículo con respecto a un sistema de referencia fijo. Esta estimación, a su vez, se combina con las medidas de los puntos escaneados por el sensor láser para construir una representación 3D de la superficie de la carretera. La interfaz del programa RoadBotGUI muestra en tiempo real la superficie reconstruida en los últimos cinco segundos, con el objetivo de poder comprobar visualmente el proceso de escaneado. La aplicación RoadBotGUI se maneja mediante la pantalla táctil situada en el salpicadero del vehículo.

III. POSICIONAMIENTO DEL VEHÍCULO EN TIEMPO REAL

La posición y orientación (*pose*) del vehículo (esto es, la posición y la orientación, con 6 g.d.l.) se calcula con el conjunto de tres receptores GPS situados sobre el vehículo. Nuestro sistema combina dos tecnologías diferentes de GPS: Real-Time-Kinematics (RTK) y GPS milimétrico (mmGPS), siendo el primero una mejora de las técnicas GPS estándar y el segundo una extensión del sistema GPS-RTK.

De forma somera, la tecnología RTK mejora la precisión del posicionamiento utilizando medidas de la fase de portadora de la señal GPS, y las correcciones en tiempo real que proporciona, vía radio o GPRS, una estación fija de referencia, pudiendo alcanzar precisiones de hasta unos pocos centímetros. Estas prestaciones pueden ser mejoradas

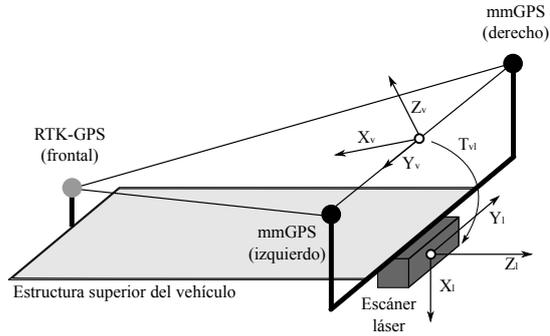


Fig. 3. Representación esquemática de las posiciones de los sensores principales y los sistemas de referencia del vehículo y el escáner láser.

considerablemente empleando la tecnología mmGPS, la cual consiste en corregir aún más la altura calculada mediante RTK utilizando para ello un emisor láser cuya posición estática ha sido medida de antemano, tal y como se muestra en la figura 2. Mediante estas correcciones del emisor láser el sistema puede alcanzar una precisión en altura de hasta ± 6 mm, convirtiéndose en la tecnología existente más precisa para el posicionamiento global. El alcance de estos emisores láser es de unos 150 m, pero el sistema está capacitado para conmutar a otro emisor de forma automática cuando recibe correcciones de altura de otro emisor más cercano. De esta forma, colocando emisores láser cada cierta distancia se puede mantener el sistema en funcionamiento de forma indefinida.

El sistema diseñado no cuenta con otros sensores para localizar el vehículo (odometría, sistemas inerciales, etc.) ya que la aplicación requiere de una posición absoluta muy precisa, la cual sólo se puede obtener mediante el sistema mmGPS. Por otro lado, con los tres receptores GPS es suficiente para determinar la pose completa en 6D del vehículo. Finalmente, el entorno de trabajo de esta aplicación (generalmente carreteras situadas fuera de las ciudades) es muy favorable para tener una buena cobertura GPS, haciendo prácticamente innecesaria la utilización de otros tipos de sensores de localización.

En nuestro sistema (ver figura 1), el receptor frontal es un GR-3⁴ RTK-GPS de Topcon, mientras que los dos traseros son mmGPS⁵, los cuales están compuestos por una antena GPS-RTK de doble frecuencia y un receptor láser. Los tres GPS pueden enviar las medidas de posicionamiento a una tasa de hasta 10 Hz a través de un enlace RS-232.

La pose del vehículo se calcula midiendo las coordenadas 3D (x, y, z) de cada antena GPS y definiendo un sistema de coordenadas local cuyo origen es el centro de las posiciones de los dos mmGPS, y con el eje Y apuntando hacia la izquierda (ver figura 3). El eje X se define como el vector perpendicular al eje Y contenido en el plano definido por los

⁴<http://www.topconpositioning.com/products/gps/receivers/gr-3>

⁵<http://www.topconpositioning.com/products/machine-control/3d/3d-millimeter-gps>

tres GPS y apuntando hacia delante en el vehículo. De esta forma, el eje Z, calculado mediante el producto vectorial de los ejes X e Y, apunta hacia arriba.

Para estimar la pose de forma precisa, el sistema desarrollado interpreta los *datums* de los GPS, es decir, la *longitud*, *latitud* y *altura*, usando el elipsoide de referencia WGS-84 (*World Geodetic System*) [5]. El elipsoide WGS-84 ha sido optimizado de manera que su centro coincida con el centro de masas de la Tierra con la mayor precisión posible. Las ecuaciones que calculan las coordenadas Cartesianas locales de una secuencia de datos de GPS se presentan a continuación.

Sea D_i el *datum* de la i -ésima medida GPS, compuesto por *longitud* α_i , *latitud* β_i , y *altura* h_i , esto es, $D_i = [\alpha_i, \beta_i, h_i]^T$; las coordenadas Cartesianas geocéntricas de este punto, G_i se calculan mediante [6]:

$$G_i = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (N_i + h_i)\cos\beta_i\cos\alpha_i \\ (N_i + h_i)\cos\beta_i\sin\alpha_i \\ (N_i\cos\epsilon)^2 + h_i\sin\beta_i \end{bmatrix} \quad (1)$$

donde el radio de curvatura N_i se calcula a partir del semi-eje mayor a y la excentricidad angular ϵ mediante:

$$N_i = \frac{a}{\sqrt{1 - (\sin\epsilon)^2(\sin\beta_i)^2}} \quad (2)$$

Sin embargo, estas coordenadas globales son de poca utilidad práctica ya que tienen una escala muy grande (el origen está situado en el centro de la Tierra) y su orientación está fijada respecto a unos ejes XYZ predefinidos. Por lo tanto, es deseable transformar estas coordenadas a una base topográfica definida en el entorno de trabajo cuyos ejes tengan una orientación más conveniente, esto es, siendo el plano XY el horizontal del suelo, y con el eje Z apuntando hacia arriba. Este tipo de sistema de referencia se denomina ENU (*East-North-Up*) y se utiliza muy habitualmente en topografía. Este cambio de coordenadas se lleva a cabo mediante el mapeo de los puntos 3D geocéntricos Cartesianos, G_i , a coordenadas ENU locales, L_i , relativas a otro punto R , y con rotación representada por los tres nuevos vectores ortogonales de la base u (*East*), v (*North*) and w (*Up*). Matemáticamente, esta operación puede ser escrita usando matrices homogéneas de la siguiente forma:

$$L_i = \left[\begin{array}{ccc|c} u & v & w & R \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right]^{-1} G_i = \left[\begin{array}{ccc|c} u^T & -u^T R \\ v^T & -v^T R \\ w^T & -w^T R \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] G_i \quad (3)$$

siendo R el origen del sistema de referencia ENU local. En nuestro sistema tomamos R como la primera posición del mmGPS izquierdo.

Una vez que las posiciones medidas por el GPS se han convertido en coordenadas locales Cartesianas, se puede calcular la pose del vehículo buscando la transformación con 6 g.d.l. existente entre dicho sistema de referencia ENU local y el del vehículo. Esto se lleva a cabo utilizando las coordenadas de los tres receptores GPS en ambos sistemas de referencia, utilizando para ello el método de formulación

cerrada publicado por Horn en [7]. Finalmente, hay que tener en cuenta que para realizar esto es necesario calibrar correctamente la posición de las tres antenas GPS respecto al sistema de referencia del vehículo, tal y como se explicará en la sección IV-A.

IV. CALIBRACIÓN DE LOS SENSORES

El término *calibración de los sensores* denota al proceso de obtener la pose de los sensores fijados en el vehículo respecto a su sistema de referencia. Para el escáner láser, dicha pose comprende posición (x, y, z) y orientación (*yaw, pitch, roll*), mientras que para los receptores GPS sólo es necesario determinar su posición.

A. Receptores GPS

Sea $p_f = (x_f, y_f, z_f)$ la posición del GPS frontal y p_l y p_r las análogas para el izquierdo y el derecho, respectivamente. Tal y como se presentó anteriormente, el sistema de referencia del vehículo está definido por las posiciones de los tres GPS, de forma que estén situados en el plano XY. Así, sus coordenadas Z en el sistema de referencia del vehículo serán cero, es decir, $(z_f = z_l = z_r = 0)$. Además, ya que el eje Y se ha definido sobre la línea que pasa entre los dos mmGPS, sus coordenadas x también serán cero ($x_l = x_r = 0$), reduciendo el problema al cálculo de los valores de las coordenadas x_f, y_f, y_l e y_r . Estos valores pueden calcularse utilizando triángulos semejantes mediante las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} p_f &= \left(\sqrt{d_{LF}^2 - (d_{LR}/2 - y_f)^2}, -\frac{d_{LF}^2 - d_{RF}^2}{2d_{LR}}, 0 \right) \\ p_l &= (0, d_{LR}/2, 0) \\ p_r &= (0, -(d_{LR}/2), 0) \end{aligned} \quad (4)$$

donde d_{LF}, d_{LR} y d_{RF} representan las distancias entre el GPS izquierdo y frontal, izquierdo y derecho, y derecho y frontal, respectivamente.

Como se aprecia en la ecuación 4, las coordenadas buscadas dependen sólo de las distancias entre GPS, las cuales se pueden estimar mediante el promediado de medidas GPS con el vehículo situado en una posición estática.

B. Escáner láser

Finalmente, es necesario calibrar la pose del escáner láser (con 6 g.d.l.) con respecto al sistema de referencia del vehículo. Usando de nuevo el método de Horn [7], podemos determinar la transformación existente entre el sistema de referencia del escáner láser y el del vehículo utilizando como entrada las coordenadas (en ambos sistemas de referencia) de, al menos, tres puntos no alineados.

Para esto hemos utilizado un patrón de calibración compuesto por tres mini-prismas fijados en una estructura rígida. El patrón se coloca en diferentes posiciones no alineadas (ver figura 4) y se escanea con el sensor láser. Después, las medidas de los prismas dadas por el escáner láser (medidas de distancia y ángulo) se transforman a coordenadas Cartesianas del sistema de referencia del láser. Posteriormente, y sin mover el patrón, utilizamos una estación total para

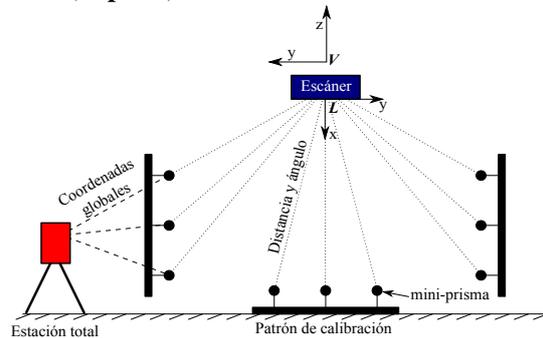


Fig. 4. Escenario para la calibración del láser.

medir las posiciones globales (latitud, longitud y altura) de los mini-prismas y transformarlas al sistema de referencia del vehículo mediante el procedimiento mostrado en la sección III. De esta forma se completa el conjunto de coordenadas en ambos sistemas de referencia necesario para determinar la transformación existente entre ellos.

V. RECONSTRUCCIÓN 3D DE LA CARRETERA

Para la reconstrucción 3D de la carretera, hemos desarrollado otra aplicación, llamada RoadBotStudio (ver figura 5), que carga los datos grabados con RoadBotGUI, los procesa y reconstruye toda la superficie escaneada. Ambas aplicaciones han sido implementadas basándose en la librería robótica MRPT⁶ desarrollada en nuestro departamento. Además de la superficie reconstruida, RoadBotStudio muestra información adicional sobre la sesión de trabajo como, por ejemplo, la trayectoria del vehículo (incluyendo marcas de tiempo), la evolución tanto de las coordenadas x, y y z como de los ángulos *yaw, pitch* y *roll* del vehículo, o las imágenes grabadas a lo largo de la trayectoria.

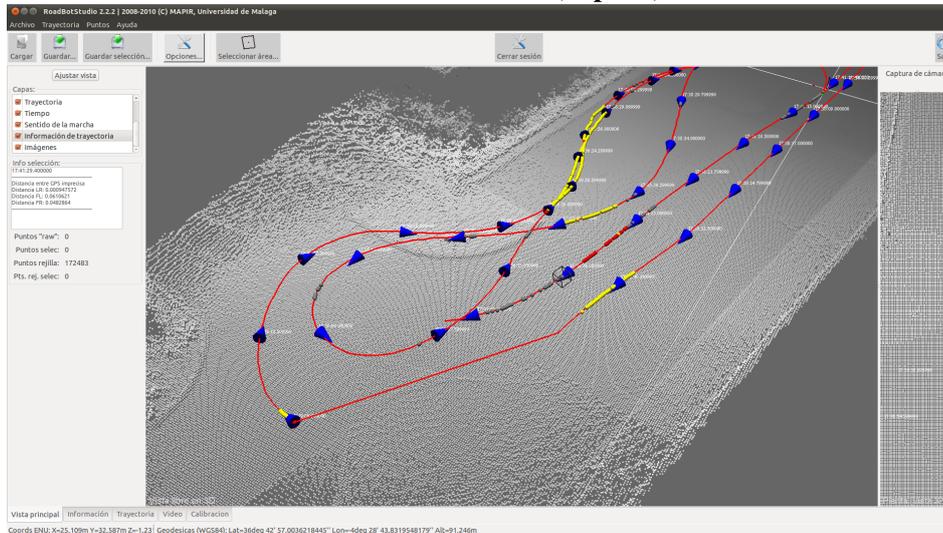
RoadBotStudio también permite al usuario, por ejemplo, filtrar zonas no deseadas, cargar sólo partes del fichero grabado y elegir entre ver todos los puntos del fichero o construir una malla regular con ellos. El tamaño de las celdas de la malla es configurable mientras que la altura de las celdas se calcula como la altura media de todos los puntos que contiene. Finalmente, RoadBotStudio puede exportar los datos procesados y filtrados a un fichero de texto en coordenadas ENU locales y en coordenadas geodésicas WGS-84.

La figura 6 muestra el nivel de precisión que proporciona el sistema, alcanzando un error medio de aproximadamente 6 mm. En este caso caso, el *ground truth* se definió mediante un conjunto de puntos de control distribuidos regularmente sobre la carretera, los cuales fueron levantados mediante técnicas de topografía convencionales.

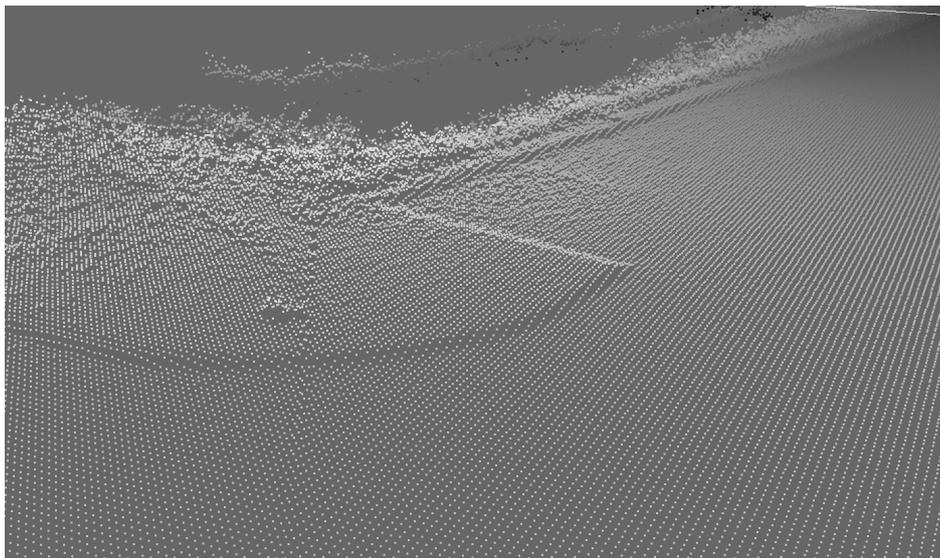
VI. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este artículo se ha presentado un vehículo eléctrico equipado con un conjunto de sensores y un ordenador de

⁶www.mrpt.org



(a)



(b)

Fig. 5. (a) Captura de pantalla de la aplicación RoadBotStudio y (b) una ampliación de la superficie reconstruida.

a bordo que automatiza la captura de un conjunto denso y preciso de puntos 3D de la superficie de una carretera. El sistema utiliza tecnologías GPS con precisión milimétrica para estimar la pose del vehículo con 6 g.d.l., y emplea un escáner láser radial de exteriores que escanean la superficie de la carretera mientras el vehículo se mueve por ella. También se han desarrollado dos aplicaciones *software*: una para la captura de datos tanto del sistema de posicionamiento como

del escáner láser, y otra para la reconstrucción y exportación de la superficie 3D medida. Los resultados obtenidos con este sistema presentan errores por debajo del centímetro en un conjunto de puntos de control (errores similares a los cometidos con las técnicas convencionales) mientras que mejora significativamente el procedimiento de inspección de la carretera, reflejado en un sensible incremento tanto en la densidad de puntos escaneados como en la velocidad de la

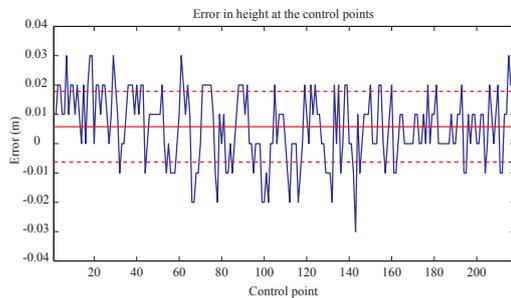


Fig. 6. Error en la coordenada Z en los puntos de control.

operación de levantamiento.

Como trabajo futuro podemos mencionar la automatización de la conducción del vehículo de manera que pueda seguir una trayectoria prefijada de forma autónoma mientras escanea la superficie de la carretera.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido promovido y apoyado por la compañía SACYR S.A.U. bajo el contrato OTRI-8.06/5.56.2922 y parcialmente apoyado por el *Plan Nacional de Investigación*, proyecto DPI08-03527.

REFERENCES

- [1] S. Yu, S. Sukumar, A. Koschan, D. Page, and M. Abidi, "3d reconstruction of road surfaces using an integrated multi-sensory approach," *Optics and lasers in engineering*, vol. 45, no. 7, pp. 808–818, 2007.
- [2] A. Jaakkola, J. Hyypä, H. Hyypä, and A. Kukko, "Retrieval algorithms for road surface modelling using laser-based mobile mapping," *Sensors*, vol. 8, no. 9, pp. 5238–5249, 2008.
- [3] S. O. Elberink, "Acquisition of 3D Topography: Automated 3D Road and Building Reconstruction Using Airborne Laser Scanner Data and Topographic Maps," Ph.D. dissertation, International Institute for Geoinformation Science and Earth Observation, 2010.
- [4] G. Gräfe, "Kinematic 3D Laser Scanning for Road or Railway Construction Surveys," in *Proceedings of the International Conference on Machine Control & Guidance*, 2008.
- [5] NIMA, "Nima technical report tr8350.2, department of defense world geodetic system 1984, its definition and relationships with local geodetic systems," 2000.
- [6] W. Featherstone and S. Claessens, "Closed-form transformation between geodetic and ellipsoidal coordinates," *Studia Geophysica et Geodaetica*, no. 1, pp. 1–18, 2008.
- [7] B. Horn, "Closed-form solution of absolute orientation using unit quaternions," *Journal of the Optical Society of America A*, vol. 4, no. 4, pp. 629–642, 1987.