

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 854 027**

51 Int. Cl.:

G03H 1/00 (2006.01)
G03H 1/04 (2006.01)
G03H 1/08 (2006.01)
G01B 11/16 (2006.01)
G01C 15/00 (2006.01)
G01M 5/00 (2006.01)
G01B 9/02 (2006.01)
G01B 9/027 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

- 86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **28.01.2016** **PCT/IB2016/050423**
87 Fecha y número de publicación internacional: **04.08.2016** **WO16120815**
96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **28.01.2016** **E 16709577 (7)**
97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **18.11.2020** **EP 3250964**

54 Título: **Método y sistema para monitorizar una estructura de edificio**

30 Prioridad:

29.01.2015 IT MI20150111
31.07.2015 IT UB20152754

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
20.09.2021

73 Titular/es:

CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE - CNR (50.0%)
Piazzale Aldo Moro, 7
00185 Roma, IT y
UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI FIRENZE (50.0%)

72 Inventor/es:

LOCATELLI, MASSIMILIANO;
POGGI, PASQUALE;
PUGLIESE, EUGENIO y
LACANNA, GIORGIO

74 Agente/Representante:

CURELL SUÑOL, S.L.P.

ES 2 854 027 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Método y sistema para monitorizar una estructura de edificio

5 La presente invención se refiere de manera general a la monitorización de estructuras de construcción, por ejemplo, en relación con la evaluación del riesgo sísmico o hidrogeológico, o en relación con la protección de bellas artes. En particular, la presente invención se refiere a un método y a un sistema para monitorizar deformaciones y/o desplazamientos de una estructura de edificio.

10 En la presente descripción y las reivindicaciones, la expresión "estructura de edificio" indicará un objeto o estructura fabricado que presenta dimensiones del orden de magnitud de 1 m o más (hasta varias decenas de metros) destinado a cualquier sector en el campo de la ingeniería civil (sectores de la construcción, geotécnico, infraestructural, hidráulico, eléctrico, estructural o de urbanismo) tales como un edificio civil o industrial, un puente o viaducto, un túnel, una barricada, una presa, un dique, un acueducto, una alcantarilla, un canal, una torre, una turbina eólica o una torre eléctrica.

15 La monitorización de las deformaciones o los desplazamientos de una estructura de edificio resulta útil en diversos sectores, por ejemplo, la evaluación de riesgo sísmico o hidrogeológico, protección civil o la protección de bellas artes. Mediante la monitorización de los desplazamientos (por ejemplo, las oscilaciones, en cuanto a la amplitud y frecuencia) de un edificio, por ejemplo, es posible evaluar las características y cualquier defecto estructural del edificio o evaluar la respuesta del edificio a factores medioambientales (terremotos, viento, lluvia y otros fenómenos naturales) o factores antropogénicos (tráfico de vehículos a motor o ferroviario, obras subterráneas, etc.).

20 En la actualidad, la monitorización de las deformaciones o los desplazamientos de una estructura de edificio se realiza normalmente por medio de sensores adecuados (sismómetros) que están dispuestos en diferentes puntos de la estructura y/o sobre su superficie.

Aunque los sismómetros en sí mismos garantizan resultados precisos, presentan varios inconvenientes.

30 En primer lugar, el acceso a la estructura para posicionar los sismómetros puede ser difícil, en particular en el caso en el que la estructura esté dañada o esté sujeta a reglamentos particulares que limitan el acceso a la misma (por ejemplo, en el caso de un edificio de interés artístico o histórico). Además, cada sismómetro proporciona datos relativos al movimiento (en particular la aceleración a lo largo de los tres ejes) del punto individual de la estructura en la que está situado. Por tanto, si se desea monitorizar la estructura en su conjunto, se requiere proporcionar una pluralidad de sismómetros posicionados en puntos adecuados de la estructura. Además, los sismómetros actuales pueden detectar deformaciones o desplazamientos periódicos (es decir, oscilaciones) con una frecuencia mayor que una determinada frecuencia mínima, pero sin embargo no permiten la detección de otros tipos de deformaciones o desplazamientos de la estructura, por ejemplo, desplazamientos no periódicos debidos a fallos estructurales que se producen a lo largo de periodos de tiempo que también pueden ser relativamente largos (horas o días).

40 El documento US 2002/135751 describe un procedimiento para registrar la deformación de objetos. Durante la deformación del objeto, se registra una secuencia o serie de imágenes del objeto con un procedimiento de medición. Se forma el diferencial entre dos imágenes secuenciales. Se integran estos diferenciales.

45 A. Pelagotti *et al*: "Reliability of 3D Imaging by Digital Holography at Long IR Wavelength", Journal of Display Technology (volumen: 6, número: 10, octubre de 2010), páginas 465-471, divulga que la holografía digital (DH) en el rango infrarrojo (IR) presenta algunos aspectos peculiares en comparación con la DH más habitual en el rango visible. El principal inconveniente actual se debe al tamaño de la distancia entre píxeles de las cámaras térmicas actualmente disponibles, que es bastante grande en comparación con lo que sería óptimo, y lo que es posible con películas analógicas. Sin embargo, dado que la longitud de onda de láser de CO₂ es 15 veces más larga que la longitud de onda visible promedio, puede lograrse una estabilidad mucho mayor, un ángulo de visión más ancho y distancias de adquisición más cortas, permitiendo una adquisición más fácil de hologramas de objetos grandes.

50 Por tanto, un objetivo de la presente invención es proporcionar un método y un sistema para monitorizar una estructura de edificio que resuelvan por lo menos uno de los problemas anteriormente mencionados.

55 En particular, un objetivo de la presente invención es proporcionar un método y un sistema para monitorizar una estructura de edificio que permitan monitorizar la estructura de manera remota (concretamente sin requerir la instalación o colocación de ningún sensor dentro de la estructura o sobre su superficie) y/o que permitan la monitorización de cualquier punto de la estructura (o la estructura en su conjunto) y/o que puedan detectar deformaciones o desplazamientos periódicos (oscilaciones) con una frecuencia arbitrariamente baja, y también deformaciones o desplazamientos de la estructura que no sean periódicos y que se produzcan a lo largo de periodos de tiempo que también pueden ser relativamente largos (horas o días).

60 Según formas de realización de la presente invención, estos y otros objetivos se alcanzan mediante un método y

un sistema que realizan la monitorización de la estructura de edificio por medio de una técnica de holografía digital. En particular, por medio de holografía digital, se reconstruye una secuencia de imágenes de fase de la estructura en tiempo real y se someten estas imágenes a procesamiento numérico adecuado con el fin de reconstruir la evolución en el tiempo de deformaciones o desplazamientos de la estructura.

La precisión de la reconstrucción es igual a aproximadamente una centésima parte de la longitud de onda utilizada. Según formas de realización preferidas de la invención, la longitud de onda utilizada se encuentra en el rango infrarrojo medio, por ejemplo 10.6 μm . Este rango de longitud de onda es particularmente ventajoso en comparación con otros rangos (por ejemplo, el espectro visible) dado que, por un lado, permite obtener un campo visual que es lo suficientemente ancho como para contener una parte significativa de la estructura (si no la estructura entera) y, por otro lado, permite una reducción de la sensibilidad frente a vibraciones del entorno hasta un nivel tal que puede realizarse la medición.

Por tanto, el método y sistema de monitorización según la presente invención permiten monitorizar la estructura de edificio, posiblemente en su conjunto, de manera remota, sin tener que disponer ningún sensor dentro o sobre la superficie externa de la estructura. Por tanto, el tiempo y los costes de monitorización se reducen significativamente en comparación con las técnicas conocidas que utilizan sismómetros.

Además, el método y el sistema de monitorización según la presente invención también pueden detectar no solo deformaciones y/o desplazamientos periódicos (oscilaciones) con una frecuencia arbitrariamente baja, sino también deformaciones y/o desplazamientos no periódicos de la estructura que se producen a lo largo de periodos de tiempo que también pueden ser relativamente largos (horas o días).

Según un primer aspecto, está previsto un sistema para monitorizar una deformación y/o un desplazamiento de una estructura de edificio por medio de holografía digital, comprendiendo el sistema:

- una fuente de láser apta para emitir una radiación infrarroja;
- una disposición interferométrica configurada para dividir la radiación infrarroja en un haz objeto configurado para irradiar por lo menos una parte de la estructura y para ser dispersado por dicha por lo menos una parte de la estructura, y un haz de referencia configurado para interferir con el haz objeto dispersado por dicha por lo menos una parte de la estructura para crear por lo menos un holograma de dicha por lo menos una parte de la estructura;
- un sensor configurado para detectar una secuencia temporal de hologramas de dicha por lo menos una parte de la estructura; y
- una unidad de procesamiento configurada para reconstruir una evolución en el tiempo de la deformación y/o el desplazamiento de dicha por lo menos una parte de la estructura mediante procesamiento numérico de la secuencia temporal de hologramas de dicha por lo menos una parte de la estructura.

Preferentemente, la radiación infrarroja presenta una longitud de onda de entre 3 μm y 30 μm .

Preferentemente, la disposición interferométrica comprende una primera lente apta para alargar el haz objeto antes de que irradie dicha por lo menos una parte de la estructura de edificio y una segunda lente apta para alargar el haz de referencia antes de que interfiera con el haz objeto dispersado mediante dicha por lo menos una parte de la estructura de edificio.

Preferentemente, la disposición interferométrica comprende además un espejo apto para desviar el haz objeto antes de que irradie dicha por lo menos una parte de la estructura de edificio, pudiendo moverse el espejo para ajustar una dirección de incidencia del haz objeto sobre la parte de estructura.

Preferentemente, la unidad de procesamiento está configurada para:

- procesar la secuencia temporal de hologramas de dicha por lo menos una parte de la estructura para proporcionar una secuencia de imágenes de fase de dicha por lo menos una parte de la estructura; y
- calcular un desplazamiento en el tiempo de por lo menos un punto de dicha por lo menos una parte de la estructura representado por un determinado píxel en la secuencia de imágenes de fase de dicha por lo menos una parte de la estructura, en función de diferencias de fase del píxel entre imágenes de fase consecutivas de la secuencia de imágenes de fase de dicha por lo menos una parte de la estructura.

Preferentemente, la unidad de procesamiento está configurada para calcular el desplazamiento en el tiempo de dicho por lo menos un punto de dicha por lo menos una parte de la estructura a lo largo de una dirección N, perpendicular a la superficie que rodea dicho por lo menos un punto de dicha por lo menos una parte de la estructura, teniendo en cuenta la inclinación de la dirección de incidencia del haz objeto sobre dicha por lo menos

una parte de la estructura con respecto a la dirección N.

Preferentemente, la unidad de procesamiento está configurada además para procesar la secuencia de hologramas de dicha por lo menos una parte de la estructura para proporcionar una secuencia de imágenes de amplitud de dicha por lo menos una parte de la estructura.

Según un segundo aspecto se proporciona un método para monitorizar una deformación y/o un desplazamiento de una estructura de edificio por medio de holografía digital, comprendiendo el método:

- proporcionar una radiación infrarroja;
- dividir la radiación infrarroja en un haz objeto y un haz de referencia, irradiando por lo menos una parte de la estructura de edificio con el haz objeto de modo que el haz objeto se dispersa mediante dicha por lo menos una parte de la estructura de edificio, y haciendo que el haz de referencia interfiera con el haz objeto dispersado mediante dicha por lo menos una parte de la estructura de edificio para crear por lo menos un holograma de dicha por lo menos una parte de la estructura;
- detectar una secuencia temporal de hologramas de dicha por lo menos una parte de la estructura de edificio; y
- reconstruir una evolución en el tiempo de la deformación y/o el desplazamiento de dicha por lo menos una parte de la estructura mediante procesamiento numérico de la secuencia temporal de hologramas de dicha por lo menos una parte de la estructura.

La presente invención se ilustrará con mayor detalle por medio de los dibujos adjuntos, que se proporcionan a título de ejemplo no limitativo, y en los que:

- la figura 1 muestra en forma esquemática un sistema para monitorizar una estructura de edificio según una forma de realización de la presente invención;
- la figura 1a muestra en forma esquemática la estructura de edificio irradiada por un haz emitido por el sistema según la figura 1;
- la figura 2 es un diagrama de flujo de funcionamiento del sistema según la figura 1;
- las figuras 3a y 3b muestran en forma esquemática una parte del sistema según la figura 1; y
- la figura 4 muestra en forma gráfica los resultados de una prueba comparativa realizada por los inventores.

Las figuras 1, 1a, 3a y 3b son unas representaciones esquemáticas, no a escala, que no reproducen los valores preferidos de distancia y ángulo mostrados en las mismas. Las evaluaciones cuantitativas de distancias y ángulos del sistema mostradas esquemáticamente en las figuras 1, 1a, 3a y 3b se indican a continuación en la presente descripción.

La figura 1 muestra un sistema 1 para monitorizar una estructura de edificio 9 (un edificio a modo de ejemplo no limitativo) según una forma de realización de la presente invención. La figura 1a muestra en forma esquemática la estructura de edificio 9, irradiada por un haz emitido por el sistema 1.

El sistema 1 comprende preferentemente una fuente de láser 2, un divisor de haz 3, una primera lente 4, una segunda lente 5, un atenuador variable 6 y un sensor de infrarrojos 7.

La fuente de láser 2 es preferentemente apta para emitir radiación en el rango infrarrojo. En particular, la longitud de onda de emisión de la fuente de láser 2 está preferentemente en el denominado "rango infrarrojo medio" o "longitud de onda larga o rango infrarrojo lejano" que oscila convencionalmente entre 3 μm y 30 μm . Más preferentemente, la longitud de onda de emisión de la fuente de láser 2 oscila entre 8 μm y 12 μm . La elección del rango preferido para la longitud de onda de emisión de la fuente de láser 2 depende preferentemente de los siguientes criterios: longitudes de onda de las fuentes de infrarrojos normalmente disponibles, respuesta espectral de los sensores en el rango infrarrojo que están normalmente disponibles, espectro de absorción atmosférica en el rango infrarrojo, sensibilidad del sistema 1 frente a las vibraciones del entorno y del propio sistema (que disminuye con un aumento de la longitud de onda y supone un valor apto para la aplicación del sistema 1 para longitudes de onda en el rango infrarrojo medio) y la dimensión deseada del campo de visión (que aumenta con un aumento de la longitud de onda, tal como se comentará con mayor detalle a continuación en la presente memoria).

La fuente de láser 2 es preferentemente una fuente continua. Alternativamente, puede utilizarse una fuente de láser pulsado.

Preferentemente, la potencia de emisión mínima de la fuente de láser 2 es de 30 W, más preferentemente 40 W e incluso más preferentemente 60 W. El intervalo preferido para la potencia de emisión de la fuente de láser 2 depende principalmente de la distancia d entre la parte del edificio 9 que tiene que monitorizarse y el área de superficie del sensor 7, la dimensión máxima de la parte del edificio 9 que tiene que monitorizarse y la sensibilidad de detección del sensor 7. Suponiendo que se desea irradiar una parte del edificio 9 (ignorando el factor de absorción del aire), los inventores han estimado que, si la distancia d aumenta en un factor n , la potencia de emisión de la fuente de láser debe aumentarse en un factor n^2 con el fin de mantener el mismo nivel de señal en el sensor. Los inventores han establecido que, con el fin de monitorizar una parte de un edificio con un área de aproximadamente 4 m² situada a una distancia d de aproximadamente 18 m desde la superficie del sensor 7, una potencia de emisión de aproximadamente 60 W es suficiente. Por otro lado, la potencia de emisión de la fuente de láser 2 es preferentemente de tal manera que la densidad de energía en la parte de la superficie del edificio 9 irradiada no supera un umbral más allá del cual puede dañar la superficie del edificio 9.

Además, preferentemente la radiación emitida por la fuente de láser 2 está linealmente polarizada. Los inventores han llevado a cabo varias pruebas positivas utilizando una fuente de láser de RF de CO₂ fabricada por Universal Laser Systems (Scottsdale, Arizona, EE.UU.) apta para emitir una radiación linealmente polarizada con una longitud de onda de emisión de 10.6 μ m y una potencia de emisión máxima de 60 W.

El divisor de haz 3 es apto para dividir la radiación de luz emitida por la fuente de láser 2 en un primer haz de luz (denominado a continuación "haz objeto O") y un segundo haz de luz (denominado a continuación "haz de referencia R"). El divisor de haz 3 está preferentemente configurado de modo que el haz objeto O dispersado por la superficie del edificio 9 y el haz de referencia R sean recibidos por el sensor 7 con intensidades comparables (el atenuador variable 6 también está destinado a este fin, tal como se comentará con mayor detalle a continuación en la presente memoria). Más particularmente, el divisor de haz 3 está configurado de modo que la potencia del haz objeto O es de por lo menos el 80% de la potencia total incidente sobre el divisor de haz 3, por ejemplo, el 90% de la potencia total incidente sobre el divisor de haz 3. En el sistema 1 mostrado en la figura 1, la parte reflejada de la radiación incidente sobre el divisor de haz 3 forma el haz objeto O, mientras que la parte transmitida forma el haz de referencia R. Sin embargo, esto no es limitativo y, según otras realizaciones no mostradas en los dibujos, el haz objeto O y el haz de referencia R pueden corresponder respectivamente a la parte transmitida y a la parte reflejada de la radiación incidente sobre el divisor de haz 3 (dispuesto para mantener las proporciones anteriormente mencionadas entre la potencia del haz objeto O y la potencia del haz de referencia R).

La primera lente 4 está preferentemente dispuesta en el trayecto óptico del haz objeto O. La primera lente 4 es preferentemente apta para aumentar el tamaño del haz objeto O para irradiar una parte suficientemente ancha del edificio 9. La primera lente 4 puede presentar diferentes formas (plana-convexa, biconvexa, de menisco, etc.). Preferentemente, la primera lente 4 es una lente divergente. Alternativamente, la primera lente 4 puede ser una lente convergente, que primero enfoca y después alarga el haz objeto O. Alternativamente, en vez de utilizar una única lente 4, con el fin de aumentar el tamaño del haz objeto O, es posible utilizar un sistema de lentes, que comprende dos o más lentes, para poder hacer variar, según se requiera, el tamaño del haz objeto a una determinada distancia e irradiar de manera más eficaz partes más o menos anchas del edificio 9. Los inventores llevaron a cabo pruebas positivas utilizando dos lentes biconvexas convergentes que permitieron ventajosamente ajustar el tamaño del haz objeto O dentro de un intervalo significativamente amplio.

La segunda lente 5 está preferentemente dispuesta a lo largo del trayecto óptico del haz de referencia R. La segunda lente 5 es preferentemente apta para aumentar el tamaño del haz de referencia R. La segunda lente 5 puede presentar diferentes formas (plana-convexa, biconvexa, de menisco, etc.) y puede comprender una lente convergente o una lente divergente. Preferentemente, la segunda lente 5 es una lente divergente. Alternativamente, la segunda lente 5 es una lente convergente, que primero enfoca y después alarga el haz de referencia R.

El atenuador variable 6 está preferentemente dispuesto a lo largo del trayecto óptico del haz de referencia R, más preferentemente entre el divisor de haz 3 y la segunda lente 5. El atenuador variable 6 es apto para ajustar la potencia del haz de referencia R para optimizar la visibilidad del patrón de interferencia del haz de referencia R y el haz objeto O, tal como se describirá con mayor detalle a continuación en la presente memoria. Según variantes alternativas, el atenuador variable 6 es sustituido por un polarizador, que permite obtener el mismo grado de atenuación del haz de referencia R.

El sensor 7 está preferentemente dispuesto para detectar el patrón de interferencia del haz objeto O y el haz de referencia R. El sensor 7 es preferentemente una cámara térmica que comprende una matriz bidimensional de $N \times M$ elementos o píxeles. Los inventores llevaron a cabo pruebas positivas utilizando la cámara microbolométrica 307 K (matriz de 640x480 píxeles de A-Si) fabricada por Thermoteknix Miricle (R.U.), con una frecuencia de adquisición de 25 fotogramas/s, un tamaño de píxel de 25 μ m x 25 μ m y una respuesta espectral de entre 8 μ m y 12 μ m.

El sistema 1 puede comprender además uno o más espejos adecuados para definir el trayecto óptico del haz objeto O y/o el haz de referencia R.

En la forma de realización mostrada en la figura 1, a modo de ejemplo no limitativo, el sistema 1 comprende un primer espejo 81 dispuesto entre la fuente de láser 2 y el divisor de haz 3, un segundo espejo 82 dispuesto entre el divisor de haz 3 y la primera lente 4, y un tercer espejo 83 dispuesto entre la primera lente 4 y el edificio 9. El tercer espejo 83 puede moverse preferentemente por medio de accionadores (no mostrados en la figura para una ilustración más sencilla) para poder modificar de manera remota la dirección del haz objeto O emitido por el sistema 1. En particular, los accionadores del espejo móvil 83 pueden utilizarse para dirigir el haz objeto O sobre la parte del edificio 9 que va a explorarse. La primera lente 4, que está posicionada aguas arriba del espejo móvil 83, ventajosamente no dificulta el ajuste de la dirección del haz objeto O.

Además, en la forma de realización mostrada en la figura 1, a título de ejemplo no limitativo, el sistema 1 también comprende un cuarto espejo 84 dispuesto entre el divisor de haz 3 y el atenuador variable 6, un segundo espejo 85 dispuesto entre el atenuador variable 6 y la segunda lente 5, y un sexto espejo 86 dispuesto entre la segunda lente 5 y el sensor 7, desviando dichos espejos el haz de referencia R sobre el sensor 7 para dirigir el haz de referencia con el ángulo de incidencia θ correcto.

El sistema 1 puede comprender otros elementos opcionales dispuestos a lo largo del trayecto óptico del haz objeto O y/o el haz de referencia R.

Por ejemplo, según una variante no mostrada en los dibujos, el sistema 1 también comprende una o más lentes cilíndricas dispuestas a lo largo del trayecto óptico del haz objeto O. La lente cilíndrica da al haz objeto una forma alargada (o una forma elíptica) que es particularmente útil en el caso en el que el edificio 9 también presenta una forma alargada (en el sentido de la altura o en el sentido de la anchura).

Según otras variantes no mostradas en los dibujos, el sistema 1 puede comprender otros elementos ópticos, tales como polarizadores, ventanas de Brewster, etc.

En cualquier caso, el divisor de haz 3, las lentes 4 y 5 y el atenuador variable 6 forman una disposición interferométrica del tipo "descentrado" y "sin lente", concretamente una disposición interferométrica en la que dos haces interferentes (concretamente el haz objeto O y el haz de referencia R) están inclinados uno con respecto al otro con un ángulo distinto de cero cuando inciden en la superficie del sensor 7 (descentrado) y en la que no hay un sistema óptico presente para la formación de imágenes delante del sensor 7 (sin lente).

El sistema 1 comprende además una unidad de procesamiento 8 que coopera con el sensor 7. La unidad de procesamiento 8 está preferentemente configurada para recibir, a partir del sensor 7, los patrones de interferencia u hologramas detectados en una forma discretizada, almacenarlos y procesarlos, tal como se comentará en detalle a continuación en la presente memoria. La unidad de procesamiento 8 está preferentemente dotada además de una pantalla 8a para visualizar los resultados de procesamiento.

El sistema 1 puede implementarse como un aparato portátil, que puede transportarse y disponerse en las inmediaciones de la estructura de edificio que va a monitorizarse, tal como se muestra esquemáticamente en la figura 1a. En particular, el sistema 1 (excepto por la unidad de procesamiento 8) se monta preferentemente sobre una plataforma que puede orientarse en una dirección horizontal y vertical. Por ejemplo, los diversos componentes del sistema 1 (excepto por la unidad de procesamiento 8) pueden montarse sobre una placa con dimensiones portátiles. Los inventores llevaron a cabo pruebas positivas utilizando una placa con dimensiones de 90 cm x 60 cm.

A continuación, se describirá el funcionamiento del sistema 1 con referencia al diagrama de flujo de la figura 2.

Durante una primera etapa de adquisición 30, se lleva el sistema 1 a las inmediaciones del edificio 9 que va a monitorizarse. La distancia d entre el sistema 1 y la parte del edificio 9 que tiene que monitorizarse depende de las condiciones del entorno (accesibilidad del terreno que rodea el edificio), de cualquier medida de seguridad (si el edificio 9 es inestable, no se permitirá el acceso más allá de un determinado punto) y de las dimensiones de la parte del edificio que tiene que monitorizarse (el campo de visión lineal del sistema 1, tal como se comentará con mayor detalle a continuación, aumenta con un aumento de la distancia d). Después se orienta el sistema 1, por medio de la plataforma ajustable, de modo que la parte del edificio 9 que tiene que monitorizarse se encuentra dentro del campo de visión del sistema 1). Después se ajusta preferentemente la dirección del haz objeto O emitido por el sistema 1 (por medio de los accionadores del espejo 83) para seleccionar una parte específica del edificio 9 dentro del campo de visión. La dirección del haz objeto O (también denominada a continuación "dirección de irradiación") forma, por tanto, con respecto a la dirección N perpendicular a la superficie del edificio 9 alrededor del punto de medición, un ángulo ψ (véase la figura 1a).

Después, se enciende la fuente de láser 2 y empieza a emitir radiación infrarroja. La radiación infrarroja se divide en un haz objeto O y un haz de referencia R mediante el divisor de haz 3.

El haz objeto O es alargado por la primera lente 4 e irradia la superficie (o una parte de la superficie) del edificio 9. La extensión de la superficie irradiada depende de la distancia d entre el sistema 1 y la parte del edificio 9 que

tiene que monitorizarse y la lente 4 o configuración de lentes utilizada para expandir el haz objeto O. El haz objeto O es dispersado por la superficie irradiada del edificio 9 y después alcanza el sensor 7.

Por otro lado, el haz de referencia R, después de haber sido atenuado por el atenuador variable 6, se alarga mediante la segunda lente 5 y se dirige sobre el sensor 7. El haz de referencia R alcanza el sensor 7 con una baja intensidad y un frente de onda aproximadamente esférico, cuyo radio de curvatura depende de la longitud focal de la lente 5 y de la distancia de la lente 5 desde el sensor. La longitud focal y la posición de la segunda lente 5 se seleccionan preferentemente de modo que el haz de referencia R irradia, de una manera sustancialmente uniforme, toda la superficie del sensor 7.

Por tanto, el haz objeto O dispersado mediante el edificio 9 y el haz de referencia R interfieren entre sí sobre la superficie del sensor 7, creando por tanto un patrón de interferencia u holograma, que se detecta mediante el sensor 7.

Preferentemente, durante la etapa 30, el sensor 7 adquiere una secuencia temporal de hologramas. La secuencia de hologramas se adquiere preferentemente a la frecuencia de adquisición del sensor 7. Si, por ejemplo, la frecuencia de adquisición del sensor 7 es de 25 fotogramas/s, se adquieren 25 hologramas por segundo. La adquisición de una secuencia de hologramas permite la reconstrucción de una evolución en el tiempo de las deformaciones o los desplazamientos de la parte iluminada del edificio 9, tal como se comentará con mayor detalle a continuación en la presente memoria.

Cada holograma adquirido presenta franjas de interferencia con una determinada separación de franjas. Cada holograma puede describirse en cuanto a la distribución de intensidad bidimensional según la siguiente ecuación:

$$H(x,y)=|R|^2+|O|^2+R^*\cdot O+R\cdot O^* \quad [1]$$

en la que x e y son las dos coordenadas ortogonales de la superficie del sensor 7, mientras que R* y O* son las conjugadas complejas del haz de referencia R y el haz objeto O, respectivamente.

Preferentemente, durante la etapa 30, se ajusta el atenuador variable 6 de modo que, sobre la superficie del sensor 7, la potencia del haz de referencia R es sustancialmente igual a la potencia del haz objeto O dispersado mediante el edificio 9. Esto permite maximizar la visibilidad de las franjas de interferencia de holograma.

Dado que, debido a la utilización de radiación infrarroja, el sistema 1 presenta una baja sensibilidad frente a vibraciones, durante el transcurso de la etapa 30 ventajosamente no se requieren medidas antivibraciones. Además, dado que el sensor 7 solo es sensible frente a la radiación infrarroja, las componentes visibles de la luz artificial y la luz solar no perturban el funcionamiento del sistema 1 durante la etapa de adquisición 30. Asimismo, las componentes infrarrojas de la luz artificial y la luz solar no perturban el funcionamiento del sistema 1, porque son incoherentes con respecto al haz objeto O y al haz de referencia R y por tanto solo representan un ruido de fondo.

Después, la secuencia de hologramas adquirida mediante el sensor 7 durante la etapa 30 se almacena mediante la unidad de procesamiento 8.

Después, la unidad de procesamiento 8 lleva a cabo preferentemente una etapa de procesamiento numérico 31 con la secuencia de hologramas adquirida. La etapa de procesamiento numérico 31 puede llevarse a cabo al final de la etapa 30, concretamente al final de la adquisición de toda la secuencia de hologramas. Alternativamente, dado que cada holograma en la secuencia se somete a procesamiento numérico de manera individual, la etapa 31 puede empezar inmediatamente después de la adquisición del primer holograma en la secuencia y después continuar en paralelo con la adquisición de los hologramas sucesivos.

El procesamiento numérico que realiza la unidad de procesamiento 8 con cada holograma adquirido comprende preferentemente una primera subetapa 310, durante la cual se filtra el holograma para cancelar el orden de difracción cero, concretamente el término $|R|^2+|O|^2$ de la ecuación [1]. Dado que el sistema 1 presenta una configuración descentrada (concretamente el haz objeto O dispersado por cada punto de la parte de edificio 9 irradiada y el haz de referencia R inciden en el sensor 7 con ángulos diferentes), ventajosamente el término $|R|^2+|O|^2$ no se superpone espacialmente sobre los otros términos $R^*\cdot O+R\cdot O^*$ y por consiguiente puede filtrarse en el dominio de las frecuencias espaciales.

Después, durante una segunda subetapa 311, se somete preferentemente el holograma a una operación de "relleno con ceros". Esta operación prevé extender la matriz de NxM píxeles del holograma discretizado y filtrado, introduciendo a lo largo de sus bordes varios píxeles ficticios adicionales, cuya intensidad se establece a cero. Preferentemente, esta operación se lleva a cabo tal como se describe en el documento EP 1 654 596.

Tal como se conoce a partir de la teoría de holografía digital, con el fin de reconstruir la imagen de amplitud o de fase de un objeto basándose en su holograma adquirido, se lleva a cabo un algoritmo matemático que implementa

la fórmula de Rayleigh-Sommerfeld conocida. Esta fórmula contiene sustancialmente una doble integración del holograma digitalizado multiplicada por una copia numérica del haz de referencia R y otros términos. La integral resultante puede convertirse en transformadas de Fourier con una reducción consiguiente del esfuerzo computacional. Dado que el holograma está en una forma discretizada, las transformadas de Fourier también son discretas y, por tanto, pueden calcularse de una manera relativamente sencilla por medio de algoritmos de FFT (transformada rápida de Fourier) conocidos. Con el fin de realizar la transformación, en particular, se conocen dos métodos: el método de convolución y el método de Fresnel. Utilizando, por ejemplo, el método de Fresnel, la resolución espacial de la imagen de fase reconstruida se cuantifica mediante el denominado "píxel reconstruido", cuyas dimensiones a lo largo de los ejes x e y se definen mediante las siguientes ecuaciones:

$$\Delta\xi = \frac{\lambda \cdot d}{N \cdot \Delta x} \quad \Delta\eta = \frac{\lambda \cdot d}{M \cdot \Delta y} \quad [2]$$

donde N y M son los números de píxeles del sensor 7 a lo largo de los ejes x e y (y, por tanto, del holograma discretizado), λ es la longitud de onda de emisión de la fuente de láser 2, d es la distancia de reconstrucción (concretamente la distancia entre la parte explorada del edificio 9 y el sensor 7), y Δx y Δy son las dimensiones de cada píxel del sensor 7 a lo largo de los ejes x e y. A partir de la ecuación [2] queda claro que $\Delta\xi$ y $\Delta\eta$ son proporcionales a la longitud de onda λ y a la distancia de reconstrucción d, mientras que disminuyen con un aumento del número total de píxeles NxM y un aumento de las dimensiones físicas de los píxeles. Por tanto, la resolución espacial de la imagen reconstruida puede ser peor que la obtenida cuando se trabaja a la distancia mínima permitida por la teoría de muestreo.

La operación de "relleno con ceros" anteriormente mencionada permite ventajosamente aumentar la resolución espacial de la imagen de fase reconstruida. Más específicamente, añadiendo píxeles ficticios con intensidad de cero a la matriz NxM del holograma adquirido, se disminuyen $\Delta\xi$ y $\Delta\eta$ y por tanto se aumenta la resolución espacial. Preferentemente, los píxeles ficticios se añaden a lo largo de los bordes del holograma adquirido, de modo que no se mezclan con los píxeles reales. Esto garantiza que la imagen de fase reconstruida no presenta frecuencias parásitas resultantes de discontinuidades introducidas entre los píxeles reales. El número de píxeles ficticios añadidos depende de la resolución que tiene que obtenerse para la imagen de fase reconstruida. La resolución máxima que puede obtenerse en cada caso está limitada por el límite de difracción.

Aunque anteriormente en la presente memoria se ha descrito la operación de "relleno con ceros" con referencia al método de Fresnel solo, puede utilizarse en combinación con otros métodos, tales como el método de espectro angular o el método de convolución.

Después, durante una tercera subetapa 312, se procesa el holograma discretizado (filtrado y opcionalmente "alargado" mediante píxeles ficticios) para reconstruir una imagen de fase de la parte del edificio 9 irradiada por el láser.

Con este fin, la unidad de procesamiento 8 lleva a cabo preferentemente en primer lugar un enfoque numérico del holograma, lo cual implica la aplicación al holograma discretizado (filtrado y, si es necesario, "alargado" mediante píxeles ficticios) de un algoritmo matemático que implementa la fórmula de Rayleigh-Sommerfeld anteriormente mencionada, que simula sustancialmente los efectos de difracción de la propagación de una copia numérica del haz de referencia R a través del holograma. La aplicación de este algoritmo da, como resultado, la reconstrucción del frente de onda del haz objeto O, enfocado a una distancia d. Preferentemente, el algoritmo se basa en el método de Fresnel anteriormente mencionado que es particularmente sencillo y rápido en comparación con otros métodos conocidos. Sin embargo, según otras variantes, es posible utilizar otros métodos de enfoque, por ejemplo, el método de espectro angular o el método de convolución.

El enfoque numérico llevado a cabo en la subetapa 312 proporciona un campo complejo reconstruido, concretamente una matriz en la que cada elemento o píxel es un número complejo. A partir de esta matriz, en la subetapa 312 la unidad de procesamiento 8 preferentemente deriva directamente la imagen de fase de la parte del edificio 9 irradiada por el láser como fase del campo complejo reconstruido. En particular, la unidad de procesamiento 8 calcula preferentemente la fase de cada número complejo de la matriz, obteniendo por tanto una matriz correspondiente en la que cada elemento o píxel es una fase. La matriz así obtenida contiene la imagen de fase de la parte del edificio 9 irradiada por el láser 9 en un momento dado.

La subetapa 312 también comprende preferentemente la operación de filtrar la conjugada compleja del campo complejo reconstruido.

Tal como se mencionó anteriormente, el procesamiento numérico 31 se aplica a todos los hologramas de la secuencia adquirida durante la etapa 30. Por tanto, la ejecución del procesamiento numérico descrito anteriormente con cada holograma de la secuencia produce una secuencia de imágenes de fase de la parte del edificio 9 irradiada por el láser.

Después, durante una etapa 32 posterior, la unidad de procesamiento 8 utiliza preferentemente la secuencia de imágenes de fase de la parte del edificio 9 irradiada por el láser con el fin de reconstruir la evolución en el tiempo de las deformaciones o los desplazamientos de la parte del edificio 9 irradiada por el láser. Con este fin, durante la etapa 32, la unidad de procesamiento 8 utiliza preferentemente todas las imágenes de fase de la secuencia.

En particular, durante la etapa 32, el desplazamiento, a lo largo de la perpendicular N al edificio 9, de cada punto del edificio 9 irradiado por el láser y representado por un píxel dado de la imagen de fase, se calcula preferentemente en función de la diferencia entre la fase de ese píxel en una determinada imagen de fase y la fase del mismo píxel en la imagen de fase anterior en la secuencia. Llevando a cabo diferencias de fase de un determinado píxel entre imágenes de fase sucesivas, es posible reconstruir el desplazamiento, a lo largo de la perpendicular N, del punto del edificio representado por ese píxel, con variación en el tiempo, según la ecuación:

$$\Delta S_N = (1/k) (\lambda \cdot \Delta \phi) / (4\pi n) = S_m / (2k), \quad [3]$$

donde ΔS_N es el desplazamiento del punto correspondiente al píxel, a lo largo de la perpendicular N a la superficie que rodea dicho punto, entre dos imágenes de fase sucesivas, S_m es la variación en el trayecto óptico de fuente/edificio/sensor, $\Delta \phi$ es la diferencia de fase del píxel entre dos imágenes de fase sucesivas, λ es la longitud de onda utilizada, n es el índice de refracción del aire, k es un factor de proyección que depende de la inclinación de la dirección de irradiación (concretamente la dirección del haz objeto O incidente sobre el punto examinado) con respecto a la perpendicular N y es igual a $\cos \psi$, donde ψ es el ángulo a lo largo del cual se hace rotar la dirección de irradiación con el fin de superponerla sobre la perpendicular N. Para desplazamientos de 10 μm y para ángulos ψ de menos de 8°, la corrección por el factor k es menor que la sensibilidad de la técnica interferométrica (estimada a 0.1 μm). La ecuación [3] solo es válida en la aproximación en la que se considera que las posiciones del espejo 83 y el sensor 7 coinciden y, por tanto, la dirección de irradiación coincide sustancialmente con la dirección de la línea que une el sensor 7 al píxel que está examinándose.

Por tanto, repitiendo la operación con un conjunto de píxeles adyacentes (o con todos los píxeles de la imagen de fase), que representan por lo menos una parte de la superficie del edificio 9, es posible reconstruir el desplazamiento a lo largo de la perpendicular N de cada punto de la parte del edificio 9 representado por los píxeles considerados, concretamente la deformación o el desplazamiento de esta parte del edificio 9 en su conjunto. Si la relación señal-ruido del píxel individual no es lo suficientemente significativa, opcionalmente se calcula el promedio de la variación de fase a lo largo de un mayor número de píxeles adyacentes.

Opcionalmente, para por lo menos uno de los hologramas de la secuencia adquirida, la unidad de procesamiento 8 también calcula la amplitud del campo complejo reconstruido del haz objeto O, calculando por separado el módulo del valor complejo de cada píxel de la matriz que representa el campo. Esto también permite la reconstrucción de una imagen de amplitud (concretamente una imagen apropiada) del edificio 9. Esta imagen de amplitud puede utilizarse ventajosamente durante el transcurso de la etapa 30 con el fin de seleccionar la parte de edificio 9, cuyas las deformaciones o desplazamientos tienen que evaluarse. Una vez seleccionados los píxeles que representan la parte de interés en la imagen de amplitud, la unidad de procesamiento 8 selecciona preferentemente los píxeles correspondientes en la imagen de fase y simplemente reconstruye el desplazamiento a lo largo de la perpendicular N de estos píxeles basándose en sus valores en las diversas imágenes de fase de la secuencia.

Opcionalmente, la etapa 32 también puede comprender un análisis de Fourier de la progresión en el tiempo de la variación del trayecto óptico S_m para uno o más puntos del edificio 9 representados por los píxeles correspondientes de la imagen de fase. Opcionalmente, la etapa 32 también puede comprender llevar a cabo una operación de filtrado de frecuencia (filtro de banda de paso) con el fin de excluir cualquier componente de frecuencia que pueda atribuirse a vibraciones del propio sistema de medición. Esto permite, en cualquier caso, calcular directamente las frecuencias de las oscilaciones del edificio 9. Opcionalmente, la etapa 32 también puede comprender llevar a cabo una operación de filtrado de frecuencia (filtro de banda de paso) con el fin de seleccionar una única frecuencia de interés y calcular la amplitud del desplazamiento relativo a la frecuencia seleccionada.

Después, se almacenan los resultados obtenidos en la etapa 32 y pueden visualizarse en la pantalla 8a de la unidad de procesamiento 8, por ejemplo, en forma gráfica.

Por tanto, el sistema 1 utiliza holografía digital con el fin de monitorizar deformaciones y desplazamientos del edificio 9 o partes del mismo. La utilización de holografía digital ofrece diversas ventajas.

En primer lugar, la holografía digital es un enfoque óptico que permite la monitorización remota del edificio. El sistema 1 está posicionado de hecho a una determinada distancia desde el edificio que, tal como se mencionó anteriormente, puede adaptarse dependiendo de la accesibilidad y las condiciones de la zona que rodea el edificio. No se requiere utilizar sensores o dispositivos que necesiten posicionarse dentro del edificio. Por tanto, el sistema 1 permite una monitorización fácil y segura de estructuras de construcción que presentan un acceso limitado por motivos de seguridad o porque son edificios de interés artístico o histórico.

Además, debido a la utilización de holografía digital, el sistema 1 puede monitorizar el edificio de una manera

sustancialmente continua desde el punto de vista tanto del espacio como del tiempo. Desde un punto de vista del espacio, con holografía digital de hecho es posible monitorizar los desplazamientos de cualquier punto del edificio, siempre que se ilumine por el haz objeto. La resolución espacial de la monitorización (concretamente el número y la densidad de los puntos del edificio que pueden monitorizarse por separado) está sustancialmente determinada por la resolución de las imágenes de fase reconstruidas por el sistema 1 (concretamente por las dimensiones de los píxeles reconstruidos, tal como se comentó anteriormente). Desde un punto de vista del tiempo, el sistema 1 permite la evaluación de los desplazamientos de un punto de píxel del edificio con variación en el tiempo de una manera sustancialmente continua. La resolución temporal de la monitorización (concretamente el intervalo de tiempo que se produce entre dos operaciones de monitorización consecutivas de la fase de un mismo píxel) está sustancialmente determinada por la frecuencia de adquisición del sensor 7.

Además, el sistema 1 puede monitorizar el edificio en tiempo real. El procesamiento numérico llevado a cabo por la unidad de procesamiento 8 es de hecho relativamente sencillo y puede realizarse para cada holograma de la secuencia adquirida sustancialmente durante el intervalo de tiempo que se produce entre la adquisición de dos hologramas sucesivos. Por tanto, el desplazamiento de cada punto puede reconstruirse sustancialmente en tiempo real, concretamente mientras está produciéndose la deformación o el desplazamiento que va a detectarse.

La utilización de holografía digital y, en particular holografía digital, en el rango infrarrojo medio, también ofrece otras ventajas.

En primer lugar, debido a la utilización de longitudes de onda de emisión relativamente largas, es posible reconstruir imágenes de fase de objetos grandes tales como edificios u otras estructuras de construcción, tal como se comentará con mayor detalle a continuación en la presente memoria.

Además, las fuentes láser de CO₂ en el rango infrarrojo medio presentan generalmente buenas propiedades de coherencia espacial y temporal. Como resultado, es posible expandir significativamente el haz objeto derivado a partir de las mismas para poder iluminar partes significativas de un edificio y obtener al mismo tiempo franjas de interferencia claramente visible, también en caso de un desequilibrio significativo entre la longitud de trayecto óptico del haz objeto y la del haz de referencia.

Con respecto al tamaño máximo de los edificios que pueden monitorizarse con el sistema 1, un objeto (por ejemplo, el edificio 9) iluminado por el haz objeto O dispersa la luz en direcciones diferentes, y las fracciones dispersadas por los diversos puntos de su superficie y que inciden en la superficie del sensor 7 forman ángulos α diferentes con la dirección de incidencia sobre el sensor del haz de referencia R. Cada ángulo α es igual a $\theta + \beta$, donde θ es el ángulo formado por la dirección del haz de referencia R y la dirección T perpendicular a la superficie del sensor 7 y β es el ángulo formado por la dirección de la fracción del haz objeto O (véase la figura 3a) con la perpendicular al sensor T. Cuanto mayor sea el tamaño de la parte de edificio irradiada, mayor será el intervalo de ángulos α que forma el haz objeto O con el haz de referencia R. Sin embargo, con un aumento del ángulo α , la separación P de las franjas de interferencia en el holograma disminuye según la siguiente ecuación:

$$P = \frac{\lambda}{2\sin(\alpha/2)}, \quad [4]$$

donde λ es la longitud de onda de emisión de la fuente láser 2. La ecuación [4] se aplica en el caso en el que θ es aproximadamente igual a β . Con el fin de satisfacer el teorema de muestreo de Whittaker-Shannon, $P \geq 2d_p$, donde d_p es el tamaño de un único píxel del sensor 7. Por tanto, el valor máximo de α que permite la detección de las franjas de interferencia del holograma es:

$$\alpha_{\max} = 2\sin^{-1}\left(\frac{\lambda}{4d_p}\right) \approx \frac{\lambda}{2d_p}. \quad [5]$$

Esta última igualdad es válida en condiciones de ángulo pequeño.

Por otro lado, el ángulo máximo $\beta_{\max}$ formado por el haz objeto O y por la perpendicular T a la superficie del sensor 7 depende tanto de la distancia d entre la parte del edificio 9 que tiene que monitorizarse y la superficie del sensor 7 como de la extensión lateral de la parte del edificio irradiada D según la siguiente ecuación:

$$\beta_{\max} = \arctan(D/2d) \approx D/2d. \quad [6]$$

Esta última igualdad es válida en condiciones de ángulo pequeño. La ecuación [6] es válida en el caso en el que la dimensión D es mucho mayor que la superficie del sensor 7.

Por tanto, las ecuaciones [5] y [6] permiten el cálculo del ángulo máximo θ entre el haz de referencia R y la perpendicular T a la superficie del sensor 7:

$$\theta_{\max} = \alpha_{\max} - \beta_{\max} = \lambda/(2d_p) - D/2d \quad [7]$$

Sin embargo, dada una determinada distancia d es posible reducir el ángulo θ con el fin de aumentar la dimensión D de la parte explorada, tal como puede observarse en la figura 3b (dado que $\alpha_{\text{máx}}$ está fijado por el teorema de muestreo, reducir θ permite aumentar $\beta_{\text{máx}}$, concretamente D). Sin embargo, con el fin de mantener los órdenes de difracción en el holograma separados, θ debe seguir siendo mayor que $D/2d$. Insertando este valor en la ecuación [7], se obtiene la dimensión máxima $D_{\text{máx}}$ de la parte del edificio 9 seleccionada como objetivo, concretamente el campo de visión máximo:

$$D_{\text{máx}} = \lambda d / (2d_p). \quad [8]$$

A partir de la ecuación [8], queda claro que $D_{\text{máx}}$ es proporcional a λ y a la distancia d , mientras que es inversamente proporcional al tamaño de píxel d_p . Teniendo en cuenta que las longitudes de onda en el rango infrarrojo medio son aproximadamente 20 veces mayores que las longitudes de onda en el espectro visible ($10 \mu\text{m}$ en vez de $0.5 \mu\text{m}$) y que el tamaño de píxel típico en un sensor de infrarrojos es normalmente 5 veces mayor que el de un sensor en el espectro visible ($25 \mu\text{m}$ en vez de $5 \mu\text{m}$), dada una determinada distancia, la utilización de radiación infrarroja permite la monitorización de objetos que presentan dimensiones cuatro veces mayores que las que pueden monitorizarse con radiación visible.

Por ejemplo, con holografía digital que presenta una longitud de onda visible, por ejemplo, de 532 nm a una distancia de $d = 30 \text{ m}$ utilizando un tamaño de píxel $d_p = 5 \mu\text{m}$, sería posible monitorizar objetos con una dimensión máxima de aproximadamente 1.6 m . En vez de eso, utilizando una longitud de onda en el rango infrarrojo medio (concretamente de aproximadamente 10 micrómetros) a la misma distancia de monitorización y con un tamaño de píxel de $d_p = 25 \mu\text{m}$, sería posible aumentar la dimensión máxima del objeto hasta aproximadamente 6 metros .

Con respecto a la amplitud de deformaciones y desplazamientos mínimos que pueden detectarse, los inventores han estimado que, optimizando la visibilidad de las franjas y la relación señal-ruido, el desplazamiento mínimo de cada punto de píxel que puede detectarse por el sistema 1 es sustancialmente igual a una centésima parte de la longitud de onda. Por tanto, utilizando longitudes de onda en el rango infrarrojo medio (por ejemplo $10.6 \mu\text{m}$), el desplazamiento mínimo que puede detectarse es del orden de una décima parte de un μm . En vez de eso, en cuanto a la frecuencia máxima de deformaciones o desplazamientos periódicos que puede detectarse, está principalmente limitada por el teorema de muestreo y depende esencialmente de la frecuencia de adquisición del sensor 7. Por ejemplo, en el caso en el que el sensor 7 presenta una frecuencia de adquisición de 25 fotogramas/s , la frecuencia máxima de deformaciones u oscilaciones periódicas que puede detectarse es de aproximadamente 10 Hz . En vez de eso, no hay ningún límite inferior de la frecuencia, de tal manera que el sistema 1 puede detectar deformaciones o desplazamientos periódicos que presentan una frecuencia que es arbitrariamente baja y también deformaciones y desplazamientos que no son periódicos.

Los inventores llevaron a cabo una prueba comparativa del sistema 1 en condiciones reales. En particular, los inventores utilizaron un sistema de monitorización similar al sistema 1 para monitorizar las oscilaciones (desplazamientos periódicos) de un edificio con una altura de aproximadamente 20 m que presentaba una superficie aproximadamente plana y vertical. Se colocó el sistema 1 a una distancia d de aproximadamente 18 metros desde el edificio y se ajustó de modo que la dirección del haz objeto O estaba a aproximadamente 38 grados con respecto al suelo y contenida en el plano perpendicular a la superficie del edificio. El haz objeto O iluminó por tanto una parte del edificio con un área de aproximadamente 4 m^2 , en la que también se colocó un sismómetro con fines comparativos. Después se reconstruyó una secuencia de imágenes de fase compuesta por $10 \text{ píxeles} \times 10 \text{ píxeles}$ que presentaba un área correspondiente a aproximadamente 100 cm^2 de los 4 m^2 iluminados.

Después se calculó el desplazamiento, con variación en el tiempo, del punto del edificio en el que estaba presente el sismómetro, tanto mediante el sistema 1 como mediante el sismómetro. Los resultados se muestran en la figura 4.

La figura 4 muestra en particular los datos obtenidos mediante el sistema 1 utilizando holografía digital (gráfico (a)) y los datos obtenidos mediante el sismómetro (gráfico (b)). Con respecto al gráfico (a), se calculó el desplazamiento, con variación en el tiempo, teniendo en cuenta el factor k de inclinación del haz objeto O (división entre $\cos(38^\circ)$) según la ecuación [3]. Por otro lado, con respecto al gráfico (b), a partir de los datos suministrados por el sismómetro, solo se consideraron los datos relacionados con el desplazamiento que podía detectarse por el sistema 1, concretamente el desplazamiento a lo largo de la perpendicular N a la superficie del edificio que rodea el punto de medición. A partir de una comparación de los dos gráficos, queda claro que los resultados proporcionados mediante el sistema 1 corresponden totalmente a los del sismómetro. Por tanto, el sistema 1 puede proporcionar resultados cuya precisión es comparable a la de los sismómetros convencionales.

Por tanto, como resultado del método y el sistema de monitorización según la presente invención, es posible monitorizar estructuras de construcción, posiblemente en su conjunto, de manera remota, y en tiempo real, sin tener que disponer ningún sensor dentro o sobre la superficie externa de las estructuras. Por tanto, se reducen significativamente el tiempo y los costes de monitorización en comparación con las técnicas conocidas que utilizan sismómetros.

REIVINDICACIONES

1. Sistema (1) para monitorizar una deformación y/o un desplazamiento de una estructura de edificio (9) por medio de holografía digital, comprendiendo dicho sistema (1):

- una fuente láser (2) apta para emitir una radiación infrarroja;
- una disposición interferométrica configurada para dividir dicha radiación infrarroja en un haz objeto (O) configurado para irradiar por lo menos una parte de dicha estructura de edificio (9) y para ser dispersado por dicha por lo menos una parte de dicha estructura de edificio (9), y un haz de referencia (R) configurado para interferir con dicho haz objeto (O) dispersado por dicha por lo menos una parte de dicha estructura (9) de manera que se cree un holograma de dicha por lo menos una parte de dicha estructura (9);
- un sensor (7) configurado para detectar una secuencia temporal de hologramas de dicha por lo menos una parte de dicha estructura (9); y
- una unidad de procesamiento (8) configurada para reconstruir una evolución en el tiempo de dicha deformación y/o dicho desplazamiento de dicha por lo menos una parte de dicha estructura (9) mediante procesamiento numérico de dicha secuencia temporal de hologramas de dicha por lo menos una parte de dicha estructura (9).

2. Sistema (1) según la reivindicación 1, en el que dicha radiación infrarroja presenta una longitud de onda comprendida entre 3 μm y 30 μm .

3. Sistema (1) según la reivindicación 1 o 2, en el que dicha disposición interferométrica comprende una primera lente (4) apta para alargar dicho haz objeto (O) antes de que irradie dicha por lo menos una parte de dicha estructura de edificio (9) y una segunda lente (5) apta para alargar dicho haz de referencia (R) antes de que interfiera con dicho haz objeto (O) dispersado por dicha por lo menos una parte de dicha estructura de edificio (9).

4. Sistema (1) según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que dicha disposición interferométrica comprende asimismo un espejo (83) apto para desviar dicho haz objeto (O) antes de que ilumine dicha por lo menos una parte de dicha estructura de edificio (9), siendo dicho espejo (83) móvil para ajustar una dirección de incidencia de dicho haz objeto (O) sobre dicha parte de dicha estructura (9).

5. Sistema (1) según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que dicha unidad de procesamiento (8) está configurada para:

- procesar dicha secuencia de hologramas de dicha por lo menos una parte de dicha estructura (9) de manera que proporcione una secuencia de imágenes de fase de dicha por lo menos una parte de dicha estructura (9); y
- calcular un desplazamiento en el tiempo de por lo menos un punto de dicha por lo menos una parte de dicha estructura (9) representado por un determinado píxel en dicha secuencia de imágenes de fase de dicha por lo menos una parte de dicha estructura (9), en función de las diferencias de fase de dicho píxel entre imágenes de fase consecutivas de dicha secuencia de imágenes de fase de dicha por lo menos una parte de dicha estructura (9).

6. Sistema (1) según la reivindicación 5, en el que dicha unidad de procesamiento (8) está configurada para calcular dicho desplazamiento en el tiempo de dicho por lo menos un punto de dicha por lo menos una parte de dicha estructura (9) a lo largo de una dirección (N) perpendicular a una superficie que rodea dicho por lo menos un punto de dicha por lo menos una parte de dicha estructura (9) y para dividir dicho desplazamiento a lo largo de dicha dirección (N) por un factor (k) que tiene en cuenta la inclinación de una dirección de incidencia de dicho haz objeto (O) sobre dicha por lo menos una parte de dicha estructura (9) con respecto a dicha dirección (N).

7. Sistema (1) según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que dicha unidad de procesamiento (8) está configurada asimismo para procesar dicha secuencia de hologramas de dicha por lo menos una parte de dicha estructura (9) de manera que proporcione una secuencia de imágenes de amplitud de dicha por lo menos una parte de dicha estructura (9).

8. Método para monitorizar una deformación y/o un desplazamiento de una estructura de edificio (9) por medio de holografía digital, comprendiendo dicho método:

- proporcionar una radiación láser infrarroja;
- dividir dicha radiación láser infrarroja en un haz objeto (O) y un haz de referencia (R), irradiando por lo menos una parte de dicha estructura de edificio (9) por medio de dicho haz objeto (O) de manera que dicho

haz objeto (O) sea dispersado por dicha por lo menos una parte de dicha estructura de edificio (9), y haciendo que dicho haz de referencia (R) interfiera con dicho haz objeto (O) dispersado por dicha por lo menos una parte de dicha estructura de edificio (9) de manera que cree por lo menos un holograma de dicha por lo menos una parte de dicha estructura (9);

5

- detectar una secuencia temporal de hologramas de dicha por lo menos una parte de dicha estructura (9); y

- reconstruir una evolución en el tiempo de dicha deformación y/o dicho desplazamiento de dicha por lo menos una parte de dicha estructura (9) mediante procesamiento numérico de dicha secuencia temporal de hologramas de dicha por lo menos una parte de dicha estructura (9).

10

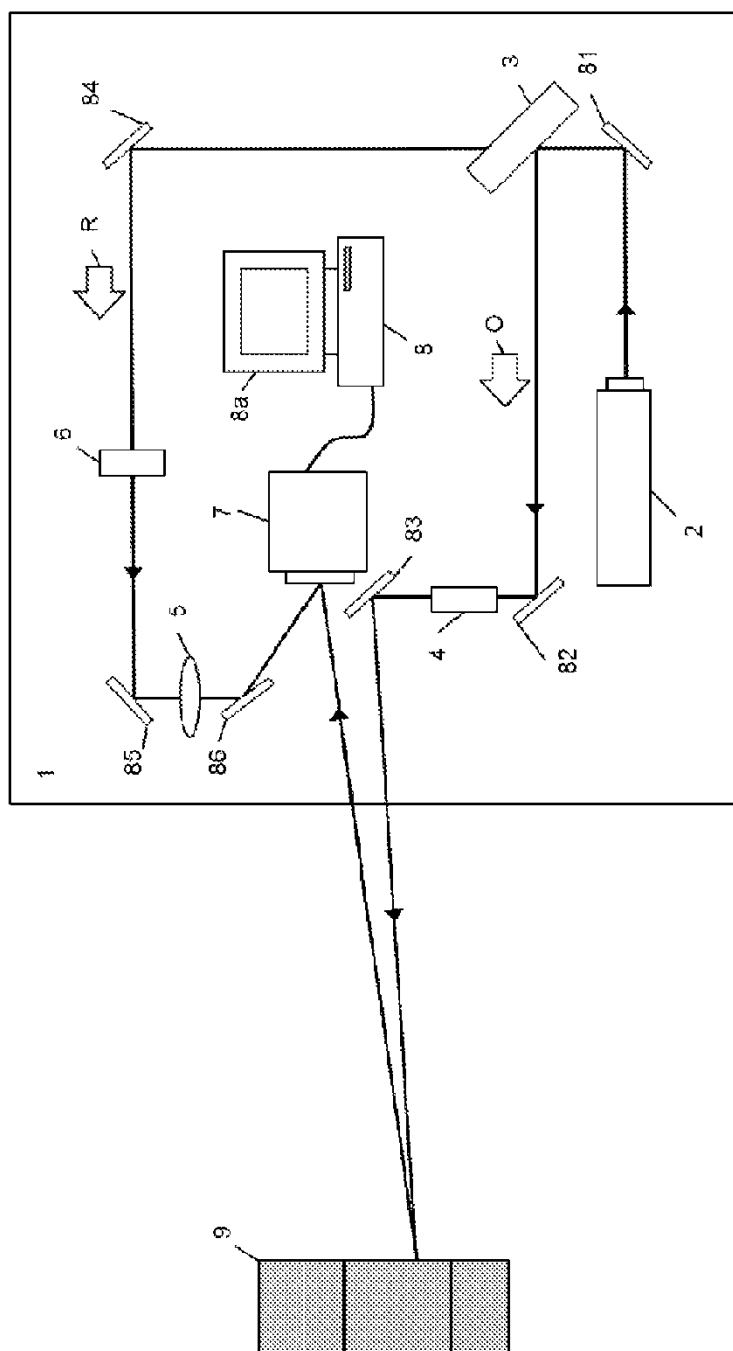


Fig. 1

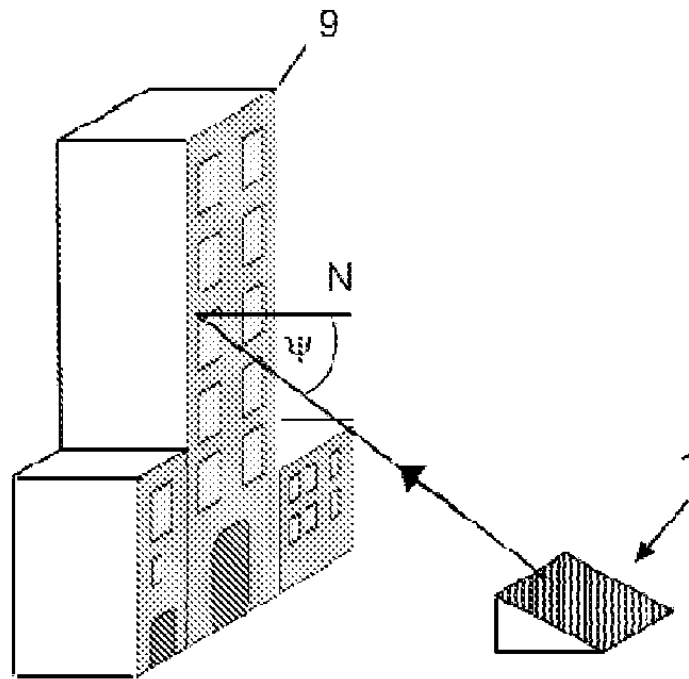


Fig. 1a

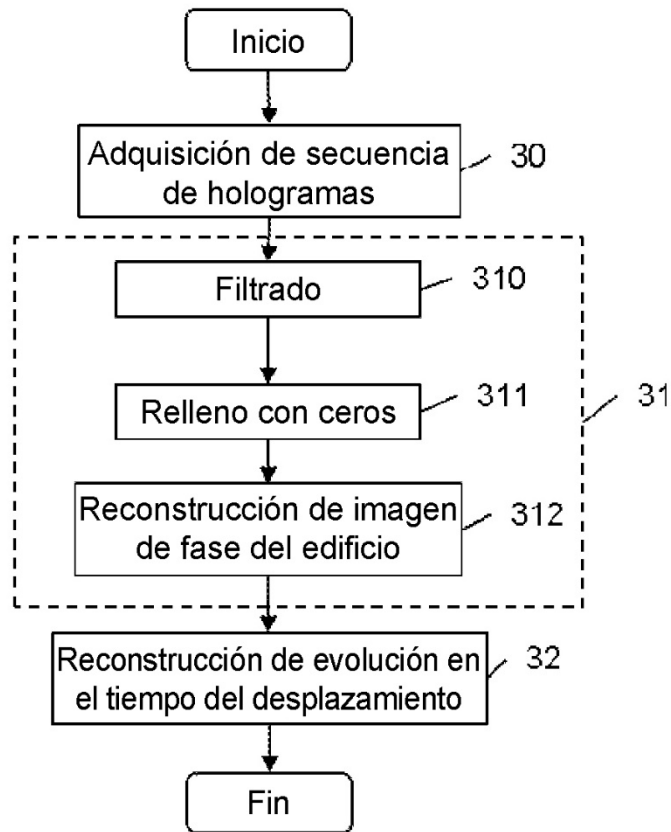


Fig. 2

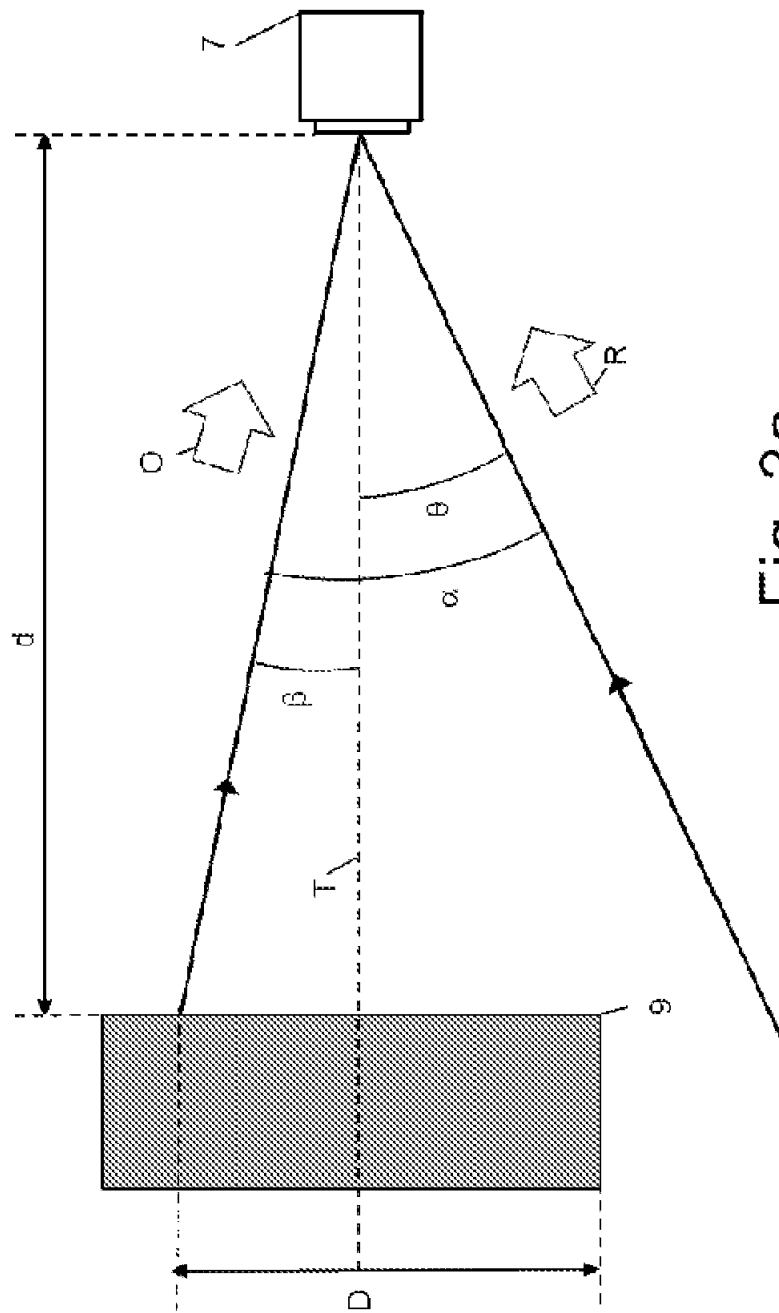


Fig. 3a

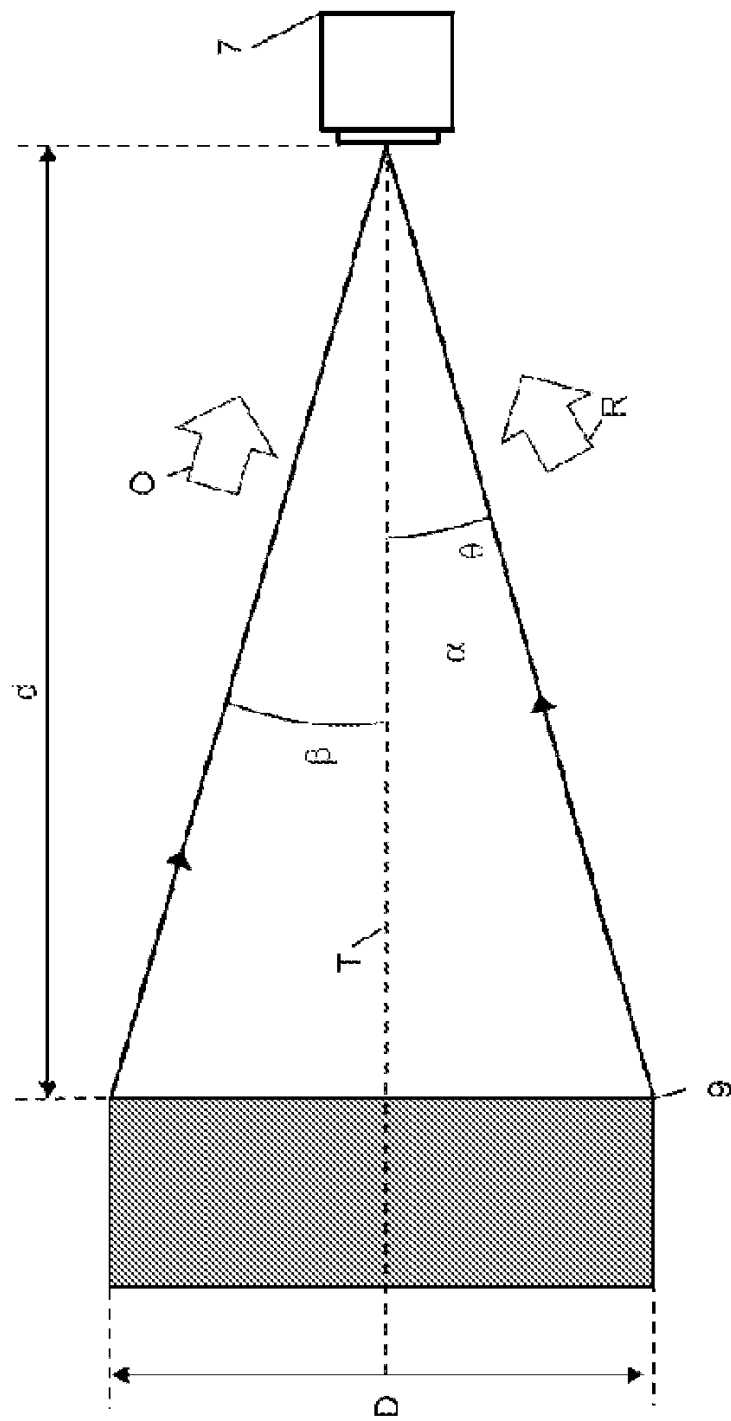


Fig. 3b

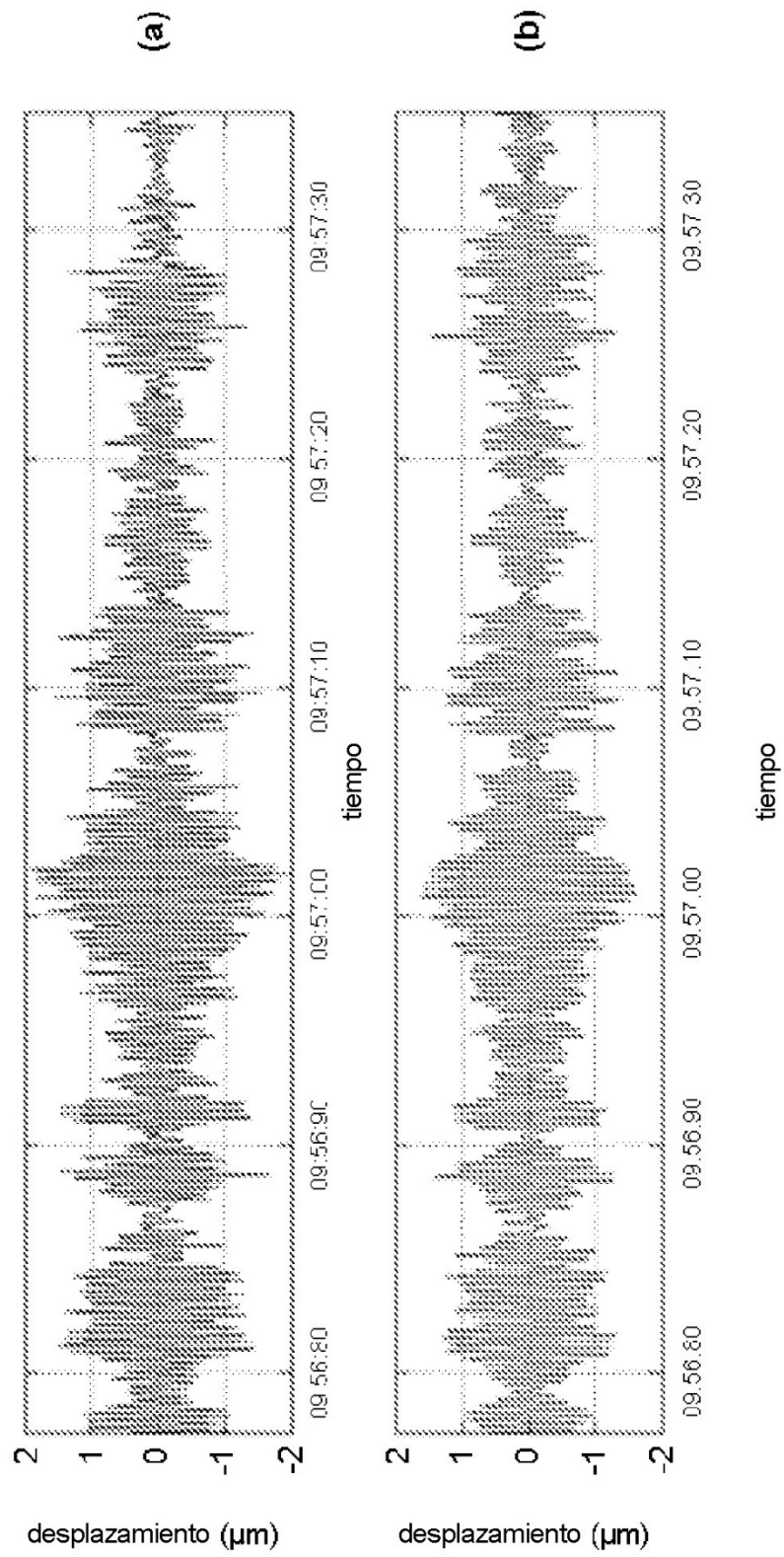


Fig. 4