

Desarrollo e implementación de un sistema láser para caracterización dinámica y medición de desplazamientos en estructuras civiles

Development and implementation of a laser system for dynamic characterization and displacement measurement of civil structures

Jean Michel Franco , Daniel Gómez, Jorge Hernán Murcia, Peter Thomson, Johannio Marulanda*

Grupo de Investigación en Ingeniería Sísmica, Ingeniería Eólica y Estructuras Inteligentes, G-7, Escuela de Ingeniería Civil y Geomática. Universidad del Valle. Calle 13 N.º 100-00 Ed.350 Ciudad Universitaria Meléndez. Cali, Colombia.

(Recibido el 24 de septiembre de 2010. Aceptado el 8 de julio de 2011)

Resumen

La instrumentación y el monitoreo de vibraciones en estructuras civiles ha ganado importancia en las últimas décadas debido a potenciales aplicaciones en identificación modal y monitoreo de salud estructural. La identificación de las propiedades dinámicas de las estructuras permite que sus modelos numéricos sean ajustados mientras que el monitoreo de salud estructural permite la identificación y caracterización del daño en las estructuras con el objetivo de realizar intervenciones anticipadas de bajo costo. Los acelerómetros son los instrumentos más empleados en estructuras civiles porque pueden ser adheridos directamente a la estructura sin requerir un marco independiente de referencia. En casos en los que se requieren los valores de desplazamiento, estos son frecuentemente estimados de manera indirecta mediante la doble integración numérica de las aceleraciones medidas. Sin embargo, estos métodos numéricos usualmente introducen errores considerables en los resultados. Este artículo presenta el desarrollo, la validación y la implementación en escala real de un novedoso sistema para la medición directa de desplazamientos de estructuras civiles. El sistema consiste en punteros láser de bajo costo que se adhieren a la estructura, una pantalla y una cámara de vídeo, y algoritmos para el procesamiento de imágenes que operan en un computador. La validación del sistema se realizó mediante una serie de pruebas de laboratorio y el análisis comparativo de los resultados

* Autor de correspondencia. telefax: + 57 + 2 + 396 02 04, correo electrónico: jmichelf@univalle.edu.co (J. M. Franco)

usando instrumentos de referencia. El sistema se implementó en un puente peatonal en Cali, Colombia, y los desplazamientos obtenidos con el sistema láser fueron comparados con los estimados con mediciones de aceleración. Los resultados muestran que el sistema propuesto es una alternativa precisa y de bajo costo para aplicaciones de instrumentación en estructuras civiles.

----- *Palabras clave:* identificación modal, monitoreo de salud estructural, sensores láser

Abstract

Instrumentation and vibration monitoring of civil structures has gained importance during the last decades due to potential applications in modal identification and structural health monitoring. The identification of dynamic properties of structures allows numerical models to be updated whereas structural health monitoring allows damage in structures to be both identified and characterized with the goal of anticipated lower-cost interventions. Accelerometers are the most common instruments used in civil structures due to the fact they can be attached directly to the structure without the need of an independent fixed frame of reference. In cases where values of displacements are desired, they are often estimated indirectly through double numerical integration of the measured accelerations. However these numerical methods commonly introduce considerable errors in the results. This paper presents the development, validation and real-scale implementation of a novel system for direct displacement measurements of civil structures. The system consists of low-cost laser pointers that are attached to the structure, a screen and video camera and image processing algorithms that run on a laptop PC. The validation of the system was carried out with a series of laboratory tests and the comparative analysis of results using reference instruments. The system was implemented on a pedestrian bridge in Cali, Colombia, and the displacements obtained with the laser system are compared with those estimated from accelerations measurements. The results show that the proposed system is a precise low-cost alternative for instrumentation applications in civil engineering.

----- *Keywords:* modal identification, structural health monitoring, laser sensors

Introducción

Las vibraciones excesivas o prolongadas en estructuras civiles pueden producir molestias en los usuarios y daños en elementos estructurales y no estructurales. Estas vibraciones están determinadas por los parámetros físicos de la estructura (masa, rigidez y amortiguamiento), y es modificando estas características estructurales como se minimiza la respuesta de la edificación

[1]. Las vibraciones son generalmente medidas mediante acelerómetros ubicados en la base y en diferentes partes de la estructura. Estos sensores miden las aceleraciones absolutas y se utilizan además para determinar periodos naturales, formas modales y amortiguamiento modal. Una aplicación de este tipo de instrumentación es el Monitoreo de Salud Estructural (MSE) [2], en el cual se analizan los cambios en las

propiedades dinámicas de la estructura con el fin de detectar daños. De esta manera la información obtenida mediante estos sensores está conformada por registros de aceleraciones y no de desplazamientos.

Para obtener la respuesta en desplazamiento se integra dos veces en el dominio del tiempo la respuesta en aceleración. Debido al proceso de la integración numérica se pierde información y no se consigue la verdadera respuesta en desplazamiento de la estructura. Para evitar la pérdida de información al integrar dos veces la señal de aceleración, en este documento se expone el desarrollo e implementación de un sistema para medir directamente los desplazamientos en estructuras de manera económica y robusta, utilizando técnicas de procesamiento digital de imágenes y visión artificial aplicadas a campos específicos en la Ingeniería Civil, como medición de desplazamientos estáticos y dinámicos en placas, puentes o en sistemas vibratorios [3-5].

En el pasado se ha intentado realizar mediciones de desplazamientos sin tener contacto directo con la estructura utilizando diferentes tecnologías, como el uso de sensores piezoeléctricos junto con LEDs [6,7], GPS para obtener mediciones estáticas y dinámicas en estructuras con movimientos de baja frecuencia [8], seguimiento de múltiples puntos utilizando LEDs y cámaras CCD [9], monitoreo de desplazamientos mediante marcas asignadas y visión artificial en puentes [10], entre otras técnicas en las cuales se destaca la evolución hacia procesamiento digital de imágenes y visión artificial, llegando al punto en donde se realizan comparaciones de desempeño entre este tipo de sensores que no requieren contacto directo con el punto de medición [11]. La visión artificial cubre un campo de aplicación muy extenso, que va desde aplicaciones en medicina [12] hasta aplicaciones en astronomía [13]. Una implementación de esta técnica en la Ingeniería Civil es la medición de desplazamientos a través del tiempo mediante un láser proyectado sobre una pantalla, el cual es captado por una cámara de vídeo. La implementación de este sistema da lugar a una forma fácil, económica y precisa,

que en cierto caso puede llegar a reemplazar los acelerómetros y LVDTs (Linear Voltage Displacement Transducers) debido a su bajo costo. El procesamiento de imágenes es utilizado para reconocer la posición de un puntero del Sensor Láser proyectado en una pantalla, el cual representa la posición de la estructura en ese instante (ver figura 1). El reconocimiento se logra mediante técnicas de procesamiento digital de imágenes, entre las cuales se destacan la umbralización, ecualización del histograma y el filtrado [14].

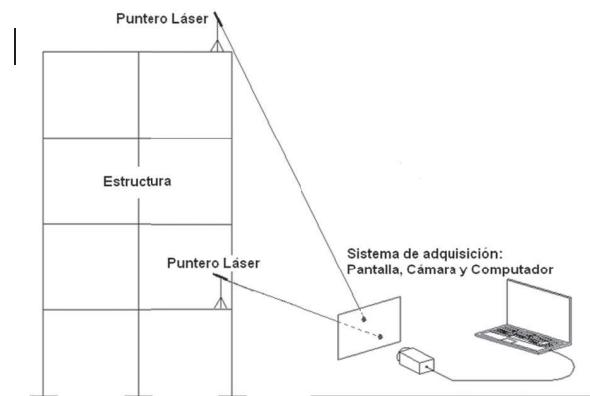


Figura 1 Esquema de la instrumentación de una estructura con el sensor láser

Para verificar la validez y precisión de la información obtenida mediante el Sistema Láser, se compara su desempeño con la respuesta en aceleración obtenida con un acelerómetro y con la respuesta en desplazamiento obtenida mediante un LVDT. Este tipo de estudio representa un avance en el área de Instrumentación y Monitoreo Estructural debido a que es aplicable a la medición de desplazamientos en grandes estructuras por la ventaja de no requerir contacto directo con ésta como es el caso de los LVDT. Otra ventaja del Sistema Láser es que no necesita largos tramos de cableado, como es el caso de la instrumentación mediante acelerómetros.

Descripción del sistema láser

El Sistema Láser propuesto consiste en uno o varios punteros láser, equipo telescópico, una

pantalla, una cámara de vídeo y un computador con los algoritmos para el procesamiento de la imagen (figura. 1). Los punteros láser, instalados en la estructura, proyectan los rayos sobre la pantalla y la cámara registra el movimiento de los puntos sobre la misma [15]. Cuando la distancia entre el puntero y la pantalla es considerable, es necesario emplear equipo telescópico para evitar la divergencia del haz. El movimiento de los puntos en la pantalla corresponde al desplazamiento de la estructura en las ubicaciones de los punteros láser y es identificado mediante el procesamiento digital de las imágenes registradas con la cámara [16]. Para el procesamiento de las imágenes se emplean técnicas de videogrametría, que permiten descomponer el registro de vídeo en secuencias de imágenes (marcos) y analizar comparativamente cada marco con uno inicial [17] La frecuencia de adquisición depende de la cantidad de marcos por segundo capturados por la cámara y la unidad mínima de medida depende de la resolución de la misma.

Calibración inicial

Además de la implementación y adquisición, se debe realizar una medida de correspondencia entre el número de píxeles y una distancia conocida para lograr una relación entre píxeles y unidades de longitud (e.g. centímetros, milímetros, etc). Para esto se busca obtener un Factor de Correspondencia (β) como medida, para lo cual se utiliza la relación *pixel/centímetro* o *pixel/milímetro* según los requerimientos. Esta constante es función de la resolución de la cámara y la distancia entre la cámara y la pantalla. La medición de esta constante se realiza agregando dos marcas a la pantalla separadas por una distancia dada, para luego capturar esa imagen y medir la distancia en píxeles entre ellas. Para obtener mediciones confiables, se calibra la cámara teniendo en cuenta la distorsión radial presente en el lente de ésta [18]

Para realizar un seguimiento e identificación óptima del desplazamiento, lo que se busca es capturar una escena lo más simple posible, a esto

se atribuye el uso de un fondo blanco, con el fin de resaltar en la imagen reflejada en la pantalla la posición del puntero láser. Cada imagen adquirida debe ser pre-procesada antes de calcular el desplazamiento, para lo que se emplean técnicas de filtrado, ecualización y umbralización.

Pre-procesamiento de la señal

Un vídeo es una señal matricial estructurada en donde el primer componente es la distribución plana cartesiana de la imagen (X, Y), el segundo componente es el identificador de los tres planos de color de la señal: rojo, verde y azul (RGB); y el tercer componente es un número de identificación asociado a cada imagen (i) [14] (figura 2). Adicionalmente se tiene otra señal temporal en la que cada dato es el tiempo asociado a cada imagen de la señal de vídeo. Debido a que esta señal no tiene ningún tratamiento previo de compresión de imágenes, la cantidad de datos obtenidos es considerable. Por ejemplo, la captura de 30 segundos de vídeo a una frecuencia de 30 marcos por segundo (FPS) genera un tamaño de datos de aproximadamente 64 MB. Empleando únicamente el plano rojo de la imagen es posible obtener la información necesaria sobre la ubicación del puntero debido a la longitud de onda del láser, aproximadamente 653 nm [19] disminuyendo considerablemente el tamaño. En situaciones en las que, debido a las condiciones de luz, haya un aporte importante de información sobre el puntero en los planos verde y azul es más adecuado realizar una conversión de los tres planos a tonos de grises, condensando la información de los tres planos en uno solo [20]. Para agilizar el procesamiento de la señal de vídeo, es conveniente utilizar regiones de interés (ROI's), para lo que sólo se procesa una zona de las imágenes en la que se presenta actividad. De esta manera la metodología permite monitorear simultáneamente el desplazamiento de varios puntos de la estructura dirigiendo varios punteros láser a una misma pantalla y seleccionando una ROI para cada láser (figura 3). Una vez se tiene la señal de vídeo filtrada en un solo plano de color rojo o en tonos de grises, se realiza el

procesamiento de las imágenes con el fin de mejorar el contraste y facilitar la identificación del puntero.

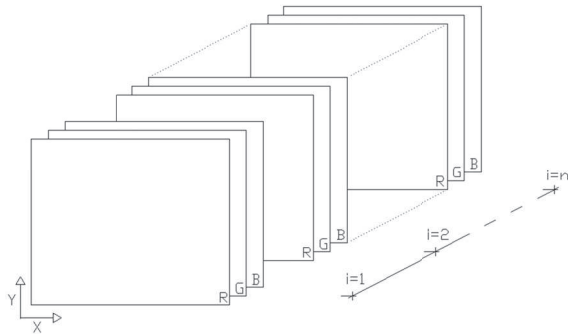


Figura 2 Esquema de una señal de video

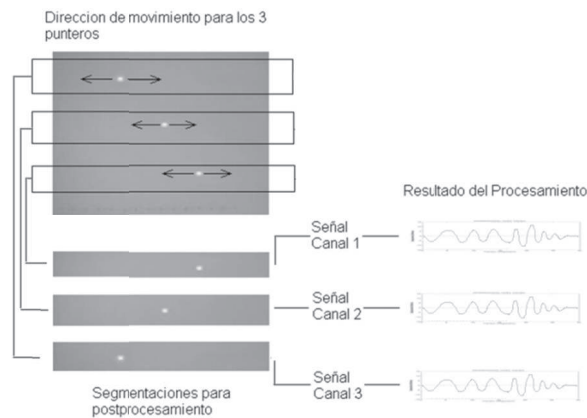


Figura 3 Segmentación en zonas de trabajo para varios punteros

Procesamiento de la señal

Existen diferentes técnicas de procesamiento con las que se busca extraer o resaltar la información de interés sobre la imagen, para lo que se utilizan regularmente dos técnicas, denominadas ecualización y umbralización. La ecualización del histograma de una imagen es una transformación que logra normalizar los niveles de grises, de manera que las partes oscuras se aclaran y las zonas tenues se resaltan logrando un mejor contraste de la imagen.

La umbralización es una técnica comúnmente utilizada para extraer información específica de

una imagen [21]. Esta técnica consiste en definir un rango límite que represente la información requerida, eliminando toda información que no esté dentro del rango y permitiendo observar únicamente el objeto de interés. El proceso de umbralización se puede automatizar al identificar el mayor valor de la Matriz A de identificación del puntero láser, la cual contiene las tonalidades de grises de la imagen. Este valor es una constante definida como el Índice de Umbralización (ϵ), con el que se define el rango de umbralización en el que se espera estén incluidos los valores del puntero láser en la Matriz A de identificación. A este rango se le asigna un valor de 1 y a lo que no pertenezca a este rango se le asigna un valor de 0, obteniendo una imagen binaria en la que sólo se encuentra el puntero láser

Identificación del puntero láser

Una vez se tiene una señal de video conformada por imágenes binarias es posible identificar la posición del puntero láser mediante la siguiente formulación [15].

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q j \times A(i,j)}{\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q A(i,j)} \quad (1)$$

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q i \times A(i,j)}{\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q A(i,j)} \quad (2)$$

En donde p y q son el número de filas y columnas de la matriz A , respectivamente. Las ecuaciones (1) y (2) representan las coordenadas del centroide del puntero láser.

Procedimiento experimental

El objetivo del procedimiento experimental es coleccionar datos para realizar un estudio comparativo entre el sistema propuesto e instrumentos comúnmente empleados para el monitoreo de vibraciones. En este caso se usaron dos tipos diferentes de instrumentos: sensores de aceleración (acelerómetros) y sensores de

desplazamiento (LVDTs). El acelerómetro sísmico de baja frecuencia Wilcoxon Research modelo 731A tiene un rango de frecuencia de 0,0500 a 500 Hz y, junto con el amplificador P31, se logra una sensibilidad de 10, 100 y 1000 V/g. El LVDT LD610-100 de OMEGA tiene un rango de medición de ± 10 cm y una linealidad $< 0,3\%$ FS. Cabe resaltar que los instrumentos mencionados requieren una gran cantidad de cableado y es necesario el uso de acondicionadores de señal y tarjetas de adquisición. La validación del Sistema Láser se realiza mediante pruebas en laboratorio y a escala real. Para los ensayos en laboratorio se emplea el simulador sísmico del Laboratorio de Ingeniería Sísmica y Dinámica Estructural de la Universidad del Valle. Para la validación a escala real se realizan pruebas de vibración producida por actividad humana en un puente peatonal de la ciudad de Cali, Colombia.

En el primer ensayo se somete a vibración libre un pórtico de acero, se registran las vibraciones con el Sistema Láser y con el acelerómetro. En el segundo ensayo se registran los desplazamientos del simulador sísmico con el Sistema Láser y el LVDT al someterlo a un barrido de frecuencias logarítmico entre 1 y 10 Hz.

Para la validación experimental a escala real del Sistema Láser se realiza una prueba de vibración inducida por actividad humana en un puente peatonal presforzado de 25 metros de longitud. El puente es altamente flexible y se ha reportado incomodidad de los usuarios por vibraciones excesivas. En este caso se empleó el Sistema Láser y el acelerómetro.

Todos los ensayos fueron realizados con una cámara web comercial típica a una frecuencia de adquisición de 30 FPS y una resolución de 320x240 píxeles. Además se emplea un puntero láser con una longitud de onda de 635 nm, aproximadamente, y un poder de salida de 3 mW, especificaciones de un láser común y económico.

Prueba No.1. Vibración libre: Acelerómetro vs. Sistema Láser

Se realiza un segundo ensayo de vibración libre sin el LVDT y con un acelerómetro, además de utilizar una estructura con una razón de amortiguamiento más baja. El montaje de la prueba se puede observar en la figura 4. Se obtiene la respuesta de la estructura en aceleración y en desplazamiento por medio del Sistema Láser. Para la validación del sistema se calculan las propiedades dinámicas del pórtico para determinar la frecuencia natural y la razón de amortiguamiento. Con el fin de comparar las señales en el tiempo se implementan algoritmos de integración numérica con el fin de integrar dos veces la señal de aceleraciones para confrontarla con el registro de desplazamientos adquirido mediante el Sistema Láser. Además se deriva numéricamente la señal obtenida mediante el Sistema Láser para compararla con la señal del acelerómetro.



Figura 4 Prueba No.1: montaje experimental

Prueba No.2. Barrido frecuencial: LVDT vs. Sistema Láser

En el simulador sísmico del Laboratorio de Ingeniería Sísmica y Dinámica Estructural de la Universidad del Valle se realiza un barrido frecuencial logarítmico entre 1 y 10 Hz. Este

ensayo es instrumentado mediante un LVDT y el Sistema Láser ubicados directamente sobre el simulador (figura 5). Para la validación del sistema se realiza la comparación entre los desplazamientos en el tiempo y una comparación en el contenido frecuencial mediante la función de transferencia entre la señal del LVDT y el Sistema Láser con el fin de valorar la correspondencia de las dos señales, tanto en magnitud como en fase.

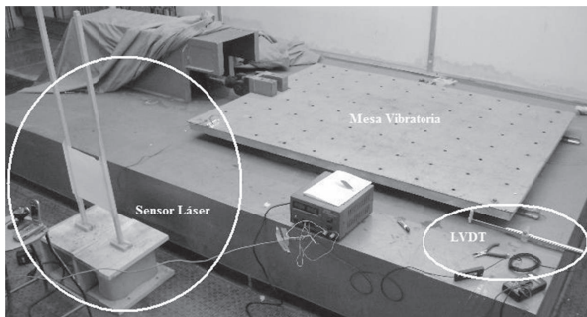


Figura 5 Prueba No.2: Montaje experimental

Prueba No.3. Actividad humana en puente peatonal: Acelerómetro vs. Sistema Láser

El puente peatonal ubicado en la Calle 5ª frente al Club Noel, de la ciudad de Santiago de Cali, se instrumenta con un acelerómetro y con el Sistema Láser instalados en el centro de la luz. Ambos instrumentos se orientan para registrar la vibración del puente en la dirección vertical. En este caso es necesario emplear equipo telescópico en el Sistema Láser para evitar la divergencia del haz debida a la distancia entre el puntero y la pantalla. El telescopio láser es ubicado en el centro de la luz, como se muestra en la figura 6, y es dirigido hacia la acera de la Calle 5ª para disponer de un sistema de referencia fijo.

La estructura se excita con saltos producidos por cuatro personas en el centro de la luz del puente. Para la validación del sistema, los registros de aceleración y desplazamiento se analizan para identificar las propiedades dinámicas. La medición del acelerómetro se integra dos veces para compararla con los desplazamientos

medidos por el láser. Así mismo, se deriva dos veces la señal de desplazamiento obtenida con el Sistema Láser y se compara con los registros de aceleraciones.



Figura 6 Prueba No.3: montaje experimental

Validación del sistema

En cada prueba del procedimiento experimental se tiene una señal de referencia para compararla en tiempo y frecuencia con los resultados obtenidos por medio del Sistema Láser. Esto se hace con el fin de reconocer discrepancias en amplitud, fase y frecuencia del movimiento, además de identificar parámetros dinámicos propios de la estructura. La comparación en el contenido temporal fue realizada mediante la ecuación 3, la cual permite establecer el ajuste que tiene una señal frente a otra. Esta ecuación fue tomada de la función *compare* del System Identification Toolbox™ del software MATLAB® [22] desarrollada por L.Ljung, en donde y_1 es la señal de referencia, y_2 es la señal a comparar y es el promedio de todos los datos de la señal de referencia.

$$\%Ajuste = \frac{1 - |y_1 - y_2|}{|y_1 - \bar{y}_1|} * 100 \quad (3)$$

Prueba No.1. Vibración libre: Acelerómetro vs. Sensor Láser

En la figura 7 se realiza una comparación de las señales en el tiempo, en donde se puede analizar estas dos señales realizando comparaciones de frecuencia natural y razón de amortiguamiento

de la estructura. Usando la Transformada Rápida de Fourier se identifica la frecuencia natural del pórtico en cada señal; dónde se obtiene que la frecuencia natural identificada no varía significativamente entre ambos registros. Por medio del Decremento Logarítmico se obtiene la razón de amortiguamiento de las dos señales y se encuentra un porcentaje de diferencia entre ambos valores de amortiguamiento de 0,67% .

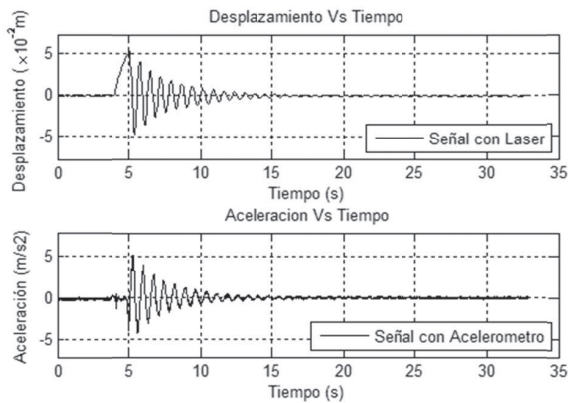


Figura 7 Prueba No.1: Registros en el tiempo

Con el objetivo de comparar los registros en el tiempo se integra dos veces la señal de aceleraciones en el contenido temporal utilizando el método Trapezoidal Acumulativo, que consiste en aproximar la señal por medio de trapecoides según la ecuación (4), donde a es un punto de la señal y b es el siguiente punto en la misma. La señal es filtrada previamente con el fin de eliminar anomalías introducidas por el mismo instrumento, además de brindar un «suavizado» a la señal.

$$\int_a^b f(x) \cdot dx \approx (b-a) \frac{f(a)+f(b)}{2} \quad (4)$$

El proceso de doble integración numérica no tiene en cuenta las condiciones de borde de la doble integración analítica y en esto radica la problemática de una buena aproximación de la integración numérica. Esta imprecisión se puede observar en la figura 8, donde se aprecia que el cambio de posición inicial no es bien identificado

en el proceso de integración y, debido a esto, se presentan anomalías en los primeros ciclos del movimiento. La doble integración numérica tiene numerosas desventajas, entre las cuales se destaca que no es posible tener en cuenta las condiciones de borde en el proceso, lo cual arroja datos que no son lo suficientemente confiables por lo que se hace necesario un método alternativo para medir desplazamientos. Mediante la Ecuación 3 se evalúa la similitud en el tiempo obteniendo un 37,12%.

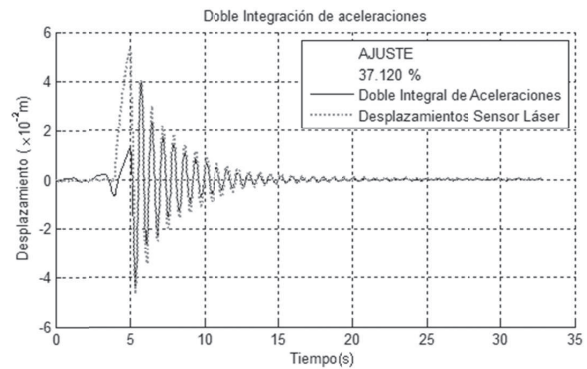


Figura 8 Prueba No.1: señal del sistema láser y doble integración de la señal del acelerómetro

Prueba No.2. Barrido frecuencial: LVDT vs. Sistema Láser

En este ensayo se aplica un barrido de frecuencias a la mesa vibratoria entre 1 Hz y 10 Hz donde se observa una disminución en la amplitud del desplazamiento (ver figura 9) debido a que el sistema de control de la mesa vibratoria mantuvo constante la velocidad de la plataforma.

Para verificar la correspondencia de las señales se evalúa la función de transferencia entre la señal del LVDT y la señal del Sensor Láser observando que ésta tiende a uno, indicando que las señales son muy parecidas (ver figura 10). Esta función de transferencia es válida entre 1 Hz y 10 Hz, por encima de este valor no se tiene información por lo que la función de transferencia es diferente de uno. Para corroborar la efectividad del Sensor Láser al identificar las frecuencias de este barrido, se realiza un espectrograma (ver figura 11) donde se observa el comportamiento logarítmico del

barrido de frecuencias de 1Hz a 10Hz igual al que se programó en la mesa vibratoria obteniendo un resultado satisfactorio y obteniendo una similitud del 84,69% al utilizar la ecuación 3.

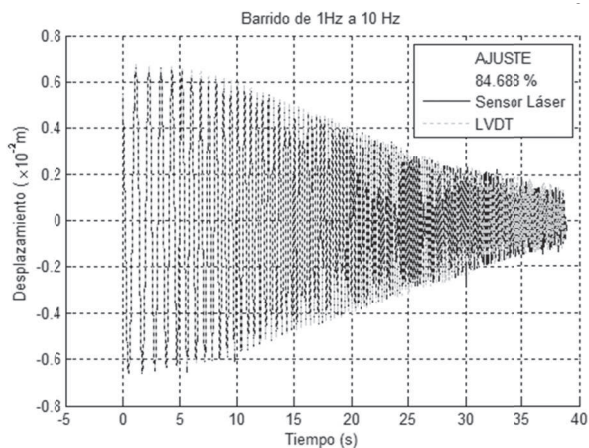


Figura 9 Prueba No.2: Registros en el tiempo

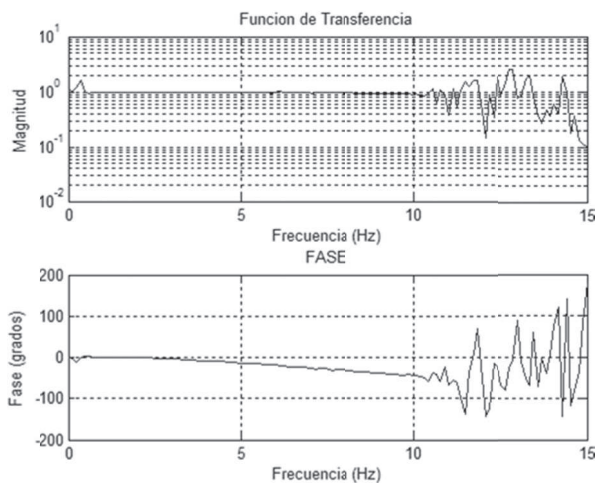


Figura 10 Prueba No.2: Función de transferencia en magnitud y fase: LVDT Vs Sistema láser

Prueba No.3. Actividad humana en puente peatonal: Acelerómetro vs. Sistema Láser

Al graficar las dos señales en el tiempo adquiridas en la prueba de saltos de personas, se observa que se presenta un comportamiento muy similar (figura 12). La frecuencia de este movimiento

fue analizada en las dos señales mediante la Transformada Rápida de Fourier (FFT), obteniendo una frecuencia natural de 1,875Hz utilizando el Sistema Láser y 1,891Hz en la señal de aceleraciones, logrando un porcentaje de diferencia de 0,85%.

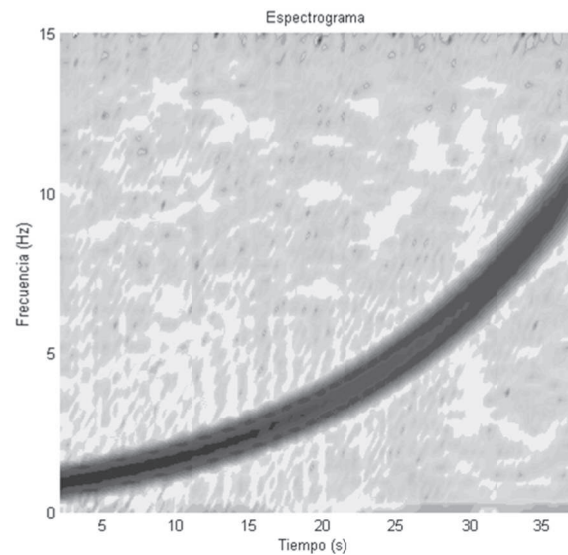


Figura 11 Prueba No.2: espectrograma para la señal del sistema láser

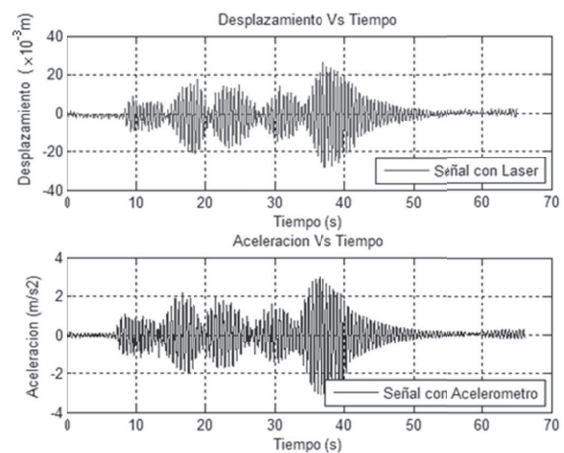


Figura 12 Prueba No.3: Registros en el tiempo

Para hallar la razón de amortiguamiento del puente se utilizó el método de Decremento Logarítmico con la señal de vibración desde el momento en que las personas dejan de saltar

hasta que encuentra en completo reposo. Se obtiene una razón de amortiguamiento de 2,21% analizando la señal del Sistema Láser y 2,23% con el registro de aceleraciones, obteniendo un porcentaje de diferencia de 0,67%

En la figura 13 se observa que la señal de desplazamientos del Sistema Láser y la señal que resulta de la doble integración de aceleraciones presentan un comportamiento similar. No obstante, la magnitud de las señales tienen una similitud de 48,41% evaluada mediante la Ecuación 3. De otra manera, la señal de desplazamientos se deriva dos veces con el objeto de obtener una señal de aceleraciones. Para ello se emplea el método de las segundas diferencias centrales, técnica que toma tres puntos y calcula el valor de la pendiente que los une aproximando de esta forma la derivada. La figura 14 ilustra la superposición de las aceleraciones medidas y las calculadas. Se observa un mejor ajuste entre las dos señales cuando se deriva el desplazamiento que cuando se efectúa la doble integración de la aceleración. La similitud entre las señales es de 68,69%, empleando la ecuación 3.

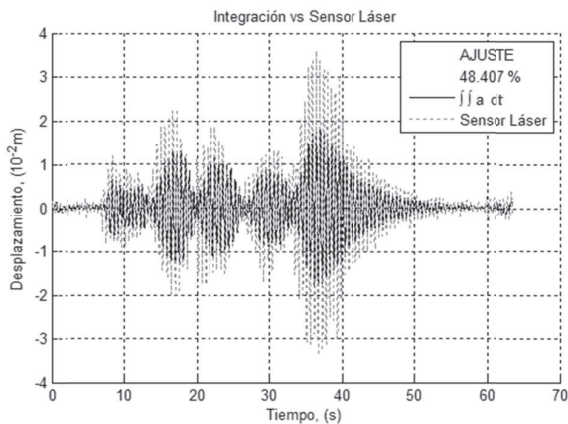


Figura 13 Prueba No.3: señal del sistema láser y doble Integración de la señal del acelerómetro

Conclusiones

Una vez obtenidos los desplazamientos es posible identificar las propiedades dinámicas de la estructura y del movimiento como el periodo,

la amplitud, la frecuencia natural y la razón de amortiguamiento, con una confiabilidad aceptable. Los resultados obtenidos a partir del uso de sensores láser se consideran aceptables tanto en el contenido temporal como en el contenido frecuencial, con pequeñas diferencias respecto de los demás instrumentos comúnmente utilizados para monitoreo estructural.

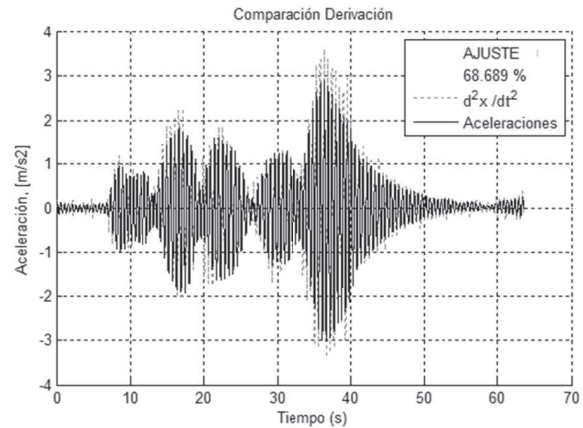


Figura 14 Prueba No.3: señal del acelerómetro y doble derivada de la señal del sistema láser

La validación de esta metodología fue realizada utilizando equipos comunes, como una webcam a 30 FPS con resolución de 320x240 píxeles y un láser de luz roja y los resultados fueron positivos convirtiéndolo en un sistema de medición considerablemente económico. Actualmente la instrumentación convencional para monitoreo estructural suele requerir grandes longitudes de cableado, en contraste esta metodología prácticamente no requiere cableado alguno, pues los sensores láser sólo necesitan una pequeña batería y la adquisición del movimiento del sensor puede llevarse a cabo sólo con el cable de conexión de la cámara al computador con la posibilidad de que en un futuro no sea necesario un computador migrando a procesadores de señales digitales (DSPs) [23].

Al derivar dos veces una señal de desplazamientos se puede conocer de manera confiable las aceleraciones presentes en la estructura, por el contrario al integrar dos veces una señal de

aceleraciones los resultados de desplazamientos no son confiables por la complejidad del proceso de integración numérica, observándose una superioridad del sensor láser frente al acelerómetro.

Al realizar comparaciones con un LVDT la superioridad del sensor láser es notable ya que este no requiere contacto directo con la estructura facilitando la medición de desplazamientos en puntos donde sería imposible utilizar un LVDT como lo observado en el puente peatonal. Este sistema de medición puede desarrollarse para monitorear varios puntos de una misma estructura mediante un solo punto de adquisición (1 caja controladora de condiciones de luz, 1 cámara digital y un computador) para esto se requiere un láser por punto a monitorear.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a la Universidad del Valle y a COLCIENCIAS, entidades financiadoras del proyecto “Investigación y desarrollo tecnológico de sistemas de monitoreo y control estructural para reducir las vibraciones producidas por la interacción humano/estructura” mediante el contrato No. 003-2007.

Referencias

- D. Gómez, J. Marulanda, P. Thomson. “Sistemas de control para la protección de estructuras civiles sometidas a cargas dinámicas”. *Revista Dyna*. 2008. Vol. 75. pp. 13.
- J. A. Marulanda, J. C. Marulanda, P. Thomson. “Monitoreo de Salud Estructural”. *Ingeniería y Competitividad*. Vol. 2. 2000. pp. 7.
- D. García, J. J. Orteu, L. Penazzi. “A combined temporal tracking and stereo-correlation technique for accurate measurement of 3D displacements: application to sheet metal forming”. *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 125-126. 2002. pp. 736-742.
- A. Wahbeh, J. P. Caffrey, S. F. Masri. “A vision-based approach for the direct measurement of displacements in vibrating systems”. *Smart Mater. Struct.* Vol. 12. 2003. pp. 10.
- J. J. Lee, M. Shinozuka. “Real-Time Displacement Measurement of a Flexible Bridge Using Digital Image Processing Techniques”. *Experimental mechanics*. Vol. 46. 2006. pp. 10.
- V. Ferrari, D. Marioli, A. Taroni. “Displacement Sensor Based on Pyroelectric Thick Films and Contactless Light-Spot Cursor”. In Proceedings of the IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference Budapest.(Hungary). Vol. 1. 2001. pp. 277-281.
- A. Depari, P. Ferrari, V. Ferrari, A. Flammini, A. Ghisla, D. Marioli, A. Taroni. “Digital signal processing for biaxial position measurement with a pyroelectric sensor array”. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. Vol. 55. 2006. pp. 501-506.
- A. Nickitopoulou, K. Protopsalti, S. Stiros. “Monitoring dynamic and quasi-static deformations of large flexible engineering structures with GPS: Accuracy, limitations and promises”. *Engineering Structures*. Vol. 28. 2006. pp. 12.
- T. C. Hutchinson, S. R. Chaudhuri, F. Kuester, S. Auduong. “Light-Based Motion Tracking of Equipment Subjected to Earthquake Motions”. *Journal of computing in civil engineering © asce*. Vol. 19. 2005. pp. 12.
- J. J. Lee, M. Shinozuka. “A vision-based system for remote sensing of bridge displacement”. *NDT&E International*. Vol. 39. 2006. pp. 7.
- P. Avitabile, C. Niezrecki, M. Helfrick, C. Warren, P. Pingle, “Noncontact Measurement Techniques for Model Correlation”. *Sound & vibration*. Vol. 44. 2010. pp. 6.
- J. L. Semmlow. *Biosignal and Biomedical Image Processing MATLAB based Applications*. Ed. Marcel Dekker. 2006. pp. 66-72.
- R. Pappa, T. Jones, J. Black, A. Walford, S. Robson, M. Shortis “Photogrammetry Methodology Development for Gossamer Spacecraft Structures”. *Sound and Vibration*. Vol. 36. 2002. pp. 11.
- W. González, M. Eddins. *Digital Image Processing Using Matlab*. 2ª. ed. Ed. Gatesmark Publishing. 2005.
- J. M. Caicedo. *Displacement Measurements in Civil Structures Using Digital Cameras and Lasers*. Proceedings of the IMAC XXIII Conference. January 31-February 3. Orlando, Florida. 2005. pp. 7.
- J. M. Franco, A. R. Ortiz, D. Gómez, P. Thomson. *Evaluación de las vibraciones producidas por las personas en el puente peatonal del Club Noel en*

- Cali, Colombia*. In Proceedings of the III Simposio internacional sobre diseño y construcción de puentes Bucaramanga. Diciembre 2 al 4. Colombia. 2009. pp. 18.
17. U. S. Paulsen, O. Erne, T. Schmidt. *Wind Turbine Operational and Emergency Stop Measurements Using Point Tracking Videogrammetry*. In Proceedings of the SEM Annual Conference and Exposition on Experimental and Applied Mechanics. Albuquerque. June 1-4. Estados Unidos. 2009. pp. 10.
 18. J. Y. Bouguet "Camera Calibration Toolbox for Matlab". Disponible en: http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/index.html#examples. Consultado en 15 de julio de 2010.
 19. A. M. Fox. "Atomic and laser physics part II: laser Physics". Disponible en: http://www.mark-fox.staff.shef.ac.uk/PHY332/laser_notes.pdf. Consultado en 15 julio de 2010.
 20. S. Westland, C. Ripamonti. *Computational Colour Science using MATLAB*. John Wiley & Sons, Ltda. 2004. pp. 4-8.
 21. P. L. Rosin, T. Ellis. "Image difference threshold strategies and shadow detection". Disponible en: <http://users.cs.cf.ac.uk/Paul.Rosin/resources/papers/shadows.pdf>. Consultado en 15 de julio de 2010.
 22. MATLAB version r2008a. Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc. Massachusetts. 2008. pp. 195.
 23. S. Qureshi. *Embedded Image Processing on the TMS320C6000™ DSP*. Springer Verlag. 2005. pp. 16-21.