(19) OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

(11) Número de publicación: **2 923 108**

(21) Número de solicitud: 202130210

(51) Int. Cl.:

G01N 29/30 (2006.01)
G01N 29/00 (2006.01)

(12) SOLICITUD DE PATENTE A1

(22) Fecha de presentación:

10.03.2021

(43) Fecha de publicación de la solicitud:

23.09.2022

(71) Solicitantes:

CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS (CSIC) (50.0%)
C/ Serrano, 117
28006 Madrid (Madrid) ES y
TECNITEST INGENIEROS (50.0%)

(72) Inventor/es:

APARICIO SECANELLAS, Sofía;
PARRILLA ROMERO, Montserrat;
IBÁÑEZ RODRÍGUEZ, Alberto;
MARTÍNEZ GRAULLERA, Óscar;
GONZÁLEZ HERNÁNDEZ, Margarita;
ANAYA VELAYOS, José Javier;
GAUNA LEÓN, Iñaki;
ACEBES PASCUAL, Mª Montserrat;
DE MATÍAS JIMÉNEZ, Héctor y
ANDRACA GUTIÉRREZ, Alejandro

(74) Agente/Representante:

PONS ARIÑO, Ángel

(54) Título: **MÉTODO Y SISTEMA DE CALIBRACIÓN DE UN SISTEMA DE INSPECCIÓN MEDIANTE ULTRASONIDOS**

(57) Resumen:

Método y sistema para calibración de un sistema de inspección mediante ultrasonidos, que comprende un sistema de desplazamiento no cartesiano y un módulo de adquisición conectado al módulo de desplazamiento, donde el método comprende las etapas de proveer un mapa de sincronismo inicial; generar una imagen de un elemento conocido mediante ultrasonidos, haciendo uso del mapa de sincronismo inicial, realizando disparos de ondas ultrasónicas hacia el elemento, siguiendo el mapa de sincronismo inicial, y obtener una posición corregida del módulo de adquisición en cada punto y un mapa de sincronismo corregido, separando la imagen en una imagen de líneas pares y una imagen de líneas impares; añadiendo un retardo inicial a la secuencia de disparos, determinando en las imágenes N funciones sync y sus máximos, situados en la posición de los defectos, obtener la posición y el tiempo de cada defecto y obteniendo el mapa de sincronismo corregido.

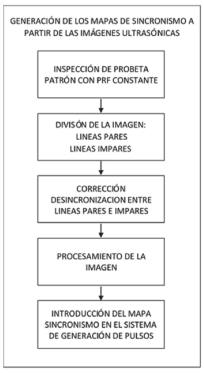

Fig. 1

ES 2 923 108 A1

DESCRIPCIÓN

MÉTODO Y SISTEMA DE CALIBRACIÓN DE UN SISTEMA DE INSPECCIÓN MEDIANTE ULTRASONIDOS

OBJETO DE LA INVENCIÓN

La presente invención se refiere a un método de calibración y a un sistema de sincronización para equipos de inspección mediante ultrasonidos basados en robots industriales no cartesianos que permite generar imágenes más precisas de los componentes inspeccionados.

Un objeto de la invención es proveer un método de calibración de un sistema de inspección mediante ultrasonidos, basado en robots industriales, para la sincronización entre los movimientos del sistema robótico y la unidad de adquisición, lo que permite activar de forma más precisa la unidad de adquisición en las posiciones de inspección preestablecidas.

Otro objeto de la invención es proveer un sistema para proporcionar las señales que sincronizan la unidad de adquisición con los movimientos del sistema robótico para mejorar la concordancia espacial entre la imagen ultrasónica y el componente sometido a inspección. Estas señales se generan a partir de una adquisición de referencia obtenida por el propio sistema.

ANTECEDENTES DE LA INVENCIÓN

Las técnicas de inspección no destructiva son de gran relevancia en la industria. Además del uso como soporte en la fabricación de componentes, son parte fundamental de los procedimientos de mantenimiento para mejorar el desempeño y alargar la vida útil de máquinas y estructuras. Por ejemplo, en el sector aeroespacial, que cuenta con un claro incentivo por los desarrollos tecnológicos que impactan muy beneficiosamente en las capacidades de diseño en otros sectores, los métodos de inspección no destructiva son relevantes para la utilización de nuevos materiales y diseños. De entre estos métodos, el examen por ultrasonidos es uno de los más adecuados para realizar inspecciones de componentes construidos con materiales compuestos y más fácilmente automatizable utilizando sistemas robotizados.

En la inspección por ultrasonidos automatizada, para obtener una imagen ultrasónica, es necesario que el transductor ultrasónico empleado se sitúe en cada una de las posiciones donde se quiere realizar una emisión ultrasónica. La información adquirida en cada una de las posiciones convenientemente ordenada forma la imagen ultrasónica de la pieza inspeccionada.

Sin embargo, con el fin de aumentar la velocidad de la inspección, el robot no se detiene en cada punto donde se quiere obtener una señal ultrasónica sino que realiza barridos, siguiendo trayectorias que pasan por estos puntos, a la máxima velocidad que permite la mecánica y la emisión-recepción ultrasónica, lo que puede suponer cierta indeterminación en la posición donde se realiza la inspección.

Hay que tener en cuenta que para poder generar correctamente la imagen ultrasónica de la pieza inspeccionada es esencial que el sistema robotizado que ejecuta la inspección tenga información precisa (típicamente inferior a 0,1mm) de la localización de los transductores sobre el componente en el momento de adquirir datos del mismo.

En los robots cartesianos, usuales en la inspección ultrasónica, las coordenadas de posición de los transductores en el espacio están relacionadas linealmente con el giro del motor que controla el movimiento de cada uno de los ejes cartesianos y es accesible desde el sistema de control de motores, por lo que la determinación de la posición del transductor es directamente derivable.

Sin embargo, en los robots industriales, que generalmente no son cartesianos, esta relación es mucho más compleja y, además, está oculta al usuario, que solo tiene control sobre la trayectoria del transductor pero desconoce el instante preciso en el que el sistema pasa por cada punto de la pieza que se quiere inspeccionar.

En la actualidad existen robots industriales comerciales que tienen la precisión, velocidad y repetitividad en sus movimientos que los hacen adecuados para su utilización en numerosas inspecciones no destructivas.

Sin embargo, al ser sistemas cerrados, no es posible sincronizar adecuadamente el movimiento del transductor con la adquisición de los datos ultrasónicos, dificultando la generación de imágenes ultrasónicas de calidad suficiente para evaluar el estado del componente inspeccionado.

El estado del arte identifica varios tipos de soluciones para este problema:

El planteamiento más extendido se centra en la correcta determinación de la posición, en cada instante, del transductor. Para ello hacen uso de un elemento que determina la posición y orientación del transductor, en relación con el objeto que se pretende inspeccionar, que puede ser un acelerómetro, un compás, un lector de infrarrojos, un nivel, o un GPS.

Otras soluciones describen un método de auto calibración de un instrumento para la inspección no destructiva. Para ello, se determina un conjunto de coordenadas del objeto a inspeccionar, por ejemplo, datos de una herramienta de diseño informático que permitan generar un modelo 3-D del objeto a inspeccionar, y determinar una posición objetivo sobre la superficie del objeto. Seguidamente, se almacena un archivo de calibración con los datos de coordenadas del objeto, se calibra el instrumento para la inspección con el archivo de calibración y después se inspecciona la posición objetivo del objeto mediante el instrumento calibrado.

Otros enfoques describen sistemas para la generación de imágenes mediante ultrasonidos que comprenden un transductor para enviar y recibir ondas ultrasónicas y convertirlas en una señal eléctrica. Estos sistemas pueden incluir sensores de posición en el transductor, para conocer la posición del transductor durante su operación. Se procesan las señales eléctricas generadas y se crea una imagen. El sensor de posición comprende una unidad para adquirir imágenes ópticas de la superficie del área objetivo durante la operación, y a partir de ellas obtener la posición del transductor con respecto al área objetivo.

Por último, otras soluciones permiten almacenar datos generados por un transductor ultrasónico y datos de posición del transductor. En este caso, los datos son convertidos a un formato de video mediante unidades de interfaz y grabados en una cinta magnética de un grabador de video. Los datos de posición del transductor son obtenidos mediante un encoder, que determina la posición y genera señales de pulsos para ser almacenadas.

Como se aprecia, los sistemas y métodos del estado del arte se centran en la determinación de la posición del transductor a través de sensores de posición y encoders. Más recientemente, se ha empezado a hacer uso de imágenes ópticas para la determinación de la posición del transductor. Pero no se ha obtenido un método y un sistema que permitan la correcta determinación de la posición del transductor de forma sencilla, económica y precisa.

DESCRIPCIÓN DE LA INVENCIÓN

La invención se refiere a un método de calibración para un sistema automatizado de inspección mediante ultrasonidos. El sistema de inspección que se pretende calibrar comprende un módulo de desplazamiento, el cual en este caso es no cartesiano, y un módulo de adquisición incorporado al módulo de desplazamiento. De modo que, el módulo de desplazamiento describe trayectorias que colocan el módulo de adquisición en las posiciones deseadas con respecto al elemento a inspeccionar y el módulo de adquisición realiza, en esas posiciones, una serie de disparos de ondas ultrasónicas que permiten formar una imagen ultrasónica del elemento a inspeccionar.

El módulo de adquisición de la invención puede comprender al menos un transductor, mientras que el módulo de desplazamiento puede consistir en un robot desplazador.

El método de la invención pretende calibrar de forma económica, precisa y eficiente las trayectorias seguidas por el módulo de desplazamiento, con el fin de sincronizar de forma precisa el disparo de cada onda ultrasónica con el movimiento del módulo de desplazamiento. Esto permite obtener imágenes ultrasónicas de mejor calidad. En el método de la invención no se actúa sobre la programación del robot, sino que se va a establecer la sincronización de cualquier robot industrial con cualquier sistema de generación de imágenes ultrasónicas, mediante el módulo de sincronización de la invención. La ventaja tecnológica de este método es que permite a las empresas especializadas en inspección no destructiva (NDT) no depender de un robot y un sistema de adquisición ultrasónico determinados, sino que pueden escoger el conjunto que más se adecúe a sus necesidades.

El método de la invención se basa en utilizar la información recopilada por el propio módulo de adquisición para determinar de forma precisa la posición, en cada instante, de dicho módulo de adquisición mientras el módulo de desplazamiento describe las trayectorias de que se compone el barrido de la pieza a inspeccionar.

El método de la invención comprende una etapa de proveer un mapa de sincronismo inicial. Un mapa de sincronismo es una lista de valores del tiempo transcurrido desde que el sistema de desplazamiento inicia una trayectoria. Cada valor corresponde a un instante en el que se emite una onda ultrasónica desde el módulo de adquisición. El mapa de sincronismo inicial se genera, por ejemplo, relacionando la trayectoria descrita por el módulo de desplazamiento con

el tiempo total empleado para realizarla. Los instantes de tiempo donde el módulo de adquisición genera una onda ultrasónica serán temporalmente precisos, pero como la velocidad en cada punto de la trayectoria que realiza el módulo de desplazamiento no se conoce con precisión, las posiciones en las que efectivamente se realizan las emisiones de ultrasonidos no se corresponden con las posiciones en las que se desea realizar la emisión.

A partir del mapa de sincronismo inicial, se genera una imagen de un elemento patrón conocido. El elemento patrón es geométricamente idéntico a la pieza a inspeccionar y debe incorporar un conjunto de elementos que generen discontinuidades en las imágenes ultrasónicas detectables, y cuya separación ha de ser conocida. La proyección de esta información al plano de inspección que genera el módulo de desplazamiento se denominará imagen real de la pieza. La inspección mediante ultrasonidos del elemento patrón se realiza mediante el mapa de sincronismo inicial, que consistirá normalmente en una frecuencia de repetición de pulsos (PRF) constante de duración mayor o igual al tiempo total del desplazamiento.

La generación de una imagen comprende los pasos de desplazar el módulo de adquisición, por medio del módulo de desplazamiento, a una distancia determinada del elemento. Entonces, se realizan disparos de ondas ultrasónicas hacia el elemento, con el mapa de sincronismo inicial. El pulso ultrasónico atraviesa el material de la probeta patrón y con la señal recibida en el módulo de adquisición se genera una imagen. Esta imagen dependerá del tipo de inspección ultrasónica que se esté realizando, puede ser información de amplitud, de tiempo de vuelo, de velocidad, de distancia o de cualquier parámetro que se pueda extraer de la señal ultrasónica recibida. En definitiva, se genera una imagen de alguna característica ultrasónica de la probeta patrón, pero está imagen será imprecisa o estará deformada debido al conocimiento impreciso de la posición del módulo de adquisición en cada instante. Preferiblemente, esta etapa se lleva a cabo en un medio acuoso si la inspección se basa en utilizar acoplamiento líquido.

El método de la invención, a continuación, comprende una etapa de identificar las discontinuidades conocidas en la imagen del patrón y asociar instantes de tiempo de la trayectoria con posiciones reales del módulo de adquisición sobre la pieza. A partir de esta asociación se genera un mapa de sincronismo corregido. Para ello, haciendo uso de un proceso de deconvolución, se reevalúa la posición del módulo de adquisición en cada punto a partir de la imagen real del elemento conocido y la imagen deformada.

La obtención de la posición corregida del módulo de adquisición comprende los pasos de:

1) separar la imagen generada en una imagen de líneas pares y una imagen de líneas impares, es decir, líneas generadas en una dirección de movimiento y líneas generadas en la dirección opuesta para sincronizarlas. Habitualmente, en la imagen ultrasónica obtenida mediante barrido mecánico se forma un efecto que se denomina "peine" debido a una desincronización entre dos barridos consecutivos en direcciones contrarias. Esta desincronización se genera por el retardo que existe desde que se manda la orden de inicio de movimiento del robot hasta que se empieza a capturar la imagen ultrasónica de la probeta;
2) añadir un retardo inicial a la secuencia de disparos calculado mediante la fórmula:

$$ret = \frac{1}{PRF} * \frac{\Delta k_d}{2}$$

donde $\frac{1}{PRF}$ es el periodo de repetición de impulsos y Δk_d es el número de píxeles que separan una misma discontinuidad en las imágenes de las líneas pares e impares para sincronizar las dos direcciones de barrido del robot;
3) preferiblemente, eliminar píxeles fuera de rango, por medio de un filtrado paso bajo, promediando el valor de varios pixeles o con filtros no lineales;
4) determinar N funciones sync con los máximos situados en la posición de los defectos, aplicando una deconvolución con un filtro inverso línea a línea con la siguiente expresión:

$$\tilde{h}(n) = i(n) * fi_x(n)$$

siendo $\tilde{h}(n)$, una función de la posición de los defectos en la imagen que se corresponde con la posición del transductor que idealmente tiene la siguiente expresión:

$$h(n) = \sum_{1}^{N} \delta(n - k_N)$$

siendo δ la función Delta de Dirac, N el número de discontinuidades en la línea y k_N la posición de esa discontinuidad; $fi_x(n)$ un filtro inverso de $x(n)$, que se calcula a partir de la transformada inversa de Fourier del inverso de la función $x(n)$, siendo $x(n)$ la imagen de una discontinuidad singular, y siendo $i(n)$ la imagen que corresponde a una línea i de n píxeles;
5) detectar el máximo en cada una de las N funciones sync determinadas, preferiblemente mediante un detector de máximos relativos;

6) obtener la posición y el tiempo de cada defecto a partir de la posición en píxeles del máximo detectado, mediante la expresión:

$$T_N = \frac{1}{PRF} * k_N$$

siendo k_N la posición en píxeles de un máximo N y PRF la frecuencia de repetición de pulsos; y

7) obtener el mapa de sincronismo a partir de una interpolación cúbica $T_N = f_L(X_N)$ de la posición real X_N y el tiempo T_N de cada defecto obtenidos para cada una de las líneas de la imagen, obteniendo la siguiente expresión:

$$S(L,k) = f_L(k\Delta x)$$

siendo $S(L,k)$ el mapa de sincronismo para cada uno de los pixeles k de una imagen ultrasónica de L líneas, Δx la resolución espacial de la imagen real, y k el número de pixel de la imagen ultrasónica.

El método de la invención puede además comprender una etapa de generación de una imagen mejorada, que consiste en realizar disparos de ondas ultrasónicas hacia el elemento, de acuerdo con el mapa de sincronismo corregido. La información ultrasónica de la señal adquirida en cada uno de los disparos se asocia a la posición conocida del módulo de adquisición en cada punto proporcionada por el mapa de sincronismo corregido generando la imagen mejorada.

La invención también se refiere a un sistema para calibración de un sistema de inspección mediante ultrasonidos. Como se ha explicado antes, el sistema de inspección mediante ultrasonidos comprende un módulo de desplazamiento no cartesiano y un módulo de adquisición conectado al módulo de desplazamiento. Así, el módulo de desplazamiento permite el movimiento controlado del módulo de adquisición.

El sistema para calibración de la invención comprende un subsistema de sincronización y un subsistema de generación de mapas de sincronismo.

El subsistema de sincronización está conectado con el módulo de desplazamiento y el módulo de adquisición. De tal forma que está configurado para sincronizar el movimiento del módulo de desplazamiento y el disparo del módulo de adquisición, en base a un mapa de sincronismo.

Por su parte, el subsistema de generación de mapas de sincronismo está conectado al módulo de adquisición y se ha configurado para procesar una imagen obtenida por el módulo de

adquisición de un elemento conocido y una imagen real de dicho elemento. Por medio del método de la invención descrito, el susbsistema de generación de mapas de sincronismo determina la posición y el movimiento del módulo de adquisición durante la inspección.

La invención también se refiere a un programa de ordenador adaptado para llevar a cabo las etapas del método de la invención y un medio de almacenamiento legible mediante ordenador que comprende el programa de ordenador de la invención.

DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

Para complementar la descripción que se está realizando y con objeto de ayudar a una mejor comprensión de las características de la invención, de acuerdo con un ejemplo preferente de realización práctica de la misma, se acompaña como parte integrante de dicha descripción, un juego de dibujos en donde con carácter ilustrativo y no limitativo, se ha representado lo siguiente:

Figura 1.- Muestra un diagrama de bloques que explica los pasos en la generación de mapas de sincronismo a partir de imágenes ultrasónicas.

Figura 2.- Muestra un diagrama de bloques que representa los pasos de procesamiento de una imagen ultrasónica para generar un mapa de sincronismo.

Figura 3.- Muestra la imagen obtenida de una inspección del elemento patrón a PRF constante y la separación entre líneas pares e impares.

Figura 4.- Muestra un detalle de la desincronización entre líneas pares e impares.

Figura 5.- Muestra un conjunto de funciones que relacionan el error en la determinación de la posición de un transductor en función de la separación entre discontinuidades del elemento patrón y en función de la aceleración del módulo de desplazamiento.

Figura 6.- Muestra un esquema de una pieza troncocónica que se va a utilizar para demostrar el método de la inspección.

Figura 7.- Muestra el efecto del filtrado de una imagen ultrasónica mediante un filtro de mediana de la pieza tronco-cónica de la figura 6, siendo la figura 7A la imagen sin filtrar y la figura 7B la imagen filtrada.

Figura 8.- Muestra la detección de la posición de las discontinuidades en una línea par (figura 8A) y una línea impar (figura 8B) de la imagen ultrasónica.

Figura 9.- Muestra un mapa de sincronismo generado para una de las líneas pares y otra impar.

Figura 10.- Muestra la velocidad del transductor en función de su posición en líneas impares (figura 10A) y líneas pares (figura 10B).

Figura 11.- Muestra una imagen ultrasónica de la misma pieza inspeccionada en la figura 7 una vez aplicado el método de la invención.

REALIZACIÓN PREFERENTE DE LA INVENCIÓN

La invención se refiere a un método de calibración de un sistema de inspección mediante ultrasonidos, donde el sistema de inspección mediante ultrasonidos comprende un módulo de desplazamiento no cartesiano y un módulo de adquisición conectado al módulo de desplazamiento. En una realización preferente de la invención, el módulo de adquisición comprende un transductor y el módulo de desplazamiento es un robot desplazador.

El método de la invención, en una realización preferente, comprende las etapas de:

a) calibración previa, que comprende:
    - determinar el tiempo total que dura la trayectoria real del transductor para cada una de las líneas de barrido durante la inspección de un elemento;
    - evaluar la repetitividad de los movimientos que realiza el robot desplazador; y
    - generar un mapa de sincronismo inicial, es decir, determinar un sincronismo de disparo en cada uno de los puntos que se corresponderán con cada pixel de imagen, en función de la posición del transductor en cada momento, durante cada una de sus trayectorias en la inspección.

b) generación de una imagen: inspeccionando mediante ultrasonidos un elemento patrón conocido, que comprende un conjunto de defectos detectables, mediante el mapa de sincronismo inicial, a una frecuencia de repetición de pulsos (PRF) constante, y donde la separación entre defectos del elemento patrón es conocida,

c) obtención de una posición corregida del transductor en cada punto y generación de un mapa de sincronismo corregido, mediante un proceso de deconvolución a partir de la

información de la imagen real del elemento conocido, los datos tomados en la generación de imagen y la imagen generada,

d) generación de una imagen mejorada que represente la información de un parámetro ultrasónico asociado al elemento inspeccionado, amplitud, tiempo de vuelo, velocidad, distancia o de cualquier parámetro que se pueda extraer de la emisión ultrasónica realizada mediante disparos de ondas ultrasónicas hacia el elemento, de acuerdo con el mapa de sincronismo corregido, y utilizando la posición conocida del transductor en cada punto.

La generación de imágenes, en los pasos b) y d) de la invención comprende los pasos de:

- desplazar el transductor, por medio del robot desplazador, a una distancia indeterminada del elemento,
- realizar disparos de ondas ultrasónicas hacia el elemento, de acuerdo con el mapa de sincronismo inicial, generando una señal de regreso,
- generar una imagen de al menos una de las características ultrasónicas del elemento a partir de la posición conocida del transductor en cada punto.

El elemento patrón conocido debe comprender defectos que generen discontinuidades en la imagen ultrasónica fáciles de detectar, preferiblemente mediante procesamiento automático de detección de defectos o mediante inspección visual. En el ejemplo mostrado en las figuras se ha usado una probeta patrón de plástico con 47 ranuras de 3 mm de ancho separadas 10 mm entre sus centros.

En los sistemas de inspección se puede considerar una aceleración uniforme en la inspección por lo que, en este caso, se necesitan tres defectos en las zonas de aceleración para reducir al mínimo el error en la determinación de la posición del módulo de adquisición, realizando un ajuste mediante una función cúbica. Si no se dispone de esta información, se pueden realizar ajustes lineales que harán que el error de posición dependa del valor de aceleración, como se muestra en la figura 2.

La etapa de generar una imagen del elemento patrón y evaluar una posición corregida del módulo de adquisición en cada punto, se esquematiza en la figura 1. La obtención de la posición corregida del módulo de adquisición comprende los pasos de:

1) separar la imagen generada en una imagen de líneas pares y una imagen de líneas impares, es decir, líneas generadas en una dirección de movimiento y líneas generadas en la dirección opuesta;

2) añadir un retardo inicial a la secuencia de disparos calculado mediante la fórmula:

$$ret = \frac{1}{PRF} * \frac{\Delta k_d}{2}$$

donde $\frac{1}{PRF}$ es el periodo de repetición de impulsos y Δk_d es el número de píxeles que separan una misma discontinuidad en las imágenes de las líneas pares e impares;

3) eliminar píxeles fuera de rango, por medio de un filtrado paso bajo, promediando varias líneas o con filtros no lineales;

4) determinar N funciones sync con los máximos situados en la posición de los defectos, aplicando una convolución con un filtro inverso línea a línea con la siguiente expresión:

$$\tilde{h}(n) = i(n) * fi_x(n)$$

siendo $\tilde{h}(n)$, una función de la posición de los defectos en la imagen que se corresponde con la posición del transductor que idealmente tiene la siguiente expresión:

$$h(n) = \sum_{1}^{N} \delta(n - k_N)$$

siendo δ la función Delta de Dirac, N el número de discontinuidades en la línea y k_N la posición de esa discontinuidad; $fi_x(n)$ un filtro inverso de $x(n)$, que se calcula a partir de la transformada inversa de Fourier del inverso de la función $x(n)$, siendo $x(n)$ la imagen de una discontinuidad singular, y siendo $i(n)$ La imagen que corresponde a una línea i de n píxeles;

5) detectar el máximo en cada una de las N funciones sync determinadas;

6) obtener la posición y el tiempo de cada defecto a partir de la posición en píxeles del máximo detectado, mediante la expresión:

$$T_N = \frac{1}{PRF} * k_N$$

siendo k_N la posición en píxeles de un máximo N y PRF la frecuencia de repetición de pulsos; y

7) obtener el mapa de sincronismo a partir de una interpolación cúbica $T_N = f_L(X_N)$ de la posición en la imagen real del defecto, X_N, y el tiempo T_N de cada defecto obtenidos para cada una de las líneas de la imagen, obteniéndose la siguiente expresión:

$$S(L, k) = f_L(k\Delta x)$$

siendo $S(L, k)$ el mapa de sincronismo para cada uno de los pixeles k de una imagen ultrasónica de L líneas, Δx la resolución espacial de la imagen real, y k el número de pixel de la imagen ultrasónica.

El paso 1) relativo a la separación en líneas pares e impares de la imagen, se refiere a la separación entre líneas generadas en una dirección de movimiento y líneas generadas en la dirección opuesta. Cuando se obtienen imágenes ultrasónicas, se realizan barridos lineales repetitivos a lo largo de las piezas a inspeccionar. Con cada barrido se obtiene tantas líneas como posiciones de transductores comprenda el módulo de adquisición, en este ejemplo 1. A continuación, se mueve perpendicularmente el módulo de adquisición en un desplazamiento equivalente al número de líneas adquiridas, y se vuelve a realizar un barrido lineal invirtiendo la dirección del movimiento.

Una vez realizada la inspección de la probeta, se observará en la imagen un efecto que se denomina “peine”, el cual se muestra en las figuras 3 y 4, que es debido a una desincronización entre dos barridos consecutivos con direcciones contrarias, que corresponde a las líneas pares e impares. Esta desincronización se genera por el retardo que existe desde que se manda la orden de inicio movimiento del robot hasta que se empieza a capturar la imagen ultrasónica de la probeta. El método para corregir este efecto se basa en dividir la imagen obtenida en dos imágenes, una formada por los barridos o líneas impares y otra por los pares, como se muestra en la figura 3.

El paso 2) se refiere a la corrección del efecto anteriormente descrito mediante la adición de un retardo inicial. Para calcular este retardo se eligen dos zonas equivalentes de la probeta y se obtiene el desplazamiento entre ambas. En el ejemplo, el desplazamiento de las líneas centrales es de 48 píxeles. Teniendo en cuenta que para la obtención de la imagen se ha utilizado un periodo de repetición de impulsos de 25 ms (PRF=40 Hz), el retardo inicial a aplicar a las líneas pares e impares es de 24*25 ms= 600 ms.
Los pasos 3 a 7 se refieren al procesamiento de la imagen ultrasónica para determinar el mapa de sincronismo corregido, que se esquematiza en la figura 2, el cual se realizará utilizando las imágenes de líneas pares e impares por separado, ya que en general la cinemática de ida y vuelta no es necesariamente la misma.

En el paso 3) se eliminan píxeles fuera de rango. Estos píxeles se corresponden con medidas que son erróneas por distintos motivos, los más habituales son las gotas que se producen cuando se realizan inspecciones mediante acoplamiento con chorros de agua y los ruidos electromagnéticos impulsivos, que suelen ser frecuentes en ambientes industriales. Estos valores erróneos pueden generar grandes errores en la detección de los defectos. Las técnicas habituales para eliminar estos ruidos, se basan en la redundancia de la información de las imágenes, bien mediante un filtrado paso bajo, promediando la información de varios

pixeles consecutivos o en la utilización de filtros no lineales como el filtro de mediana, que se muestra en la figura 7. Para que estos procedimientos se puedan llevar a cabo, es necesario que la discontinuidad a detectar ocupe un número suficiente de pixeles.

En el paso 5) se detecta el máximo de las N funciones sync, como se muestra en la figura 8. Este máximo se puede detectar automáticamente con un detector de máximo relativos, pero también lo puede realizar manualmente un operador si el número de líneas no es muy elevado

En la figura 9 se muestran las curvas de sincronismo generadas para una línea par (línea 64) y otra impar (línea 65) del ejemplo teniendo como origen de coordenadas la posición y tiempo del primer defecto de la probeta. El mapa de sincronismo estará formado por el conjunto de todas las curvas de sincronismo.

A partir de esta función se pueden calcular diferentes parámetros de movimiento de la inspección como por ejemplo la velocidad, tal como aparece en las figuras 10A y 10B, y comprobar, por ejemplo, que el movimiento del robot es adecuado a la inspección a realizar.

En el ejemplo utilizado se puede observar unas pequeñas oscilaciones cuando el robot va a velocidad máxima. Estas oscilaciones si fueran mayores podrían deteriorar la imagen obtenida, pero se puede comprobar que son inferiores al 5% de la velocidad máxima, por tanto daría un error del 5% de la posición de ese píxel con respecto al anterior, lo cual es completamente despreciable ya que la digitalización de la imagen ultrasónica permite una precisión de un pixel.

Al hacer uso del mapa de sincronismo obtenido, se puede realizar la inspección tal como aparece en la figura 11. La figura 6 muestra un esquema de la pieza a inspeccionar, mientras que la figura 11 muestra una imagen ultrasónica de la pieza inspeccionada generada mediante el método descrito. Se puede comprobar la gran mejora en la imagen obtenida si se compara con la imagen inicial (figuras 7A y 7B), cuando no se conocía con precisión la posición de los transductores.

La invención también presenta un sistema para calibración del sistema de inspección mediante ultrasonidos descrito.

El sistema para calibración de la invención comprende:

- un subsistema de sincronización, conectado con el robot desplazador y el transductor, configurado para sincronizar el movimiento del robot y el disparo del transductor, en base a un mapa de sincronismo; y
- un subsistema de generación de mapas de sincronismo, conectado al transductor, y configurado para procesar una imagen de un elemento conocido, obtenida por dicho transductor, y una imagen de dicho elemento con el fin de determinar la posición y el movimiento del transductor durante la inspección haciendo uso de un algoritmo de reconstrucción tomográfica ultrasónica que se basa en un método de deconvolución como el descrito.

REIVINDICACIONES

1. Método de calibración de un sistema automático de inspección mediante ultrasonidos, que comprende un módulo de desplazamiento no cartesiano y un módulo de adquisición incorporado al módulo de desplazamiento, donde el método comprende las etapas de:
   - componer un mapa de sincronismo inicial;
   - generar una imagen ultrasónica de un elemento patrón conocido que genere discontinuidades detectables en la imagen con una separación entre ellas conocida a frecuencia de repetición de pulsos (PRF) constante haciendo uso del mapa de sincronismo inicial, que comprende los pasos de:
     - desplazar el módulo de adquisición, por medio del módulo de desplazamiento, a una distancia indeterminada del elemento, pasando por todas las zonas del elemento donde la velocidad de inspección no sea constante,
     - realizar disparos de ondas ultrasónicas hacia el elemento, en base al mapa de sincronismo inicial, que al interaccionar con el elemento generan una señal ultrasónica que es recibida en el módulo de adquisición,
     - generar una imagen del elemento, a partir de la información que contiene la señal ultrasónica recibida y la posición no precisa del módulo de adquisición en cada punto.
   - obtener una posición corregida del módulo de adquisición en cada punto y de un mapa de sincronismo corregido, comprendiendo los pasos de:
     - separar la imagen generada en una imagen de líneas pares y una imagen de líneas impares, es decir, líneas generadas en una dirección de movimiento y líneas generadas en la dirección opuesta;
     - añadir un retardo inicial a la secuencia de disparos calculado mediante la fórmula:

$$ret = \frac{1}{PRF} * \frac{\Delta k_d}{2}$$

       donde $\frac{1}{PRF}$ es el periodo de repetición de impulsos y Δk_d es el número de píxeles que separan una misma discontinuidad en las imágenes de las líneas pares e impares;
     - determinar, en las imágenes de líneas pares e impares, N funciones sync con los máximos situados en la posición de los defectos, aplicando una convolución con un filtro inverso línea a línea con la siguiente expresión:

$$\tilde{h}(n) = i(n) * fi_x(n)$$

siendo $\tilde{h}(n)$, una función de la posición de los defectos en la imagen que se corresponde con la posición del transductor que tiene la siguiente expresión:

$$h(n) = \sum_{1}^{N} \delta(n - k_N)$$

siendo δ la función Delta de Dirac, N el número de discontinuidades en la línea y k_N la posición de esa discontinuidad; $fi_x(n)$ un filtro inverso de $x(n)$, que se calcula a partir de la transformada inversa de Fourier del inverso de la función $x(n)$, siendo $x(n)$ la imagen de una discontinuidad singular, y siendo $i(n)$ la imagen que corresponde a una línea i de n píxeles;

- detectar el máximo en cada una de las N funciones sync determinadas;
- obtener la posición y el tiempo de cada defecto N a partir de la posición en píxeles del máximo detectado, mediante la expresión:

$$T_N = \frac{1}{PRF} * k_N$$

  siendo $\mathrm{k_N}$ la posición en píxeles de un máximo N y PRF la frecuencia de repetición de pulsos; y
- obtener el mapa de sincronismo corregido a partir de una interpolación cúbica $T_N = f_L(X_N)$ de la posición real X_N y el tiempo T_N de cada defecto obtenidos para cada una de las líneas de la imagen, obteniendo la siguiente expresión:

$$S(L, k) = f_L(k\Delta x)$$

  siendo $S(L, k)$ el mapa de sincronismo para cada uno de los pixeles k de una imagen ultrasónica de L líneas, Δx la resolución espacial de la imagen real, y k el número de pixel de la imagen ultrasónica.

2. Método de acuerdo con la reivindicación 1, que además comprende una etapa de eliminar píxeles fuera de rango, por medio de un filtrado paso bajo, promediando varios pixeles o con filtros no lineales, previa a la determinación de N funciones sync.

3. Método de acuerdo con la reivindicación 1, donde la etapa de detectar el máximo en cada una de las N funciones sync determinadas se lleva a cabo mediante un detector de máximos relativos.

4. Método de acuerdo con la reivindicación 1, que además comprende una etapa de generación de una imagen mejorada, que consiste en realizar disparos de ondas ultrasónicas hacia el elemento, de acuerdo con el mapa de sincronismo corregido. Así, la información ultrasónica de la señal adquirida en cada uno de los disparos se asocia a la posición conocida del módulo de adquisición en cada punto proporcionada por el mapa de sincronismo corregido generando la imagen mejorada.

5. Método de acuerdo con la reivindicación 1, donde el módulo de adquisición comprende al menos un transductor.

6. Método de acuerdo con la reivindicación 1, donde el módulo de desplazamiento es un robot desplazador.

7. Método de acuerdo con la reivindicación 1, donde la etapa de generación de imagen se lleva a cabo en un medio acuoso si la inspección se basa en el acoplamiento líquido.

8. Sistema para calibración de un sistema de inspección mediante ultrasonidos, que comprende un módulo de desplazamiento no cartesiano y un módulo de adquisición conectado al módulo de desplazamiento, que comprende:

   - un subsistema de sincronización, conectado con el módulo de desplazamiento y el módulo de adquisición, configurado para sincronizar el movimiento del módulo de desplazamiento y el disparo del módulo de adquisición, en base a un mapa de sincronismo; y
   - un subsistema de generación de mapas de sincronismo, conectado al módulo de adquisición, configurado para procesar una imagen obtenida por el módulo de adquisición de un elemento conocido y una imagen real de dicho elemento y determinar la posición y el movimiento del módulo de adquisición durante la inspección por medio de un método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 8.

9. Programa de ordenador adaptado para llevar a cabo las etapas del método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 8.

10. Un medio de almacenamiento legible mediante ordenador que comprende el programa de ordenador de la reivindicación 9.

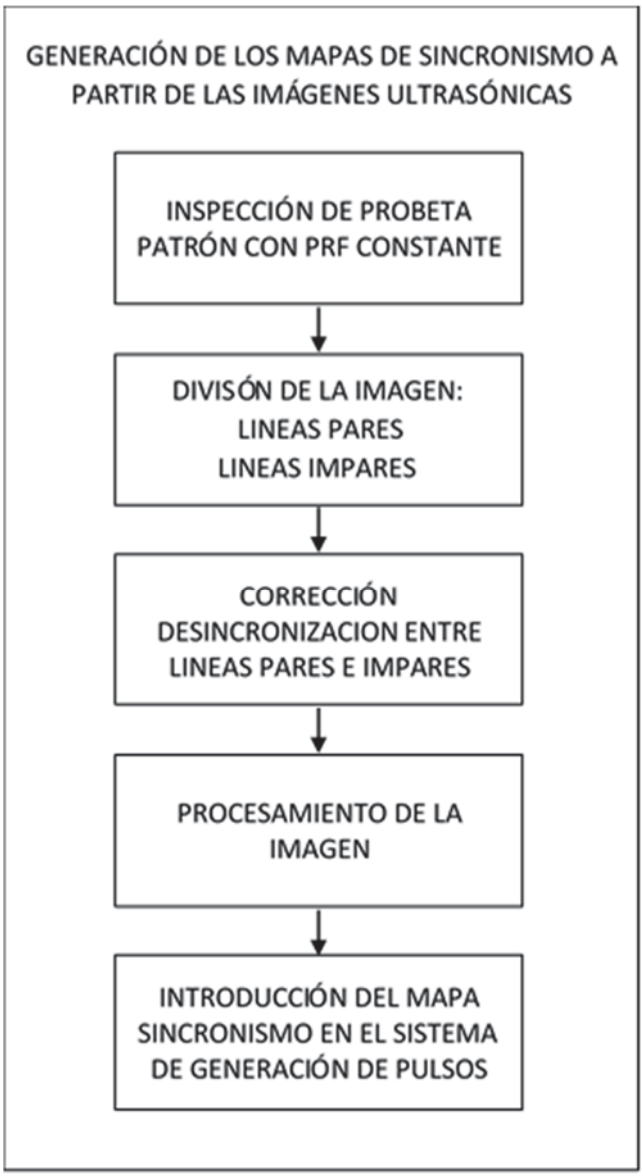
GENERACIÓN DE LOS MAPAS DE SINCRONISMO A PARTIR DE LAS IMÁGENES ULTRASÓNICAS
INSPECCIÓN DE PROBETA PATRÓN CON PRF CONSTANTE
DIVISÓN DE LA IMAGEN: LINEAS PARES LINEAS IMPARES
CORRECCIÓN DESINCRONIZACION ENTRE LINEAS PARES E IMPARES
PROCESAMIENTO DE LA IMAGEN
INTRODUCCIÓN DEL MAPA SINCRONISMO EN EL SISTEMA DE GENERACIÓN DE PULSOS

Fig. 1

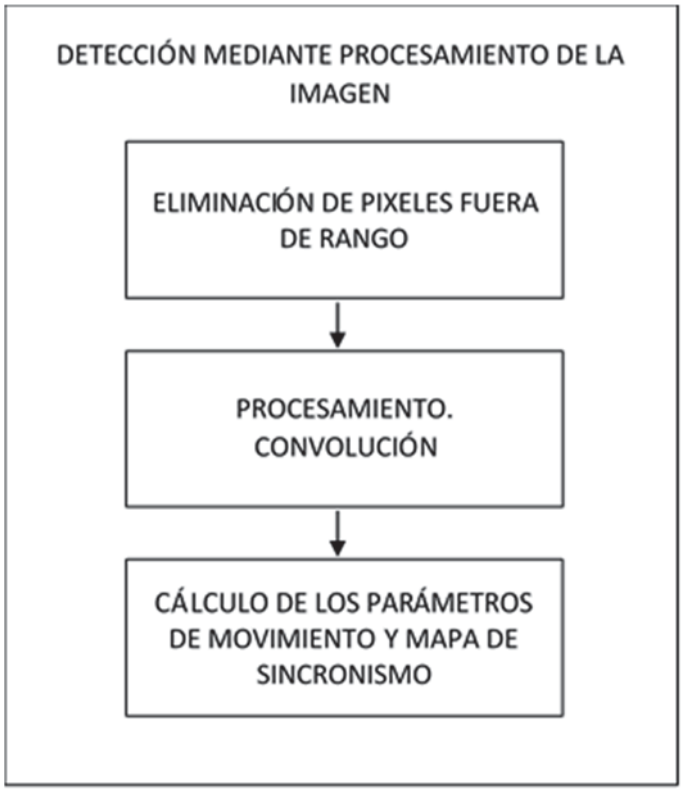
DETECCIÓN MEDIANTE PROCESAMIENTO DE LA IMAGEN
ELIMINACIÓN DE PIXELES FUERA DE RANGO
PROCESAMIENTO. CONVOLUCIÓN
CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS DE MOVIMIENTO Y MAPA DE SINCRONISMO

Fig. 2

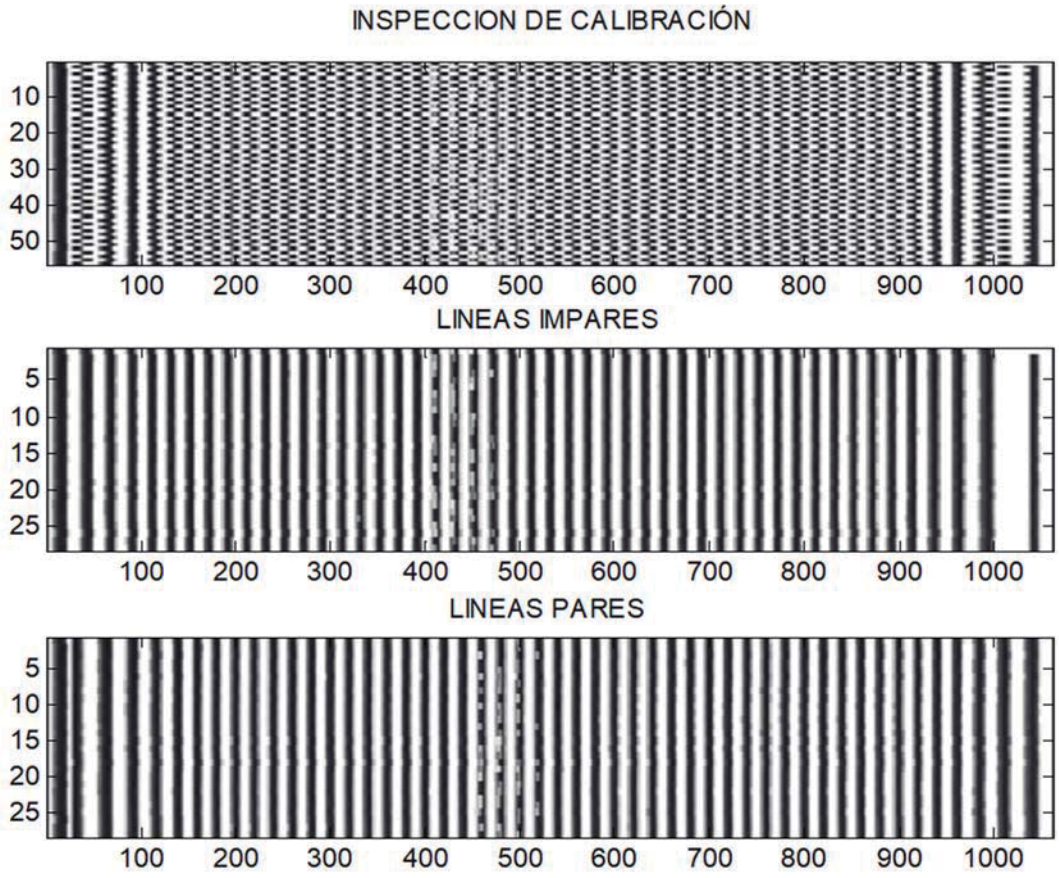
INSPECCION DE CALIBRACIÓN
10
20
30
40
50
100 200 300 400 500 600 700 800 900 1000
LINEAS IMPARES
5
10
15
20
25
100 200 300 400 500 600 700 800 900 1000
LINEAS PARES
5
10
15
20
25
100 200 300 400 500 600 700 800 900 1000

Fig. 3

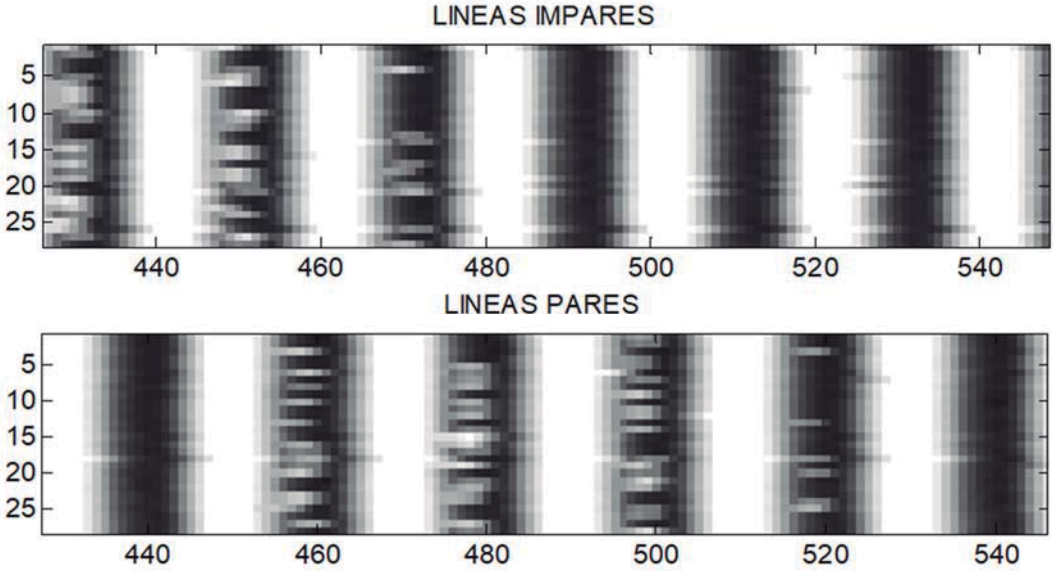
LINEAS IMPARES
5
10
15
20
25
440
460
480
500
520
540
LINEAS PARES
5
10
15
20
25
440
460
480
500
520
540

Fig. 4

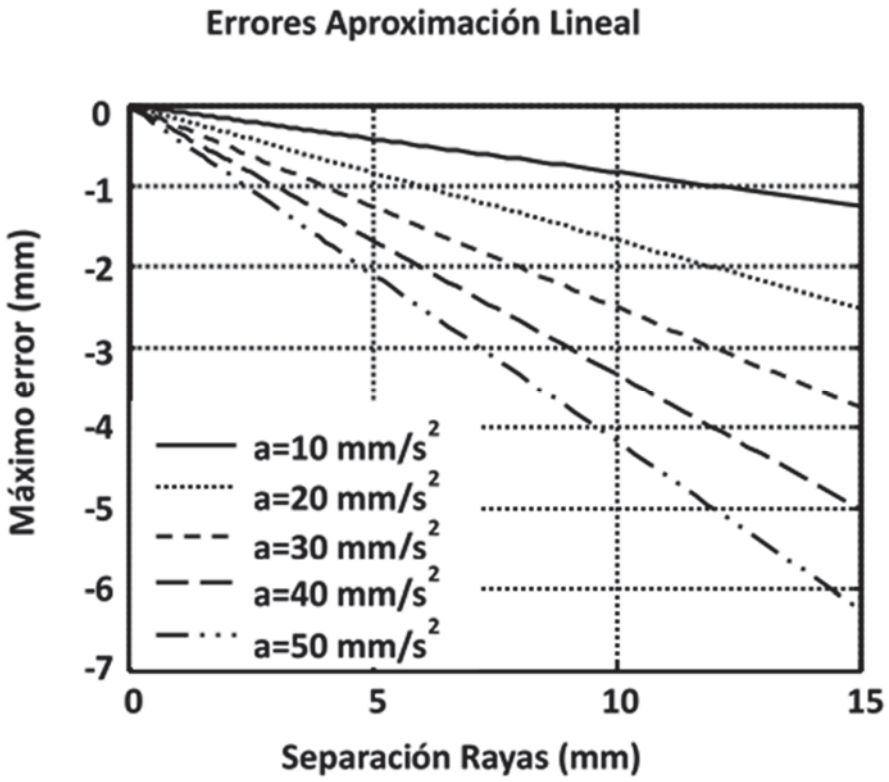
Errores Aproximación Lineal
Máximo error (mm)
0
-1
-2
-3
-4
-5
-6
-7
0
5
10
15
Separación Rayas (mm)
a=10 mm/s2
a=20 mm/s2
a=30 mm/s2
a=40 mm/s2
a=50 mm/s2

Fig. 5

Fig. 6

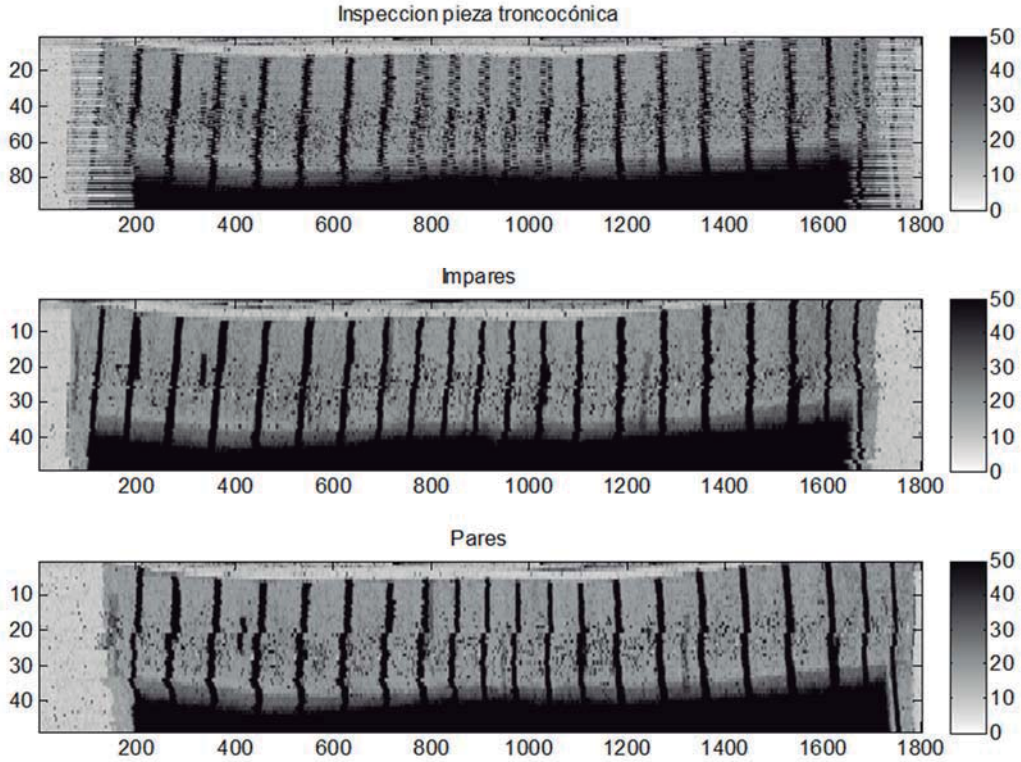
Inspeccion pieza troncocónica
20
40
60
80
200
400
600
800
1000
1200
1400
1600
1800
50
40
30
20
10
0
Impares
10
20
30
40
200
400
600
800
1000
1200
1400
1600
1800
50
40
30
20
10
0
Pares
10
20
30
40
200
400
600
800
1000
1200
1400
1600
1800
50
40
30
20
10
0

Fig. 7A

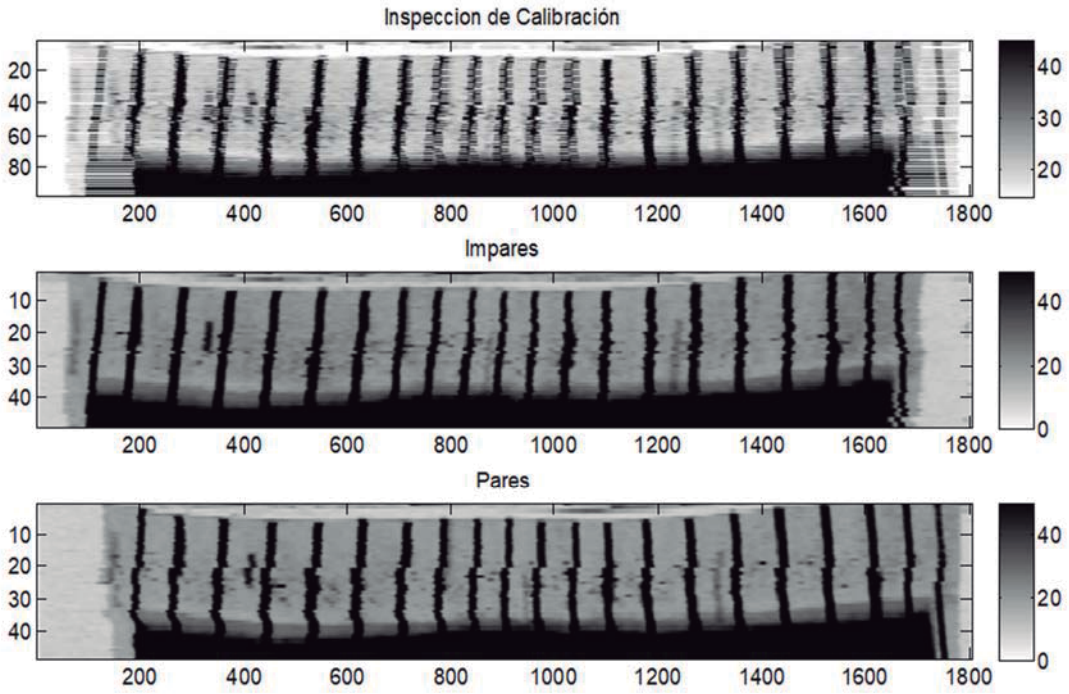
Inspeccion de Calibración
20
40
60
80
200
400
600
800
1000
1200
1400
1600
1800
40
30
20
Impares
10
20
30
40
200
400
600
800
1000
1200
1400
1600
1800
40
20
0
Pares
10
20
30
40
200
400
600
800
1000
1200
1400
1600
1800
40
20
0

Fig. 7B

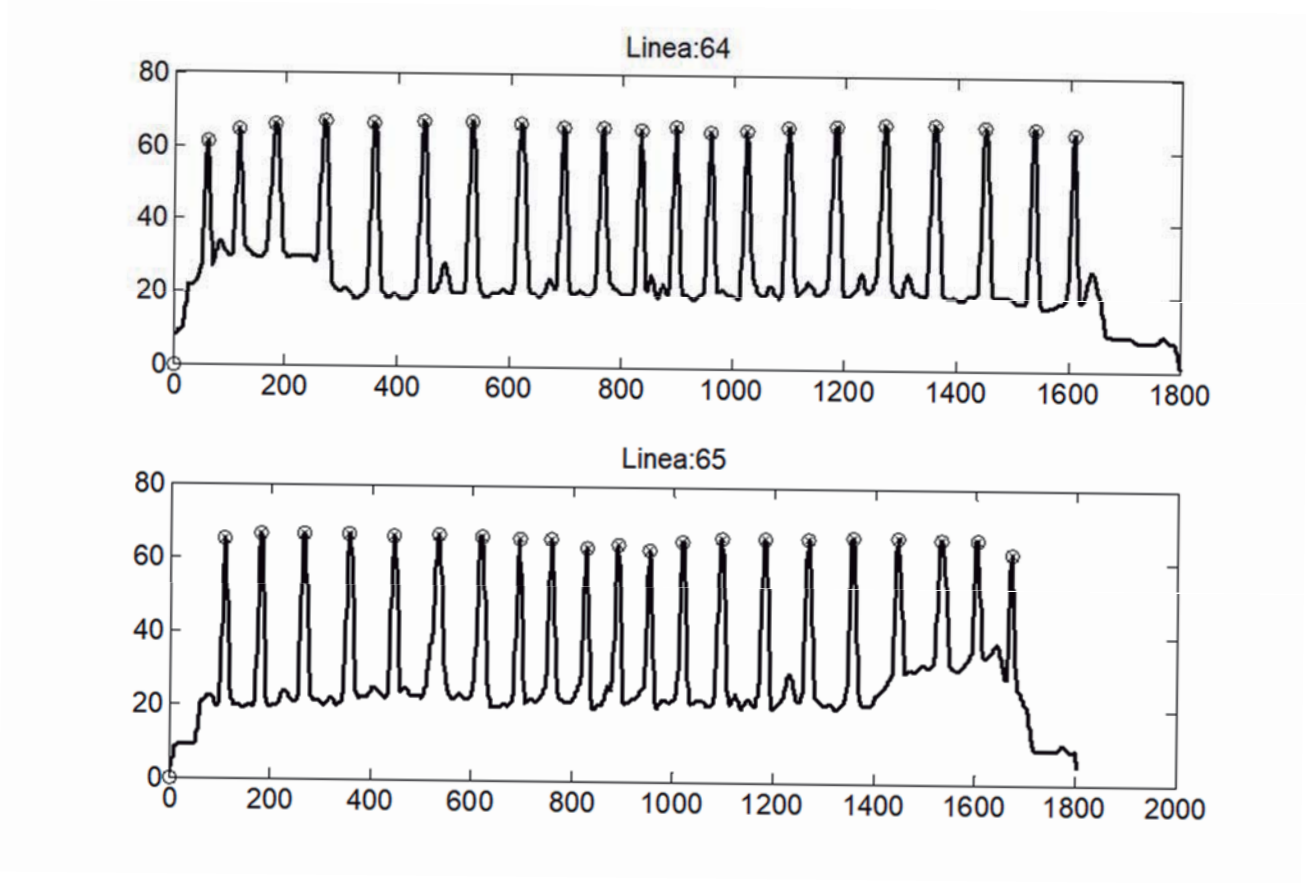
Linea:64
80
60
40
20
0
0
200
400
600
800
1000
1200
1400
1600
1800
Linea:65
80
60
40
20
0
0
200
400
600
800
1000
1200
1400
1600
1800
2000

Fig. 8

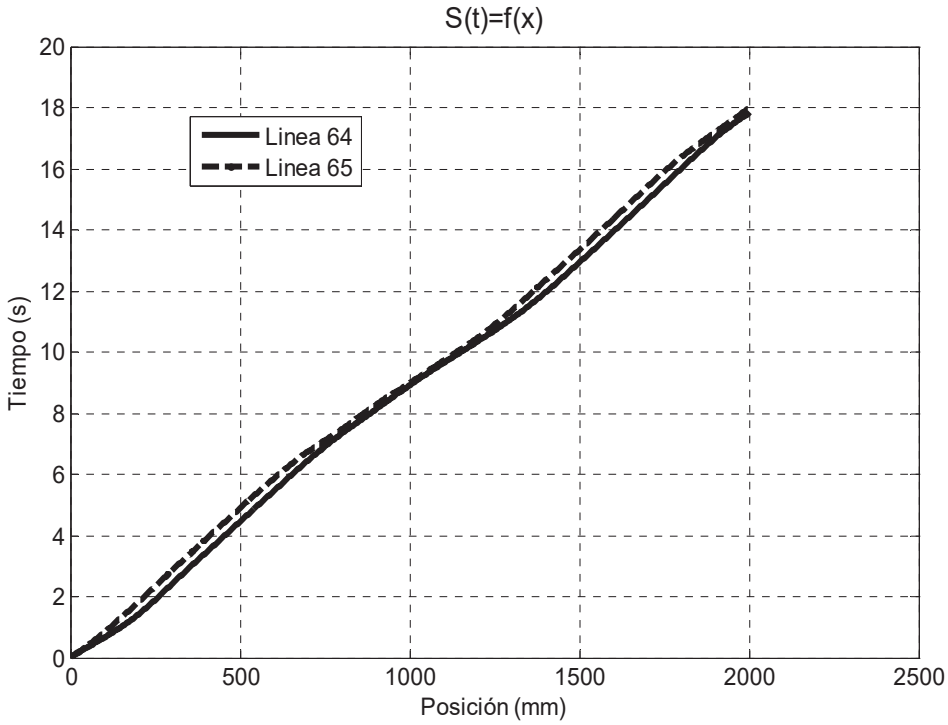
S(t)=f(x)
Linea 64
Linea 65
Tiempo (s)
Posición (mm)
0
2
4
6
8
10
12
14
16
18
20
0
500
1000
1500
2000
2500

Fig. 9

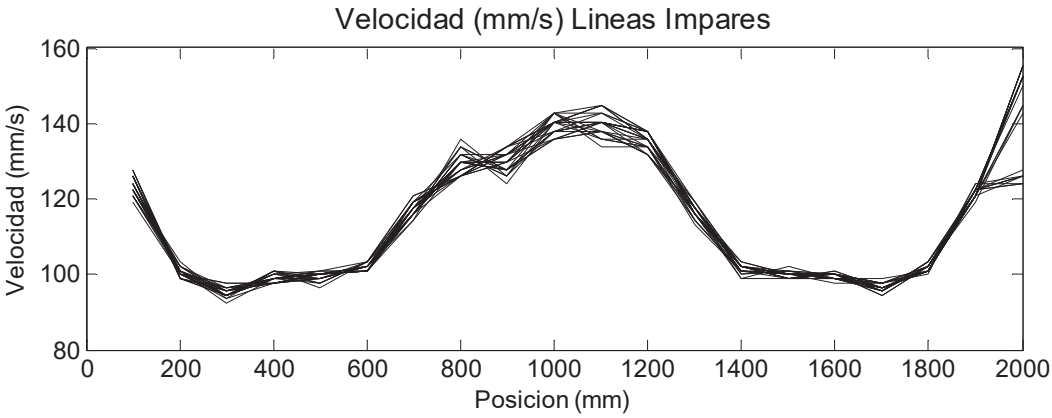
Velocidad (mm/s) Lineas Impares
Velocidad (mm/s)
160
140
120
100
80
0
200
400
600
800
1000
1200
1400
1600
1800
2000
Posicion (mm)

Fig. 10ª

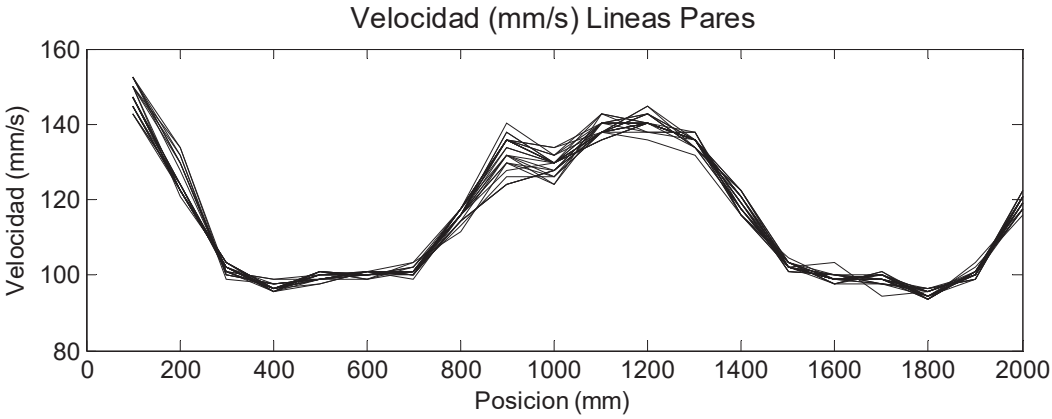
Velocidad (mm/s) Lineas Pares
Velocidad (mm/s)
160
140
120
100
80
0
200
400
600
800
1000
1200
1400
1600
1800
2000
Posicion (mm)

Fig. 10B

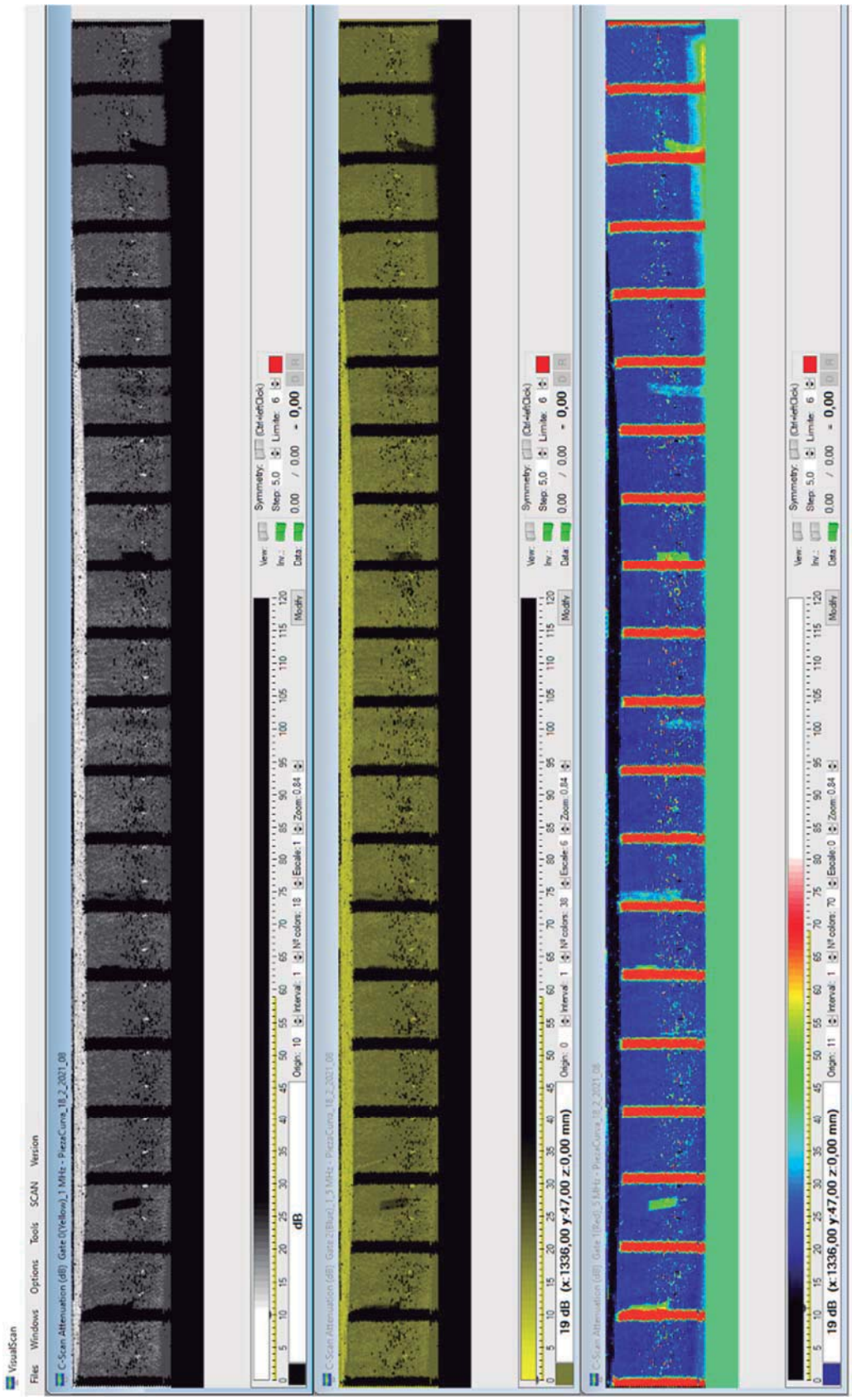
VisualScan
Files Windows Options Tools SCAN Version
C-Scan Attenuation (dB) Gate 0(Yellow) 1 MHz - PiezaCurva_18_2_2021_08
dB
19 dB (x:1336,00 y:47,00 z:0,00 mm)
C-Scan Attenuation (dB) Gate 2(Blue) 1,5 MHz - PiezaCurva_18_2_2021_08
19 dB (x:1336,00 y:47,00 z:0,00 mm)
C-Scan Attenuation (dB) Gate 1(Red) 5 MHz - PiezaCurva_18_2_2021_08
19 dB (x:1336,00 y:47,00 z:0,00 mm)

Fig. 11

OFICINA ESPAÑOLA
DE PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

(21) N.º solicitud: 202130210

(22) Fecha de presentación de la solicitud: 10.03.2021

(32) Fecha de prioridad:

INFORME SOBRE EL ESTADO DE LA TECNICA

(51) **Int. Cl. :** ***G01N29/30*** (2006.01)
G01N29/00 (2006.01)

DOCUMENTOS RELEVANTES

Categoría	(56) Documentos citados	Reivindicaciones afectadas
A	US 6685645 B1 (MCLAUGHLIN GLEN et al.) 03/02/2004, Todo el documento	1-10
A	CHENGPU YU et al. A blind deconvolution approach to ultrasound imaging. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 20120201 IEEE, USA., 01/02/2012, Vol. 59, Páginas 271 - 280, ISSN 0885-3010, <DOI: doi:10.1109/TUFFC.2012.2187>. Todo el documento.	1-10
A	MERCIER L et al. A review of calibration techniques for freehand 3-D ultrasound systems. ULTRASOUND IN MEDICINE AND BIOLOGY, 20050201 NEW YORK, NY, US. 01/02/2005, Vol. 31, Páginas 143 - 165, ISSN 0301-5629. Todo el documento.	1-10
A	US 2007047831 A1 (WEN JING J WEN JING JIANG) 01/03/2007, Todo el documento	1-10
A	WO 2019048482 A1 (PIUR IMAGING GMBH et al.) 14/03/2019, Todo el documento	1-10
A	CN 112326802 A (BEIJING INSTITUTE TECH) 05/02/2021, Todo el documento	1-10

Categoría de los documentos citados
X: de particular relevancia
Y: de particular relevancia combinado con otro/s de la misma categoría
A: refleja el estado de la técnica
O: referido a divulgación no escrita
P: publicado entre la fecha de prioridad y la de presentación de la solicitud
E: documento anterior, pero publicado después de la fecha de presentación de la solicitud

El presente informe ha sido realizado
☒ para todas las reivindicaciones ☐ para las reivindicaciones nº:

Fecha de realización del informe	Examinador	Página
15.03.2022	M. Muñoz Sanchez	1/2

Documentación mínima buscada (sistema de clasificación seguido de los símbolos de clasificación)

G01N

Bases de datos electrónicas consultadas durante la búsqueda (nombre de la base de datos y, si es posible, términos de búsqueda utilizados)

INVENES, EPODOC, WPI, NPL, XPIEE, XPI3E