

Sistema de inspección visual automática de carreteras mediante técnicas de procesamiento 2D/3D

Carlos García Serrada, carlosgarcia@collosa.es

Eduardo Vara Pazos, evara@collosa.es

Construcciones y Obras Llorente, S.A. (COLLOSA)

Roberto Medina Aparicio, robmed@cartif.es

José Llamas Fernández, joslla@cartif.es

Fundación Cartif

Jaime Gómez García-Bermejo, jaigom@eis.uva.es

Eduardo Zalama Casanova, ezalama@eis.uva.es

Universidad de Valladolid, ITAP-DISA

En este trabajo, se describe un completo sistema de inspección visual automática embarcado en un vehículo para detectar grietas y fisuras en el pavimento. El vehículo de inspección dispone de un equipo de adquisición de imágenes de alta resolución (LRIS), dos perfilómetros láser de alto rendimiento, un sistema de posicionamiento (DGPS), una cámara de video de alta definición y una cámara matricial de alta velocidad para extraer información tridimensional de la carretera. La apariencia visual y la información geométrica se obtienen simultáneamente ya que los perfiles 3D se obtienen capturando la línea láser proyectada por el LRIS con la cámara matricial de alta velocidad. La combinación de estos dos tipos de datos nos ha permitido mejorar los índices de detección de grietas y fisuras que se consiguen utilizando cada una de las tecnologías por separado. Un entorno de visualización de desarrollo propio permite la visualización de forma sincronizada de todos los datos generados por los diversos equipos embarcados en el vehículo así como los datos procesados. También es posible generar informes personalizados sobre el estado de la carretera que permiten realizar un seguimiento y una comparación visual y cuantitativa del estado de la carretera. El sistema de auscultación de carreteras ha sido utilizado en tramos de carretera real de la red de carreteras de Castilla y León, lo que ha permitido medir el estado actual de la carretera y la evolución del deterioro de la misma para poder tomar las medidas correctoras oportunas. Se presenta un ejemplo de un tramo de auscultación real donde se muestran algunos de los resultados obtenidos.

Palabras clave: energía, inteligente, piezoeléctricos, carretera

A complete system of automatic visual inspection boarded on a vehicle to detect cracks and fissures in the pavement is described in this paper. The inspection vehicle carries the equipment to acquire high-resolution images (LRIS), two high-performance laser profilers, a positioning system (DGPS), a high-definition video camera and a high speed matrix camera to extract three dimensional information of the road. The visual appearance and the geometric information are obtained simultaneously as 3D profiles capturing the projected LRIS matrix camera with a high speed laser line. The combination of these two types of data allow us to improve the cracks and fissures detection rates, obtained using each technology separately. An own development view environment allows the synchronized viewing of all data generated by all in-vehicle equipment such as the processed data. In addition the system can also generate custom reports of the road state that allow the monitoring and the visual and quantitative comparison of this road state. The road monitoring system has been tested in current roads sections of Castile and Leon highways, allowing the measure of the current road state and the evolution of the damage helping to take the appropriate corrective measures. Finally, this paper presents an example of a real auscultation and the results obtained.

Keywords: energy, intelligent, piezoelectric, highway

Sistema de inspección visual automática de carreteras mediante técnicas de procesamiento 2D/3D

1- Introducción

Las carreteras españolas totalizan el 86% del transporte terrestre de mercancías y el 88% del transporte de viajeros. Esta elevada carga de vehículos que utilizan las carreteras junto con la climatología y las condiciones ambientales del entorno ocasionan un alto nivel de desgaste con la consiguiente pérdida de propiedades del firme. Esto provoca una serie de inconvenientes muy serios a los usuarios: reducción de la seguridad en la carretera, decremento en el confort de los desplazamientos, incremento en los consumos de combustible de los vehículos con el consiguiente aumento en las emisiones de gases contaminantes, etc.

La estrategia de conservación de firmes se puede definir como el conjunto de actuaciones a desarrollar durante la vida de la carretera o del tramo para que su índice de servicio no baje de un mínimo admisible. Se considera que la forma más adecuada de trabajar, de cara a la seguridad y confort de la vía, consiste en plantear actuaciones preventivas que consigan rehabilitar el firme antes de que los usuarios se vean afectados por el deterioro de la carretera.

El mantenimiento de la carretera requiere el conocimiento del estado de la misma. Para conocer su estado, la inspección visual realizada por personas es el método más habitual utilizado en la actualidad, pero no alcanza los requerimientos de evaluación del deterioro de la carretera por su falta de fiabilidad, repetitividad, velocidad de inspección y robustez. La visión humana tiene una gran habilidad para adaptarse a nuevas tareas. Sin embargo, el mismo estado de carretera puede ser clasificado de diferente forma por dos personas distintas, e incluso por la misma persona en distintos momentos, debido a la inherente subjetividad humana y a la fatiga visual. Es por ello que surge la necesidad de desarrollar sistemas automáticos para la evaluación del estado de la carretera basados en la utilización de equipos de medida y tratamiento de los datos obtenidos. Algunos sistemas semiautomáticos de inspección de carretera han sido desarrollados, los cuales funcionan en modo de post-procesamiento y requieren una importante interacción humana. A pesar de todo, el trabajo manual es aún necesario para obtener datos fiables del estado de la carretera.

Obtener una medida exacta y objetiva del estado del firme es fundamental para la toma de decisiones en tareas de conservación y mantenimiento de carreteras.

2. Arquitectura de adquisición de datos

Para obtener la información completa del estado de la superficie de la carretera han sido integrados en una furgoneta una gran variedad de dispositivos. En la Figura 1 podemos ver como se han integrado los dispositivos en el vehículo de inspección.



Figura 1. Vehículo de inspección de carreteras.

Para la caracterización visual del estado de la carretera se utiliza el sistema de adquisición de imágenes LRIS (Laser Road Imaging System), fabricado por INO en exclusiva para PAVEMETRICS. Adquiere la imagen de 4 metros de ancho de la carretera con una resolución de 1 mm a una velocidad máxima de 100 km/h. Para proporcionar información extra sobre las condiciones de la carretera, el vehículo dispone a su vez de dos perfilómetros inerciales, un sistema de posicionamiento global diferencial (DGPS) y una cámara de alta definición. Para mejorar los resultados de auscultación obtenidos con el sistema de adquisición de imágenes 2D, se ha incorporado una cámara matricial de alta velocidad para capturar los perfiles tridimensionales de la carretera. Puede adquirir una traza de un metro de ancho de carretera cada 10 mm a una velocidad de 72 km/h.

La gran cantidad de datos que generan estos dispositivos debe ser almacenada siguiendo unos procedimientos muy eficientes. Para ello, el vehículo de inspección dispone de dos ordenadores cada uno de ellos equipado con dos discos duros y software de desarrollo propio para el control y la gestión de la adquisición. El PC1 controla el LRIS, los perfilómetros inerciales, el DGPS y la cámara de entorno, mientras que el PC2 gestiona la adquisición de perfiles de la cámara 3D. Para gestionar el almacenamiento de las imágenes, tanto las procedentes del equipo LRIS como la cámara 3D, se han desarrollado algoritmos de procesamiento en paralelo que permiten el almacenamiento si-

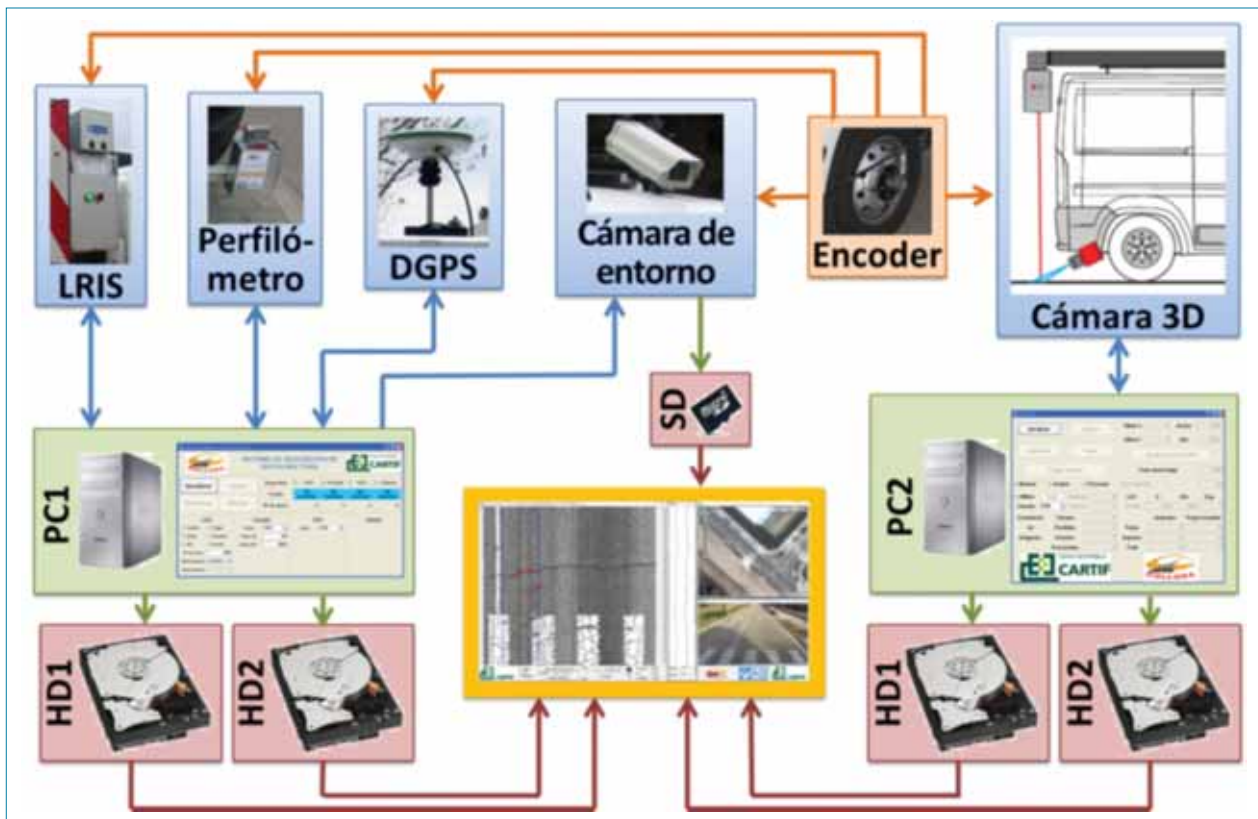


Figura 2. Esquema representativo del control y la gestión de la adquisición de datos.

multáneo de imágenes en dos discos duros diferentes y así alcanzar las velocidades de almacenamiento requeridas.

Para que todos los dispositivos capturen su información de forma sincronizada y a la frecuencia deseada se utiliza un encoder incremental acoplado a la rueda del vehículo. El encoder utilizado genera 5.000 pulsos cada vez que la rueda del vehículo gira una vuelta, lo que equivale a enviar un pulso cada vez que el vehículo avanza 0.33 mm. Se ha desarrollado una electrónica a medida para que cada dispositivo sea disparado a la frecuencia requerida. En la Figura 2 podemos ver el esquema de cómo se controlan los diferentes equipos embarcados en el vehículo de inspección y cómo se gestiona la adquisición de la información.

La cámara 3D está colocada de tal manera que la traza láser producida por el LRIS se captura con un ángulo rasante a la carretera, como puede verse en la Figura 3, a la izquierda. Esto supone una clara ventaja respecto a otros sistemas comerciales en los que la cámara se encuentra casi perpendicular a la carretera. Además, en el método propuesto, el láser para generar la traza 3D es el que se utiliza para iluminar las imágenes 2D, por lo que la posición relativa de las imágenes 2D y 3D es muy precisa.

Como la longitud de onda del láser es de 808 nm, se ha utilizado el filtro paso alto LP780 para inmunizarse de la luz exterior. En la Figura 3, a la derecha, se muestra la eficiencia cuántica del sensor de la cámara 3D y la transmitancia del filtro.

3. Métodos de inspección desarrollados

Se utilizan dos fuentes de información sobre el estado de la carretera que son procesadas de forma independiente para, a continuación, ser combinadas y obtener un mejor resultado

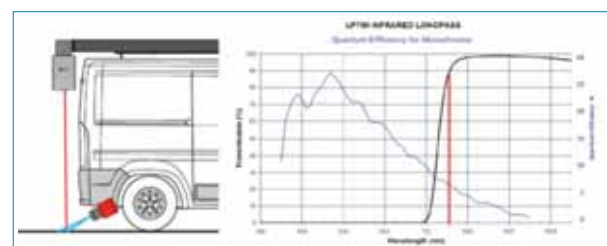


Figura 3. Disposición de la cámara 3D y el láser del LRIS y eficiencia cuántica del sensor de la cámara MV2-D1280-640 y transmitancia del filtro LP780. La línea roja indica la longitud de onda del láser del equipo LRIS.

Sistema de inspección visual automática de carreteras mediante técnicas de procesamiento 2D/3D

que el que ofrecen cada una de ellas de forma independiente. Por un lado se utilizan las imágenes que nos ofrece el equipo LRIS para obtener información de la apariencia visual del estado de la carretera. Por otro lado el perfil de la carretera es analizado a partir de las imágenes generadas por la cámara 3D.

3.1 Procesamiento de imágenes 2D

El procesamiento de las imágenes 2D que nos ofrece el sistema LRIS sigue los siguientes pasos:

- En primer lugar las imágenes son preprocesadas para igualar el nivel medio de brillo en cada una de las imágenes, descartando las zonas brillantes de la imagen que corresponden a marcas viales horizontales.
- A continuación la imagen se divide en sub-imágenes de 128x128 píxeles y se filtran, por un conjunto de filtros de Gabor, que analizan la imagen en el espacio frecuencial.
- El máximo del módulo de la imagen filtrada es la entrada a un clasificador sencillo en el que el umbral ha sido fijado maximizando la exactitud ponderada.
- A continuación, se ha utilizado el algoritmo de ADABOOST para combinar los clasificadores sencillos, dando lugar a un único clasificador para cada tipo de defecto mejorando los resultados de los clasificadores sencillos.

3.2 Procesamiento de perfiles 3D

La traza láser capturada por la cámara matricial es aproximadamente una línea recta paralela al eje x de la imagen. La posición de esta línea dentro de la imagen varía debido a la amortiguación del vehículo, pero siempre se encuentra dentro de los 256 píxeles adquiridos. Durante el proceso de adquisición la imagen segmentada es proyectada sobre el eje y para obtener la posición aproximada de la traza, de tal manera que una imagen de 1.280x64 se almacena para analizarla offline. Una imagen de cada 100 es almacenada a la resolución de adquisición, es decir, a 1.280x256 píxeles, y se utiliza en el procesamiento offline para homogeneizar la distribución de la iluminación. Esta distribución se asemeja a una función parabólica, por lo que se ha utilizado el método de los mínimos cuadrados para ajustar los parámetros de la ecuación, utilizando los puntos que no pertenecen a la traza láser.

Se ha segmentado manualmente un conjunto de imágenes para entrenar al sistema, calcular automáticamente el umbral óptimo y poder extraer correctamente la traza de la imagen. Después de la segmentación, se eliminan los píxeles ruidosos mediante la operación morfológica de la apertura. Para localizar la traza láser se utiliza la transformada de Hough. Por último, se comprueba la presencia de puntos de la traza para cada columna en un entorno de la recta obtenida por la transformada de Hough. Cuando hay una grieta o fisura, la traza estará oculta o fuera del entorno establecido muy próxima a la recta calculada mediante la transformada de Hough. Estos píxeles son marcados como píxeles candidatos a contener defectos en la línea correspondiente de la imagen 2D que contiene toda la información extraída del procesamiento 3D. Después de procesar todas las trazas se buscan segmentos de líneas rectas de un tamaño superior a uno dado, eliminando el resto de los píxeles marcados inicialmente como candidatos a contener defectos. La pendiente de los segmentos de líneas rectas nos permite clasificar las grietas o fisuras como longitudinales y transversales.

3.3 Combinación 2D/3D

Los resultados del análisis 3D pueden considerarse como dos clasificadores más en el algoritmo de Adaboost como describen Zalama et al. (2013), uno para la detección de grietas longitudinales y otro para la detección de grietas transversales. La imagen completa de la carretera se divide siguiendo el mismo procedimiento que se explica en la sección 3.1. La salida de los clasificadores 3D se pone a 1 cuando hay algún píxel marcado como grieta. La salida del algoritmo Adaboost nos indica qué sub-imágenes contienen grietas o fisuras con mayor precisión que el obtenido utilizando solamente la salida del procesamiento de las imágenes 2D o 3D de forma independiente.

4. Resultados experimentales

Para entrenar y probar el funcionamiento de estos clasificadores se han generado dos grupos de imágenes extraídos de diversas inspecciones que han sido clasificados manualmente por expertos en inspección visual de carreteras. Uno de los grupos de imágenes contiene 1.969 sub-imágenes, entre las cuales hay 501 grietas trasversales. El otro grupo contiene

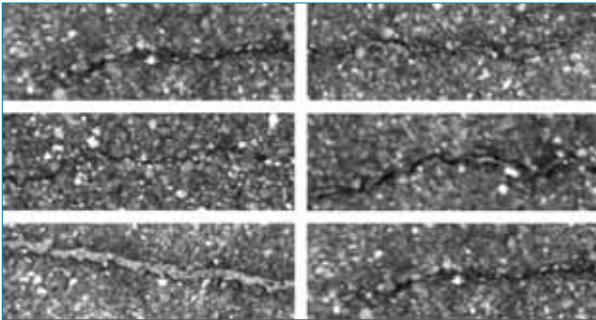


Figura 4. Imágenes de grietas y fisuras transversales de la base de datos.

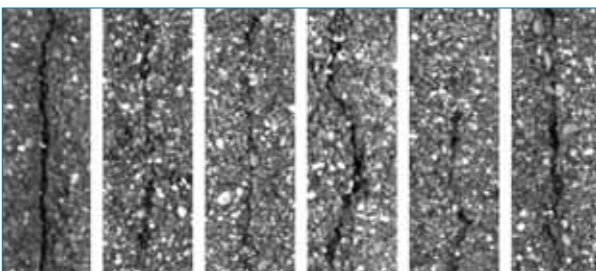


Figura 5. Imágenes de grietas y fisuras longitudinales de la base de datos.

1.453 sub-imágenes, de las cuales 370 son grietas o fisuras longitudinales. La mitad de las muestras de cada grupo se ha utilizado para entrenar el sistema mientras que la otra mitad ha sido utilizada para probar su funcionamiento. Algunos ejemplos podemos verlos en la Figura 4 y la Figura 5. Los resultados aplicados a los tres algoritmos propuestos, es decir, solo LRIS, solo 3D y la combinación de ambos la podemos ver en la Tabla 1, expresados en términos de sensibilidad, especificidad y exactitud ponderada.

Los resultados obtenidos con los perfiles de 3D son mejores para grietas transversales que para grietas longitudinales. Este resultado era esperado debido a que la posición de la cámara está diseñada para encontrar la oclusión de la traza en

presencia de grietas transversales. El clasificador combinado mejora el resultado respecto a utilizar solo las imágenes 2D o solo los resultados 3D, pero la principal ventaja es que este resultado ha sido logrado con menos filtros de Gabor, 7 para las grietas longitudinales y sólo 5 para las grietas transversales, que es una disminución importante frente a los 56 que fueron obtenidos en estudios previos, lo que disminuye sensiblemente el tiempo de procesamiento requerido.

Entre las ventajas del método utilizado podemos citar:

- Se trata de un método de auscultación con criterio común para todas las carreteras, al ser un sistema automático.
- La auscultación se lleva a cabo de forma rápida y segura, sin interferir en el tráfico, ya que el vehículo de inspección puede circular a velocidades entre 60 y 90 Km/h durante la recogida de datos.
- Esta herramienta nos va a permitir medir el estado del firme de forma preventiva para decidir la técnica más oportuna de reparación (sellado, microaglomerado en frío, fresado y reposición, etc.), según se encuentre el estado del firme.
- Vamos a ser capaces de medir la evolución del estado del firme a la largo del tiempo.
- La herramienta tiene capacidad de evaluar los indicadores de estado del firme que aparecen en los pliegos de condiciones utilizados en las concesiones.

5. Resultados de campo

El sistema de inspección visual automática ha sido probado en diversos tramos de la red de carreteras de Castilla y León. En esta sección se presentan los resultados obtenidos en un pequeño tramo. Los resultados obtenidos pueden ser visualizados de dos formas distintas. Por un lado se dispone de un

Tabla 1. Resultados del procesamiento de imágenes en términos de sensibilidad, especificidad y precisión.

Tipo de grieta o fisura	Método	Sensibilidad	Especificidad	Exactitud ponderada
Transversales	Imágenes LRIS	0,9240	0,9510	0,9375
	Perfiles 3D	0,9600	0,9564	0,9582
	Combinados	0,9720	0,9591	0,9656
Longitudinales	Imágenes LRIS	0,9189	0,9094	0,9142
	Perfiles 3D	0,8486	0,8725	0,8606
	Combinados	0,9405	0,9261	0,9333

Sistema de inspección visual automática de carreteras mediante técnicas de procesamiento 2D/3D

software de desarrollo propio que permite el acceso a toda la información capturada y procesada de forma sincronizada. Por otro lado se generan de forma automática informes del estado de la carretera que pueden ser visualizados por software convencional. En la Figura 6 se muestra una captura de pantalla con toda la información adquirida sin ningún tipo de procesamiento. En la Figura 7 se muestra esa misma información, pero con la imagen del LRIS normalizada. En la Figura 8 se muestra la información con el resultado del procesamiento.

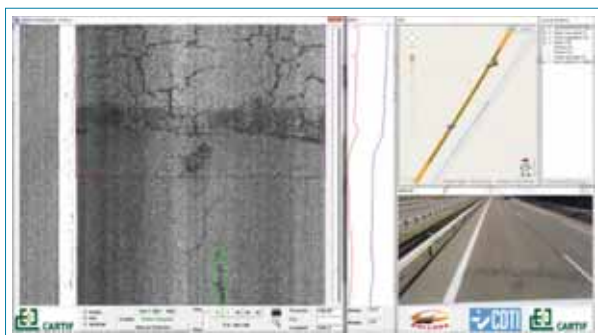


Figura 6. Captura de pantalla del software de visualización. Datos sin procesar.

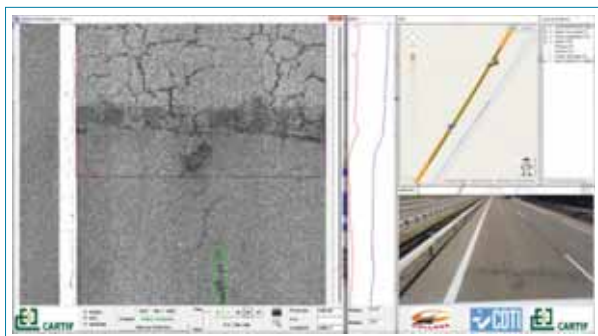


Figura 7. Captura de pantalla del software de visualización. Imagen normalizada.

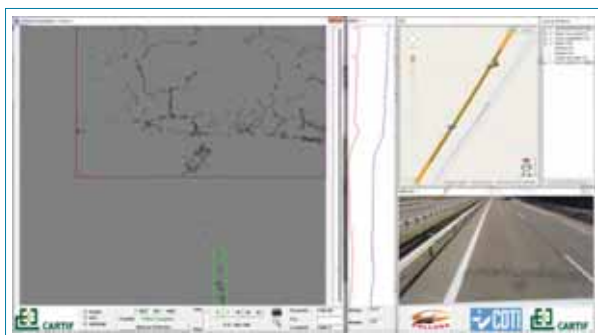


Figura 8. Captura de pantalla del software de visualización. Datos procesados.

En todo momento es posible intercambiar entre los posibles modos de visualización, hacer zoom sobre los datos (ver Figura 9), localizar los datos en un navegador tipo google maps y usar sus propiedades, como el street view o la visualización del terreno (ver Figura 9 y Figura 10), navegar por los defectos, etc.

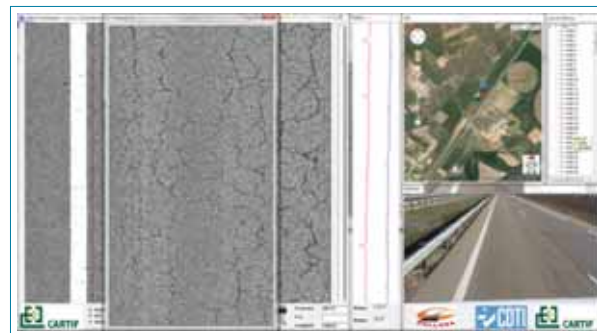


Figura 9. Captura de pantalla del software de visualización. Ejemplo zoom y modo terreno de google maps.

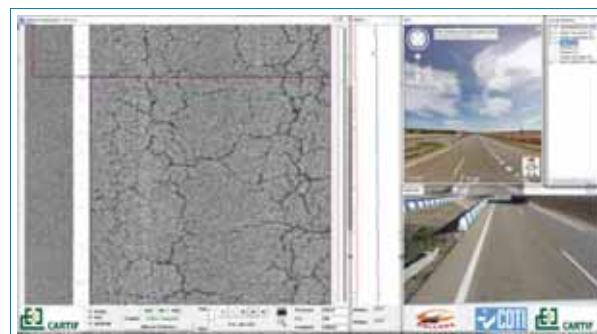


Figura 10. Captura de pantalla del software de visualización. Ejemplo street view.

También es posible ver el mapa de defectos de la carretera procesada, lo que nos permite tener una idea intuitiva del estado de la carretera accediendo a la información en cada tramo de la imagen del estado de la carretera, tal y como podemos ver en la Figura 11.

El software desarrollado permite la generación de informes del estado de la carretera. Se genera un resumen con los datos globales del tramo de carretera inspeccionado, así como por sub-tramos de 100 metros del tramo inspeccionado, como los mostrados en la Figura 12, en el que se muestra el área que efectivamente contiene defectos. Además se genera un informe más completo en el que se detallan las características de cada uno de los defectos y se asocia una imagen de cada defecto, tal y como se muestra en la Figura 13.

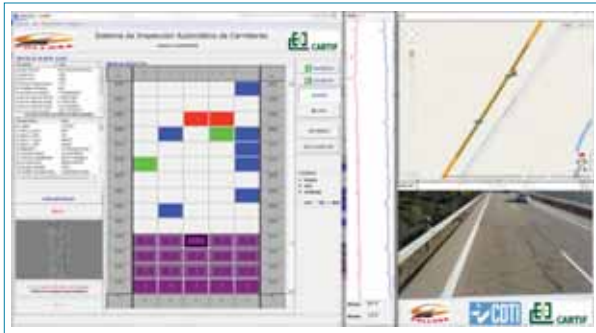


Figura 11. Captura de pantalla del software de visualización. Modo mapa de defectos.

Estos informes nos permiten visualizar rápidamente el estado superficial del tramo auscultado, así como realizar inspecciones periódicas para comprobar la evolución del deterioro de la carretera a lo largo del tiempo y poder tomar tanto las oportunas medidas correctoras, como medidas preventivas anticipándose al deterioro.

Distintos parámetros pueden ser comparados en sucesivas campañas de auscultación, como podemos ver en la Figura 14 y se pueden codificar mediante colores el estado de cada uno de los mismos, como se muestra en la Figura 15.

6. Conclusiones

Se ha presentado una nueva metodología para detectar grietas en el pavimento de la carretera que combina el aspecto visual de las imágenes y la información geométrica. Se ha descrito en detalle todo el procedimiento para la adquisición y el almacenamiento de datos de los diferentes dispositivos que se encuentran en el vehículo de inspección. Gracias a los procedimientos descritos es posible re-

alzar la inspección sin interrumpir el tráfico. Una de las principales contribuciones es el enfoque original para la extracción de la información geométrica de la carretera. La cámara 3D está situada de tal forma que la traza láser del LRIS queda oculta cuando aparecen grietas o fisuras transversales mientras que deja de ser una línea recta ante la presencia de grietas longitudinales. La combinación de la información 2D/3D ha conseguido alcanzar una exactitud ponderada del 96,6% para las grietas transversales y un 93,3% para las longitudinales.

También se ha desarrollado un software a medida para la visualización de la información recogida, tanto de la información suministrada por los equipos como de la información procesada. Toda esta información es mostrada de forma sincronizada, de tal manera que disponemos de una visión global de cada punto de la carretera.

El sistema de inspección automática ha sido utilizado en diversos tramos de la red de carreteras de Castilla y León, permitiendo evaluar el deterioro de la carretera y su evolución en el tiempo y poder así tomar medidas preventivas. Se ha presentado un ejemplo de una inspección realizada en un tramo de carretera real en el que se muestra la información proporcionada por el software de visualización de desarrollo propio. También se muestran algunos ejemplos de los informes que se generan y las comparaciones que se pueden realizar entre tomas consecutivas, poniendo de manifiesto la utilidad de la herramienta desarrollada para la gestión del mantenimiento de las carreteras.

El poder contar con este tipo de herramientas de inspección automática nos va a permitir auscultar la carretera de forma periódica y programada en el tiempo. Esto nos dará

Área total con defectos	170.649	Tramo 106.000 - 106.100	
Área total Carretera	6,397,000.5	Área tramo con defectos	14.479
Área total con defecto SIN ESPECIFICAR	1.381	Área total SIN ESPECIFICAR con defectos	0.055
Área total con defecto Grieta Transversal	0.125	Área total Grieta Transversal con defectos	0
Área total con defecto Grieta Longitudinal	0.414	Área total Grieta Longitudinal con defectos	0.038
Área total con defecto Malla	168.73	Área total Malla con defectos	14.386
Área total con defecto Parcheo	0	Área total Parcheo con defectos	0
Área total con defecto Mancha	0	Área total Mancha con defectos	0
Área total con defecto Cambio de Asfalto	0	Área total Cambio de Asfalto con defectos	0
Área de cada tramo	402.8	Perímetro de Defectos	4118.14
		Cantidad de Defectos	33

Figura 12. Informe resumen. Área en m2 y perímetro en metros.

Sistema de inspección visual automática de carreteras mediante técnicas de procesamiento 2D/3D

CARRETERA	P.K.	TIPO DE DEFECTO	LONGITUD DEL DEFECTO (mm)	ANCHURA DEL DEFECTO (mm)	ÁREA DEL DEFECTO (m ²)	Índice I
Carretera - Tramo de Datos 2	P.K. 107+574	Malla	337,331.38	5.67	2.404	1
Carretera - Tramo de Datos 1	P.K. 107+541	Malla	272,898.88	5.58	2.611	2
Carretera - Tramo de Datos 1	P.K. 107+539	SIN ESPECIFICAR	131.61	12.00	0.002	3
Carretera - Tramo de Datos 1	P.K. 107+551	Malla	281,528.22	5.00	1.136	4
Carretera - Tramo de Datos 1	P.K. 107+550	SIN ESPECIFICAR	121.56	15.27	0.002	5
Carretera - Tramo de Datos 1	P.K. 107+547	SIN ESPECIFICAR	189.43	14.84	0.003	6
Carretera - Tramo de Datos 1	P.K. 107+542	Malla	247,586.75	3.77	2.521	7
Carretera - Tramo de Datos 1	P.K. 107+528	Malla	224,367.97	5.71	1.611	8

Figura 13. Informe detallado con referencia a imágenes.

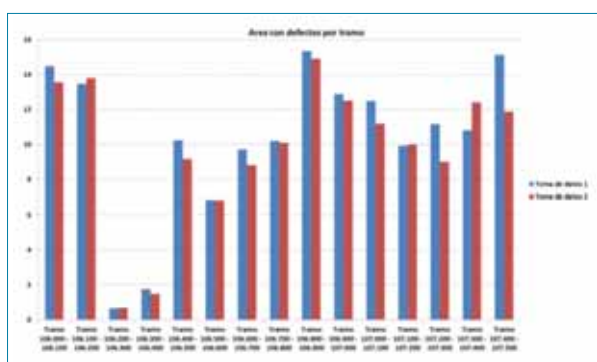


Figura 14. Comparación de área de defectos por tramo.

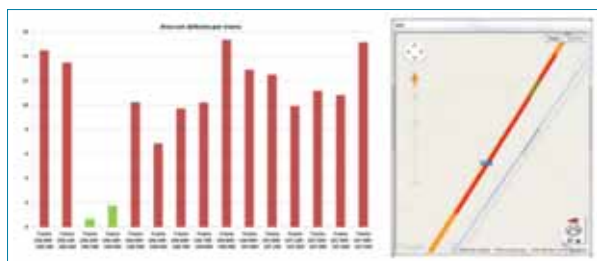


Figura 15. Código de colores para visualizar el estado de la carretera de forma intuitiva.

una visión exacta de la evolución que sufren los diferentes defectos detectados (principalmente grietas, fisuras y estado del firme) con el tiempo y nos permitirá obtener las conclusiones pertinentes para efectuar los tratamientos preventivos necesarios para mantener el firme en el estado correcto de uso y confort para los usuarios, bien a través de tratamientos superficiales tipo microaglomerado en frío, bien a través del sellado de las grietas o decidir si es necesario llevar a cabo un fresado y reposición del firme en función del estado y la evolución del mismo, lo que va a permitir un ahorro de costes y una optimización de los recursos destinados a la conservación de los firmes.

7. Referencias bibliográficas

- D.S. Mahler, Z.B. Kharoufa, E.K. Wong, and L.G. Shaw, "Pavement distress analysis using image processing techniques," *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 6, 1–14, 1991.
- S. Chambon, and J.M. Moliard, "Automatic Road Pavement Assessment with Image Processing: Review and Comparison," *International Journal of Geophysics*, pp. 1–20, 2011.
- H. Oliveira, and P.L. Correia, "Automatic Road Crack Detection and Characterization," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 14(1), pp. 155-168, 2013.
- A. Cord, and S. Chambon, "Automatic Road Defect Detection by Textural Pattern Recognition Based on AdaBoost," *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, CACAIE, 27, pp. 244-259, 2012.
- E. Zalama, J. Gómez-García-Bermejo, R. Medina, and J. Llamas, "Road Crack Detection Using Visual Features Extracted by Gabor Filters," *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2013.
- G. Bao, "Road Distress Analysis using 2D and 3D Information," *Electronic Thesis or Dissertation*, University of Toledo, 2010.
- K. Wang, "Automated Survey of Pavement Distress based on 2D and 3D Laser Images". Report MBTC DOT 3023, 2011.
- Y. Tsai, Y. Wu, C. Ai, and E. Pitts, "Critical Assessment of Measuring Concrete Joint Faulting Using 3D Continuous Pavement Profile Data," *ASCE Journal of Transportation Engineering*, 138(11), pp. 1291–1296, 2012.
- Y. Tsai, and F. Li, "Critical Assessment of Detecting Asphalt Pavement Cracks under Different Lighting and Low Intensity Contrast Conditions Using Emerging 3D Laser Technology," *ASCE Journal of Transportation Engineering*, 138(5), pp. 649–656, 2012.
- J. Huang, W. Liu, and X. Sun, "A Pavement Crack Detection Method Combining 2D with 3D Information Based on Dempster-Shafer Theory," *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2013.