

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 530 619**

51 Int. Cl.:

**B21B 38/02** (2006.01)

**G01B 11/25** (2006.01)

**G01B 11/30** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **26.04.2011** **E 11163746 (8)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **19.11.2014** **EP 2517799**

54 Título: **Aparato y método para la medición en línea industrial de la topografía micrométrica y de la ondulación de productos en movimiento**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**04.03.2015**

73 Titular/es:

**CENTRE DE RECHERCHES MÉTALLURGIQUES  
ASBL - CENTRUM VOOR RESEARCH IN DE  
METALLURGIE VZW (100.0%)  
Boulevard de l'Impératrice 66  
1000 Bruxelles , BE**

72 Inventor/es:

**MOREAS, GENEVIÈVE**

74 Agente/Representante:

**LEHMANN NOVO, María Isabel**

ES 2 530 619 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**

Aparato y método para la medición en línea industrial de la topografía micrométrica y de la ondulación de productos en movimiento

Campo de la invención

5 La presente invención se refiere a un método para la medición en línea exacta de la ondulación de una superficie de un producto industrial en movimiento en base a técnicas de microscopio.

La invención también se refiere a un aparato para llevar a cabo el método.

Antecedentes técnicos y técnica anterior

10 Se sabe que una topografía de superficie se refiere básicamente a la información horizontal y vertical en la variación de altura de una superficie, que puede dividirse en (micro) rugosidad (Ra) y ondulación (Wa). Generalmente, la rugosidad por definición incluye sólo variaciones de altura que tienen una separación horizontal o una longitud de onda de entre 5 y 10 veces la distancia vertical de pico a valle, que corresponde a las longitudes de onda típicamente por debajo de 2,5 mm.

15 Por otro lado, ondulación se refiere a componentes estructurales con longitudes de onda más largas de aproximadamente entre 1 y 30 mm (véase la figura 1).

Ondulación significa, en general, una desviación de forma de una superficie en el intervalo de longitud de onda por encima de la rugosidad, es decir, la forma por encima de la frecuencia de corte habitual (Lc) de principalmente 0,8 o 2,5 mm en el caso del acero.

20 Si la ondulación de una chapa de acero está por encima de los límites predefinidos, el usuario de acero no acepta el producto, ya que produce desechos o mala calidad en su posterior procesamiento, tal como embutición profunda, pintura intensa o cepillado excesivo. Como la ondulación, excepto para superficies muy brillantes, la mayoría de las veces no es visible a simple vista antes de la pintura, se requiere una medición para evaluar su nivel. Hoy en día, esto se hace mediante el uso de perfilómetros en muestras estáticas desde la cola o la cabeza de algunas bobinas. Sin embargo esta medición generalmente no está disponible para toda la bobina y, por otra parte, sólo se realiza en algunas (1 de cada 5 por término medio). No obstante, el valor de ondulación es cada vez más importante para los clientes, especialmente los de la industria automotriz, que requieren una mejor calidad para evitar desechos y tratar de poner menos pintura sobre el producto de acero sin perder calidad en el aspecto.

30 El documento JP 6307840 A da a conocer un método para la medición sin contacto de la rugosidad y de la ondulación de una superficie que tiene una alta velocidad de alimentación tal como en un proceso en línea para laminar metal, mediante el uso de una señal de error detectada como una señal de error focal para servomovimientos a través del cálculo hasta la banda de alta frecuencia. Por consiguiente, una irregularidad de superficie clara de una placa de acero se detecta como un error focal desde la posición de enfoque y se incluye en la señal de falta de uniformidad de la superficie. Mediante un filtro de paso de banda, esta señal se emite de forma divergente a las respectivas señales de rugosidad y de ondulación.

35 El documento US 6.556.945 B1 describe un sistema para la medición de irregularidades formadas por ranuras y/u ondas largas en una superficie de un objeto mediante el uso de una plataforma de medición. El sistema mueve el objeto y la plataforma de medición uno con respecto a la otra y proyecta desde la plataforma de medición un rayo de luz que se extiende en una dirección del desplazamiento sobre una superficie del objeto según un ángulo de proyección fijo que está inclinado con respecto a una superficie perpendicular a la superficie. El rayo de luz se reproduce en un fotorreceptor plano sensible a la posición con una pluralidad de exposiciones instantáneas consecutivas del fotorreceptor, donde el fotorreceptor está dispuesto de manera fija sobre la plataforma de medición con un ángulo de registro que está inclinado con respecto al ángulo de proyección fijo. El sistema registra la superficie a lo largo de la dirección del desplazamiento con una pluralidad de imágenes de rayos de luz continuos y determina un perfil de superficie de la superficie a lo largo de la dirección de desplazamiento a partir de las deformaciones en la pluralidad de las imágenes de rayos de luz.

40 El documento G. Moreas et al., "Sensor avanzado para topografía en línea en líneas continuas", La Revue de Métallurgie-CIT, vol. 103, nº 5, mayo de 2006, pp. 233-237, describe un sensor, desarrollado por CRM en colaboración con Sidmar, que captura imágenes muy ampliadas de un producto de banda de acero en movimiento. El sensor avanzado proporciona la oportunidad, mediante análisis en tiempo real de la superficie, de mejorar la calidad de la producción. Da la información que se puede utilizar para ajustar las condiciones de producción y para obtener la gama de rugosidad Ra requerida por el cliente.

50 El documento DE 199 32 324 A1 describe un proceso para determinar la ondulación y/o la planeidad de una banda que comprende calcular la posición de la superficie de la banda en referencia a los puntos y/o en referencia a las

líneas en un espacio, modelando una superficie de soporte virtual en esta superficie y calculando la ondulación a partir de las desviaciones de la superficie desde la superficie de soporte. Una reivindicación independiente también se incluye para un dispositivo que incorpora un medidor de distancia para determinar la ondulación y/o la planeidad de una banda.

5    Objetos de la invención

La presente invención tiene como objetos la aplicación de un sistema en línea para la medición de la ondulación de una banda fabricada industrialmente tal como una banda de acero y el reconocimiento de su tipo durante el proceso de producción.

10   También pretende su utilización para cualquier producto para el que tenga que ser medido el perfil de microaltura alargado.

Resumen de la invención

Un primer aspecto de la presente invención se refiere a un sensor de microscopio para llevar a cabo el método para medir sin contacto la ondulación ( $W_a$ ) de una superficie en movimiento, como se describe anteriormente, que comprende:

15   - un microscopio industrial que tiene un aumento adecuado para obtener un campo de visión de imagen en el intervalo de 1000  $\mu\text{m}$  y/o una resolución de al menos 0.5  $\mu\text{m}$ , una distancia de trabajo mayor de 10 mm y una profundidad de campo mayor de 15  $\mu\text{m}$ ;

20   - una fuente de láser pulsado en el orden de nanosegundos con una frecuencia de al menos  $V / (\text{FOV} \cdot O)$  en  $\text{s}^{-1}$ , donde  $V$  es la velocidad máxima de la superficie, en m/s, FOV es el campo de visión en la dirección de desplazamiento, en m y  $O$  es la superposición entre imágenes consecutivas en m, para emitir un haz a través de fibra óptica a fin de proyectar una línea micrométrica superpuesta a una iluminación de fondo, siendo dicha línea proyectada sustancialmente paralela a la dirección de desplazamiento;

25   - un acoplamiento de fibras para acoplar cada fibra óptica al láser usando una lente plano-convexa diseñada para enfocar sustancialmente todo el haz láser en el núcleo de la fibra en el límite de densidad de energía soportada por la fibra;

30   - una cámara matricial de alta velocidad que tiene al menos la misma frecuencia que la frecuencia del láser, un campo de visión adaptado a la precisión requerida, de preferencia de al menos 600  $\mu\text{m}$  y una óptica adecuada con una resolución espacial de 0,5  $\mu\text{m}$ ;

- un medio de enfoque que comprende un sensor de distancia;

35   - al menos una mesa de posicionamiento de alta precisión para el enfoque;

- un medio de control electrónico para la sincronización externa de la cámara y el láser y para recalcular la frecuencia de la señal de sincronización en tiempo real;

40   - medios de hardware y software para cooperar con la cámara matricial a fin de capturar a alta frecuencia una pluralidad de imágenes individuales de la superficie en movimiento con una superposición lateral, obteniéndose cada una de dichas imágenes en una iluminación de fondo, calculando un perfil de la superficie a partir de la deformación de una línea láser proyectada sobre la superficie según un ángulo dado, y sustancialmente paralela a la dirección de desplazamiento; para realizar el montaje por stitching de imágenes consecutivas, y para el ajuste de línea, a fin de obtener un perfil de superficie en bruto de la longitud del perfil nominal definido por un valor de frecuencia de corte elevado; para filtrar el perfil de superficie en bruto, a fin de separar los datos de rugosidad y de ondulación y para calcular los parámetros de rugosidad y de ondulación.

Según realizaciones particulares, el sensor incluye además una o una combinación apropiada de las siguientes características:

- el medio para filtrar el perfil comprende un filtro de tipo Gaussiano de magnitud " $n$ ", siendo  $n$  un número entero.

45   - el sensor comprende un medio para sincronizar la frecuencia de captura con la velocidad de la superficie en movimiento.

- el medio para realizar el montaje por stitching de imágenes consecutivas comprende un modelo de transformación que comprende una traslación calculada entre dos imágenes consecutivas utilizando una técnica de correlación y un algoritmo de FFT.

- el sensor comprende un medio para evaluar un vector de traslación que comprende una iluminación de fondo con ventanas secundarias que no contienen la línea láser.
  - el sensor comprende un medio para ajustar las direcciones de la proyección de línea y del eje óptico de la cámara.
  - 5 - el sensor comprende un medio para ajustar la orientación de la cámara, fin de que el desplazamiento en el montaje por stitching perpendicular a la dirección de desplazamiento esté cerca de cero píxeles.
  - el sensor comprende un medio para ajustar la línea proyectada a la dirección de desplazamiento que comprende una mesa de rotación de alta precisión combinada con un análisis de FFT, para obtener la extinción del pico de FFT en la longitud del stitching
  - 10 - el sensor comprende un medio para realizar una iluminación de fondo y una proyección de línea láser homogéneas.
  - el sensor comprende un medio para inclinar el eje óptico del sensor de microscopio alrededor del plano perpendicular a la superficie según un ángulo comprendido entre 4 y 24 grados, de preferencia entre 12 y 18 grados.
- Otro aspecto de la presente invención se refiere a un método para medir sin contacto la ondulación ( $W_a$ ) de una superficie en movimiento, en base al uso del sensor de microscopio, como se describe anteriormente, usando una longitud mínima de perfil de superficie y valores de frecuencia de corte elevado y bajo correspondientes, siendo dicha longitud mínima de perfil de superficie al menos igual a 6 veces el valor de corte elevado, siendo el valor de corte elevado igual a 5 mm, comprendiendo el método los pasos de:
- 15 - capturar a alta frecuencia, mediante una cámara de alta velocidad, una pluralidad de imágenes individuales de la superficie con una superposición lateral, obteniéndose dichas imágenes mediante un método de triangulación a alta resolución en el que, para cada imagen, en una iluminación de fondo, un perfil de la superficie se calcula mediante el análisis de la deformación de una línea láser proyectada en la superficie según un ángulo dado, siendo dicha línea proyectada sustancialmente paralela a la dirección de desplazamiento;
  - 20 - montar por stitching dicha pluralidad de imágenes unas con otras para obtener una imagen montada por stitching correspondiente a un perfil que tiene una longitud al menos igual a dicha longitud de perfil mínima; y
  - 25 - filtrar dicho perfil mediante el análisis de la imagen montada; caracterizado por que la línea proyectada se ajusta a la dirección de desplazamiento mediante el uso de una mesa de rotación de alta precisión combinado con un análisis de FFT, para obtener la extinción del pico de FFT en la longitud de montaje.

#### Breve descripción de los dibujos

- La figura 1, ya mencionada, representa esquemáticamente perfiles de rugosidad y de ondulación respectivamente.
- 30 La figura 2 representa esquemáticamente la iluminación de la fibra acoplada por láser de acuerdo con la presente invención.
- La figura 3 es el esquema para la señal de sincronización.
- La figura 4 es el esquema para el montaje óptico de láser.
- La figura 5 es el esquema para la adquisición general y la unidad de control.
- 35 La figura 6 ilustra esquemáticamente el principio del montaje por stitching.
- La figura 7 ilustra esquemáticamente un ligero desajuste en la línea proyectada.
- La figura 8 muestra el efecto de diferentes tamaños de ventana.
- La figura 9 muestra el resultado del montaje por stitching de dos imágenes consecutivas.
- La figura 10 ilustra una muestra de perfiles de rugosidad y de ondulación medidos en laboratorio.- 40 La figura 11 muestra la  $R_a$  óptica en función del lápiz óptico  $R_a$ .

La figura 12 muestra la  $W_a$  óptica en función del lápiz óptico  $W_a$ .

La figura 13 muestra el principio de la implantación mecánica de acuerdo con la invención.

La figura 14 muestra un ejemplo de cálculo de parámetros de superficie obtenidos con algoritmos especializados de ajuste.

La figura 15 muestra una comparación entre  $W_a$  a partir de mediciones mecánicas Wavimeter® y Talysurf.

5 La figura 16 muestra una comparación de Wavimeter® y mediciones mecánicas durante una variación de parámetros de producción.

Descripción detallada de la invención

10 Las ventajas científicas y tecnológicas del sensor desarrollado de acuerdo con la presente invención, denominado Wavimeter®, consisten en la aplicación de una medición en línea precisa de una ondulación de producto, y más específicamente de una ondulación de banda, en base a técnicas de microscopio. Esta última puede ser utilizada para constituir una base de datos a fin de evaluar los parámetros que influyen en la ondulación y determinar las interdependencias entre estos parámetros con el fin de obtener una mejor comprensión de los mecanismos físicos que influyen en la superficie, lo que deriva en la definición de directrices para controlar la ondulación y mejorar el proceso, y para definir una referencia común para productores y clientes también.

15 Algunos estudios han llegado a la conclusión de que un sistema de medición de ondulación en línea normalmente mide una longitud de perfil de superficie mínima de 30 mm con una densidad de puntos  $\geq 300$  puntos/mm, usando un corte bajo de 1 mm y un corte elevado de 5 mm. Esto parece ser el mínimo actualmente, mientras que el Wavimeter® es capaz de alcanzar características específicas superiores.

20 La comparación de las mediciones en laboratorio, todas hechas en la dirección de laminación, ha confirmado una  $R_a$ , calculada por ejemplo, con un corte elevado de 2,5 mm, y una  $W_a$  calculada por ejemplo con un corte bajo de 1 mm y un corte elevado de 5 mm (equivalente por tanto a un filtro de paso de banda), en una longitud máxima de 45 mm.

25 Para calcular la ondulación y separarla de la rugosidad, se requiere la filtración del perfil. En general, el filtro gaussiano es preferible ya que es de "fase correcta", es decir, no introduce distorsión de fase en la onda transmitida. Varias aplicaciones de este filtro se han probado para optimizar el tiempo de procesamiento. El resultado fue la elección de un filtro de tipo Gaussiano de orden de magnitud "n" para aplicación en laboratorio y mediciones en línea.

30 Debido a que es extremadamente costoso y difícil de diseñar un sistema de visión que tiene al mismo tiempo una alta resolución y un amplio campo de visión, el método adoptado de acuerdo con la presente invención combina dos técnicas. La primera es un método de triangulación a alta resolución utilizado previamente en el documento EP 1 429 114 en el que el perfil de la superficie se mide mediante el análisis de la deformación de una línea láser proyectada sobre la superficie según un ángulo conocido (en el denominado proyecto Topometer®, véanse también, por ejemplo, los documentos BE 1 014 971, WO 02/101366 A1, EP 1 806 558). El campo de visión amplio está en el intervalo de 1 mm, vinculado a las características específicas actuales de la cámara, siendo el objetivo alcanzar una precisión de píxel en el intervalo de 0.5  $\mu\text{m}$ . La adición del Wavimeter® consiste en la captura a alta frecuencia de una serie de tales imágenes con una ligera recuperación. Estas imágenes, cuyo fondo es visible a través del uso de una iluminación adecuada, son después montadas unas con otras por "stitching" para obtener la longitud de medición requerida. Como la longitud mínima de perfil a tener en cuenta en las mediciones de ondulación utilizando una línea proyectada es muy grande (alrededor de 45 mm y mayor), la reducción del aumento (o la resolución) del sensor de microscopio no es una solución, debido a una gran pérdida de información de altura y por tanto de resolución. De otro modo, sería necesario un sensor matricial CCD muy largo para mantener la alta resolución requerida para mediciones  $W_a$ , lo que resultaría muy caro.

Para aplicar el método definido, siguiendo las características específicas generales para las mediciones de ondulación, el Wavimeter® integra/utiliza una cámara de alta velocidad y un láser de alta velocidad.

45 Una técnica de sincronización externa de alta precisión, basada en la conversión de la señal de velocidad para alcanzar continuamente la cantidad de recuperación definida entre imágenes individuales, se utiliza para sincronizar de forma muy precisa la frecuencia de captura con la velocidad del producto. Esto se traduce en una cantidad casi constante de píxeles de recuperación de imagen a imagen. Esto deriva así en una mayor velocidad de cálculo para el montaje ya que la zona de montaje no cambia mucho.

50 También se ha prestado mucha atención en la calidad de los componentes ópticos utilizados y en la estabilidad de los montajes utilizados para alcanzar una configuración lo más estable posible. De hecho, una iluminación estable del fondo y un nivel estable de la línea proyectada proporciona una mayor estabilidad en los resultados con el tiempo. El sistema es multitarea por la combinación de múltiples procesos en paralelo: comprobación de la posición de seguridad, decisión del momento de adquisición adecuado, captura de imágenes, cálculo de valores de  $R_a$  y  $W_a$ .

- Se han utilizado paralelamente técnicas de montaje por stitching. El stitching de imágenes por lo general se define como el proceso de combinar varias imágenes fotográficas con campos de visión superpuestos para producir un panorama segmentado o una imagen en alta resolución. Los algoritmos de montaje por stitching se refieren a un conjunto de técnicas que se utilizan para recuperar una imagen grande de un conjunto de imágenes más pequeñas.
- 5 Es de uso común, por ejemplo, recuperar un panorama completo en base a una serie de imágenes tomadas con una cámara. En el presente proyecto, el equilibrio necesario entre resolución y campo de visión es imposible de manejar sin usar estas técnicas.
- En una realización preferida, el método de montaje por stitching utilizado se basa en un modelo de transformación simple que consiste en una traslación que se calcula entre dos imágenes consecutivas utilizando una técnica de correlación y algoritmos de FFT. En esta realización, no se tiene en cuenta ni la rotación ni el cambio de zoom. Esto es realista, ya que la configuración óptica del dispositivo de adquisición está por el contrario muy bien controlada. Sin embargo, si es necesario, se puede tener en cuenta un modelo de transformación más complejo.
- 10 Por otra parte, el montaje por stitching se realiza preferentemente en una ventana secundaria que no incluye ni línea proyectada ni zonas de puntos brillantes que derivan de ella.
- 15 Una característica notable a tener en cuenta de acuerdo con la invención es la orientación de la línea láser en comparación con la dirección de la banda. De manera ideal, la línea láser debe proyectarse exactamente en la dirección de desplazamiento de la banda, por lo que la adquisición de varias imágenes consecutivas sería equivalente a proyectar una línea láser más larga en un campo de visión más amplio.
- 20 Así, de acuerdo con la presente invención, la cámara y la línea proyectada se eligen ajustables para alinear perfectamente el sistema.
- La cámara se orienta preferentemente de modo que se minimice el desplazamiento de montaje por stitching transversal (perpendicular a la dirección de laminación). Esto ayuda en el proceso de procesamiento en lo que se refiere al tiempo y a las ventanas secundarias comunes disponibles en dos imágenes consecutivas.
- 25 La dirección de línea se ajusta preferentemente mediante el uso de una mesa de rotación de alta precisión, en la que la óptica de proyección de línea se fija combinada con un análisis de FFT de la imagen montada por stitching resultante. La orientación correcta de la línea en la dirección de laminación tendrá como resultado la extinción del pico de frecuencia en la longitud de montaje por stitching.
- La homogeneidad de la iluminación de fondo debe ser buena, ya que desempeña un papel importante en la calidad del montaje por stitching.
- 30 La elección adecuada de los parámetros iniciales en la búsqueda del desplazamiento entre ventanas coincidentes y desplazadas es un factor muy importante con el fin de reducir el tiempo de procesamiento. Se han aplicado algoritmos específicos en función, por ejemplo, del tipo de textura.
- Una aplicación de algoritmo rápido para el cálculo del vector de desplazamiento entre dos imágenes consecutivas, y la generación de la imagen montada por stitching hecha de un conjunto de imágenes adyacentes, se han optimizado. Esto se basa en el algoritmo de CCN basado en FFT.
- 35 Lo primero que se debe hacer cuando se instala el sensor es ajustar su posición global. Esto se hace mediante el uso de una señal de sensor de distancia y las mesas de posicionamiento que soportan el núcleo del sensor. Esta señal es mínima cuando el eje óptico es perpendicular a la superficie de rodillo.
- 40 Se han compuesto algoritmos específicos para ajustar en línea la posición del Wavimeter®. En segundo lugar se comprueba el enfoque mediante una evaluación de desenfoque. La inclinación de la cámara se modifica en base a los valores de traslación de montaje por stitching. La línea de triangulación se alinea a lo largo de la dirección de laminación mediante el análisis del espectro de perfil.
- 45 Dependiendo de la reflectividad del producto, de nuevo según la invención, todo el sensor se puede inclinar para recoger una mayor cantidad de reflexión especular. Las imágenes capturadas son entonces mucho mejores y el factor de llenado de la línea detectada también. Incluso con la pequeña profundidad de enfoque, la imagen resultante no aparece borrosa en la zona de interés. Esta solución deriva en una pequeña pérdida de precisión en la medición debido a la inclinación. Se trata de un compromiso entre un buen factor de llenado que resulta en una mejor medición con menos interpolación entre los puntos poco precisos y una mejor precisión.
- 50 Pruebas industriales en línea han confirmado el método en productos en movimiento con un factor de correlación de 0,71 y una dispersión de +/- 10%.

Descripción de las realizaciones preferidas

1. Requisitos generales

Para poder medir un gran número de tipos de ondulación se requiere una mayor longitud de medición en comparación con la medición de la rugosidad: idealmente, de acuerdo con las buenas prácticas, 6 veces el corte elevado elegido para el filtrado.

- 5 El algoritmo de montaje por stitching requiere una cantidad de superposición de imagen a imagen. Preferiblemente, se utilizará una recuperación en una gama de 50 píxeles. Se ha determinado mediante análisis de imagen de la base de datos constituida en laboratorio.

La frecuencia de captura tiene que tener en cuenta esa superposición definida. Teniendo en cuenta un campo de visión de  $W$  ( $\mu\text{m}$ ) con  $p$  píxeles, una velocidad lineal de  $v$  (m/min) y una recuperación de  $r$  píxeles, la frecuencia de captura debe ser:

10

$$(p / (p - r)) * v * 10^6 / 60 / W.$$

Por ejemplo, teniendo en cuenta un campo de visión de 850  $\mu\text{m}$  y 850 píxeles, una cantidad de solapamiento de 50 píxeles y una velocidad máxima de 180 m/min en una línea de galvanización, la frecuencia de captura debe ser de 3,75kHz.

- 15 2. Requisitos de cámara

La cámara elegida debe alcanzar la frecuencia calculada, dependiendo de la aplicación específica, utilizando al menos parte de la distribución de píxeles, manteniendo la precisión requerida lo largo de la dirección de línea.

3. Requisitos de láser

- 20 La fuente de láser elegida, por ejemplo un láser que funciona a 532 nm, como en el Topometer® (véase por ejemplo la solicitud de patente BE2002/0192), debe tener una anchura de pulso que corresponda a un movimiento de idealmente  $\frac{1}{2}$  píxel como máximo (para optimizar el montaje por stitching) o posiblemente 2.5  $\mu\text{m}$  (correspondiente a la mitad de la referencia de diámetro de lápiz óptico). El láser también debe llegar a la frecuencia de captura. La fuente de láser puede consistir en uno o varios diodos de láser directamente situados en el cabezal de sensor.

3.1. Acoplamiento de fibras de láser

- 25 Al igual que en el Topometer®, la fuente de láser está dividida como mínimo de dos haces: uno utilizado para la proyección de línea y el segundo para la iluminación de fondo. Para minimizar los requisitos de nivel de energía láser, se ha mejorado el acoplamiento utilizando una lente plano-convexa para enfocar el haz láser de manera precisa en el núcleo de la fibra dentro del límite de densidad de energía soportado por la fibra. La longitud focal de la lente ha sido elegida de manera que el ángulo de convergencia del haz enfocado coincida con el ángulo de aceptación de la fibra. Esto asegura que sólo se propague un poco de luz en modos de no transmisión de la fibra, y que el núcleo de la fibra se ilumine con el haz enfocado (figura 2).
- 30

El inconveniente de este sistema es un aumento de la sensibilidad hacia el posicionamiento del haz enfocado con respecto al núcleo de la fibra. El ángulo de iluminación y la distancia de enfoque también son parámetros muy sensibles. De todos modos, la buena práctica permite que la persona experta evite cualquier problema.

- 35 3.2. Modo de sincronización de cámara y láser

Ya que el pulso de láser debe ser muy corto para "congelar" la imagen de un producto en movimiento, es importante tener una buena sincronización de la cámara y el láser, con el fin de poder "atrapar" correctamente el pulso durante el tiempo de exposición de la cámara. De lo contrario, la cámara pierde el pulso y la imagen grabada no se puede utilizar (imagen en negro).

- 40 Hay dos modos de sincronización disponibles para accionar la cámara: los modos interno y externo. La sincronización interna utiliza una señal generada internamente, que puede ajustar el usuario a través de una interfaz de software. La sincronización externa utiliza una señal externa que se puede utilizar para sincronizar otros dispositivos.

3.3. Señal de sincronización

- 45 La frecuencia de esta señal puede ser fija o variable en función de la velocidad. Si es fija, tiene que ser suficientemente alta para mantener la cantidad de superposición para la velocidad más alta. Esto resultará en una cantidad muy alta de la superposición para baja velocidad, resultando así en un alto número de imágenes almacenadas. Esto implica que, para una línea de imágenes contiguas, la superposición puede variar mucho produciendo más cálculos para eliminar las imágenes extra.

La frecuencia se puede volver a calcular cada vez que los cambios de velocidad para mantener la cantidad de superposición estén en el mismo intervalo. Así, el número de imágenes almacenadas será relativamente constante y no se requerirán cálculos adicionales. Por el contrario, esto ayudará al algoritmo de montaje por stitching mediante la reducción de la zona de análisis.

- 5 Sin embargo el cálculo continuo en tiempo real de esta frecuencia a través del PC no es la mejor opción para una cuestión de cambio en tiempo real. Se ha sustituido por el uso de un VCO (oscilador controlado por voltaje) asociado a un circuito integrado que combina la velocidad y dos factores programables: ganancia y desvío (figura 3). Estos dos últimos parámetros se pueden cambiar a través del PC para modificar rápidamente la cantidad de superposición.

## 10 3.4. Montaje óptico para el láser

El esquema de montaje óptico para el láser se muestra en la figura 4. Para compactar el sistema, se han utilizado espejos. Un divisor de haz divide la energía en dos haces para una primera fibra para la proyección de línea y para una segunda fibra para la iluminación de fondo. Un atenuador motorizado se ha añadido en cada trayecto óptico para poder modificar de forma independiente desde el PC la intensidad de la línea y del fondo.

- 15 Este montaje se puede utilizar en combinación con la evaluación automática de los niveles de línea y de fondo para modificarlo en línea en función de la superficie del producto.

Para mejorar la resistencia a las vibraciones, las mesas de traslación a las que se conectan las fibras tienen una posición bloqueable.

## 3.5. Unidad de adquisición y control (figura 5)

- 20 Teniendo en cuenta que se necesitan  $n$  imágenes para cubrir la longitud deseada con una cantidad definida de solapamiento, se utiliza la cámara en el modo de ciclo. En un primer paso, la cámara se preactiva mediante el PC. Esta adquirirá imágenes y las almacenará en una memoria intermedia de ciclo con un tamaño de  $n$  imágenes.

Cuando se realiza un ciclo completo de adquisición, la primera vez que se alcanza el punto de enfoque, el PC activa la cámara de nuevo. Este segundo paso se completa cuando se adquieren  $n/2$  imágenes.

- 25 De esa manera, la memoria intermedia de la cámara consiste en  $n/2$  imágenes adquiridas antes del enfoque y  $n/2$  imágenes adquiridas después del enfoque. A priori, esta es la mejor manera de obtener una línea de imágenes mejor enfocadas.

- 30 Una posibilidad consiste en controlar la secuencia de capturas mediante el PC sólo tres veces: la preactivación que no es crítica en función del tiempo, la activación que es más crítica y la finalización de la adquisición que no es crítica tampoco. Algunas operaciones pueden ser delegadas ventajosamente a un sistema de control externo tal como un PLC.

La señal de activación crítica se comprueba continuamente mediante el PC a través de la adquisición de la señal de distancia. Sin embargo podría aplicarse también en un hardware externo para controlar directamente la cámara.

- 35 Durante este paso, la otra operación a cargo del ordenador es la adquisición de velocidad para el ahorro posterior y la comprobación de las señales de seguridad para retirar el sistema si es necesario.

## 4. Wavimeter®

El sensor se completa con un sistema usado para controlar el soporte sobre el que se fija el cabezal de sensor. Este sistema permitirá colocar el sensor cerca del producto cuando es posible llevar a cabo la medición y quitarlo cuando se producen incidentes de línea (deformaciones por calor, etc.).

- 40 Para un funcionamiento estable durante mucho tiempo, se ha hecho hincapié en que se debe mantener una temperatura estable dentro del cabezal de medición. Esto se consigue preferentemente utilizando un sistema de calentamiento/refrigeración Peltier.

- 45 Si se mantiene la inclinación entre la línea y el eje óptico de la cámara, idealmente entre 30 y 60 grados, dependiendo de la resolución para llegar a productos altamente reflectantes, se puede inclinar todo el sensor en un modo en el que puede llegar más reflexión "especular" a la cámara, lo que deriva en un mejor resultado.

## 5. Montaje por stitching de imágenes

### 5.1. Requisitos de montaje por stitching

De hecho, se necesita una resolución muy alta para capturar la desviación de la línea láser con una precisión compatible con mediciones de  $W_a$ . El orden típico de magnitud para valores de  $W_a$  en productos planos es de entre 0,2 y 1  $\mu\text{m}$ . Sin embargo, la  $W_a$  es una medición que se refiere en general a longitudes de onda bastante grandes (de alrededor de 1 mm y mayores), y a un perfil grande, y por tanto, se necesita típicamente 6 veces la longitud de onda máxima (por ejemplo 5 mm) para calcular la amplitud de onda.

Debido a que es extremadamente costoso y difícil diseñar al mismo tiempo un sistema de visión con una alta resolución y un amplio campo de visión, el método detallado en el presente documento mantiene el aspecto de resolución para la parte de hardware (cámara, sistema óptico), y recupera la propiedad de amplio campo de visión montando por stitching imágenes de recuperación consecutivas (figura 6).

Ya existen algoritmos de montaje por stitching en varios campos de procesamiento de imágenes. Estos algoritmos tienen actualmente que cumplir condiciones específicas:

- ser lo suficientemente precisos como para reconstruir un perfil de ondulación exacto;
- ser lo suficientemente rápidos para un procesamiento en tiempo real.

El principio básico de algoritmos de montaje por stitching generalmente implica varios pasos:

- preprocesamiento de las imágenes;
- cálculo de una transformación de una imagen a otra (por lo general, la transformación es un modelo paramétrico cuyos parámetros tienen que ser calculados);
- mezcla de las dos imágenes en base a la transformación calculada para reconstruir una imagen montada por stitching;
- postprocesamiento de las imágenes para obtener datos de nivel superior.

Reconstrucción de una "imagen" montada por stitching - modelo de transformación

Una vez que la zona de solapamiento se ha calculado con precisión a través de un modelo de transformación de montaje por stitching, es posible "reconstruir" la información en la zona de superposición utilizando toda la información disponible. Se puede calcular el promedio de nivel de gris de dos imágenes  $I_0$  y  $I_1$  o el de nivel de gris de una fuente en la zona de solapamiento.

Según una realización preferida de la presente invención, el método de montaje por stitching utilizado en la presente invención se basa en:

- un modelo de transformación simple que es una traslación del vector  $p$ . No se tiene en cuenta ni la rotación ni el cambio en el zoom. Esto es realista, ya que la configuración óptica del dispositivo de adquisición se controla muy bien;
- el vector  $p$  de esta transformación se calcula entre dos imágenes consecutivas utilizando una técnica de correlación y algoritmos de FFT;
- la fusión de datos en la zona de solapamiento se hace calculando un promedio de las dos imágenes;
- el proceso se puede repetir fácilmente para montar por stitching más imágenes.

Desalineamientos leves

Idealmente, la línea láser se proyecta exactamente en la dirección del desplazamiento de la banda, por lo que la adquisición de varias imágenes consecutivas sería equivalente a proyectar una línea láser más larga en un campo de visión más amplio. Sin embargo, esta alineación es difícil de configurar perfectamente sin un dispositivo de control específico. En adquisiciones experimentales, se puede ver casi cada vez una ligera falta de alineación (figura 7).

Este fenómeno es un problema en sí mismo, porque significa que el perfil reconstruido no será totalmente continuo. Pero antes del paso de reconstrucción del perfil, esta desalineación puede producir artefactos en el cálculo del vector  $p$  si la zona utilizada para evaluar el montaje por stitching incluye la línea. Debido a que la línea láser está vinculada al campo de visión, no sigue la misma traslación que la imagen de fondo. El montaje por stitching se aplicará en zonas que no incluyen la línea, por lo que, la correlación entre el fondo de la primera imagen y el fondo de la segunda imagen se puede maximizar y la falta de alineación de la línea láser puede también llegar a ser visible.

Para permitir una alineación perfecta del sistema, la cámara y la línea proyectada se pueden ajustar de acuerdo con la presente invención.

5 Para la cámara, con respecto a su orientación en el plano focal, no se aplica ningún sistema automático. La cámara se puede orientar mediante el uso de placas delgadas colocadas en el lado adecuado entre la cámara y su soporte. El ajuste se optimiza cuando el desplazamiento de montaje por stitching transversal (perpendicular a la dirección de laminación) es de cerca de 0 píxeles.

10 La dirección de línea se puede ajustar mediante el uso de una mesa de rotación en la que se fija la óptica de proyección lineal en combinación con un análisis de FFT de la imagen montada por stitching resultante. De hecho, si la línea no está perfectamente en la dirección de laminación, el resultado será la imagen montada por stitching en un perfil con escalones que aparecen en la longitud de montaje por stitching (que es constante ya que la frecuencia de captura está directamente relacionada con la velocidad del producto). Estos escalones van a aparecer en el perfil de FFT de ambos perfiles de  $W_a$  y  $R_a$ . La orientación de la línea en la dirección de laminación, dará como resultado la extinción del pico en cuestión (no mostrado).

Tamaño de ventana coincidente

15 La elección adecuada de los parámetros iniciales en la búsqueda del desplazamiento entre ventanas coincidentes y desplazadas es un factor muy importante para reducir el tiempo de procesamiento. Por ejemplo, el tamaño de la ventana coincidente es fundamental, ya que el número de Correlaciones Cruzadas Estandarizadas y comparaciones necesarias se ve directamente afectado. En esta zona se lograron varias mejoras. En la figura 8, se muestran dos tamaños de ventana; el plano de la izquierda ilustra el tamaño de ventana utilizado en ensayos anteriores, mientras que el derecho indica el tamaño de ventana utilizado en la última versión de software que, al ser mucho más pequeña, proporciona un tiempo de cálculo más corto.

20

La selección del tamaño de ventana sólo es posible después de varios ensayos y de un trabajo de estudio exhaustivo con las particulares condiciones de imágenes, por lo que puede variar dependiendo de las diferentes aplicaciones.

25 Con este tamaño de ventana más pequeña, el sistema puede estar seguro de que el valor máximo encajará en la misma, aunque debe tenerse en cuenta otro parámetro importante: el desplazamiento inicial de la ventana desplazada.

Este desplazamiento se calcula en un proceso repetitivo mirando los valores anteriores de desplazamiento. Esta mejora permite reducir considerablemente el tiempo necesario.

30 5.2. Resultados del proceso de montaje por stitching

Los algoritmos utilizados además de la elección de los parámetros correctos (tamaño de parches, gama de traslaciones admisibles, normalización) y de un ajuste específico (interpolación subpíxel) han permitido obtener buenos resultados en el proceso de montaje por stitching en un periodo de tiempo razonable (figura 9).

5.3. Aplicación y optimización C++

35 Se ha hecho una aplicación de algoritmos rápidos para el cálculo del vector de desplazamiento entre dos imágenes consecutivas y la generación de la imagen montada por stitching formada por un conjunto de imágenes adyacentes.

El software desarrollado tiene al menos las siguientes características:

- cálculo del vector de desplazamiento con el uso de una biblioteca de FFT eficiente y aplicación de "memoria estática" para disminuir el tiempo de la memoria;
- 40 - construcción dinámica de la imagen montada por stitching, con posibilidad de registrar solamente una zona de interés (ROI) alrededor de la línea, lo que aumenta la velocidad de ejecución y reduce los requisitos de memoria;
- disposición de datos físicos en la memoria para permitir que la imagen montada por stitching aumente sin necesidad de volver a copiarla cada vez, etc.

6. Análisis de la imagen montada por stitching

45 Una vez adquirida una imagen completa montada por stitching, la línea presente en la imagen tiene que ser aislada para su posterior análisis. Los algoritmos desarrollados inicialmente para Topometer® (ver más arriba) se han adaptado al tamaño mayor de la imagen y también a la presencia de una posible pendiente de la línea en la imagen montada por stitching.

Se han aplicado técnicas específicas basadas en la regresión lineal y en el filtrado de la desviación estándar.

## 6.1. Análisis de perfil

Cuando se encuentra la línea, un perfil en bruto está disponible para cálculos posteriores. Con este perfil, se pueden obtener parámetros de rugosidad y de ondulación.

- 5 Para calcular la ondulación y separarla de la rugosidad, se requiere la filtración del perfil. En general, el filtro gaussiano es preferible ya que este es de fase correcta, es decir, no introduce distorsión de fase en la onda transmitida.

## 7. Confirmación en muestras industriales en laboratorio

### 7.1. Confirmación del método en muestras estáticas

- 10 El principio de confirmación en muestras estáticas consiste en:

- desplazar la muestra en la dirección de línea para simular movimiento en línea;
- tomar una imagen después de cada desplazamiento;
- montar por stitching todas las imágenes capturadas;
- analizar la imagen resultante para encontrar la línea y obtener el perfil;

- 15 - filtrar el perfil con cortes adecuados;

- calcular la Ra y la Wa;

- comparar los valores obtenidos con las mediciones dadas por los métodos clásicos en laboratorio fuera de línea.

### 7.2. Montaje y condiciones de prueba

- 20 El Topometer® ha sido utilizado para mediciones ópticas. Cada muestra se monta en un sistema compuesto por 2 mesas de traslación y una mesa de rotación (no mostradas). Esto permite:

- colocar la superficie de la muestra perfectamente en un plano perpendicular al eje óptico;

- mover la muestra en la dirección de medición;

- mover la muestra para medir en líneas paralelas a fin de comparar los resultados obtenidos en diferentes posiciones.

- 25 Después se han reconstruido los perfiles de una serie de muestras (montaje, detección de línea, filtrado). Las imágenes han sido adquiridas preferiblemente con una recuperación de 50  $\mu\text{m}$  de imagen a imagen.

La figura 10 muestra el tipo de perfil obtenido en la muestra con el método Wavimeter®. Los valores Wavimeter® de Ra y Wa están muy cerca de las mediciones mecánicas.

- 30 Los resultados globales para Ra calculados con un corte elevado de 2,5 mm se muestran en la figura 11. Los resultados globales para Wa calculados con un corte bajo de 1 mm y un corte elevado de 5 mm se muestran en la figura 12.

Estos resultados confirman el método en laboratorio, ya sea para el montaje por stitching de imágenes o para el procesamiento de imágenes o para el filtrado de perfil. La precisión es buena (principalmente +/- 15%) y la correlación con la medición con lápiz óptico mecánico también.

- 35 8. Mediciones de ondulación de superficie de banda en línea integradas en una línea de galvanizado (en planta)

### 8.1. Montaje mecánico, ajuste de sensor

Con el fin de integrar adecuadamente el prototipo en la línea, algunas características específicas se definen de acuerdo con los requisitos de los dispositivos y de los ensayos previos en planta:

- 40 - el eje óptico del dispositivo debe pasar a través del centro del rodillo delante del cual se colocaría (figura 13); también es posible trabajar sobre una superficie que no esté delante de un rodillo si el nivel y la frecuencia de la variación de la amplitud no son demasiado altos;

- el sensor debe ser colocado de manera que no tenga su propia vibración de amplitud alta.

Después de la instalación, la posición global se ajusta mediante el uso de la señal de sensor de distancia y de las mesas de posicionamiento que soportan el núcleo del sensor. Esta señal es mínima cuando el eje óptico es perpendicular a la superficie de rodillo.

5 Para facilitar los siguientes ajustes del sensor en línea, se han compuesto algunos algoritmos (figura 14). La primera parte de este software se refiere al montaje por stitching. Un parámetro de enfoque se calcula en 6 zonas de cada imagen: esquina superior izquierda, parte media superior, esquina superior derecha, esquina inferior izquierda, parte media inferior, esquina inferior derecha (no se muestra). El término "superior", significa por encima de la línea proyectada, e "inferior" significa por debajo de la línea. El promedio en todas las imágenes de base también se  
10 calcula para cada zona. Esto ayuda a evaluar si el sistema está bien enfocado.

Los parámetros correspondientes de "desplazamiento longitudinal", "desplazamiento transversal" y "factor de correlación", referentes al montaje por stitching entre 2 imágenes consecutivas se muestran en gráficos (figura 14). El desplazamiento longitudinal es a lo largo de la dirección de laminación, el transversal es perpendicular a la dirección de laminación (la línea se proyecta a lo largo de la dirección de laminación). Esto ayuda a evaluar la  
15 calidad del montaje por stitching. Si hay presentes variaciones de desplazamiento, esto significa una zona de búsqueda original mala para el montaje por stitching o también puede ser un problema de enfoque o de calidad de la imagen de fondo.

Si el desplazamiento transversal es demasiado alto, esto destaca una gran inclinación de la cámara. Esto debe ser corregido mediante la inclinación de la cámara. Incluso con una pequeña profundidad de enfoque, la imagen  
20 resultante no aparece borrosa. Esta solución mejora la calidad de la línea, pero da como resultado una pequeña pérdida de precisión en la medición debido a la inclinación. Se trata de un compromiso entre un buen factor de llenado y una mejor precisión. El procesamiento de imagen tiene que ser adaptado ligeramente para tener en cuenta la inclinación y la alta reflectividad del producto.

La segunda parte se refiere al análisis de perfil y de ese modo, también al montaje por stitching. El perfil de línea se busca mediante el procesamiento de imagen en la imagen montada por stitching y luego se analiza para obtener los  
25 perfiles de Ra y de Wa. Entonces, como ya se ha explicado, los espectros de estos perfiles se calculan para comprobar si existe o no un pico en la longitud del montaje por stitching. Se recuerda que la presencia de este pico es significativa de una desalineación de la línea proyectada.

## 8.2. Muestras de la cola

30 Durante la medición en una planta, las muestras tomadas de las bobinas se han medido con un perfilador de referencia de lápiz óptico mecánico.

La figura 15 muestra que aparece una clara correlación y las variaciones están en +/- 10% en relación a la Wa medido con un perfilador Talysurf (TS Wa). El factor de correlación es de 0,71, y está influenciado por la pequeña gama de datos (de 0,28 a 0.42  $\mu\text{m}$ ).

## 35 8.3. Confirmación de mediciones en bobinas específicas

Una gran cantidad de bobinas se han investigado durante la campaña. Esto ha sido utilizado, junto con muestras al final de las bobinas para comprobar las mediciones Wavimeter® en comparación con datos mecánicos durante la  
40 variación de los parámetros de producción, tales como la fuerza total en el paso de la capa (representado por círculos en la figura 16). Los triángulos, que hacen referencia a los datos del Wavimeter®, siguen de cerca a los cuadrados, que hacen referencia a los datos de los lápices ópticos mecánicos. Esta figura muestra dos niveles bien diferenciados de Wa seguidos de cerca por el Wavimeter®. Esto confirma el cambio de medición de acuerdo con las variaciones debidas a las condiciones de proceso.

**REIVINDICACIONES**

1. Sensor de microscopio para llevar a cabo un método para medir sin contacto la ondulación ( $W_a$ ), con un valor de corte elevado de 5 mm, de una superficie en movimiento, que comprende:
  - 5 - un microscopio industrial que tiene un aumento adecuado para obtener un campo de visión de imagen en el intervalo de 1.000  $\mu\text{m}$  y/o una resolución de al menos 0.5  $\mu\text{m}$ , una distancia de trabajo mayor de 10 mm y una profundidad de campo mayor de 15  $\mu\text{m}$ ;
  - 10 - una fuente de láser pulsado en el orden de nanosegundos con una frecuencia de al menos  $V/(\text{FOV}\cdot O)$  en  $\text{s}^{-1}$ , donde V es la velocidad máxima de la superficie, en m/s, FOV es el campo de visión en la dirección de desplazamiento, en m y O es la superposición entre imágenes consecutivas en m, para emitir un haz a través de fibra óptica para proyectar una línea micrométrica superpuesta a una iluminación de fondo, siendo dicha línea proyectada sustancialmente paralela a la dirección de desplazamiento;
  - un acoplamiento de fibras para acoplar cada fibra óptica al láser usando una lente plano-convexa diseñada para enfocar sustancialmente todo el haz láser en el núcleo de la fibra;
  - 15 - una cámara matricial de alta velocidad que tiene al menos la misma frecuencia que la frecuencia del láser, un campo de visión de al menos 600  $\mu\text{m}$  y una óptica adecuada con una resolución espacial de preferiblemente 0,5  $\mu\text{m}$ ;
  - un medio de enfoque que comprende un sensor de distancia;
  - al menos una mesa de posicionamiento de alta precisión para el enfoque;
  - un medio de control electrónico para la sincronización externa de la cámara y el láser y para recalcular la frecuencia de la señal de sincronización en tiempo real;
  - 20 - medios de hardware y software para cooperar con la cámara matricial para capturar a alta frecuencia una pluralidad de imágenes individuales de la superficie en movimiento con una superposición lateral, obteniéndose cada una de dichas imágenes en una iluminación de fondo, calculando un perfil de la superficie a partir de la deformación de una línea láser proyectada sobre la superficie según un ángulo dado, y sustancialmente paralela a la dirección de desplazamiento; para montar por stitching imágenes consecutivas, y para el ajuste de línea, a fin de obtener un perfil de superficie en bruto de la longitud del perfil nominal definido por un valor de frecuencia de corte elevado; para filtrar el perfil de superficie en bruto, a fin de separar los datos de rugosidad y de ondulación y para calcular los parámetros de rugosidad y de ondulación.
2. Sensor de acuerdo con la reivindicación 1, caracterizado por que el medio para filtrar el perfil comprende un filtro de tipo Gaussiano de magnitud "n", siendo n un número entero.
- 30 3. Sensor de acuerdo con la reivindicación 1, caracterizado por que comprende un medio para sincronizar la frecuencia de captura con la velocidad de la superficie en movimiento.
4. Sensor de acuerdo con la reivindicación 1, caracterizado por que el medio para montar por stitching imágenes consecutivas comprende un modelo de transformación que comprende una traslación calculada entre dos imágenes consecutivas utilizando una técnica de correlación y un algoritmo de FFT.
- 35 5. Sensor de acuerdo con la reivindicación 4, caracterizado por que comprende un medio para evaluar un vector de traslación que comprende una iluminación de fondo con ventanas secundarias que no contienen la línea láser.
6. Sensor de acuerdo con la reivindicación 1, caracterizado por que comprende un medio para ajustar las direcciones de la proyección de línea y del eje óptico de la cámara.
- 40 7. Sensor de acuerdo con la reivindicación 6, caracterizado por que comprende un medio para ajustar la orientación de la cámara, a fin de que el desplazamiento de montaje por stitching perpendicular a la dirección de desplazamiento esté cerca de cero píxeles.
8. Sensor de acuerdo con la reivindicación 6, caracterizado por que comprende un medio para ajustar la línea proyectada a la dirección de desplazamiento que comprende una mesa de rotación de alta precisión combinada con un análisis de FFT, para obtener la extinción del pico de FFT en la longitud de montaje por stitching.
- 45 9. Sensor de acuerdo con la reivindicación 1, caracterizado por que comprende un medio para realizar una iluminación de fondo y una proyección de línea láser homogéneas.

10. Sensor de acuerdo con la reivindicación 1, caracterizado por que comprende un medio para inclinar el eje óptico del sensor de microscopio alrededor del plano perpendicular a la superficie según un ángulo comprendido entre 4 y 24 grados, de preferencia entre 12 y 18 grados.

5 11. Método para medir sin contacto la ondulación ( $W_a$ ) de una superficie en movimiento, en base al uso del sensor de microscopio de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, usando una longitud mínima de perfil de superficie y valores de frecuencia de corte elevado y bajo correspondientes, siendo dicha longitud mínima de perfil de superficie al menos 6 veces el valor de corte elevado, siendo el valor de corte elevado igual a 5 mm, comprendiendo el método los pasos de:

10 - capturar a alta frecuencia, mediante una cámara de alta velocidad, una pluralidad de imágenes individuales de la superficie con una superposición lateral, obteniéndose dichas imágenes mediante un método de triangulación a alta resolución en el que, para cada imagen, en una iluminación de fondo, un perfil de la superficie se calcula mediante el análisis de la deformación de una línea láser proyectada en la superficie según un ángulo dado, siendo dicha línea proyectada sustancialmente paralela a la dirección de desplazamiento;

15 - montar por stitching dicha pluralidad de imágenes unas con otras para obtener una imagen montada por stitching correspondiente a un perfil que tiene una longitud al menos igual a dicha longitud de perfil mínima; y

- filtrar dicho perfil mediante el análisis de la imagen montada por stitching; caracterizado por que la línea proyectada se ajusta a la dirección de desplazamiento mediante el uso de una mesa de rotación de alta precisión combinado con un análisis de FFT, para obtener la extinción del pico de FFT en la longitud de montaje por stitching.

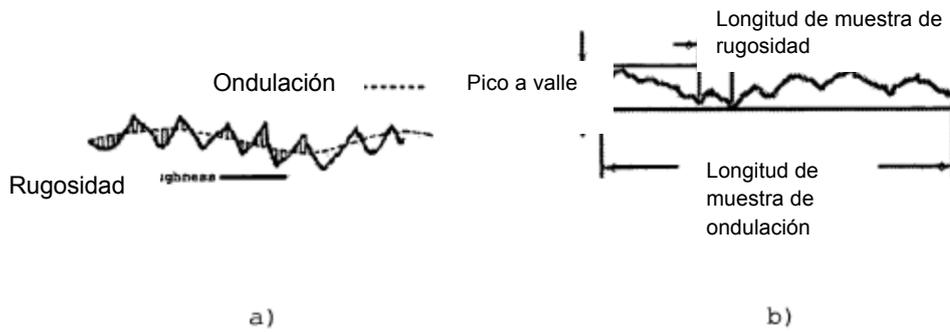


FIG. 1

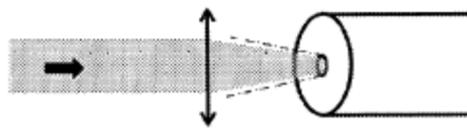


FIG. 2

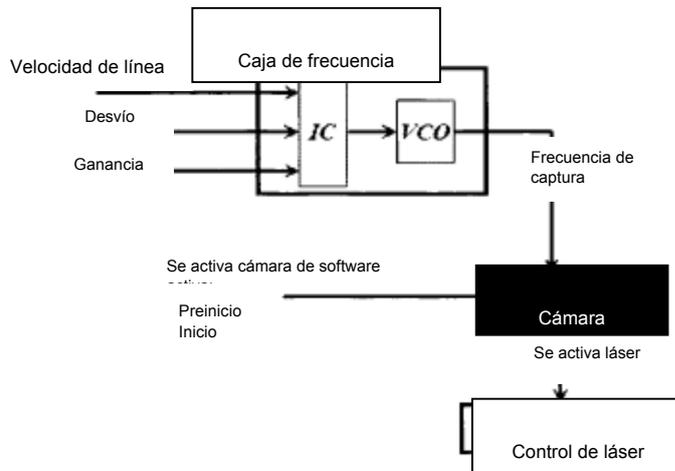


FIG. 3

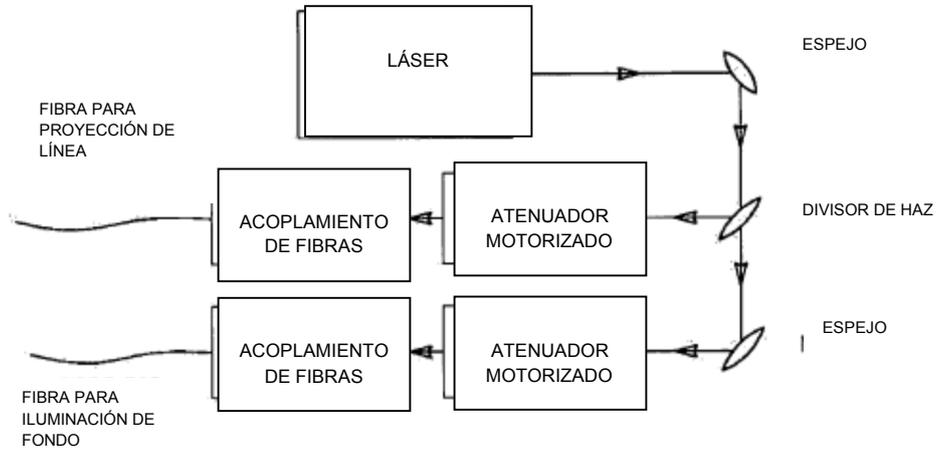


FIG. 4

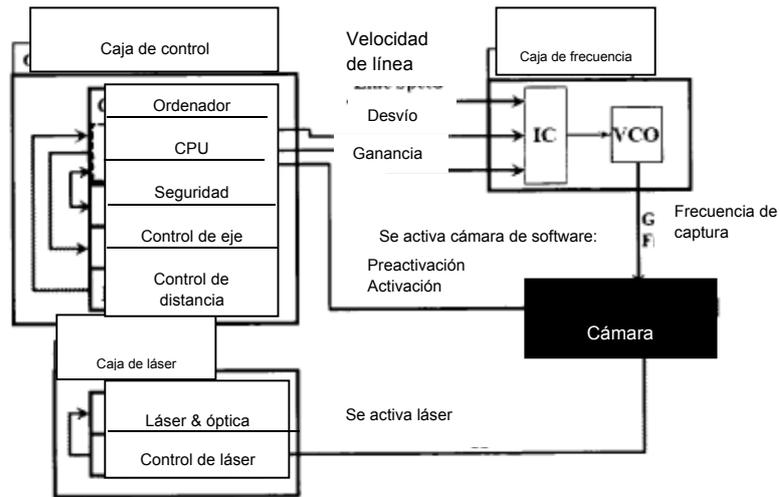


FIG. 5

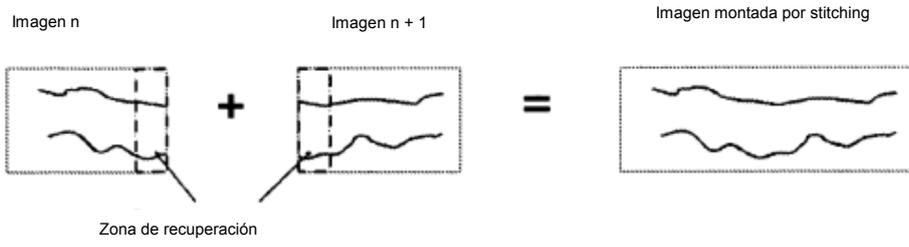


FIG. 6

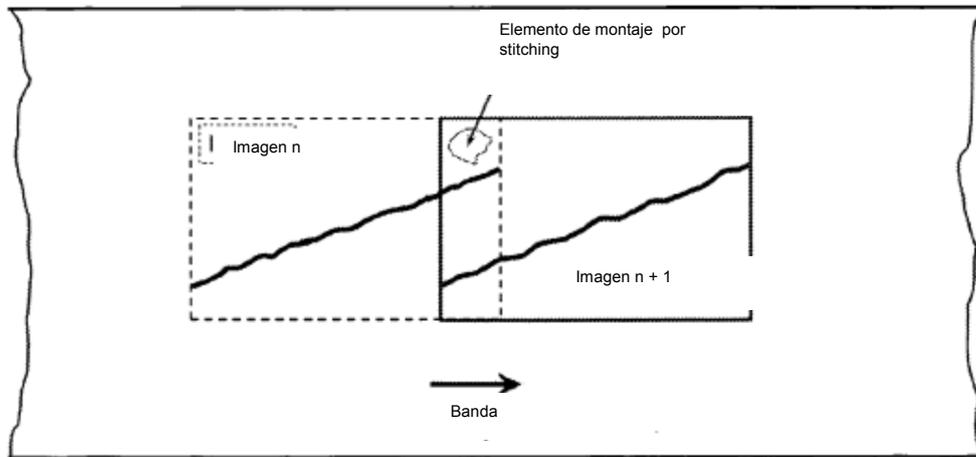


FIG. 7

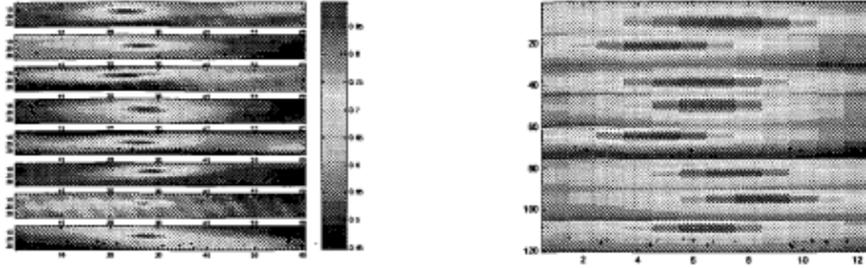


FIG. 8



FIG. 9

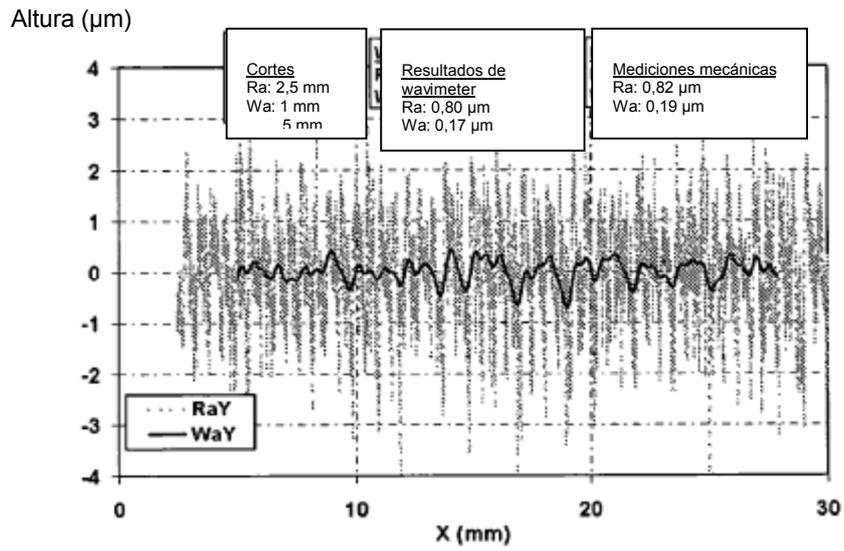


FIG.10

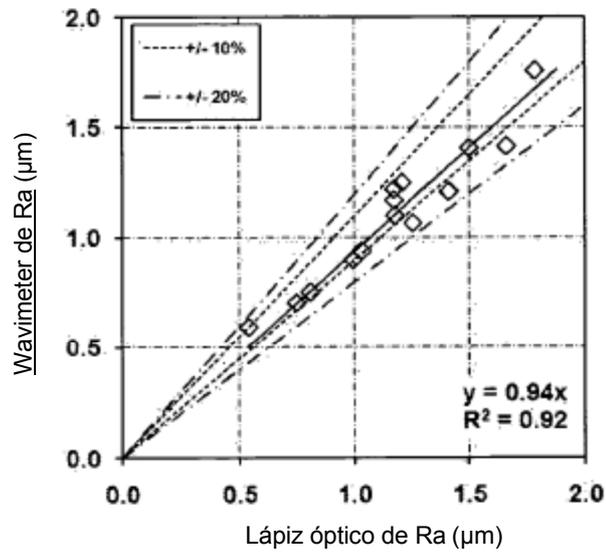


FIG.11

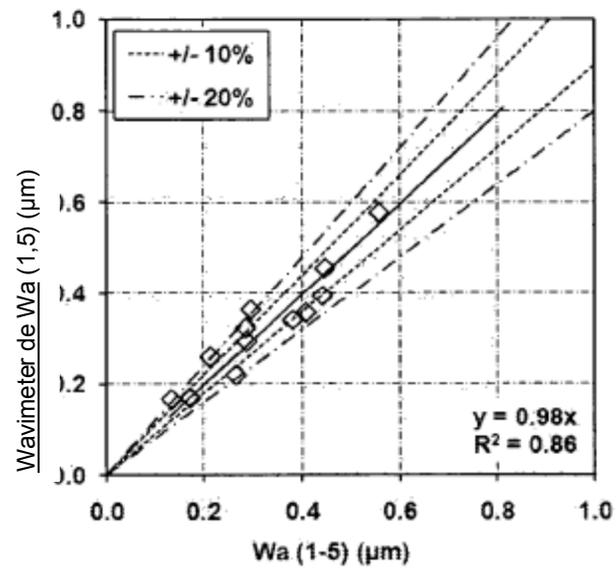


FIG. 12

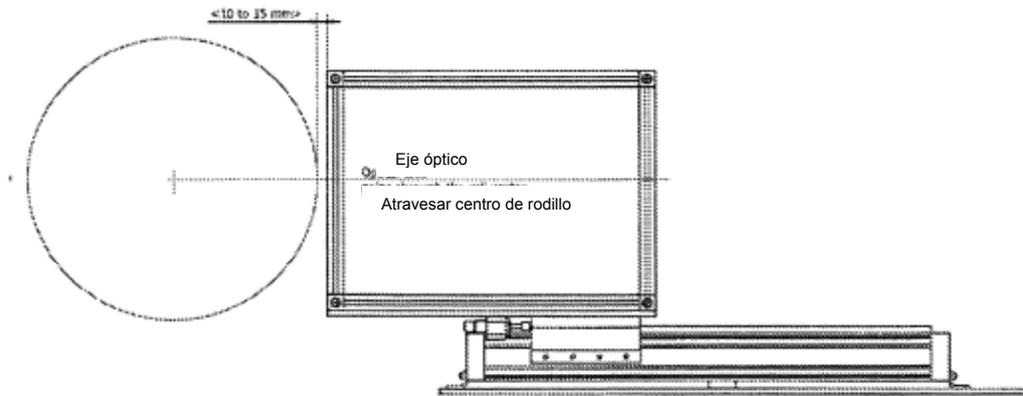


FIG. 13

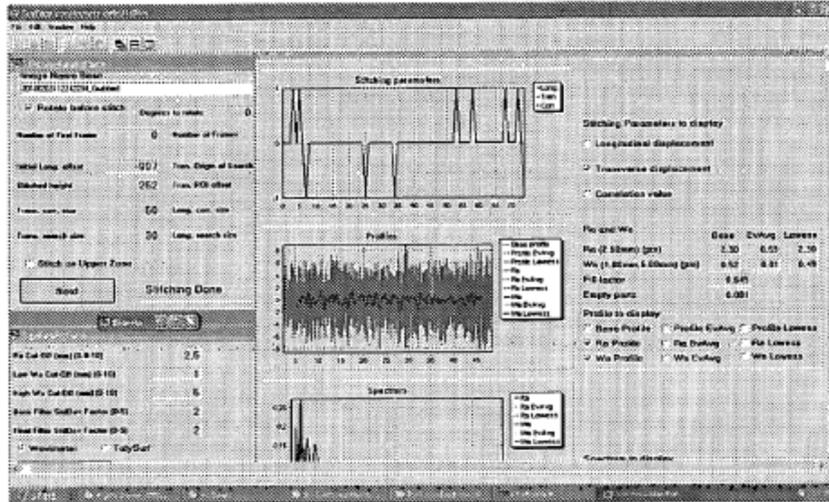


FIG. 14

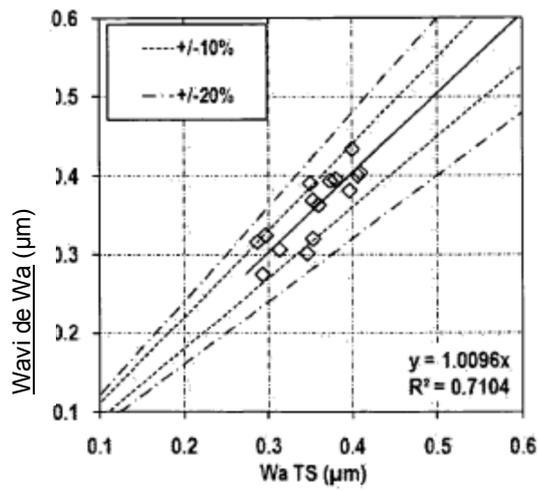


FIG. 15

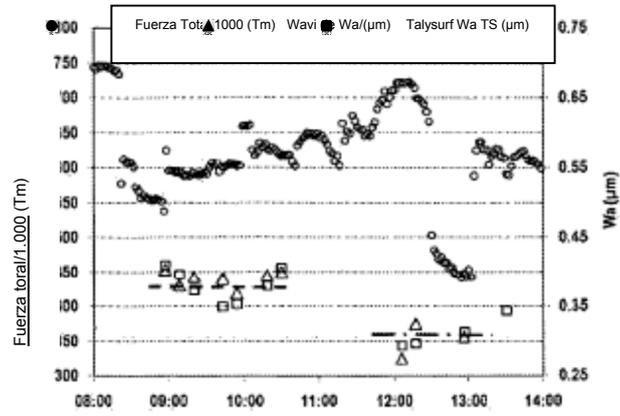


FIG. 16