

Sistema para la monitorización de movimientos en estructuras basados en técnicas de visión artificial

System for monitoring movements in structures based on artificial vision techniques

Miguel Ángel Vicente Cabrera^{a, *}, Thomas Schumacher^b, Jesús Mínguez Algarra^c,

Nicholas Brown^d y Dorys Carmen González Cabrera^e

^a Dr. ICCP. Profesor Titular de Universidad. Universidad de Burgos. mvicente@ubu.es

^b PhD. Civil Engineer. Associate Professor. Portland State University (Portland, OR, USA), thomas.schumacher@pdx.edu

^c Dr. ICCP. Profesor Ayudante Doctor. Universidad de Burgos, jminguez@ubu.es

^d Civil Engineer. Master Student. Portland State University (Portland, OR, USA), nibrown@pdx.edu

^e Dr. ICCP. Profesor Contratado Doctor. Universidad de Burgos, dgonzalez@ubu.es

RESUMEN

Este artículo muestra un novedoso sistema para la monitorización de movimientos en puentes y estructuras basado en visión artificial. De forma resumida, el sistema está compuesto por unos láseres ubicados en una referencia fija y un panel dotado de luces LED, ubicado sobre la referencia móvil. Los láseres inciden sobre el panel y una videocámara registra todos los puntos de luz del panel. La imagen es procesada mediante software de tratamiento de imágenes. Se han llevado a cabo ensayos de calibración en el laboratorio y también en campo y en todos los casos, los resultados han sido muy satisfactorios. El sistema permite alcanzar precisiones del orden de la décima de milímetro, monitorizando de forma continua y bajo cualquier condición lumínica.

ABSTRACT

This paper shows a novel system for monitoring movements in bridges and structures, based on artificial vision. In summary, the system consists of lasers located in a fixed reference and a panel equipped with LED lights, located on the mobile (or target) reference. Lasers hit the panel and a videocamera records all the panel's light points. The image is processed by artificial vision software. Calibration tests have been carried out in the laboratory and also in the field and in all cases, the results have been very satisfactory. The system provides an accuracy of around a tenth of a millimetre, monitoring continuously and under any lighting conditions.

PALABRAS CLAVE: monitorización de estructuras, visión artificial, láser.

KEYWORDS: structural health monitoring, artificial vision, laser.

1. Introducción

Durante los últimos 50 años se ha producido un incremento espectacular en el patrimonio de puentes de los países. Más allá de las innumerables ventajas que estos elementos aportan a los ciudadanos, se hace necesario utilizar una impor-

tante cantidad de recursos para su mantenimiento, al objeto de garantizar un adecuado nivel de confort y seguridad. Dentro de las tareas de mantenimiento, la inspección visual sigue siendo la actividad esencial, basada en el trabajo en

campo de técnicos altamente cualificados, capaces de detectar los indicios de falta de calidad de las estructuras. Esto supone siempre un enorme gasto en recursos humanos, no siempre óptimamente utilizados. Además, en muchos casos la inspección visual muestra un notable grado de subjetividad, y los resultados del estudio en campo dependen fuertemente del técnico que ha realizado los trabajos.

Por otra parte, en los últimos años se ha producido un desarrollo muy notable en la tecnología de sensores, incrementado su calidad y, sobremanera, reduciendo fuertemente sus costes, lo que ha permitido su uso en puentes. En este contexto, la monitorización de puentes se convierte en una herramienta muy útil para las tareas de mantenimiento de los puentes, combinada con los procedimientos tradicionales de inspección.

De entre todos los parámetros que pueden ser monitorizados en un puente, la flecha vertical es, posiblemente, el más útil, ya que ésta está relacionada directamente con el comportamiento en servicio de la estructural. Por ello, todas las normas internacionales limitan su valor máximo [1, 2]. Además, los procesos de envejecimiento, degradación mecánica, corrosión así como los fenómenos diferidos (retracción, fluencia y pérdida de pretensado, entre otros), afectan directamente a la deformación vertical.

Sin embargo, la monitorización a largo plazo de la flecha vertical en puentes en servicio sigue siendo un reto tecnológico de primer nivel, especialmente en el caso de puentes de gran altura o gran luz, o aquellos situados en zonas de difícil acceso.

El sistema de medida ideal debe cumplir con una serie de requisitos. En primer lugar, debe ser preciso, para ser capaz de apreciar desplazamientos pequeños. En segundo lugar, debe ser robusto, pudiendo operar bajo condiciones cambiantes de humedad y temperatura. También tiene que ser fiable. Finalmente tiene que ser barato, para que su implementación sea económicamente factible.

Existen muchas técnicas en el mercado para medir movimientos verticales en puentes (transductores de desplazamiento, distanciómetros láser, interferómetros acústicos y electromagnéticos, estaciones totales, GPS, geófonos, acelerómetros, etc.). Sin embargo, ninguno de ellos satisface todos los requisitos anteriormente descritos.

En los últimos años han emergido con fuerza las soluciones basadas en visión artificial. Esto está siendo posible por el enorme desarrollo de los sistemas de video, que permiten actualmente grabaciones en 4K a costes relativamente bajos. Además, la proliferación de software de tratamiento digital de imágenes permite post-procesados relativamente sencillos de las imágenes para extraer la información deseada.

Sin embargo, esta tecnología aún no está madura, puesto que tiene que resolver dos temas cruciales. El primero es la precisión: para su aplicación en puentes, ésta debe situarse por debajo de 1 mm. El segundo es el postprocesado de los datos. Generalmente una grabación de video contiene una ingente cantidad de información que es necesario filtrar. Se hace necesario mejorar los sistemas de postprocesado (hardware y software) para que puedan ser capaces de procesar información en tiempo real.

La mayor parte de los trabajos de investigación en este campo ubican la cámara de video en una posición fija, fuera del puente (y generalmente bastante lejos). El puente se equipa con una serie de dianas. El movimiento de las dianas es medido a través de la comparación de los diferentes fotogramas [3 a 9]. Esta solución tiene varias limitaciones relevantes. En primer lugar, la precisión que se obtiene es, en general, muy baja. La precisión de la cámara es el tamaño de píxel, el cual depende fuertemente del campo de visión. Cuando la cámara está muy alejada del puente, el campo de visión es muy grande y, en consecuencia, la precisión es muy baja. Para mejorar esto se utilizan potentes teleobjetivos, lo que encarece mucho el precio. En el caso de puentes muy grandes (colgantes o atirantados),

en los que las flechas esperadas es de centenares de milímetros, esta solución puede llegar a ser viable [10, 11], pero en el caso de puentes mucho más rígidos, la solución no funciona.

La segunda limitación es que este sistema no puede monitorizar durante la noche. La tercera limitación está relacionado con el comportamiento de la videocámara a los fenómenos meteorológicos y el vandalismo.

Existen un buen número de trabajos de investigación en los que se utilizan sistemas de medida basados en video para monitorizar la respuesta dinámica de las estructuras [12 a 18]. Se trata de una medida más fácil puesto que es menos exigente que la medida de la respuesta diferida de la estructura (es menos sensible a la precisión de la cámara y la duración de la medida es generalmente corta). Sin embargo, tiene menos interés, ya que los acelerómetros son equipos que realizan esta medida de forma muy eficiente.

Apenas existen trabajos, en los que estos sistemas se utilicen para la monitorización de la respuesta estática. Cabe destacar, en este punto, la investigación desarrollado por Zhao y sus colaboradores [19, 20]. En este caso, el láser se ubican en una referencia fija y la videocámara junto con el panel se ubican en el punto de control. En este caso, tanto la videocámara como el panel se mueven solidariamente. Cuando el punto de control se mueve, la videocámara registra el movimiento del punto láser sobre el panel, que es contrario al movimiento del punto de control. El punto débil de esta solución es que el panel es opaco, por lo que la videocámara tiene que visualizarlo desde un ángulo oblicuo (no ortogonal) al panel, para no interferir con el láser incidente. Esto debe tenerse en cuenta a la hora de analizar las imágenes. Además, esta solución obliga a que el panel y la videocámara se muevan solidariamente, puesto que dentro del campo de visión solo se encuentra la referencia fija (punto láser) y no existen referencias móviles.

La solución que aquí se muestra mejora los puntos débiles de la solución anteriormente descrita, incluyendo luces LED en el panel. Esto

permite liberar a la videocámara de un movimiento solidario con el panel. Además, el panel es traslúcido, de tal modo que la videocámara puede situarse en el lado opuesto al del láser y puede posicionarse, por lo tanto, perpendicularmente al panel. Además, esta solución aporta más ventajas, como es el hecho de que puede funcionar tanto de día como de noche.

Esta solución ha sido patentada por la Universidad de Burgos (ES 2 684 134 B2). El sistema que aquí se muestra puede monitorizar desplazamientos, independientemente de su naturaleza (instantáneos o diferidos), durante toda la vida útil de la estructura. Además, puede hacerlo en estructuras en las que conseguir una referencia fija es complejo, como es el caso de puentes y viaductos de gran altura o aquellos situados sobre cauces de agua, etc. También puede monitorizar bajo cualquier condición lumínica, de día y de noche, y con una precisión del entorno de la décima de milímetro.

2. Descripción del sensor

2.1 Descripción del equipo y sus componentes

El transductor de desplazamiento basado en láser y video (LVBDT por sus siglas en inglés), está compuesto por dos partes principales, a saber, la parte fija y la parte móvil (Figura 1).

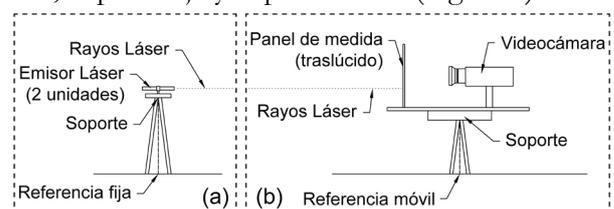


Figura 1. Sensor LVBDT: (a) Parte fija, (b) Parte móvil.

La parte fija se ubica en un emplazamiento fijo, es decir, que no se mueve para los propósitos de la monitorización que se pretende realizar. Está compuesta por un soporte que sujeta dos punteros láser. Los láseres utilizados en esta in-

vestigación son de punto verde, con una longitud de onda de 532 nm, una potencia de 5mW, clase IIIA y una divergencia de radio de 1 mrad.

La parte móvil está ubicada en el punto de control y se mueve solidariamente con éste. Está compuesto por una videocámara y un panel de medida sobre un soporte. La videocámara utilizada en esta investigación fue una Lumix DMC-G80 (PANASONIC), con un sensor de imagen de 16 MP y un zoom óptico de 12-60 mm f/3.5-5.6, con capacidad para grabar en 4K a 60fps.

El panel de medida está compuesto por una pieza rectangular de metacrilato transparente, de 300 mm de anchura y 200 mm de altura, y un espesor de 5 mm. En una de sus caras se pegó una hoja de papel blanco, para hacerlo traslúcido. Además, el panel lleva 3 luces LED rojas ubicadas sobre dos líneas ortogonales, una horizontal y otra vertical (Figura 2).

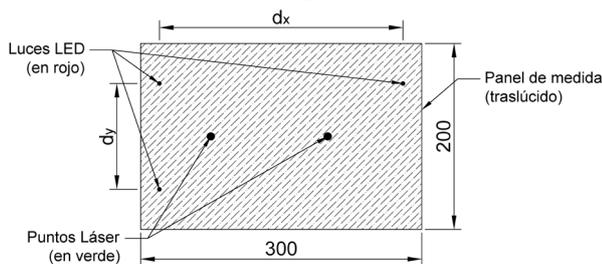


Figura 2. Descripción y dimensiones del panel de medida.

Los dos láseres proyectan sendos puntos sobre el panel de medida, en la cara opuesta a la del papel. Dentro del campo de visión de la videocámara se sitúan 5 puntos, a saber, los dos puntos laser verdes y las 3 luces LED rojas (Figura 2). Las tres luces LED definen una suerte de sistema de coordenadas (Figura 3). Las dimensiones d_x y d_y entre las luces LED son conocidas. La videocámara puede ubicarse ortogonalmente al panel de medida. Cuando el punto de medida se mueve, también lo hace el panel de medida. Los puntos láser, en realidad, se mantienen fijos mientras que las luces LED son las que se mueven. Sin embargo, la videocámara “ve” otra cosa: que los puntos láser se mueven con respecto a las luces LED.

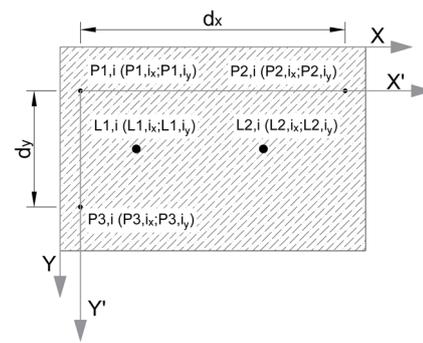


Figura 3. Sistema de coordenadas en el panel de medida.

2.2 Análisis numérico

A continuación se describe el procedimiento para la extracción de la información a partir de la grabación de la videocámara.

2.2.1. Transformación de video a imágenes

El primer paso es transformar la grabación de video en una sucesión de imágenes. Existen numerosos programas informáticos que pueden realizar esta función. En este caso se ha utilizado MATLAB (MATHWORKS). Un dato adicional, interesante, es la velocidad de grabación. Las videocámaras tradicionales graban a 60 fps, aunque se pueden utilizar cámaras de grabación en alta velocidad, para, por ejemplo, análisis dinámicos, impulsivos o de impacto, o realizar grabación en time-lapse, para procesos de monitorización muy largos que no requieran alta velocidad de muestreo.

2.2.2. Transformación homográfica

Aunque se espera que la videocámara se mantenga perpendicular al panel de medida en todo momento, esta condición no es imprescindible. Además, durante la monitorización la videocámara se puede mover de forma diferente respecto al panel de medida. En consecuencia, se hace necesario considerar esta situación y aplicar una corrección homográfica de cada imagen. Esta operación es sencilla, en la medida en que las distancias entre las diferentes luces LED es constante y conocida. En la Figura 4 se muestra una imagen antes y después de ser sometida a la transformación homográfica.

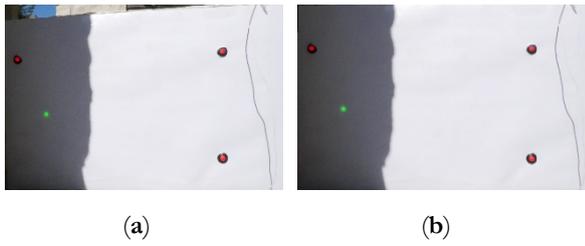


Figura 4. Imagen antes (a) y después (b) de la transformación homográfica.

2.2.3. Filtrado del umbral de color

El siguiente paso consiste en identificar los píxeles pertenecientes a las cinco referencias anteriormente mencionadas, es decir, a los dos puntos láser y las tres luces LED y eliminar el resto de la imagen, innecesaria. Una de las principales ventajas de esta solución es que las cinco referencias son emisores lumínicos, lo que permite realizar la grabación con muy diferentes niveles de iluminación.

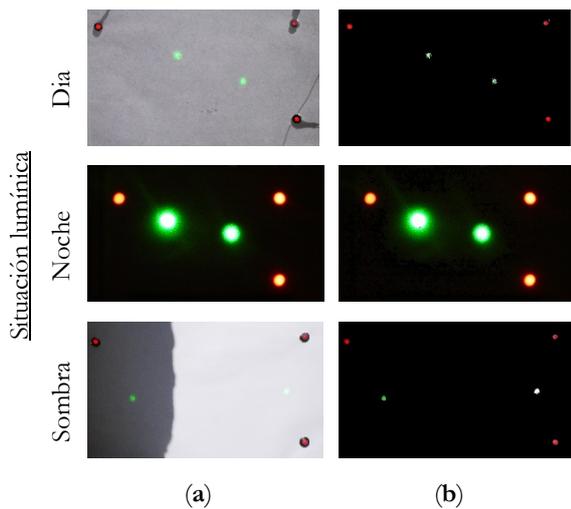


Figura 5. Imagen antes (a) y después (b) de la aplicación del filtro de color, para diferentes situaciones lumínicas.

Todas las imágenes fueron sometidas a un procedimiento de umbral de color. En este caso, se ha utilizado el método propuesto por Huang y Wang [21]. El color umbral fue el negro y el espacio de color fue el HSB (matiz-saturación-brillo). El rango de matiz fue de 0 a 255, el de saturación de 0 a 140 y el brillo de 0 a 243. La Figura 5 muestra una comparación entre imágenes antes y después de ser sometidas a este proceso, bajo diferentes condiciones lumínicas.

Tal y como se puede apreciar en la Figura 5, el resultado del proceso de filtrado es muy satisfactorio. Además, el tamaño de cada imagen es aproximadamente el 10% del inicial, lo que resulta muy beneficioso para el análisis computacional posterior.

2.2.4. Identificación de los píxeles y agrupación

Desde el punto de vista numérico, cada imagen es una matriz de N filas y 5 columnas, donde N es el número total de píxeles. La primera y la segunda columna corresponden a las coordenadas X e Y del píxel y las tres últimas, a sus valores de color RGB.

A continuación, se identifican y agrupan los píxeles pertenecientes a cada uno de los 5 puntos de referencia (los dos puntos láser y las 3 luces LED). Para ello se establecen criterios de rango de color y de proximidad. El resultado final es un conjunto de 5 matrices de N_i filas y 2 columnas, en el que el término N_i es el número de píxeles de cada punto de referencia ($i=1$ a 5). En las columnas se recogen las coordenadas X e Y de dichos píxeles, respectivamente. El resto de píxeles se eliminan.

Seguidamente se determina el centro de gravedad de cada punto de referencia. Simplificadamente, se puede determinar como el valor promedio de los centros de gravedad de cada uno de los píxeles que conforman el punto de referencia elegido.

Llegado este punto, toda la información de cada imagen se ha concentrado en una matriz de 5×2 . Para la imagen i -ésima, cada fila incluye las coordenadas X e Y del centro de gravedad de cada punto de referencia (eq. 1). En este caso, los puntos $P1$, $P2$ y $P3$ hacen referencia a las luces LED y los puntos $L1$ y $L2$ hacen referencia a los puntos láser.

$$\begin{bmatrix} P1, i^{(0)}_x & P1, i^{(0)}_y \\ P2, i^{(0)}_x & P2, i^{(0)}_y \\ P3, i^{(0)}_x & P3, i^{(0)}_y \\ L1, i^{(0)}_x & L1, i^{(0)}_y \\ L2, i^{(0)}_x & L2, i^{(0)}_y \end{bmatrix} \quad (1)$$

2.2.5. Determinación de los movimientos y giros

A continuación, la matriz mostrada en la ecuación 1 se transforma, incluyendo una traslación y una rotación, para pasar de los ejes X-Y a los nuevos ejes X'-Y' (Figura 3), que es el sistema de referencia de las luces LED P1, P2 y P3 (eq. 2).

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ P2, i^{(1)}_x & 0 \\ 0 & P3, i^{(1)}_y \\ L1, i^{(1)}_x & L1, i^{(1)}_y \\ L2, i^{(1)}_x & L2, i^{(1)}_y \end{bmatrix} \quad (2)$$

Seguidamente se aplica, a esta matriz, el factor de conversión, para pasar de unidades de píxel a unidades físicas (eq. 3).

$$\begin{aligned} P2, i^{(1)}_x &= d_x \\ P3, i^{(1)}_y &= d_y \end{aligned} \quad (3)$$

De esta forma, la matriz de la ecuación 2 queda del siguiente modo (eq. 4).

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ d_x & 0 \\ 0 & d_y \\ L1, i^{(1)}_x \cdot \frac{d_x}{P2, i^{(1)}_x} & L1, i^{(1)}_y \cdot \frac{d_y}{P3, i^{(1)}_y} \\ L2, i^{(1)}_x \cdot \frac{d_x}{P2, i^{(1)}_x} & L2, i^{(1)}_y \cdot \frac{d_y}{P3, i^{(1)}_y} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Finalmente, los valores absolutos de distancia horizontal, vertical y giro se definen del siguiente modo (eq. 5) (Figura 6).

$$\begin{aligned} d_{h,i} &= \frac{1}{2} \cdot (L1, i^{(1)}_x + L2, i^{(1)}_x) \cdot \frac{d_x}{P2, i^{(1)}_x} \\ d_{v,i} &= \frac{1}{2} \cdot (L1, i^{(1)}_y + L2, i^{(1)}_y) \cdot \frac{d_y}{P3, i^{(1)}_y} \\ \tan(\theta_i) &= \frac{L1, i^{(3)}_y - L2, i^{(3)}_y}{L1, i^{(3)}_x - L2, i^{(3)}_x} \cdot \frac{d_y}{P3, i^{(1)}_y} \cdot \frac{P2, i^{(1)}_x}{d_x} \end{aligned} \quad (5)$$

Entre la primera imagen y la i-ésima se produce, en un caso general, un movimiento de todas las referencias, tanto los puntos láser como las luces LED (por un eventual movimiento relativo de la videocámara respecto del panel de control). En todo caso, las tres luces LED definen un sistema de coordenadas intrínseco y por

lo tanto siempre se puede determinar la posición relativa entre los láseres y las luces LED. El movimiento relativo del panel se define del siguiente modo (eq. 6).

$$\begin{aligned} \delta_h &= d_{h,i} - d_{h,1} \\ \delta_v &= d_{v,i} - d_{v,1} \end{aligned} \quad (6)$$

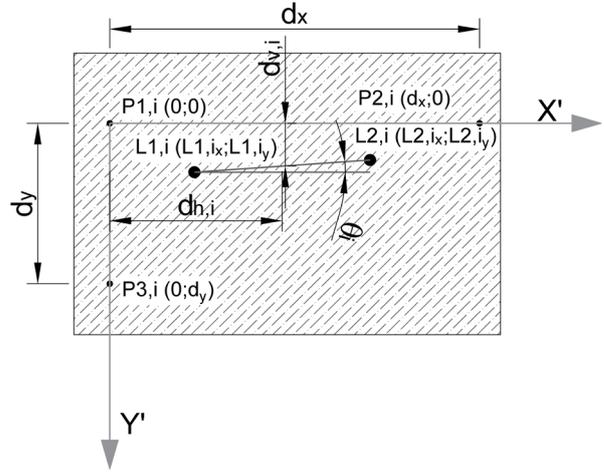


Figura 6. Coordenadas absolutas para la imagen i-ésima.

Una de las principales ventajas de la solución propuesta es que cada imagen incluye tanto las referencias fijas como las móviles. En consecuencia, la medida es independiente de la posición de la videocámara. El sistema permite monitorizar tanto movimientos horizontales como verticales y también giros. El rango de medida depende de las dimensiones del panel y la precisión depende de la calidad de la videocámara. Otra ventaja relevante es que el postprocesado es muy simple y muy rápido. Este procedimiento permite cualquier velocidad de grabación (desde las cámaras ultrarápidas hasta grabación en time-lapse) y cualquier resolución de videocámara (desde 720 p hasta la más moderna 8K). Además, esta solución permite precisiones del entorno del tamaño del píxel, independientemente de la distancia a la que se encuentre la referencia fija.

El sistema de visión artificial, conectado a un procesador, permite, finalmente, obtener un registro flecha – tiempo, que puede ser enviado a gestor de la infraestructura en tiempo real, generar sistemas de alarma temprana, etc.

3. Validación experimental

3.1 Valoración en laboratorio

Al objeto de validar la solución, se llevó a cabo en primer lugar un ensayo de calibración en el laboratorio, para comparar los movimientos proporcionados por el LVBDT y un LVDT convencional. Para ello, se ubicó la referencia móvil del LVBDT sobre un actuador hidráulico de doble efecto marca MTS. El actuador lleva incorporado un LVDT con un rango de 250 mm y un error de 0.01 mm. La parte fija del LVBDT estaba situado sobre el suelo del laboratorio, a unos 15 metros de distancia (Figuras 7 y 8). La distancia entre la videocámara y el panel fue de 300 mm y el tamaño de píxel fue de 0.08 mm.

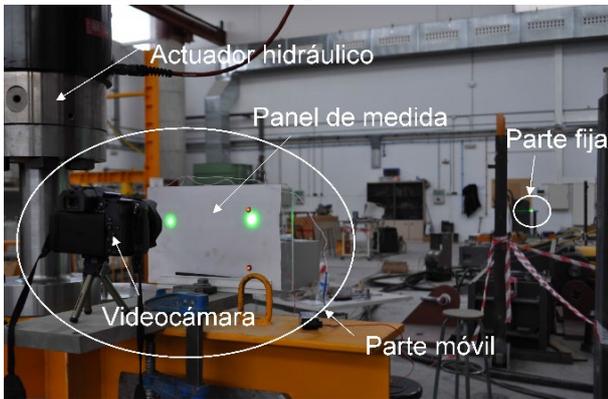


Figura 7. Prueba de calibración. Vista general.

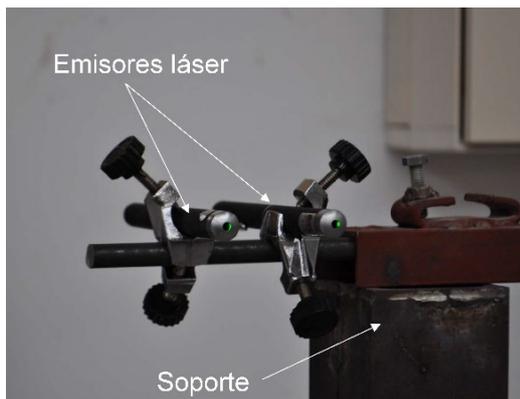


Figura 8. Prueba de calibración. Detalle de la referencia fija.

Durante el ensayo, el émbolo del actuador hidráulico se movió para abajo y para arriba, lentamente. El desplazamiento máximo fue de 20 mm y la velocidad de desplazamiento, de 0.2

mm/s. Durante el ensayo, se registró el movimiento con el LVDT (con una velocidad de captura de 1 Hz) y con el LVBDT (con una velocidad de grabación de 60 fps, aunque solo se post-procesó 1fps).

Las figuras 9 y 10 muestran los resultados obtenidos en ambas medidas, así como su correlación. Tal y como se puede apreciar en estas figuras, el LVBDT proporciona resultados muy próximos a los proporcionados por el LVDT, que se toma como referencia. La máxima diferencia obtenida ha sido de 0.6 mm. En términos generales, el LVBDT proporcionó desplazamientos un 2% inferior al mostrado por el LVDT. El valor de correlación R^2 es de 0.999. El valor medio y la desviación estándar de la diferencia fue de 0.19 mm y 0.23 mm respectivamente.

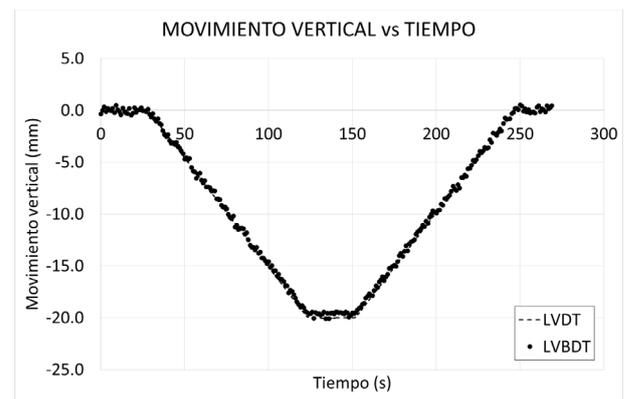


Figura 9. Comparación de las medidas proporcionadas por LVDT y LVBDT.

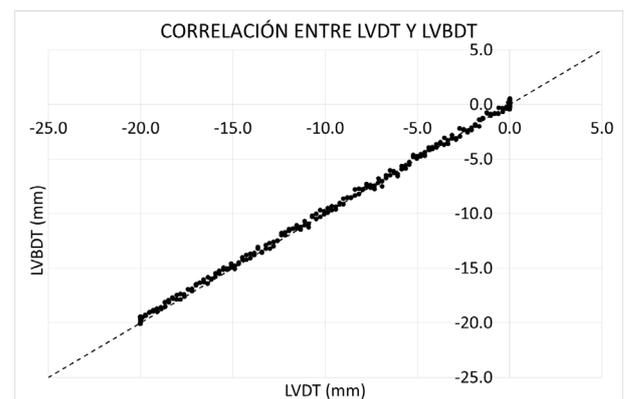


Figura 10. Correlación entre LVDT y LVBDT.

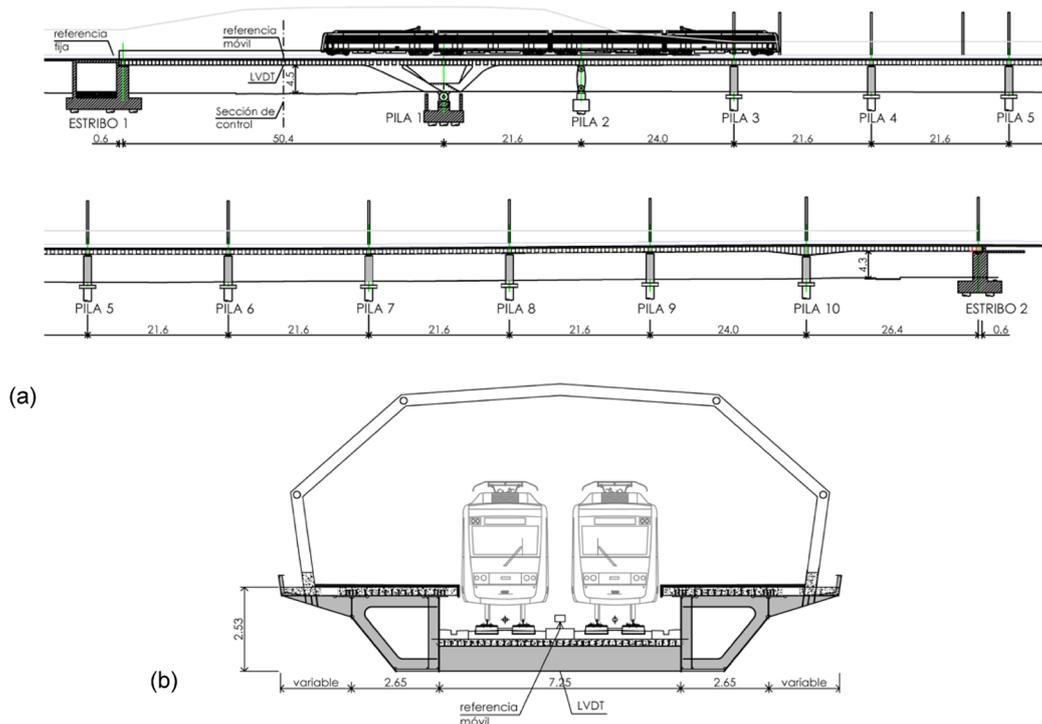


Figura 11. Viaducto de la estación de Loiola: (a) Alzado. (b). Sección transversal en el punto de referencia (sección centro-luz del vano 1).

3.2 Prueba en campo

También se llevó a cabo una prueba en campo, al objeto de evaluar la respuesta del LVBDT bajo condiciones reales. La estructura utilizada fue el Viaducto de la Estación de Loiola, situado en San Sebastián. Se trata de un viaducto mixto de 11 vanos de luces $50.4 + 21.6 + 24.0 + 6 \times 21.6 + 24.0 + 26.4$ metros y una longitud total de 277.2 metros (Figura 11).

Se llevó a cabo una prueba de carga del viaducto con locomotora y se midió la sección

centro-luz del vano 1 tanto con LVDT (por debajo del tablero), como con el nuevo sensor LVBDT (situado por encima del tablero, entre las vías). La parte móvil de este sensor se ubicó en la sección de control y la parte fija, en el estribo 1. La distancia entre la referencia fija y el punto de control fue de, aproximadamente, 26 metros. La distancia entre la videocámara y el panel de control fue de 300 mm y el tamaño de píxel fue de 0.08 mm (Figura 12).

Durante la prueba de carga se hizo pasar una composición ferroviaria desde el estribo 1 al



Figura 12. Descripción del ensayo en campo: (a) Vista general. (b). Referencia fija. (c) Referencia móvil.

estribo 2, a diferentes velocidades. Se registró el descenso vertical de la sección de control con ambas tecnologías. De forma análoga a las pruebas del laboratorio, aunque la velocidad de grabación de la cámara fue de 60 fps, solo se post-procesó 1fps.

Las figuras 13 y 14 muestran los resultados obtenidos en ambas medidas, así como su correlación, para una de las hipótesis de carga (en este caso, la correspondiente a una velocidad de paso de 5 km/h).

Tal y como se puede apreciar en las figuras 13 y 14, el LVBDT proporciona también resultados muy próximos a los proporcionados por el LVDT. La máxima diferencia obtenida ha sido de 0.2 mm. En términos generales, el LVBDT proporcionó desplazamientos un 2.6% superior al mostrado por el LVDT. El valor de correlación R^2 es de 0.998. El valor medio y la desviación estándar de la diferencia fue de 0.04 mm y 0.05 mm respectivamente.

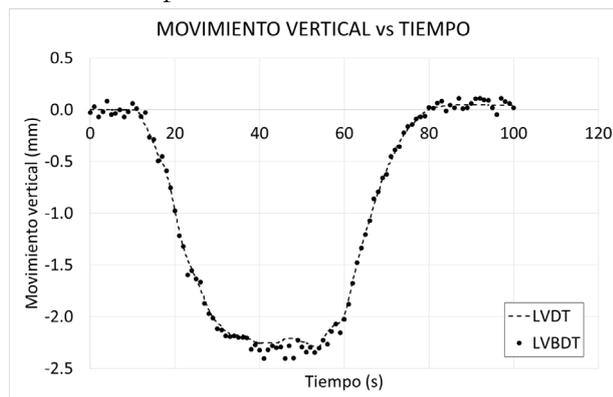


Figura 13. Comparación de las medidas proporcionadas por LVDT y LVBDT.

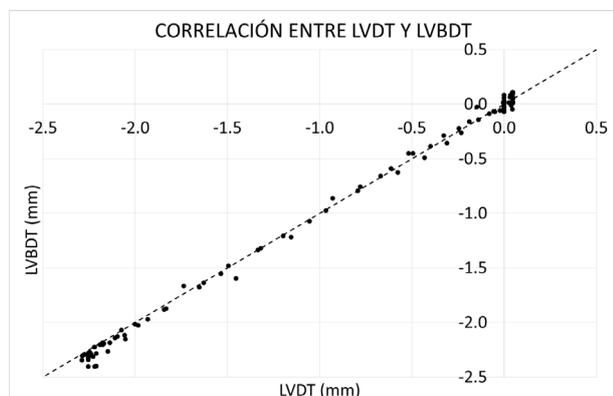


Figura 14. Correlación entre LVDT y LVBDT.

4. Conclusiones

Hasta la fecha, la monitorización a largo plazo de flechas verticales en puentes continúa siendo un reto tecnológico que aún no ha sido satisfactoriamente resuelto. Las diferentes soluciones técnicas resuelven parcialmente los requerimientos, especialmente en el caso de puentes de gran altura, gran luz y gran rigidez.

Este artículo muestra un nuevo sistema para la monitorización de las flechas y también los giros en estructuras, basado en técnicas de visión artificial, utilizando láseres, luces LED y una videocámara, denominado LVBDT. Esta solución ha sido especialmente desarrollada para monitorización a largo plazo de movimientos de naturaleza casi-estática bajo cualquier condición de iluminación. La principal novedad de este sistema es que dentro del campo de visión de la videocámara se encuentran tanto la referencia fija como la móvil. Por lo tanto, no es necesario ubicar la videocámara en una posición fija (como sí ocurre en algunas soluciones desarrolladas por otros investigadores); su movimiento no tiene influencia en la medida. Otra ventaja relevante es que esta solución puede operar bajo cualquier condición lumínica, lo que la hace apta para monitorización nocturna. La videocámara se ubica cerca del panel de medida, lo que mejora enormemente la resolución de la solución.

El artículo describe en detalle el sensor y dos pruebas llevadas a cabo por los autores, tanto en laboratorio como el campo. Los resultados de ambas propuestas confirman que la solución proporciona valores de precisión muy elevados, del orden de la décima de mm. Las diferencias con el transductor de desplazamiento LVDT son del orden del 2%, lo cual es más que aceptable para la monitorización en campo.

En resumen, el sistema que aquí se muestra puede monitorizar desplazamientos, independientemente de su naturaleza (instantáneos o diferidos), durante toda la vida útil de la estructura. La solución es especialmente útil en estruc-

turas en las que obtener una referencia fija es difícil, como, por ejemplo, en puentes o viaductos de gran altura o en aquellos situados sobre vías de agua. También puede monitorizar bajo cualquier condición lumínica, de día y de noche. Y todo ello puede llevarse a cabo con una precisión del entorno de la décima de milímetro.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la ETS - Euskal Trenbide Sarea y a las empresas Anta Ingeniería Civil, Altuna y Uria, Construcciones Moyua y Comsa Emte por permitir la realización de los trabajos en campo en el Viaducto de la Estación de Loiola.

Referencias

- [1] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). LRFD Bridge Design Specifications, 8th ed.; American Association of State Highway and Transportation Officials: Washington, DC, USA, 2017.
- [2] EN 1992-2. Eurocode 2—Design of Concrete Structures—Concrete Bridges—Design and Detailing Rules; European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2005.
- [3] Ye, X.W.; Dong, C.Z.; Liu, T. A review of machine vision-based structural health monitoring: Methodologies and applications. *J. Sens.* 2016, 2016, 7103039.
- [4] Tian, L.; Pan, B. Remote bridge deflection measurement using an advanced video deflectometer and actively illuminated led targets. *Sensors* 2016, 16, 1344.
- [5] Feng, D.; Feng, M.Q.; Ozer, E.; Fukuda, Y. A vision-based sensor for noncontact structural displacement measurement. *Sensors* 2015, 15, 16557–16575.
- [6] Ribeiro, D.; Calçada, R.; Ferreira, J.; Martins, T. Non-contact measurement of the dynamic displacement of railway bridges using an advanced video-based system. *Eng. Struct.* 2014, 75, 164–180.
- [7] Shariati, A.; Schumacher, T. Eulerian-Based Virtual Visual Sensors to Measure Dynamic Displacements of Structures. *Struct. Control Health Monit.* 2017, 24, doi: 10.1002/stc.1977.
- [8] Lee, J.J.; Shinozuka, M. A vision-based system for remote sensing of bridge displacement. *NDT&E Int.* 2006, 39, 425–431.
- [9] Yoneyama, S.; Ueda, H. Bridge deflection measurement using digital image correlation with camera movement correction. *Mater. Trans.* 2012, 53, 285–290.
- [10] Feng, D.M.; Feng, M.Q. Experimental validation of cost-effective vision-based structural health monitoring. *Mech. Syst. Signal Process.* 2017, 88, 199–211.
- [11] Feng D.M.; Feng, M.Q. Computer vision for SHM of civil infrastructure: From dynamic response measurement to damage detection—A review. *Eng. Struct.* 2018, 156, 105–117.
- [12] Khuc, T.; Catbas, F.N. Computer vision-based displacement and vibration monitoring without using physical target on structures. *Struct. Infrastruct. Eng.* 2017, 13, 505–516.
- [13] Khuc, T.; Catbas, F.N. Completely contactless structural health monitoring of real-life structures using cameras and computer vision. *Struct. Control Health Monit.* 2017, 24, e1852.
- [14] Feng, D.; Feng, M.Q. Identification of structural stiffness and excitation forces in time domain using noncontact vision-based displacement measurement. *J. Sound Vib.* 2017, 406, 15–28.
- [15] Lee, J.; Lee, K.-C.; Cho, S., Sim, S.-H. Computer vision-based structural displacement measurement robust to light-induced image degradation for in-service bridges. *Sensors* 2017, 17, 2317.
- [16] Zhang, D.; Guo, J.; Lei, X.; Zhu, C. A high-speed vision-based sensor for dynamic vibration analysis using fast motion extraction algorithms. *Sensors* 2016, 16, 572.

- [17] Shariati, A.; Schumacher, T.; Ramanna, N. Eulerian-Based Virtual Visual Sensors to Detect Natural Frequencies of Structures. *J. Civ. Struct. Health Monit.* 2015, 5, 457–468, doi: 10.1007/s13349-015-0128-5.
- [18] Schumacher, T.; Shariati, A. Monitoring of structures and mechanical systems using virtual visual sensors for video analysis: Fundamental concept and proof of feasibility. *Sensors* 2013, 13, 16551–16564.
- [19] Zhao, X.; Liu, H.; Yu, Y.; Zhu, Q.; Hu, W.; Li, M.; Ou, J. Displacement monitoring technique using a smartphone base on the laser projection-sensing method. *Sens. Actuators A Phys.* 2016, 246, 35–47.
- [20] Zhao, X.; Liu, H.; Yu, Y.; Xu, X.; Hu, W.; Li, M.; Ou, J. Bridge displacement monitoring method based on laser projection-sensing technology. *Sensors* 2015, 15, 8444–8463.
- [21] Huang, L.-K.; Wang, M.-J.J. Image thresholding by minimizing the measures of fuzziness. *Pattern Recognit.* 1995, 28, 41–51.