

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 993 873**

51 Int. Cl.:

A61B 8/00 (2006.01)

A61B 8/08 (2006.01)

G06T 7/20 (2007.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **14.05.2020** **PCT/FR2020/050807**

87 Fecha y número de publicación internacional: **26.11.2020** **WO20234530**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **14.05.2020** **E 20737238 (4)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **09.10.2024** **EP 3968860**

54 Título: **Procedimiento para determinación ultrasónica de una imagen corregida de un medio, y dispositivo para llevar a cabo este procedimiento**

30 Prioridad:

17.05.2019 FR 1905212

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

10.01.2025

73 Titular/es:

SUPERSONIC IMAGINE (100.00%)
135 Rue Emilien Gautier, Bâtiment C
13290 Aix en Provence, FR

72 Inventor/es:

COUADE, MATHIEU

74 Agente/Representante:

VEIGA SERRANO, Mikel

ES 2 993 873 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

Procedimiento para determinación ultrasónica de una imagen corregida de un medio, y dispositivo para llevar a cabo este procedimiento

Sector de la técnica

La presente divulgación se refiere a procedimientos y dispositivos de obtención de imágenes por ondas ultrasónicas para proporcionar imágenes de un medio viscoelástico. En particular, el propósito del procedimiento es corregir las imágenes producidas teniendo en cuenta una variación en la presión ejercida por una sonda de imágenes ultrasónicas sobre una superficie externa del medio.

Estado de la técnica

Más particularmente, la presente divulgación se refiere a un procedimiento de obtención de imágenes que utiliza ondas ultrasónicas para observar un medio viscoelástico difusor que contiene partículas reflectantes de dichas ondas ultrasónicas de compresión.

Las imágenes corregidas por el procedimiento pueden ser de varios tipos. Por ejemplo, las imágenes pueden ser del tipo "deformación" o del tipo "elasticidad".

El documento US 2005/252295 propone una técnica de obtención de imágenes de elasticidad en la que se genera una onda de cizalladura elástica en el medio, y se observa la propagación de esta onda de cizalladura elástica registrando una pluralidad de imágenes del medio. A continuación, se determinan imágenes de al menos un parámetro de movimiento del medio (desplazamiento, deformación parcial) y, a partir de las imágenes, se deducen imágenes de un parámetro de propagación de la onda de cizalladura, como la velocidad de la onda de cizalladura, el módulo de cizalladura, el módulo de Young, la elasticidad de cizalladura, etc.

Esta última técnica se utiliza ampliamente. Sin embargo, se ha observado que las imágenes de los parámetros de movimiento o de propagación de las ondas de cizalladura son sensibles a la presión ejercida por la sonda ultrasonora sobre la superficie del medio. Esta presión de la sonda es ejercida por el profesional y puede variar durante un examen o de un examen a otro. En efecto, el profesional varía esta presión externa para obtener la observación deseada en la imagen en cuestión.

Además, estas imágenes comprenden deformaciones ligadas a las variaciones de la presión externa ejercida, lo que provoca imprecisiones en su representación, reproducibilidad y determinación.

El documento US 2015/146953 divulga un procedimiento (y su correspondiente dispositivo) para determinar por ultrasonidos una imagen corregida de un medio, en el que se utiliza una sucesión temporal de imágenes del medio para determinar una imagen de deformación, siendo dicha imagen corregida teniendo en cuenta el movimiento de la sonda durante la adquisición de la imagen.

Objeto de la invención

El objetivo de la presente invención es mejorar los procedimientos de obtención de imágenes de este tipo, en particular mejorar las imágenes.

Con este fin, la presente divulgación proporciona un procedimiento para determinar ultrasónicamente una imagen corregida como se define en la reivindicación 1.

La presente divulgación también se refiere a un dispositivo de obtención de imágenes como se define en la reivindicación 15.

Descripción de las figuras

Otras características y ventajas de la presente divulgación se harán evidentes en la siguiente descripción de diversas realizaciones, proporcionadas a modo de ejemplo no limitativo, con referencia a los dibujos adjuntos.

En los dibujos:

- la figura 1 es una vista esquemática de un dispositivo de obtención de imágenes por ultrasonidos según una realización de la divulgación;

- las figuras 2A y 2B muestran esquemáticamente el movimiento de una imagen del medio entre una presión externa nula y una presión externa que deforma la superficie externa del medio;

- la figura 2C muestra esquemáticamente un movimiento más complejo que el de la figura 2B, que incluye una rotación;

- la figura 3 es un diagrama que muestra una realización del procedimiento de cálculo de una imagen de deformación corregida;

- la figura 4 es un diagrama que muestra un procedimiento para determinar una imagen de elasticidad corregida;

- la figura 5 es un diagrama que muestra una primera realización de un procedimiento para determinar una imagen de un parámetro de no linealidad corregido;

- la figura 6 es un gráfico que muestra un ejemplo de implementación del procedimiento de la figura 5;

- la figura 7A es un diagrama que muestra un procedimiento para determinar una imagen de tensión corregida;

- la figura 7B es un diagrama que muestra una segunda realización de un procedimiento para determinar una imagen de un parámetro de no linealidad corregido; y

- la figura 8 es un diagrama que muestra un ejemplo de implementación del procedimiento de la figura 7B.

En las distintas figuras, proporcionadas a título ilustrativo, las mismas referencias numéricas designan elementos idénticos o similares.

Descripción detallada de la invención

Dispositivo 1 de obtención de imágenes

El dispositivo 1 de obtención de imágenes mostrado en la figura 1 está diseñado para proporcionar imágenes de un medio 2 viscoelástico que se dispersa con respecto a las ondas ultrasónicas de compresión, y que puede ser, por ejemplo, un cuerpo vivo, por ejemplo parte del cuerpo de un paciente (pecho, hígado, abdomen, etc.), en el caso de aplicaciones médicas. Este dispositivo 1 de obtención de imágenes también puede estudiar la propagación de ondas elásticas de cizalladura para proporcionar imágenes de la elasticidad del medio 2.

Las imágenes del medio se producen, por ejemplo, por medio de un microordenador 4 (que comprende al menos una interfaz 4b de entrada, como un teclado o similar, y una interfaz 4a de salida, como una pantalla o similar) o cualquier otra unidad central electrónica, que envía ondas ultrasónicas de compresión al medio 2, desde su superficie 3 externa, que interactúan con las partículas 5 de dispersión contenidas en el medio 2, partículas que son reflectantes para las ondas ultrasónicas de compresión. Las partículas 5 pueden estar constituidas por cualquier heterogeneidad del medio 2 y, en particular, en el caso de una aplicación médica, por partículas de colágeno presentes en los tejidos humanos (estas partículas forman puntos denominados "speckle" en las imágenes de ultrasonidos).

Para observar el medio 2 y generar imágenes del mismo, se utiliza una sonda 6 de ultrasonidos colocada contra la superficie 3 externa del medio 2 observado. Esta sonda envía, según un eje Z, impulsos de ondas ultrasónicas de compresión del tipo comúnmente utilizado en ecografía, a una frecuencia comprendida entre 0,5 y 100 MHz por ejemplo y preferiblemente entre 0,5 y 15 MHz, por ejemplo del orden de 4 MHz.

La sonda 6 de ultrasonidos está formada por un conjunto de n transductores T1, T2, ..., Ti, ..., Tn ultrasónicos, siendo n un número entero mayor o al menos igual a 1.

Esta sonda 6 puede adoptar la forma de una matriz lineal que comprenda, por ejemplo, n = 128 transductores alineados según un eje X perpendicular al eje Z. La sonda en cuestión también puede ser un conjunto bidimensional (plano o no) de transductores.

Los transductores T1, T2, ... Tn pueden ser controlados independientemente unos de otros por el microordenador 4, eventualmente a través de una unidad central, CPU contenida, por ejemplo, en un armario 7 electrónico conectado por un cable flexible a la sonda 6. Los transductores T1-Tn pueden así emitir selectivamente:

- o bien una onda ultrasonora de compresión "plana" (es decir, en este caso, una onda cuyo frente de onda es rectilíneo en el plano X, Z) o cualquier otro tipo de onda desenfozada que ilumine todo el campo de observación del medio 2, por ejemplo, una onda generada provocando la emisión de señales acústicas aleatorias por los distintos transductores T1-Tn,

- o bien una onda ultrasonora de compresión enfocada en uno o varios puntos del medio 2.

El documento US 2009/234230 propone una técnica de obtención de imágenes sintéticas que utiliza varias ondas de

compresión desenfocadas, por ejemplo ondas planas de diferentes ángulos, y que combina las ondas de retorno de estas ondas planas para obtener de manera rápida una imagen del medio de calidad mejorada.

Determinación de imágenes del medio I_k

Para generar una imagen del medio (I), el dispositivo de obtención de imágenes realiza, por ejemplo, las etapas siguientes:

(i1) el microordenador 4 hace que la sonda 6 emita al menos un disparo de onda ultrasónica de compresión desenfocada en el medio viscoelástico,

i2) el microordenador 4 hace que la sonda 6 detecte y registre en tiempo real las señales acústicas recibidas del medio 2 viscoelástico, que comprenden los ecos generados por la onda ultrasónica de compresión desenfocada al interactuar con las partículas 5 reflectantes del medio viscoelástico, y

(i3) una etapa de procesamiento durante la cual el microordenador 4 procesa las señales acústicas recibidas del medio 2 viscoelástico durante la subetapa (i2) para determinar una o más imágenes del medio (I).

La onda ultrasónica de compresión desenfocada se propaga en el medio 2 a una velocidad de propagación muy elevada, por ejemplo del orden de 1500 m/s en el cuerpo humano, e interactúa con las partículas 5 reflectantes, generando ecos u otras perturbaciones similares en la señal, conocidas per se como "ruido de moteado" en el campo de los ultrasonidos.

Este "ruido de moteado" es captado por los transductores T1, ... Tn durante la subetapa (i2), tras el disparo de la onda ultrasonora de compresión desenfocada. La señal $s_i(t)$ así captada por cada transductor T_i se muestrea primero a alta frecuencia (por ejemplo de 30 a 100 MHz) y se digitaliza en tiempo real por un muestreador perteneciente al bastidor 7 y conectado a este transductor, respectivamente E1, E2, En.

La señal $s_i(t)$ muestreada y digitalizada de este modo se almacena a continuación, también en tiempo real, en una memoria M_i perteneciente al bastidor 7 y específica del transductor T_i .

Cada memoria M_i tiene una capacidad del orden de 128 MB, por ejemplo, y contiene todas las señales $s_i(t)$ recibidas.

Una vez almacenadas todas las señales $s_i(t)$, la unidad central CPU procesa estas señales a través de un circuito S sumador perteneciente al bastidor 7 (o realiza por sí misma este procesamiento, o dicho procesamiento puede realizarse en el microordenador 4), mediante un procedimiento convencional de formación de canales correspondiente a la subetapa (i3).

Se generan señales $S(x, z)$, cada una de las cuales corresponde a la imagen del campo de observación del medio tras el disparo de la onda ultrasónica desenfocada.

Por ejemplo, una señal $S(t)$ puede determinarse mediante la siguiente fórmula:

$$S(x, z, t) = \sum_{i=1}^n \alpha_i(x, z) \cdot s_i[t(x, z) + d_i(x, z)/V]$$

en la que:

s_i es la señal bruta percibida por el transductor n.º i tras el disparo de la onda ultrasónica de compresión,

$t(x, z)$ es el tiempo que tarda la onda ultrasónica de compresión en alcanzar el punto del campo de observación con coordenadas (x,z), con $t = 0$ al inicio del disparo,

$d_i(x, z)$ es la distancia entre el punto del campo de observación con coordenadas (x,z) y el transductor n.º i, o una aproximación de esta distancia,

V es la velocidad media de propagación de las ondas acústicas ultrasónicas de compresión en el medio viscoelástico observado, y

$\alpha_i(x, z)$ es un coeficiente de ponderación que tiene en cuenta las leyes de apodización (en la práctica, en muchos casos será posible considerar que $\alpha_i(x, z) = 1$).

La fórmula anterior se aplica mutatis mutandis cuando el campo de visión es tridimensional (conjunto bidimensional de transductores), sustituyendo las coordenadas espaciales del plano (x,z) por las coordenadas espaciales (x,y,z).

Tras la etapa opcional de formación de canales, la unidad central CPU almacena las señales de imagen $S(x,z)$ correspondientes al último disparo en una memoria M central perteneciente al bastidor 7. Estas señales también pueden almacenarse en el microordenador 4 para que éste pueda calcular por sí mismo la imagen del medio (I).

Existen otras técnicas para generar imágenes del medio (I), como las técnicas de imagen sintética. Puede utilizarse cualquier técnica de obtención de imágenes del medio. Es preferible utilizar una técnica que permita obtener imágenes a gran cadencia.

El dispositivo 1 de obtención de imágenes y el procedimiento según la presente divulgación llevan a cabo una sucesión temporal de imágenes del medio para seguir la variación de la presión P externa ejercida sobre la superficie 3 externa. Así, se considerará que un número N+1 de imágenes del medio se toman en instantes sucesivos en el tiempo, no estando estos instantes necesariamente separados en el tiempo por un periodo constante. Por consiguiente, las imágenes del medio pueden identificarse mediante un índice de imagen k comprendido entre 0 y N.

Por tanto, las imágenes del centro se identificarán con la notación I_k .

Este índice k se utilizará para cualquier otra imagen o magnitud determinada a partir de la imagen del medio de índice k y, eventualmente, a partir de imágenes anteriores del medio. Por tanto, este índice puede utilizarse para identificar el instante de tiempo asociado a esta imagen del medio de índice k.

Además, la primera imagen de esta sucesión de imágenes se denomina convencionalmente imagen del medio de índice 0. Se supondrá que para esta primera imagen, la presión P externa es baja o nula, y que la deformación inducida de la superficie 3 externa es baja o nula. Esta primera imagen se muestra, por ejemplo, en la figura 2A.

Las figuras 2A a 2C ilustran el problema resuelto por la presente divulgación.

La figura 2A muestra el dispositivo 1 de obtención de imágenes en uso, con la sonda 6 ejerciendo poca o ninguna presión P externa sobre la superficie 3 externa. La superficie 3 externa permanece sustancialmente horizontal (en la dirección X). La imagen del medio I_0 comprende, por ejemplo, una inclusión $2i$ a una profundidad 21 con respecto a la superficie 3 externa.

La figura 2B muestra el dispositivo 1 de obtención de imágenes en uso en un instante temporal posterior al de la figura 2A, y con una presión P' externa mayor que P, que deforma la superficie 3 externa en la dirección Z hacia el interior del medio 2. El dispositivo 1 de obtención de imágenes produce una imagen del medio I_1 del mismo tamaño que la imagen I_0 producida en la figura 2A, pero las capas superiores del medio por encima de la inclusión $2i$ están naturalmente más comprimidas que las capas inferiores del medio 2 por debajo de la inclusión $2i$, de modo que la inclusión $2i$ está en esta imagen del medio I_1 de la figura 2B desplazada hacia la sonda 6 en comparación con la primera imagen I_0 de la figura 2A. En otras palabras, la inclusión $2i$ se encuentra entonces a una profundidad 22 con respecto a la superficie 3 externa que es inferior a la profundidad 21 de la primera imagen I_0 .

Por consiguiente, durante una variación de la presión externa, los elementos internos del medio se desplazan a imagen del medio debido a la elasticidad de dicho medio 2. Por tanto, es necesario conocer estos movimientos generales para controlar y analizar con precisión las características de estos elementos internos.

El ejemplo de las figuras 2A y 2B muestra que una traslación en la dirección Z podría proporcionar una corrección adecuada.

La figura 2C muestra el dispositivo 1 de obtención de imágenes en uso en otro instante temporal, por ejemplo aún más tarde que los instantes temporales anteriores mostrados en las figuras 2A y 2B, y con una presión P externa diferente, y sobre todo una inclinación de la sonda 6 con respecto a la dirección Z vertical (inclinación exagerada en esta figura 2C). La superficie 3 externa se deforma en la dirección Z y se inclina en un ángulo Θ . El dispositivo 1 de obtención de imágenes produce una imagen del medio I_2 del mismo tamaño, pero las capas superiores del medio también se comprimen y la inclusión $2i$ se desplaza lateralmente en la imagen, es decir, se desplaza en la dirección X por la inclinación de la sonda 6.

Así, las variaciones de presión y de posición de la sonda 6 en la superficie 3 externa desplazan los elementos internos del medio en la imagen del mismo, y parece necesario conocer estos movimientos generales (que son muy lentos en comparación con las ondas ultrasónicas) para controlarlos y/o compensarlos en las imágenes del medio tomadas con el fin de efectuar un análisis preciso de las características de los elementos internos.

La sonda 6 puede tener un movimiento más complejo que una simple traslación en la dirección Z o una combinación

de traslación y rotación. El movimiento de corrección necesario será entonces más complejo. Los detalles de la determinación de estos movimientos se explicarán más adelante en esta divulgación.

Determinación de un campo de desplazamiento u_k

Las imágenes del medio (I_k) pueden tratarse por correlación y ventajosamente por intercorrelación de dos en dos, es decir, entre una imagen del medio de índice k (I_k) y la imagen del medio de índice $k-1$ (I_{k-1}).

La intercorrelación puede realizarse, por ejemplo, en un circuito electrónico DSP especializado perteneciente al bastidor 7, o programarse en la unidad central CPU o en el microordenador 4.

Durante este procedimiento de intercorrelación, se maximiza una función de intercorrelación $\langle S_{k-1}(x,z), S_k(x,z) \rangle$ para determinar el desplazamiento experimentado por cada partícula 5 que da lugar a un eco ultrasónico.

En el estado de la técnica, en particular en los siguientes documentos, se ofrecen ejemplos de tales cálculos de intercorrelación:

- "Internal displacement and strain imaging using speckle tracking", O'Donnell *et al*, IEEE transactions on ultrasonic, ferroelectrics, and frequency control, vol. II. 41, n.º 3, mayo de 1994, páginas 314-325),

- "Elastography: a quantitative method for imaging the elasticity of biological tissues", Ophir *et al*. 13, páginas 111-134, 1991), y –

"Pyramidal Implementation of the Lucas Panade Feature Tracter. Description of the algorithm", J-Y Bouquet, Intel Corp.

Se obtiene así un campo de desplazamiento, es decir, un conjunto de vectores de desplazamiento o $u(x,z,t)$ en cada posición (x,z) del medio 2, que puede denotarse $u_k(x,z)$ sustituyendo la variable temporal t por el índice de imagen k . Estos vectores de desplazamiento pueden reducirse a un único componente o a dos o tres componentes. En este ejemplo, el campo de desplazamiento u_k en el índice de imagen k es:

$$u = \begin{bmatrix} u_x \\ u_z \end{bmatrix}$$

Este campo de desplazamiento (conjunto de vectores de desplazamiento) se almacena en la memoria M o en el microordenador 4.

Puede construirse una imagen del campo de desplazamiento Iu_k , y el conjunto de imágenes del campo de desplazamiento Iu_k correspondiente a la sucesión temporal de imágenes del medio puede visualizarse, en particular mediante la pantalla 4a del microordenador, por ejemplo, en forma de una película a cámara lenta en la que el valor de los desplazamientos se ilustra mediante un parámetro óptico como, por ejemplo, un nivel de gris o un nivel cromático.

Determinación de las imágenes de deformación parcial $I\Delta\epsilon_k$

Pueden entonces calcularse las deformaciones parciales $\Delta\epsilon$ en cada punto del medio 2, es decir, vectores cuyas componentes son las derivadas de las componentes de los vectores de desplazamiento respectivamente con respecto a las variables espaciales (coordenadas según X, Z en el ejemplo considerado), es decir:

$$\Delta\epsilon = \begin{bmatrix} \frac{du_x}{dx} \\ \frac{du_z}{dz} \end{bmatrix}$$

Posiblemente, según un ejemplo de implementación, solo se calcula la deformación/deformación parcial uniaxial en la dirección Z. Esto se debe a que la compresión debida a la presión externa de la sonda se produce principalmente en esta dirección. Del mismo modo, en un cálculo de tensiones posterior, solo puede calcularse la tensión/tensión parcial uniaxial en la dirección Z. Esto simplifica los cálculos.

Al igual que con los vectores de desplazamiento, puede construirse una imagen de deformación parcial ($I\Delta\epsilon_k$) a partir del conjunto de deformaciones parciales calculadas en cualquier punto con coordenadas (x, z) en el plano X-Z (plano de la imagen).

Estos vectores de deformación parcial o imágenes de deformación parcial ($I\Delta\epsilon_k$) pueden visualizarse, en particular mediante la pantalla del microordenador 4a, en forma de película a cámara lenta.

Determinación del movimiento del medio por presión externa

La deformación del medio 2 ligada a las variaciones de la presión externa P ejercida sobre la superficie 3 externa es una deformación lenta, elástica y casi uniforme. Esta deformación se propaga en el interior del medio 2 viscoelástico y provoca el desplazamiento de las partículas 5 y de los elementos incluidos en el medio 2.

Este desplazamiento es perjudicial para el análisis de las características de los distintos puntos de la imagen del medio y, en particular, para la evaluación de la deformación en dichos puntos y/o de la elasticidad de los mismos.

La presente divulgación contempla, por tanto, la corrección de imágenes para compensar estos movimientos, lo que permite mantener las partículas y/o elementos internos del medio 2 en localizaciones prácticamente constantes en la imagen, posibilitando así un estudio más preciso de sus características.

Puede considerarse que la deformación externa causada por la presión P externa provoca un movimiento entre una imagen del medio de índice k (I_k) y una imagen del medio de índice k-1 anterior (I_{k-1}).

El movimiento puede determinarse entonces mediante el campo de desplazamiento (u_k) entre una imagen del medio de índice k y una imagen del medio de índice k-1 anterior.

En particular, este movimiento puede modelizarse mediante una transformación geométrica T_k de índice k que representa de forma general y sencilla todos los desplazamientos del campo de desplazamiento en la etapa de índice de imagen k, $u_k(x, z)$, es decir, con un número muy reducido de parámetros, por ejemplo menos de diez.

Así, la compensación de cualquier tipo de imagen a partir de los movimientos anteriores puede realizarse aplicando las transformaciones geométricas anteriores, es decir, aplicando las transformaciones geométricas T_i , variando el índice i de 1 a k.

Según una primera variante, la transformación geométrica T_k comprende una traslación, como se muestra entre la figura 2A y la figura 2B.

En una segunda variante, la transformación geométrica T_k comprende una traslación y una homotecia.

En una segunda variante, la transformación geométrica T_k comprende una traslación, una homotecia y una rotación.

Así, en el plano X-Z, el plano de la imagen, la transformación geométrica puede ponerse en forma de matriz del siguiente tipo:

$$T_k = \begin{bmatrix} Hx.\cos\theta & -Hz.\sen\theta & Tx \\ Hx.\sen\theta & Hz.\cos\theta & Tz \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

con los siguientes parámetros de la transformación geométrica (T_k):

T_x, T_y coeficientes de traslación en el plano de la imagen,

H_x, H_z coeficiente de homotecia en el plano de la imagen, y

θ ángulo de rotación con eje perpendicular al plano de la imagen.

Así, si se toman tres puntos P1, P2 y P3 en la imagen con coordenadas respectivas (x_1, z_1), (x_2, z_2) y (x_3, z_3), se obtienen las siguientes relaciones:

$$A = \begin{bmatrix} x1 & x2 & x3 \\ z1 & z2 & z3 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} x1 + dx1 & x2 + dx2 & x3 + dx3 \\ z1 + dz1 & z2 + dz2 & z3 + dz3 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

con,

$$dx1 = u_{x1} \quad dz1 = u_{z1}$$

$$dx2 = u_{x2} \quad dz2 = u_{z2}$$

$$dx3 = u_{x3} \quad dz3 = u_{z3}$$

para utilizar la notación para las componentes X y Z de los vectores de desplazamiento de los puntos P1, P2 y P3.

Además, se obtiene una relación que permite calcular la transformación geométrica T_k a partir de las matrices A y B anteriores, es decir, una matriz A correspondiente a las coordenadas de los tres puntos de la imagen, y una matriz B correspondiente a las coordenadas de esos mismos tres puntos con los desplazamientos de dichos puntos (el movimiento). De esta forma, la matriz de la transformación geométrica se obtiene por el producto matricial de la matriz B y la inversa de la matriz A:

$$T_k = B \cdot A^{-1}$$

Aplicando esta relación, puede calcularse la transformación geométrica T_k a partir de tres puntos P1, P2 y P3.

A la inversa, una vez establecida la transformación geométrica T_k , esta relación puede utilizarse para hallar las coordenadas (x, z) de cualquier punto P mediante la relación inversa:

$$B = T_k \cdot A$$

Así, la compensación de cualquier tipo de imagen de los movimientos anteriores puede realizarse por multiplicación matricial de las transformaciones geométricas anteriores, es decir, por multiplicación matricial de las transformaciones geométricas T_i , variando el índice i de 1 a k.

Las relaciones anteriores establecidas con 3 puntos pueden generalizarse a un grupo de puntos imagen, comprendiendo el grupo de puntos 3, 4, 5 o 6 puntos de imagen. El grupo de puntos comprende entre 3 y 10 puntos de imagen.

Además, en una variante, se toma ventajosamente una población de tres puntos (de grupos de puntos) de la imagen, comprendiendo dicha población un número N_g de grupos de puntos de alto valor. Por ejemplo, el tamaño de esta población, el número N_g de grupos de puntos, es superior a cien.

Los parámetros de la transformación geométrica T_k se obtienen entonces a partir de los valores medios de los parámetros calculados a partir de la población de grupos de puntos de la imagen.

En particular, esta técnica puede aplicarse a una imagen del campo de desplazamiento u_k para deducir el desplazamiento entre una imagen del medio de índice k y una imagen del medio anterior de índice k-1.

Utilizando una población de grupos de puntos, puede determinarse una transformación geométrica que represente, de forma más global, el movimiento entre la imagen del medio de índice k y una imagen del medio de índice k-1 anterior.

Ventajosamente, los puntos de cada grupo se seleccionan al azar en la imagen. Gracias a esta disposición, es

posible determinar una transformación geométrica que represente el movimiento entre imágenes de forma más global y fiable.

Determinación de imágenes de deformación parcial corregida $I_{\Delta\epsilon_k}^*$

Las imágenes de deformación parcial $I_{\Delta\epsilon_k}$ se corrigen a continuación para volver a alinear estas imágenes con la primera imagen del medio I_0 , suprimiendo así los movimientos causados por la deformación de la presión P externa en estas imágenes de deformación parcial $I_{\Delta\epsilon_k}$.

Esta corrección se efectúa utilizando, para cada imagen de deformación parcial $I_{\Delta\epsilon_k}$ de índice de imagen k , el conjunto de movimientos globales determinados entre cada imagen del medio. Más concretamente, los movimientos inversos deben aplicarse para volver a la situación de la primera imagen I_0 .

En otras palabras, las imágenes de deformación parcial corregida $I_{\Delta\epsilon_k}^*$ contienen deformaciones parciales corregidas $\Delta\epsilon_k^*$ y se calculan compensando dichas imágenes de deformación parcial $I_{\Delta\epsilon_k}$ a partir de los movimientos asociados a las imágenes del medio con índices comprendidos entre 1 y k inclusive.

Determinación de una imagen de deformación corregida $I_{\epsilon_k}^*$

La deformación $\epsilon_k(x, z)$ se obtiene sumando las deformaciones parciales sucesivas, es decir:

$$\epsilon_k(x, z) = \sum_{i=1}^k \Delta\epsilon_i(x, z)$$

En este caso, la deformación $\epsilon_k(x, z)$ (deformación corregida) se obtiene sumando las sucesivas deformaciones parciales corregidas $\Delta\epsilon_k^*$:

$$\epsilon_k^*(x, z) = \sum_{i=1}^k \Delta\epsilon_i^*(x, z)$$

Una imagen de deformación corregida ($I_{\Delta\epsilon_k}^*$) puede construirse a partir del conjunto de deformaciones corregidas $\epsilon_k(x, z)$ calculadas en cualquier punto con coordenadas (x, z) en el plano X-Z (plano de la imagen).

Estas imágenes de deformación corregida $I_{\epsilon_k}^*$ pueden visualizarse en forma de película a cámara lenta.

Procedimiento para determinar una imagen corregida

En resumen, según una primera realización del procedimiento mostrado en la figura 3 según la presente divulgación, el procedimiento implementado comprende las siguientes etapas:

(d1) determinar una sucesión temporal de imágenes del medio (I_k), siendo k un índice de imagen comprendido entre 0 y N , y suponiéndose la primera imagen de dicha sucesión sin deformación,

(d2) determinar el movimiento para cada imagen del medio de índice k comprendido entre 1 y N , siendo el movimiento entre una imagen del medio de índice k (I_k) y la imagen del medio de índice $k-1$ anterior (I_{k-1}),

(d3) determinar una sucesión temporal de imágenes de deformación parcial ($I_{\Delta\epsilon_k}$) a partir de la imagen del medio de índice k (I_k) y de la imagen del medio de índice $k-1$ anterior (I_{k-1}),

(d4) determinar imágenes de deformación parcial corregida ($I_{\Delta\epsilon_k}^*$) por compensación de dichas imágenes de deformación parcial ($I_{\Delta\epsilon_k}$) a partir de los movimientos anteriores, es decir, los movimientos asociados a las imágenes del medio de índices comprendidos entre 1 y k inclusive,

(d5) determinar una imagen de deformación corregida ($I_{\epsilon_n}^*$) por suma o acumulación de las imágenes de deformación parcial corregida ($I_{\Delta\epsilon_n}^*$) de índices comprendidos entre 1 y k inclusive.

Sumar o agregar imágenes significa que los valores de los píxeles con la misma coordenada espacial en dichas imágenes se suman (es decir, se añaden) para formar el valor del píxel correspondiente en la imagen resultante.

Gracias a estas disposiciones, se obtiene una imagen de deformación corregida $I_{E,n}^*$ del medio 2 que no está influenciada, o lo está muy poco, por la deformación y los movimientos inducidos por la presión P externa, lo que permite obtener valores de deformación más exactos y precisos que en la técnica anterior.

Determinación de una imagen de elasticidad del medio IE_k

El documento US 2005/252295 propone una técnica de obtención de imágenes de la elasticidad del medio 2 viscoelástico: El dispositivo 1 de obtención de imágenes estudia la propagación de ondas de cizalladura elásticas en este medio. Los movimientos de las ondas de cizalladura elásticas son controlados por los medios descritos anteriormente y, en particular, por el microordenador 4.

Esto se realiza en varias etapas:

(e1.1) una etapa de excitación durante la cual el microordenador 4 genera una onda de cizalladura elástica en el medio 2 viscoelástico, haciendo que al menos una onda ultrasónica focalizada en el medio viscoelástico sea emitida por la sonda 6,

(e1.2) una etapa de observación durante la cual se observa simultáneamente la propagación de la onda de cizalladura en una multitud de puntos del campo de observación en el medio 2 viscoelástico, comprendiendo esta etapa subetapas durante las cuales se generan una pluralidad de imágenes intermedias temporalmente sucesivas del medio $II_{j,k}$, siendo j un índice de imagen intermedia comprendido entre 0 y M inclusive, siendo $M+1$ el número de imágenes intermedias producidas.

Cada imagen intermedia del medio se genera, por ejemplo, mediante el procedimiento de determinación de una imagen del medio I_k descrito anteriormente, en el que al menos un disparo de onda ultrasónica de compresión desenfoada es emitido por la sonda 6, y las señales acústicas recibidas son detectadas y registradas por la sonda 6, y estas señales acústicas son procesadas para construir una imagen intermedia del medio ($II_{j,k}$).

El enfoque y la temporización de la onda ultrasónica enfocada emitida en la etapa (e1), así como la temporización de las ondas ultrasónicas desenfoadas emitidas en la etapa (e2), se adaptan de modo que las ondas ultrasónicas desenfoadas lleguen al campo de visión durante la propagación de la onda de cizalladura en este campo de visión. De este modo, la onda de cizalladura es visible en las imágenes intermedias del medio $II_{j,k}$ generadas.

A continuación se procede con:

(e1.3) una etapa de procesamiento de las imágenes intermedias del medio para determinar una imagen de elasticidad del medio IE_k .

Las imágenes intermedias del medio $II_{j,k}$ se procesan para calcular un campo de desplazamiento $u_{j,k}$, por ejemplo por correlación o intercorrelación como anteriormente. Por ejemplo, por intercorrelación entre una imagen intermedia del medio de índice j ($II_{j,k}$) y la imagen intermedia del medio de índice $j-1$ ($II_{j-1,k}$). Los vectores de desplazamiento determinados pueden utilizarse para visualizar la propagación de la onda de cizalladura en forma de película. Las deformaciones parciales $\Delta\epsilon$ en cada punto del medio 2 también pueden calcularse a partir del campo de desplazamiento.

En base a los campos de desplazamiento o de deformación, el microordenador 4 puede, ventajosamente, realizar a continuación una etapa de cartografía durante la cual, a partir de la evolución del parámetro de movimiento (desplazamiento o deformación parcial) en el tiempo en el campo de observación, se calcula al menos un parámetro de propagación de la onda de cizalladura, o bien en determinados puntos seleccionados del campo de observación, o bien en todo el campo de observación.

Entonces, puede construirse una imagen de elasticidad IE_k , correspondiente a todos los parámetros de propagación de la onda de cizalladura en los distintos puntos del campo de observación.

Esta imagen de la elasticidad IE_k del medio puede visualizarse, en particular en la pantalla 4a del microordenador, donde el valor del parámetro de propagación se ilustra mediante un parámetro óptico como un nivel de gris o un nivel cromático.

El parámetro de propagación de la onda de cizalladura que se calcula durante la etapa de cartografía se elige, por ejemplo, entre:

- la velocidad C_s de las ondas de cizalladura, o

- el módulo de cizalladura μ , o

- Módulo de Young $E=3\mu$, o

- atenuación α de las ondas de cizalladura, o

- elasticidad de cizalladura μ_1 , o

- la viscosidad de cizalladura μ_2 , o

- el tiempo de relajación mecánica de los tejidos en el medio.

Por ejemplo, puede calcularse en distintos puntos del campo de observación:

- el valor de la celeridad C_s de la onda de cizalladura, que da acceso a la dureza del tejido,

- el valor del tiempo de relajación mecánica τ_s de los tejidos, característico de la viscosidad local del medio.

Para ello, se utiliza un modelo de propagación de ondas de cizalla, por ejemplo representado por la siguiente ecuación de propagación, que gobierna los desplazamientos u generados por las ondas de cizalla en cada posición r del medio:

$$\rho \frac{\partial^2 \vec{u}(\vec{r}, t)}{\partial t^2} = c_s^2 \left(1 + \tau_s \frac{\partial}{\partial t} \right) \cdot \vec{\nabla}^2 \vec{u}(\vec{r}, t)$$

Donde

ρ es la densidad del tejido,

τ_s es el tiempo de relajación mecánica del tejido, y

c_s es la celeridad de la onda de cizalladura, directamente relacionada con el módulo de Young E del tejido por la relación:

$$c_s = \sqrt{\frac{E}{3\rho}}$$

La resolución de esta ecuación de propagación con todos los desplazamientos u permite obtener los parámetros de propagación (c_s , τ_s) mencionados anteriormente.

Es posible variar el cálculo de los parámetros de propagación. En particular, la ecuación de ondas puede utilizarse en el dominio de Fourier, por ejemplo promediando los valores en una banda de frecuencias. También pueden utilizarse deformaciones parciales en lugar de desplazamientos.

También se pueden producir cartografías de parámetros de propagación, es decir, imágenes de elasticidad, con diferentes ondas de cizalladura. A continuación, pueden combinarse, por ejemplo promediándolas, para obtener una cartografía más precisa.

La velocidad de propagación de la onda de cizalladura en el medio 2 es suficientemente elevada para considerar que no hay variación de la presión P externa ejercida sobre la superficie 3 externa durante este proceso, durante el cual se toman una pluralidad de imágenes del medio (imágenes intermedias) para determinar una imagen de elasticidad IE (parámetro de propagación de la onda de cizalladura). De este modo, estas imágenes del medio no se corrigen por los movimientos del medio.

Por otra parte, la imagen de elasticidad del medio IE_k debe corregirse con el movimiento en el instante temporal considerado o en un instante temporal próximo (representado por el índice k) para que pueda compararse con la imagen del medio inicial IE_0 , o para que pueda compararse con la imagen de deformación corregida IE_k^* .

Determinación de una imagen de elasticidad corregida IE_k^*

A continuación, se corrige la imagen de elasticidad IE_k en un procedimiento que se muestra en la figura 4, en el que

se intenta devolver esta imagen de elasticidad IE_k a una situación conforme a la primera imagen del medio I_0 para suprimir los movimientos provocados por la deformación de la presión P externa.

Esta corrección se efectúa utilizando, para cada imagen de elasticidad IE_k de índice de imagen k , el conjunto de movimientos globales determinados entre cada imagen del medio. Más concretamente, los movimientos inversos deben aplicarse para volver a la situación de la primera imagen I_0 .

En otras palabras, el procedimiento comprende las siguientes etapas:

(e1) determinación de una imagen de elasticidad (IE_k),

(e2) determinación de una imagen de elasticidad corregida (IE_k^*) compensando la imagen de elasticidad (IE_k) en función de los movimientos anteriores asociados a las imágenes del medio de índices comprendidos entre 1 y k inclusive.

Determinación de una imagen de un parámetro de no linealidad INL_k

En un dominio elástico lineal, el medio 2 se deforma en proporción a la tensión σ y sigue la ley de Hooke:

$$\sigma = E_0 \cdot \varepsilon$$

Donde

E_0 es el módulo de Young del dominio lineal, y

ε es la deformación.

En un dominio elástico no lineal, esta proporcionalidad ya no es válida. En la mayoría de los casos, el módulo de Young E del material en el medio 2 aumenta con la compresión.

El módulo de elasticidad o módulo de Young E se define como la pendiente de la curva tensión-deformación, es decir:

$$E = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \varepsilon} \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde

E es el módulo de Young,

$\Delta \sigma$ es la variación de la tensión local, es decir, la tensión parcial,

$\Delta \varepsilon$ es la variación de la deformación local, es decir, la deformación parcial.

Un ejemplo de parámetro de elasticidad no lineal es el coeficiente de Landau conocido como módulo de elasticidad de cizalladura de tercer orden A mencionado en los documentos:

- "Acoustoelasticity in soft solids: Assessment of the non-linear shear modulus with the acoustic radiation force", Gennisson *et al.*, J. Acoust. Soc. Am (122), Diciembre 2007, páginas 3211-3219, y

- "Quantitative Imaging of Nonlinear Shear Modulus by Combining Static Elastography and Shear Wave Elastography", H. Latorre-Ossa *et al.*, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 51, n.º 4, páginas 833-839.

En particular, la ecuación (1) de este último documento puede reescribirse en forma de relación (R1) entre la elasticidad (módulo de Young) E y la tensión σ :

$$E = E_0 - \frac{A}{\frac{4}{3} \cdot E_0} \cdot \sigma \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde

E es el módulo de Young o módulo de elasticidad,

E_0 es el módulo de Young del dominio lineal, es decir, el módulo de Young del material del medio sin compresión, por tanto la primera imagen de elasticidad corregida en la sucesión temporal de imágenes,

σ es la tensión y por ejemplo la tensión σ_z uniaxial en la dirección Z, vertical, correspondiente sustancialmente a la compresión inducida por la presión ejercida externamente por el usuario de la sonda 6, y

A es el parámetro de no linealidad deseado.

Diferenciando la relación R1 anterior, se obtiene:

$$\Delta E = -\frac{A}{\frac{4}{3} \cdot E_0} \cdot \Delta \sigma$$

Dividiendo entre la definición del módulo de Young en la ecuación (ec. 1) y entre integración se obtiene una relación R2 entre la elasticidad (módulo de Young) E y la deformación ε , es decir:

$$\ln(E) = \ln(E_0) - \frac{A}{\frac{4}{3} \cdot E_0} \cdot \varepsilon$$

(Ec. 3)

donde

E es el módulo de Young,

E_0 es el módulo de Young del dominio lineal, es decir, el módulo de Young del material del medio sin compresión, de por tanto, la primera imagen de elasticidad corregida en la sucesión temporal de imágenes,

$\ln()$ es la función logarítmica neperiana,

ε es la deformación, y

A es el parámetro de no linealidad a determinar.

Según una primera variante del procedimiento NLa, mostrada en la figura 5, basada en imágenes de deformación e imágenes de elasticidad, el procedimiento implementado por el microordenador 4 comprende además las siguientes etapas:

(NL1a) determinar una pluralidad de imágenes de deformación corregidas ($\{E_k^*\}$), tal como se ha presentado anteriormente,

(NL2a) determinar una pluralidad de imágenes de elasticidad corregidas ($\{E_k^*\}$), tal como se ha presentado anteriormente, estando dichas imágenes de deformación corregidas y dichas imágenes de elasticidad intercaladas temporalmente, y

(NL3a) determinar una imagen de un parámetro de no linealidad ($\{INL_k\}$) a partir de la pluralidad de imágenes de deformación corregidas ($\{E_k^*\}$) y de la pluralidad de imágenes de elasticidad corregidas ($\{E_k^*\}$).

De hecho, un parámetro de no linealidad de un píxel de la imagen se determina mediante el conjunto (pluralidad) de valores de deformación corregida y elasticidad corregida de este mismo píxel.

Por ejemplo, este parámetro de no linealidad se determina mediante una regresión lineal de esta pluralidad de pares de valores. A esta regresión lineal se le denominará regresión de deformación lineal.

Cada par de valores se forma para un píxel de la imagen y comprende:

- un primer valor de este mismo píxel de una imagen de deformación corregida, y

- un segundo valor de este mismo píxel de una imagen de elasticidad corregida,

considerándose las imágenes de deformación y elasticidad corregidas como imágenes temporalmente suspensivas o temporalmente próximas. Estas imágenes pueden tener índices de imagen idénticos o próximos.

Eventualmente, las imágenes de deformación y las imágenes de elasticidad pueden tener índices de imagen diferentes y es necesario tomar imágenes con índices correspondientes a instantes sucesivos o temporalmente próximos en el tiempo como se ha explicado anteriormente, es decir, se establece una correspondencia entre el tiempo y el índice de cada imagen considerada.

La figura 6 es una representación para un píxel de la imagen de una pluralidad de puntos Pa, correspondiendo cada punto Pa a un par de valores de este tipo (E_k, ε_k). Todos estos puntos Pa están sustancialmente alineados según una línea recta Da en un gráfico que tiene como abscisa el valor de deformación corregido ε (para este píxel) y como ordenada el logaritmo neperiano del valor del módulo de Young E (para este mismo píxel de la imagen).

La regresión lineal en la deformación utiliza entonces la relación R2 entre la elasticidad (módulo de Young) E y la deformación ε (ec. 3):

$$\ln(E) = \ln(E_0) - \frac{A}{\frac{4}{3} \cdot E_0} \cdot \varepsilon$$

donde más precisamente en el presente caso de aplicación:

E es el módulo de Young del píxel de la imagen de elasticidad corregida considerada,

E_0 es el módulo de Young del píxel de la primera imagen de elasticidad corregida,

$\ln()$ es la función logaritmo neperiano,

ε es la deformación del píxel de la imagen de deformación corregida considerada, y

A es el parámetro de no linealidad determinado para dicho píxel por dicha regresión lineal en deformación.

La resolución de esta regresión de deformación lineal para un conjunto de pares de valores extraídos de la pluralidad de imágenes de deformación corregida ($I\varepsilon_k^*$) e imágenes de elasticidad corregida (IE_k^*) se obtienen los valores del parámetro de no linealidad A para cada píxel de la imagen.

Gracias a estos cálculos, se obtiene una imagen de un parámetro de no linealidad INL_k del medio 2 que utiliza imágenes corregidas. Esta imagen no presenta los artefactos de las imágenes no corregidas de la técnica anterior. Esta imagen está poco o nada influenciada por las deformaciones y movimientos inducidos por la presión P externa. Los valores del parámetro de no linealidad A obtenidos son más exactos y precisos que con los procedimientos de la técnica anterior.

Según una segunda variante del procedimiento NLb, mostrada en las figuras 7A y 7B, basada en imágenes de tensión e imágenes de elasticidad, el procedimiento implementado por el microordenador 4 comprende:

- una primera fase durante la cual las imágenes de deformación parcial se convierten en imágenes de tensión corregidas, y

- una segunda fase durante la cual se determina una imagen de un parámetro de no linealidad.

Durante la primera fase mostrada en la figura 7A, se lleva a cabo:

(c1) la determinación de una secuencia temporal de imágenes de tensión parcial corregida ($I\Delta\sigma_k^*$) multiplicando la imagen de deformación parcial corregida ($I\varepsilon_k^*$) de índice k y la imagen de elasticidad corregida (IE_k^*) de índice k,

(c2) la determinación de una imagen de tensión corregida ($I\sigma_k^*$) por una suma de las imágenes de deformación parcial corregida ($I\Delta\sigma_k^*$) de los índices comprendidos entre 1 y k inclusive.

Por multiplicación de imágenes se entiende en este caso que los valores de píxel de la misma coordenada espacial de dichas imágenes se multiplican (es decir, se multiplican entre sí) para formar el valor del píxel correspondiente de

la imagen resultante. En este caso, por tanto, un valor de deformación parcial corregido $\Delta\epsilon^*$, calculado por las etapas del procedimiento explicado anteriormente e ilustrado en la figura 3, se multiplica por un valor de elasticidad corregido E^* (módulo de Young corregido), calculado por las etapas del procedimiento explicado anteriormente e ilustrado en la figura 4, para obtener el valor de tensión corregido $\Delta\sigma^*$ de dicho píxel.

De este modo, se calcula la tensión parcial en cada píxel de la imagen mediante:

$$\Delta\sigma^* = E^* \cdot \Delta\epsilon^*$$

Sumar o agregar imágenes significa que los valores de los píxeles con la misma coordenada espacial en dichas imágenes se suman (es decir, se añaden) para formar el valor del píxel correspondiente en la imagen resultante.

En otras palabras:

$$\sigma_k^*(x, z) = \sum_{i=1}^k \Delta\sigma_i^*(x, z)$$

Esta fórmula se aplica a cada píxel de la imagen para construir la imagen de tensión corregida ($I\sigma_k^*$).

Durante la segunda fase mostrada en la figura 7B, se realiza:

(NLb1) la determinación de una pluralidad de imágenes de deformación corregidas ($I\epsilon_k^*$),

(NLb2) la determinación de una pluralidad de imágenes de elasticidad corregidas (IE_k^*), estando dichas imágenes de deformación corregidas y dichas imágenes de elasticidad temporalmente intercaladas, y

(NLb3) la determinación de un parámetro de no linealidad (INL_k) a partir de la pluralidad de imágenes de deformación corregida ($I\epsilon_k^*$) y de la pluralidad de imágenes de elasticidad corregida (IE_k^*).

De hecho, un parámetro de no linealidad de un píxel de la imagen se determina mediante el conjunto (pluralidad) de valores de tensión corregida y elasticidad corregida de este mismo píxel.

Por ejemplo, este parámetro de no linealidad se determina mediante una regresión lineal de esta pluralidad de pares de valores. A esta regresión se le denomina lineal regresión lineal restringida.

Cada par de valores se forma para un píxel de la imagen y comprende:

- un primer valor de este mismo píxel de una imagen de tensión corregida, y

- un segundo valor de este mismo píxel de una imagen de elasticidad corregida,

considerándose que las imágenes de tensión y elasticidad corregidas son imágenes temporalmente suspensivas o temporalmente próximas. Estas imágenes pueden tener índices de imagen idénticos o próximos.

Eventualmente, las imágenes de tensión y las imágenes de elasticidad pueden tener índices de imagen diferentes y es necesario tomar imágenes con índices correspondientes a instantes temporales sucesivos o temporalmente próximos en el tiempo como se ha explicado anteriormente, es decir, se establece una correspondencia entre el tiempo y el índice de cada imagen considerada.

La figura 8 es una representación para un píxel de la imagen de una pluralidad de puntos P_b , correspondiendo cada punto P_b a un par de valores (E_k, σ_k). Todos estos puntos P_b están sustancialmente alineados según una línea recta Db en un gráfico que tiene como abscisa el valor de tensión corregida σ (para este píxel) y como ordenada el valor del módulo de Young E (para este mismo píxel de la imagen).

La regresión lineal de la tensión utiliza entonces la relación $R1$ entre la elasticidad (módulo de Young) E y la tensión σ (ec. 2):

$$E = E_0 - \frac{A}{\frac{4}{3} \cdot E_0} \cdot \sigma$$

donde más precisamente en el presente caso de aplicación:

- 5 E es el módulo de Young del píxel de la imagen de elasticidad corregida considerada,
 E₀ es el módulo de Young del píxel de la primera imagen de elasticidad corregida,
 ln() es la función de logaritmo neperiano,
 10 ε es la deformación del píxel de la imagen de deformación corregida considerada, y
 A es el parámetro de no linealidad determinado para dicho píxel por dicha regresión de tensión.
- 15 La resolución de esta regresión lineal de tensión para un conjunto de pares de valores extraídos de la pluralidad de imágenes de tensión corregida (Iσ_k*) e imágenes de elasticidad corregida (IE_k*) se obtienen los valores del parámetro de no linealidad A para cada píxel de la imagen.
- 20 Gracias a estos cálculos, se obtiene una imagen de un parámetro de no linealidad INL_k del medio 2 que utiliza imágenes corregidas. Esta imagen no presenta los artefactos de las imágenes no corregidas de la técnica anterior. Esta imagen está poco o nada influenciada por las deformaciones y movimientos inducidos por la presión P externa. Los valores del parámetro de no linealidad A son más exactos y precisos que en la técnica anterior.

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento de determinación por ultrasonidos de una imagen corregida de un medio, comprendiendo el procedimiento:

- determinar una sucesión temporal de imágenes del medio (I_k), siendo k un índice de imagen comprendido entre 0 y N , y suponiéndose sin deformación la primera imagen de dicha sucesión,

- determinar el movimiento para cada imagen del medio de índice k entre 1 y N , estando el movimiento entre una imagen del medio de índice k (I_k) y la imagen del medio de índice $k-1$ anterior (I_{k-1}),

caracterizado por que dicho procedimiento comprende además

- determinar una sucesión temporal de imágenes de deformación parcial ($I_{\Delta\epsilon k}$) de la imagen del medio de índice k (I_k) y de la imagen del medio de índice $k-1$ anterior (I_{k-1}),

- determinar imágenes de deformación parcial corregidas ($I_{\Delta\epsilon k}^*$) por compensación de dichas imágenes de deformación parcial ($I_{\Delta\epsilon k}$) de los movimientos anteriores, es decir, de los movimientos asociados a las imágenes del medio de índices comprendidos entre 1 y k inclusive, y

- determinar una imagen de deformación corregida ($I_{\epsilon k}^*$) por suma de las imágenes de deformación parcial corregidas ($I_{\Delta\epsilon k}^*$) de los índices comprendidos entre 1 y k inclusive, y

en la que la determinación del movimiento en el índice k se lleva a cabo mediante:

- determinar un campo de desplazamiento (u_k) entre una imagen del medio (I_k) y la imagen del medio anterior (I_{k-1}),

- determinar una transformación geométrica (T_k) de la imagen a partir de dicho campo de desplazamiento (u_k), representando dicha transformación geométrica el campo de desplazamiento (u_k) con un número de parámetros inferior a diez.

2. Procedimiento según la reivindicación 1, en el que el campo de desplazamiento se calcula mediante intercorrelación entre una imagen del medio (I_k) y la imagen del medio anterior (I_{k-1}), o mediante un algoritmo de seguimiento de subimágenes entre una imagen del medio (I_k) y la imagen del medio anterior (I_{k-1}).

3. Procedimiento según la reivindicación 2, en el que el algoritmo de seguimiento es un algoritmo Lucas-Kanade.

4. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 3, en el que la transformación geométrica (T_k) comprende al menos una traslación, o una traslación y una homotecia, o una traslación, una homotecia y una rotación.

5. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 3, en el que la transformación geométrica (T_k) comprende una traslación, una homotecia y una rotación, y en el que la transformación geométrica se conforma en una matriz tal como:

$$T_k = \begin{bmatrix} Hx \cdot \cos\theta & -Hz \cdot \sin\theta & Tx \\ Hx \cdot \sin\theta & Hz \cdot \cos\theta & Tz \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

con los siguientes parámetros de la transformación geométrica (T_k) en el plano de la imagen:

T_x , T_y coeficientes de traslación

H_x , H_z , coeficiente de homotecia, y

θ ángulo de rotación de eje perpendicular al plano de la imagen.

6. Procedimiento según la reivindicación 1, en el que los parámetros de la transformación geométrica (T_k) se obtienen mediante valores medios de una población de parámetros calculados a partir de grupos de puntos del campo de desplazamiento (u_k).

7. Procedimiento según la reivindicación 6, en el que:

- un grupo comprende entre tres y diez puntos en el campo de desplazamiento (u_k), y
- la población supera los cien grupos.

8. Procedimiento según la reivindicación 1, que comprende además:

(e1) determinar una imagen de elasticidad (IE_k) del medio, y

(e2) determinar una imagen de elasticidad corregida (IE_k^*) compensando dicha imagen de elasticidad (IE_k) a partir de movimientos anteriores, es decir, movimientos asociados a imágenes del medio de índices comprendidos entre 1 y k inclusive.

9. Procedimiento según la reivindicación 8, en el que la imagen de elasticidad (IE_k) producida en la etapa (e1) se genera mediante las siguientes subetapas:

(e1.1) una etapa de excitación durante el cual se genera una onda de cizalladura en el medio, haciendo que se emita al menos una onda ultrasonora focalizada,

(e1.2) una etapa de observación durante la cual se observa la propagación de la onda de cizalladura determinando una sucesión temporal de imágenes intermedias del medio ($II_{j,k}$), siendo j un índice de imagen intermedia comprendido entre 0 y M,

(e1.3) una etapa de procesamiento durante la cual se determina la imagen de elasticidad (IE_k) a partir de dichas imágenes intermedias del medio ($II_{j,k}$) y de un modelo de propagación de la onda de cizalladura.

10. Procedimiento según la reivindicación 8, en el que además se realiza:

- determinar una pluralidad de imágenes de deformación corregida (IE_k^*),

- determinar una pluralidad de imágenes de elasticidad corregida (IE_k^*), estando dichas imágenes de deformación corregida y dichas imágenes de elasticidad temporalmente intercaladas, y

- determinar una imagen de un parámetro de no linealidad (INL_k) a partir de la pluralidad de imágenes de deformación corregida (IE_k^*) y de la pluralidad de imágenes de elasticidad corregida (IE_k^*).

11. Procedimiento según la reivindicación 10, en el que el valor de cada píxel de la imagen de un parámetro de no linealidad (INL_k) se determina mediante regresión lineal de deformación de pares de valores, correspondiendo el primer valor de cada par al valor de un mismo píxel de una imagen de deformación corregida de la pluralidad y correspondiendo el segundo valor del par al valor de un mismo píxel de una imagen de elasticidad de la pluralidad, siendo dicha imagen de deformación corregida de la pluralidad y dicha imagen de elasticidad corregida de la pluralidad temporalmente sucesivas o cercanas, y

en el que la regresión lineal en la deformación se establece en base a la relación entre la deformación y la elasticidad siguiente:

$$\ln(E) = \ln(E_0) - \frac{A}{\frac{4}{3} \cdot E_0} \cdot \varepsilon$$

donde

E es el módulo de Young del píxel de la imagen de elasticidad corregida considerada,

E_0 es el módulo de Young del píxel de la primera imagen de elasticidad corregida,

$\ln()$ es la función logaritmo neperiano,

ε es la deformación del píxel de la imagen de deformación corregida considerada, y

A es el parámetro de no linealidad determinado para dicho píxel por dicha regresión de deformación lineal.

12. Procedimiento según la reivindicación 8, en el que además se realiza:

- determinar una secuencia temporal de imágenes de tensión parcial corregida ($I\Delta\sigma_k^*$) multiplicando la imagen de

tensión parcial corregida ($I\Delta\epsilon_k^*$) de índice k y la imagen de elasticidad corregida (IE_k^*) de índice k,

- determinar una imagen de tensión corregida ($I\sigma_k^*$) sumando las imágenes de deformación parcial corregida ($I\Delta\sigma_k^*$) de índices comprendidos entre 1 y k inclusive.

13. Procedimiento según la reivindicación 12, en el que además se realiza:

- determinar una pluralidad de imágenes de tensión corregida ($I\sigma_k^*$),

- determinar una pluralidad de imágenes de elasticidad corregida (IE_k^*), estando dichas imágenes de deformación corregida y dichas imágenes de elasticidad temporalmente intercaladas, y

- determinar una imagen de un parámetro de no linealidad (INL_k) a partir de la pluralidad de imágenes de tensión corregida ($I\sigma_k^*$) y de la pluralidad de imágenes de elasticidad corregida (IE_k^*).

14. Procedimiento según la reivindicación 13, en el que el valor de cada píxel de la imagen de un parámetro de no linealidad (INL_k) se determina por regresión lineal de tensión de pares de valores, correspondiendo el primer valor de cada par al valor de un mismo píxel de una imagen de tensión corregida de la pluralidad y correspondiendo el segundo valor del par al valor de un mismo píxel de una imagen de elasticidad corregida de la pluralidad, siendo dicha imagen de tensión corregida de la pluralidad y dicha imagen de elasticidad corregida de la pluralidad temporalmente sucesivas o cercanas, y

en el que la regresión lineal de tensión se establece en base a la relación entre la tensión y la elasticidad siguiente:

$$\ln(E) = \ln(E_0) - \frac{A}{\frac{4}{3} \cdot E_0} \cdot \epsilon$$

Donde

E es el módulo de Young del píxel de la imagen de elasticidad corregida considerada,

E_0 es el módulo de Young del píxel de la primera imagen de elasticidad corregida,

$\ln()$ es la función logaritmo neperiano,

ϵ es la deformación del píxel de la imagen de deformación corregida considerada, y

A es el parámetro de no linealidad determinado de dicho píxel por dicha regresión.

15. Dispositivo (1) de obtención de imágenes que comprende una sonda (6) ultrasonora y un microordenador (4) adaptado para implementar el procedimiento de determinación por ultrasonidos de una imagen corregida de un medio (2) según una de las reivindicaciones 1 a 14.

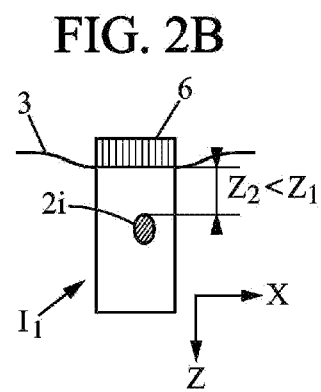
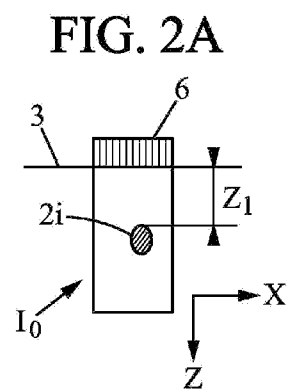
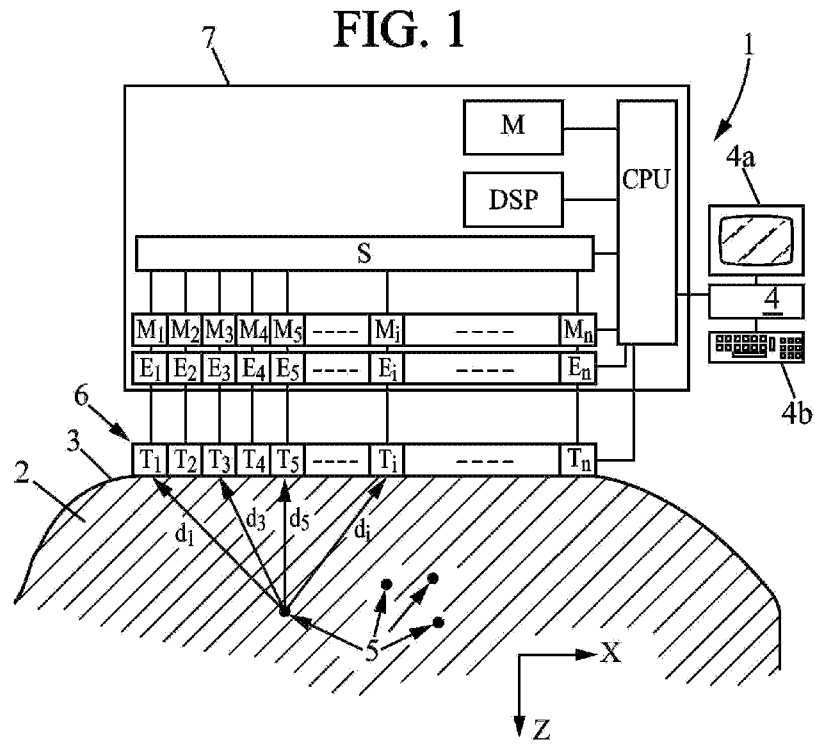


FIG. 2C

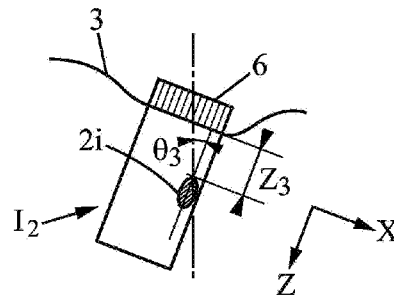


FIG. 3

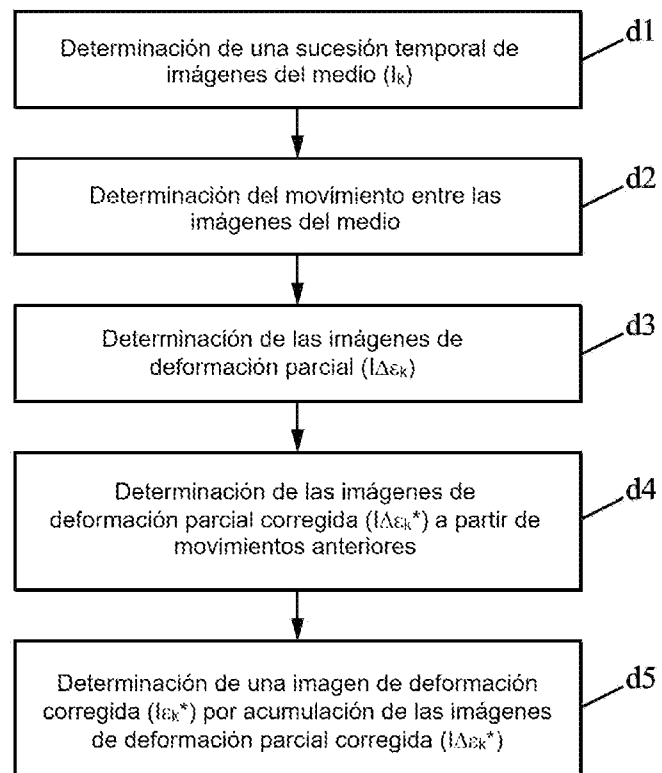


FIG. 4

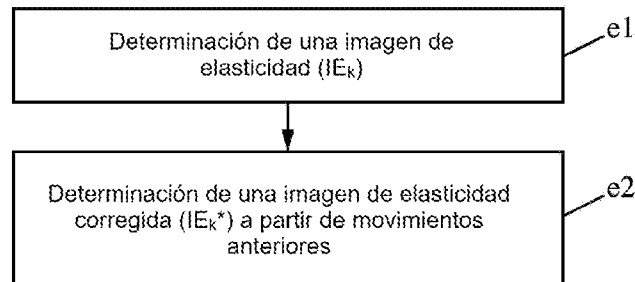


FIG. 5

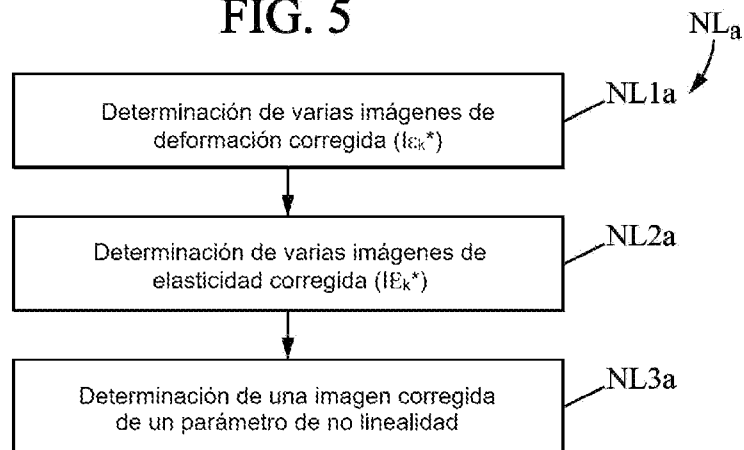


FIG. 6

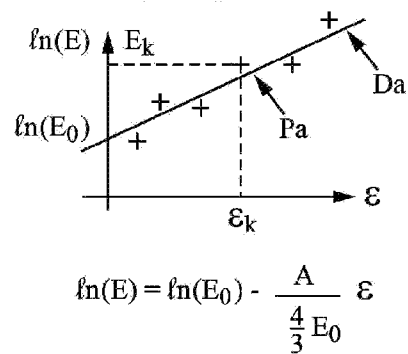


FIG. 7A

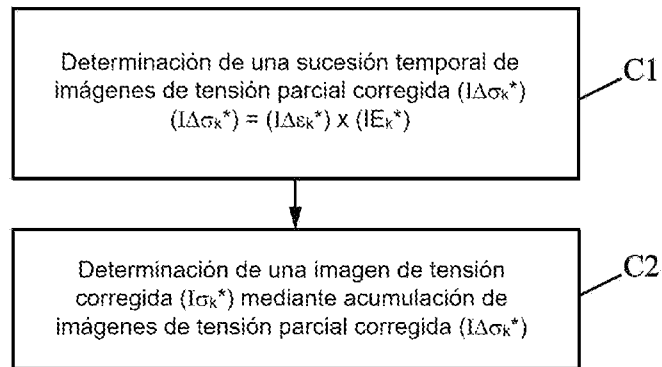


FIG. 7B

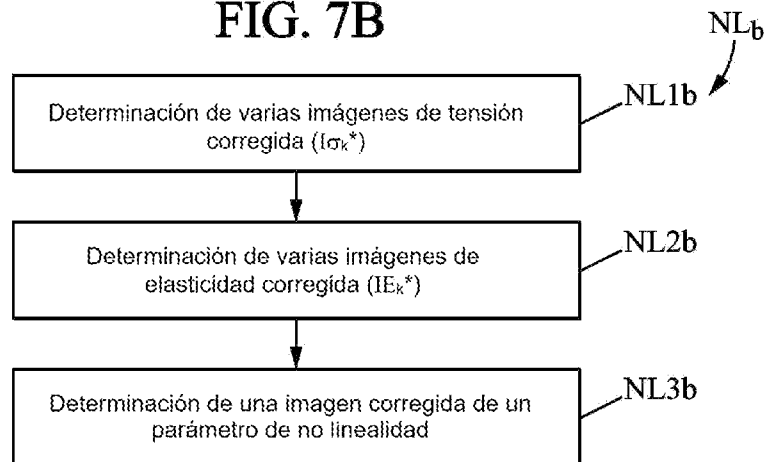


FIG. 8

