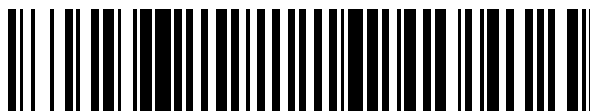


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 702 023**

51 Int. Cl.:

G01B 11/24

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **16.10.2015** **PCT/EP2015/074011**

87 Fecha y número de publicación internacional: **26.05.2016** **WO16078841**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **16.10.2015** **E 15787916 (4)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **19.09.2018** **EP 3221660**

54 Título: **Procedimiento y dispositivo de caracterización en tres dimensiones de una superficie de un objeto**

30 Prioridad:

21.11.2014 FR 1461310

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

27.02.2019

73 Titular/es:

**SYNCHROTRON SOLEIL (100.0%)
CEA Saclay l'Orme des Merisiers
91190 St Aubin, FR**

72 Inventor/es:

**KUBSKY, STEFAN;
LESTRADE, ALAIN;
JOBERT, NICOLAS;
ENGBLOM, CHRISTER y
ALVES, FILIPE**

74 Agente/Representante:

ELZABURU, S.L.P

ES 2 702 023 T3

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

DESCRIPCIÓN

Procedimiento y dispositivo de caracterización en tres dimensiones de una superficie de un objeto

Dominio Técnico

5 La presente invención se refiere a un procedimiento de caracterización en tres dimensiones de una superficie de un objeto. Se refiere también a un dispositivo que pone en práctica este procedimiento.

10 Tal dispositivo o procedimiento puede permitir por ejemplo a un usuario realizar una topografía o una caracterización en tres dimensiones de una superficie de un objeto con una resolución nanométrica, con caracterización independiente y simultánea de su soporte giratorio. El dominio de la invención es más particularmente pero de manera no limitativa el de la caracterización de la superficie de un objeto típicamente con una resolución en altura inferior a 10 nm y/o la caracterización de la superficie de un objeto destinado a ser colocado con precisión en intersección con un haz de radiación (corpúscular o electromagnético).

Estado de la técnica anterior

Se conocen numerosas tecnologías que permiten caracterizar en tres dimensiones la superficie de un objeto:

- interferometría,
- 15 - captadores capacitivos,
- telemetría láser,
- etc.

El problema real con todas estas tecnologías es que poseen todas un defecto y que no se puede encontrar un compromiso ideal entre:

- 20 - el área de cobertura de la caracterización,
- la resolución espacial de la caracterización,
- la rapidez a la que es efectuada la caracterización,
- el presupuesto de puesta en práctica.

El documento DE 20 2005 018753 U1 describe un dispositivo de caracterización de un objeto.

25 El propósito de la presente invención es proponer un dispositivo y un procedimiento de caracterización en tres dimensiones de una superficie de un objeto que permita:

- una cobertura grande de la caracterización del objeto (de preferencia en 360° alrededor del objeto), y
- una buena resolución espacial de la caracterización (de preferencia inferior a 10 nm), y
- una buena rapidez a la que la caracterización es efectuada (de preferencia 30 minutos o menos),
- 30 todo eso simultáneamente, y todo limitando tanto como sea posible el presupuesto de puesta en práctica.

Exposición de la invención

Este objetivo es alcanzado con un procedimiento de caracterización en tres dimensiones de un objeto que comprende:

- un suministro del objeto,
- una adquisición de datos de distancias que comprenden:
 - 35 ○ para al menos dos planos de medición distintos, estando equipado cada plano de medición con al menos tres captadores de distancia que rodean al objeto, y
 - para cada captador de distancia de cada plano de medición,

una medición de un dato de distancia representativo de una distancia entre una superficie exterior del objeto y este captador de distancia medida en el plano de medición del captador,

- 40 - una reiteración de la adquisición de datos de distancias para varios valores de rotación del objeto alrededor de un eje de rotación con relación a un sistema de referencia de distancia en el que los captadores de distancia son fijos,

- para cada plano de medición, una obtención de datos representativos de una línea de contorno del objeto a partir de los datos de distancias medidas por todos los captadores de este plano de medición y para diferentes valores de rotación del objeto alrededor de su eje de rotación, estando contenida la línea de contorno en este plano de medición, (comprendiendo dicha obtención de datos representativos de una línea de contorno de preferencia una toma en cuenta de una variación de inclinación y/o de traslación del eje de rotación en el sistema de referencia de distancia durante adquisiciones de datos de distancia),

- para cada plano de medición entre al menos uno de los planos de medición, una adquisición, por un captador de imagen, de una imagen tridimensional de una cara del objeto, siendo formada la imagen de este plano de medición sobre esta imagen tridimensional, y una reiteración de esta adquisición de imagen para varios valores de rotación del objeto alrededor de su eje de rotación frente a este captador de imagen en un sistema de referencia de imagen en el que el captador de imagen está fijo,

- para cada plano de medición que ha sido el objeto de adquisición de imágenes tridimensionales, un ensamblaje de diferentes imágenes tridimensionales adquiridas para este plano de medición, de manera que se obtengan datos tridimensionales de una superficie de contorno del objeto, comprendiendo el ensamblaje una definición de posiciones relativas de las diferentes imágenes por medio de los datos representativos de la línea de contorno contenida en este plano de medición.

La definición de las posiciones relativas de las imágenes tridimensionales puede comprender, para cada imagen tridimensional de un plano de medición, un algoritmo de mínimos cuadrados que minimizan una desviación entre:

- los datos representativos de la línea de contorno del objeto contenido en este plano de medición, y

- esta imagen tridimensional de este plano de medición.

El procedimiento según la invención puede comprender, antes del ensamblaje de las diferentes imágenes tridimensionales, una orientación de cada imagen tridimensional con relación a las otras imágenes tridimensionales, siendo determinada esta orientación en función de una variación de inclinación del objeto con relación al sistema de referencia de imagen durante la adquisición de estas diferentes imágenes tridimensionales.

El objeto puede extenderse a lo largo de un eje de elongación, formando el eje de elongación y el eje de rotación de preferencia un ángulo inferior a 0,01 rad, de manera aún más preferente inferior o igual a 0,005 rad.

El objeto puede ser montado sobre un soporte térmicamente estabilizado y montado en rotación alrededor del eje de rotación, comprendiendo el procedimiento de preferencia además una verificación de la estabilización de una temperatura del objeto con variaciones de temperatura por debajo de un umbral de desviación de temperatura.

Cada captador de imagen puede comprender un interferómetro de luz blanca y/o microscopio de contraste de foco.

Los captadores de distancia pueden ser captadores interferométricos y los datos de distancias son datos interferométricos.

Los captadores de distancia y el captador de imagen son de preferencia solidarios de un mismo bastidor, estando montado el objeto sobre una platina de desplazamiento dispuesta para la rotación del objeto alrededor del eje de rotación con relación a este bastidor.

Según aún otro aspecto de la invención, se ha propuesto un dispositivo de caracterización, que comprende:

- una zona de objeto,

- medios para adquirir datos de distancias, estando repartidos estos medios de adquisición de datos de distancias sobre al menos dos planos de medición distintos, estando equipado cara plana de medición de al menos tres captadores de distancia que rodean la zona de objeto, estando dispuesto cada captador de distancia para medir en su plano de medición un dato de distancia representativo de una distancia entre:

- una superficie exterior de un objeto dispuesto en la zona de objeto siendo solidaria de la zona de objeto y
- este captador de distancia

y ello para diferentes valores de rotación de la zona de objeto alrededor de un eje de rotación con relación a un sistema de referencia de distancia en el que los captadores de distancia están fijos,

- para cada plano de medición, medios para obtener datos representativos de una línea de contorno del objeto a partir de datos de distancias adquiridos que comprenden datos de distancias medidas por todos los captadores de este plano de medición y para diferentes valores de rotación de la zona de objeto alrededor de su eje de rotación, estando contenida esta línea de contorno en este plano de medición (estando de preferencia dispuestos los medios de obtención de datos representativos de una línea de contorno para una toma en cuenta de una variación de inclinación y/o de traslación del eje de rotación en el sistema de referencia de distancia durante adquisiciones de los datos de distancia),

- 5 - para cada plano de medición entre al menos uno de los planos de medición, un captador de imagen dispuesto para adquirir una imagen tridimensional de una cara del objeto dispuesto en la zona de objeto, estando formada la imagen de este plano de medición sobre esta imagen tridimensional, estando dispuesto el captador de imagen para reiterar la adquisición de imagen para varios valores de rotación de la zona de objeto alrededor de su eje de rotación frente a este captador de imagen en un sistema de referencia de imagen en el que el captador de imagen está fijo,
- 10 - para cada plano de medición entre al menos uno de los planos de medición, medios para ensamblar diferentes imágenes tridimensionales adquiridas para este plano de medición, de manera que obtengan datos tridimensionales de una superficie de contorno del objeto, estando dispuestos los medios de ensamblaje para definir las posiciones relativas de las diferentes imágenes por medio de los datos representativos de la línea de contorno contenida en este plano de medición.
- Los medios de ensamblaje pueden estar dispuestos para que la definición de las posiciones relativas de las imágenes tridimensionales comprendan, para cada imagen tridimensional de un plano de medición, un algoritmo de los mínimos cuadrados que minimiza una desviación entre:
- 15 - los datos representativos de la línea de contorno del objeto contenido en este plano de medición, y
- 15 - esta imagen tridimensional de este plano de medición.
- El dispositivo según la invención puede comprender medios dispuestos para, antes de un ensamblaje de diferentes imágenes tridimensionales, orientar cada imagen tridimensional con relación a las otras imágenes tridimensionales en función de una variación de inclinación de la zona de objeto con relación al sistema de referencia de imagen durante la adquisición de estas diferentes imágenes tridimensionales.
- 20 El dispositivo según la invención puede comprender un soporte para la zona de objeto, estando montado dicho soporte en rotación alrededor del eje de rotación, comprendiendo dicho soporte medios de estabilización térmica, comprendiendo el dispositivo de preferencia además medios de verificación de la estabilización de una temperatura de la zona de objeto con variaciones de temperatura por debajo del umbral de desviación de temperatura.
- Cada captador de imagen puede comprender un interferómetro de luz blanca y/o un microscopio de contraste de foco.
- 25 Los captadores de distancia son de preferencia captadores interferométricos y los datos de distancia son de referencia datos interferométricos.
- Los captadores de distancia y el captador de imagen son de preferencia solidarios de un mismo bastidor, estando montada la zona de objeto sobre una platina de desplazamiento dispuesta para la rotación de la zona de objeto alrededor del eje de rotación con relación a este bastidor.
- 30 **Descripción de las figuras y modos de realización**
- Otras ventajas y particularidades de la invención aparecerán con la lectura de la descripción detallada de puestas en práctica y de modos de realización en ninguna forma limitativos, y de los dibujos adjuntos siguientes:
- 35 - la figura 1 es una vista de perfil de un primer modo de realización del dispositivo 1 según la invención, que es el modo de realización preferido de la invención,
- la figura 2 es una vista desde arriba del dispositivo 1 según la invención,
- la figura 3 es una vista de perfil del soporte 3 situado en el centro del dispositivo 1 según la invención, comprendiendo este soporte 3 platinas de micro-desplazamientos en traslación y en rotación, y llevando un objeto 5 a caracterizar,
- la figura 4 ilustra una línea de contorno del objeto 5 en un plano de medición 81 u 82 visto desde arriba,
- 40 - la figura 5 ilustra un ejemplo de objeto 5 a caracterizar y las posiciones de los dos planos de medición 81, 82 y de captadores de imágenes 15, 151, 152 con relación a este objeto 5,
- la figura 6 es una vista desde arriba del objeto 5 y de varias imágenes 191 a 196 adquiridas por el captador de imagen 151 o 152,
- la figura 7 ilustra la imagen 191 « vista desde arriba » adquirida por el captador de imagen 151 o 152,
- la figura 8 ilustra la imagen 191 « vista de frente » adquirida por el captador de imagen 151 o 152,
- 45 - la figura 9 ilustra la imagen 192 « vista desde arriba » adquirida por el captador de imagen 151 o 152,
- la figura 10 ilustra la imagen 192 « vista de frente » adquirida por el captador de imagen 151 o 152,
- la figura 11 ilustra el ensamblaje de las imágenes 191 y 192,

- la figura 12 ilustrar diferentes posiciones 38, 39 del objeto 5 en rotación alrededor del eje de rotación 4, para una primera posición de las platinas de posicionamiento 35, 36 de la figura 3, y

- la figura 13 ilustra diferentes posiciones 40, 41 del objeto 5 en rotación alrededor del eje de rotación 4, para una segunda posición de las platina de posicionamiento 35, 36 de la figura 3.

- 5 Al ser estos modos de realización nada limitativos en absoluto, se podrá en particular considerar variantes de la invención que no comprenden más que una selección de características descritas o ilustradas a continuación aisladas de las otras características descritas o ilustradas (incluso si esta selección está aislada en el seno de una frase que comprende estas otras características), si esta selección de características es suficiente para conferir una ventaja técnica o para diferenciar la invención con relación al estado de la técnica anterior. Esta selección comprende al menos una característica de preferencia funcional sin detalles estructurales, y/o solamente con una parte de los detalles estructurales si esta parte únicamente es suficiente para conferir una ventaja técnica o para diferenciar la invención con relación al estado de la técnica anterior.

Se va a describir a continuación, con referencia a las figs. 1 a 13, un modo de realización preferente del dispositivo 1 según la invención para caracterizar en tres dimensiones un objeto 5.

- 15 El dispositivo 1 consiste en una combinación ventajosa de métodos ópticos y digitales: se ha concebido un dispositivo circular que lleva un cierto número de captadores interferométricos 7 dispuestos en dos niveles 81, 82 distantes en algunos milímetros, a razón de al menos tres captadores 7 por nivel, más una medida de altura (por un captador de altura 25).

En el centro de este dispositivo 1 se encuentra un soporte o sistema 3 de nano posicionamiento con:

- 20 - tres ejes lineales (XYZ),
- un medio de rotación 31 en el plano horizontal y
- una platina lineal XY horizontal,

llevando el soporte 3 un conjunto constituido:

- por un objeto 5 porta-muestras, y
25 - por una muestra 23 llevada por el objeto 5,

estando montado este conjunto sobre el medio de rotación 31 alrededor de un eje 4.

- En esta configuración los captadores interferométricos 7 pueden barrer la superficie del conjunto 5, 23 angularmente paso a paso. Pueden medir además la, convolución entre la forma del conjunto 5, 23 y los errores de la rotación. Para mejorar la precisión y para poder modelar realmente el conjunto, incluso para muestras 23 no reflectantes, se utilizan de manera complementaria en el mismo dispositivo circular dos métodos ópticos: al menos un captador 15 que comprende un interferómetro de luz blanca (WLI) y un microscopio de contraste de foco, estando adaptado este último a las muestras 23 estructuradas pero no reflectantes. Estos dos métodos ópticos están integrados en un ensamblaje que se parece a un microscopio óptico. Otros métodos complementarios, tal como por ejemplo el nano-GPS (Horiba Jobin-Yvon), pueden ser integrados en el dispositivo 1 así como en el proceso de tratamiento de datos.

- 35 Los diferentes captadores 7, 15 permiten hacer una cartografía del conjunto 5, 23. Por el contrario es necesario deshacer la convolución de las contribuciones que provienen de los errores (reproducibles y no reproducibles) geométricos de la rotación (alrededor del eje 4) de aquellas que son fijas y que representan la forma exterior del conjunto 5, 23. Para este enfoque se llega a describir digitalmente a) el conjunto 5, 23 y b) los errores del medio de rotación 31.

- 40 De manera más detallada, el dispositivo 1 comprende una zona de objeto 2. Esta zona de objeto está situada aproximadamente en el centro del dispositivo 1.

El dispositivo 1 comprende el soporte 3 para la zona de objeto.

La zona de objeto 2 está dispuesta para acoger el objeto 5 de manera que este objeto 5 esté en contacto y sea solidario del soporte 3.

El soporte 3 está montado a rotación alrededor del eje de rotación 4.

- 45 El soporte 3 (ilustrado en la figura 3) comprende el medio de rotación 31 que es una platina 31 de rotación alrededor del eje 4, de referencia Smaract modelo SR2812 y de paso angular inferior o igual a 0,018 rad.

El soporte 3 comprende:

- una platina 32 de desplazamiento según un eje horizontal X, de referencia AEROTECH modelo ANT95 y que tiene un paso de 1 nm,

- una platina 33 de desplazamiento según un eje horizontal Y perpendicular al eje X, de referencia Physikalische Instrumente (PI) modelo LPS65 y que tiene un paso de 1 nm,
- una platina 34 de desplazamiento según un eje vertical Z perpendicular a los ejes X e Y, de referencia Physikalische Instrumente (PI) modelo LPS65 y que tiene un paso de 1 nm,
- 5 - una platina 35 de desplazamiento según el eje horizontal X, de referencia Smaract modelo SLC1720 y que tiene un paso de 1 nm, y situada entre el medio de rotación 31 y la zona 2 o el objeto 5,
- una platina 36 de desplazamiento según el eje horizontal Y perpendicular al eje X, de referencia Smaract modelo SLC1720 y que tiene un paso de 1 nm, y situada entre el medio de rotación 31 y la zona 2 o el objeto 5.
- 10 El soporte 3 (y el bastidor 17) está provisto de medio de estabilización térmica, que comprenden por ejemplo varios elementos calentadores. Cada elemento calentador es por ejemplo una hoja de calefacción de 60×47 mm² (marca: THERMO, denominación Thermo Follen Heizung60X47). Cada elemento calentador está colocado lo más cerca posible de una fuente de calor que le está asociada entre los captadores ópticos integrados así como los motores de las platinas 31 a 36, y este elemento calentador calienta únicamente cuando la fuente de calor a la que está asociado no funciona o no calienta por encima de un cierto umbral.
- 15 El dispositivo 1 comprende medios 6 para adquirir datos de distancias que comprenden varios captadores 7.
- Los medios 6 de adquisición de datos de distancias están repartidos sobre al menos dos planos de medición distintos 81 y 82.
- Dos planos de mediciones contiguos 81, 82 están típicamente distantes a lo largo del eje Z en una distancia comprendida entre 3 y 6 milímetros.
- 20 Cualquiera que sea su número, los planos de mediciones 81, 82 son paralelos.
- Cada plano 81, 82 es paralelo a los ejes X e Y.
- El eje de rotación 4 es sensiblemente vertical.
- Cada plano de medición 81, 82 es horizontal.
- 25 Cada plano de medición 81 u 82 es sensiblemente perpendicular al eje de rotación 4. Más exactamente, el eje de rotación 4 es sensiblemente perpendicular a cada plano de medición 81, 82 a más o menos 10 mili radianes y permanece así.
- 30 Cada plano de medición 81, 82 está equipado de al menos tres (de preferencia al menos cuatro) captadores 7 de distancia (referenciados 71 para el plano 81 y 72 para el plano 82) que rodean la zona de objeto 2. Cada captador de distancia (respectivamente 71 o 72) está dispuesto para medir (por interferometría) en su plano de medición (respectivamente 81 u 82) un dato de distancia representativo de una distancia contenida en este plano (respectivamente 81 u 82) entre:
 - una superficie exterior del objeto 5 dispuesta en la zona de objeto 2 que es solidaria de la zona de objeto 2, y
 - este captador de distancia (respectivamente 71 o 72)
- 35 y ello para diferentes valores de rotación de la zona de objeto 2 y por tanto el objeto 5 alrededor del eje de rotación 4 con relación a un sistema de referencia de distancia 9 (definido por los ejes ortogonales X, Y y Z) en el que los captadores de distancia 71 y 72 son fijos.
- Dicho de otro modo, cada captador 71 o 72 mide la distancia entre él mismo y la superficie exterior del objeto 5 en su plano de medición 81 u 82.
- 40 Cada captador 7 de distancia es un captador « puntual » o unidireccional, que proporciona no una información con dos o tres dimensiones espaciales, sino una información según únicamente una dimensión espacial, más exactamente una distancia entre una superficie exterior del objeto 5 y este captador de distancia 7.
- Cada captador 7 tiene una resolución espacial para esta medición de distancia (entre una superficie exterior del objeto 5 y este captador de distancia) inferior a 10 nm, idealmente inferior a 1 nm.
- Cada captador 7 comprende un interferómetro que comprende:
 - 45 - una cabeza « pasiva » (colimador - focalizador) "Attocube standard" para el plano de medición inferior 82 y "Attocube flexure head" para el plano de medición superior 81, y
 - una caja FPS3010 (unidad de control) de la marca Attocube unida a la cabeza « pasiva » por una fibra óptica.

Cada captador 7 tiene un diámetro de integración (típicamente tamaño de punto para la medida interferométrica) sobre el objeto 5 típicamente inferior a 100 μm .

Los captadores 7, 71, 72 de distancia son captadores interferométricos (típicamente en el infrarrojo) y los datos de distancias son datos interferométricos.

- 5 El dispositivo 1 comprende medios de cálculo y de control 10. Los medios 10 son medios técnicos, y comprenden al menos un ordenador, una unidad central o de cálculo, un circuito electrónico analógico (de preferencia dedicado), un circuito electrónico digital (de preferencia dedicado) y/o un microprocesador (de preferencia dedicado), y/o medios de software. De manera más detallada, los medios 10 comprenden un ordenador 26 provisto de una tarjeta gráfica 37.

- 10 El dispositivo 1 comprende, para cada plano de medición (respectivamente 81 u 82), medios 11 para obtener datos representativos de una línea de contorno 14 del objeto 5 a partir de datos de distancias adquiridos por los medios 6, comprendiendo estos datos, datos de distancias medidas por todos los captadores (respectivamente 71 o 72) de este plano de medición (respectivamente 81 u 82) y para diferentes valores de rotación de la zona de objeto 2 y por tanto del objeto 5 alrededor de su eje de rotación 4. Esta línea de contorno 14 (ilustrada en la figura 4) está contenida en este plano de medición (respectivamente 81 u 82), y delimita la totalidad o parte de la superficie exterior del objeto 5 en este plano de medición (respectivamente 81 u 82). La línea de contorno 14 en el plano 81 u 82 es de preferencia un bucle cerrado que da toda la vuelta al objeto 5 a 360° alrededor del eje 4, pero puede en una versión más limitada, no seguir más que una parte de interés de la superficie exterior del objeto 5 en el plano 81 u 82.

Los medios 11 comprenden típicamente los medios 10 de cálculo y de mando.

- 20 Los medios 11 de obtención de datos representativos de una línea de contorno 14 están dispuestos para una toma en cuenta de una variación de inclinación y/o de traslación del eje de rotación 4 (o del objeto 5 o de la zona 2) en el sistema de referencia de distancia 9 durante la adquisición de los datos de distancia en particular durante la rotación de la zona 2 o del objeto 5 alrededor del eje 4. Esta variación de inclinación y/o de traslación en el sistema de referencia de distancia 9 es debida a las imperfecciones del medio de rotación 31 típicamente a la escala del nanómetro o de algunos nanómetros.

- 25 La variación de inclinación del eje de rotación 4 en el sistema de referencia 9 tiene de preferencia una amplitud inferior a 5 μ radianes para un grupo de N medidas de distancia por un captador 71 o 72.

La variación de traslación del eje de rotación 4 en el sistema de referencia de distancia 9 tiene de preferencia una amplitud inferior a 10 micrones para un grupo de N medidas de distancia por un captador 71 o 72.

- 30 El dispositivo 1 comprende, para cada plano de medición (respectivamente 81 u 82) entre al menos uno de los planos de medición, un captador de imagen 15 (respectivamente 151 o 152) dispuesto para adquirir una imagen tridimensional 191 de una cara del objeto 5, estando formada la imagen de este plano de medición (respectivamente 81 u 82) sobre esta imagen tridimensional, estando dispuesto el captador de imagen (respectivamente 151 o 152) para reiterar la adquisición de imágenes tridimensionales 192 a 196 para varios valores de rotación de la zona de objeto 2 y por tanto del objeto 5 alrededor de su eje de rotación 4 frente a este captador de imagen (respectivamente 151 o 152) en un sistema de referencia de imagen 16 en el que el captador de imagen (respectivamente 151 o 152) está fijo.

Cada captador de imagen 151, 152 comprende:

- un interferómetro de luz blanca (WLI) de referencia GBS Ilmenau « Smart WLI » cuya óptica entrada enfrentada al objeto 5 está modificada para tener una larga distancia de trabajo de aproximadamente 20 nm, y

- un microscopio de contraste de foco de marca Phaseview de modelo Zeescan.

- 40 Según el modo de realización, el dispositivo 1 puede comprender (como se ha ilustrado en la figura 5):

- únicamente un captador de imagen 151 fijo para el plano 81, o

- únicamente un captador de imagen 152 fijo para el plano 82, o

- 45 - un captador de imagen 15 móvil a lo largo del eje Z con relación al objeto 5 para al menos dos posiciones a lo largo del eje Z correspondientes a los planos 81 y 82, desempeñando este captador 15 la misión de los dos captadores 151 y 152; en este caso, para desplazar el captador 15 con relación al objeto 5 a lo largo del eje Z, se desplaza el objeto 5 por medio de la platina 34 y se controla la posición del objeto 5 por medio del captador interferométrico 25 de altura que apunta al objeto 5; o

- un captador de imagen 151 fijo para el plano 81 de un captador de imagen 152 fijo para el plano 82 y distinto del captador 151.

- 50 Los captadores de distancia 7, 71, 72 y cada captador de imagen 151, 152 son solidarios de un mismo bastidor 17 y de preferencia inmóviles.

Los sistemas de referencia de distancia 9 y de imagen 16 están confundidos.

La zona de objeto 2 o el objeto 5 está por tanto montado sobre el medio de rotación 31 que está dispuesto para la rotación de la zona de objeto 2 o del objeto 5 alrededor del eje de rotación 4 con relación a este bastidor 17.

El bastidor 17 es por ejemplo de acero inoxidable de 1 a 5 cm de grosor.

- 5 El dispositivo 1 comprende además medios de verificación de la estabilización de una temperatura de la zona de objeto 2 con variaciones por debajo del umbral de desviación de temperatura ΔT . El ΔT es de preferencia inferior o igual a un mili Kelvin. Estos medios de verificación de la estabilización de la temperatura comprenden típicamente varios captadores NTC de tipo Thermistances EPCOS S861/5k/F40 (referencia de constructor B578S502/F/040), y del que posición de cada uno está referenciada 27, 28 o 29:

- 10 - tres captadores 27 sobre el bastidor 17 en posición « baja » (fuerte grosor del bastidor 17 y fuga térmica del « suelo »)
 - tres captadores 28 sobre el bastidor 17 en posición « alta » (débil grosor del bastidor 17)
 - cuatro captadores 29 sobre los medios de desplazamiento 3.

Si cada captador 27, 28, 29 tiene una temperatura medida estable de casi un mili Kelvin, entonces se considera que la zona 2 y el objeto 5 tienen una temperatura eventualmente diferente de los puntos de medición de los captadores 27, 28, 29 pero que es también estable a casi un mili Kelvin.

- 15 Cada captador 27, 28, 29 está dispuesto para verificar una estabilidad de temperatura entre $T_{ref} - \Delta T$ y $T_{ref} + \Delta T$ (pudiendo la temperatura de referencia T_{ref} variar según el punto de medición es decir según el captador 27, 28, 29). Cada captador de temperatura puede tener una temperatura de referencia diferente de la de los otros captadores de temperatura. La temperatura de referencia de cada captador de temperatura puede ser definida como la temperatura medida por este
 20 captador de temperatura al comienzo de una serie de adquisición de datos de distancia por los captadores 7 y de imágenes por el captador 151 y/o 152.

De preferencia, el dispositivo 1 comprende por tanto medios de verificación de la estabilización de los gradientes de temperatura entre varios puntos de medida de temperatura (sobre el dispositivo 1) por debajo del umbral de desviación de temperatura ΔT (típicamente igual a 1 mK).

- 25 El dispositivo 1 comprende medios 12 para, antes de un ensamblaje de diferentes imágenes tridimensionales 191 a 196 adquiridas por el captador 151 o 152, orientar (típicamente en el sistema de referencia de imagen 16) cada imagen tridimensional con relación a las otras imágenes tridimensionales a las que debe ser ensamblada, siendo realizada esta orientación en función de una variación de inclinación de la zona de objeto 2 o del objeto 5 con relación al sistema de
 30 referencia de imagen 16 durante la adquisición de esta diferentes imágenes tridimensionales 191 a 196, en particular durante la rotación de la zona 2 o del objeto 5 alrededor del eje 4. Esta variación de inclinación está definida según los ángulos alrededor de dos ejes perpendiculares, comprendiendo estos dos ejes (ilustrados en la figura 11) el eje óptico 21 (paralelo al plano respectivamente 81 u 82) del captador de imagen (respectivamente 151 o 152) que ha tomado estas imágenes 191 a 196 y un eje 22 perpendicular a este eje óptico 21.

Los medios 12 comprenden típicamente los medios 10 de cálculo y de mando.

- 35 El dispositivo 1 comprende, para cada plano de medición (respectivamente 81 o 82) entre al menos uno de los planos de medición, medios 13 para ensamblar diferentes imágenes tridimensionales 191 a 196 adquiridas (por el captador respectivamente 151 o 152) para este plano de medición (respectivamente 81 u 82), de manera que obtengan datos tridimensionales de una superficie de contorno 18 (ilustrada en la figura 6) del objeto 5, estando dispuestos los medios de
 40 ensamblaje para definir las posiciones relativas de las diferentes imágenes 191 a 196 por medio de los datos representativos de la línea de contorno 14 contenida en este plano de medición (respectivamente 81 u 82). La superficie de contorno 18 es de preferencia una superficie cerrada « en cinta » que da toda la vuelta al objeto 5 a 360° alrededor del eje 4, pero puede en una versión más limitada no seguir más que una parte de interés de la superficie exterior del objeto 5.

Los medios 13 comprenden típicamente los medios 10 de cálculo y de mando.

- 45 Los medios de ensamblaje 13 están dispuestos para que la definición de las posiciones relativas de las imágenes tridimensionales comprenda, para cada imagen tridimensional de un plano de medición (respectivamente 81 u 82), un algoritmo de los mínimos cuadrados que minimizan una desviación entre:

- los datos representativos de la línea de contorno 14 del objeto contenido en este plano de medición (respectivamente 81 u 82), y
 50 - esta imagen tridimensional de este plano de medición (respectivamente 81 u 82).

Se va a describir ahora, siempre con referencia a las figs. 1 a 13, un procedimiento según la invención de caracterización en tres dimensiones del objeto 5 puesto en práctica por el dispositivo 1.

Suministro del objeto 5

Este procedimiento comprende en primer lugar un suministro del objeto 5 en el seno del dispositivo 1.

- 5 Cada línea de contorno 14 y cada superficie de contorno 18 es de preferencia una línea de contorno o una superficie de contorno de una parte de interés del objeto 5, teniendo esta parte de interés una forma modelable por coordenadas cilíndricas (r , ϕ , z) alrededor de un eje de elongación 20 del objeto 5, de manera que para esta parte de interés, para cada altura z dada a lo largo del eje de elongación 20 y para cada ángulo ϕ dado alrededor del eje de elongación en un plano perpendicular a este eje de elongación 20, no existe más que un único valor posible de radio r entre el eje de elongación 20 y la superficie exterior del objeto 5.

- 10 Este objeto 5 tiene una parte que tiene de preferencia casi (es decir con algunas variaciones casi micrométricas) una forma de un cilindro de radio r_0 que se extiende a lo largo del eje de elongación 20 sensiblemente paralelo al eje de rotación 4. El eje de revolución desde cilindro y el eje de rotación 4 están sensiblemente confundidos con algunas imperfecciones de alineación próximas.

La parte del objeto 5 que tiene una forma sensiblemente cilíndrica es de preferencia un cilindro de latón (altura de 10 a 50 milímetros, diámetro r_0 de 3 a 20 mm).

- 15 El objeto 5 lleva en su parte superior una muestra 23 destinada a ser colocada ulteriormente en intersección con un haz de radiación (corpúscular o electromagnética).

El objeto 5 se extiende a lo largo del eje de elongación 20 (que corresponde aquí a un eje de revolución del cilindro de radio r_0), formando el eje de elongación 20 y el eje de rotación 4 un ángulo inferior a 0,01 rad, de manera aún más preferiblemente inferior o igual a 0,005 rad.

- 20 Verificación de la temperatura

El objeto 5 está montado sobre el soporte 3 térmicamente estabilizado y montado en rotación alrededor del eje de rotación 4.

- 25 Este procedimiento comprende una verificación (por los medios de verificación de la estabilización de la temperatura 27, 28, 29) de la estabilización de una temperatura del objeto 5 con variaciones por debajo de un umbral de desviación de temperatura (1 mK), y esto durante todas las etapas de adquisición de datos de distancia y de adquisición de imágenes tridimensionales. Estos medios de verificación de la estabilización de la temperatura comprenden típicamente varios captadores de temperatura 27, 28, 29 (un captador de temperatura por punto de medición) como se ha descrito precedentemente.

- 30 Pueden existir gradientes de temperatura entre los diferentes captadores de temperatura, lo que importa entonces será la estabilidad de estos gradientes por debajo de una variación de un mili Kelvin durante todas las etapas de adquisición de datos de distancia y de adquisición de imágenes tridimensionales.

De preferencia, el procedimiento comprende por tanto una verificación de la estabilidad de los gradientes de temperatura entre varios puntos de medición de temperatura del dispositivo 1 por debajo del umbral de desviación de temperatura ΔT .

Alineación del objeto 5 (y su eje de elongación) con el eje de rotación 4.

- 35 Para hacer corresponder lo más posible el eje de elongación 20 del objeto 5 y el eje de rotación 4 del medio de rotación 31, el dispositivo 1 comprende medios 24 para medir la posición del objeto 5 con relación al eje 4 del medio de rotación 31, siendo ajustada esta posición por los medios de traslación 35 y 36 para minimizar la distancia (de preferencia inferior a 100 nm) entre el eje de elongación 20 del objeto 5 y el eje de rotación 4 del medio de rotación 31.

Los medios de medición 24 comprenden un aparato de referencia LS-9000 de KeyEnce.

- 40 Los medios de medición 24 están situados por debajo del nivel de los planos 81 y 82 para no estorbar a las mediciones en estos planos 81, 82 por los captadores 7, 151, 152.

- 45 A continuación, la porción de cilindro del objeto 5 medida por los captadores 71 o 72 se ha supuesto centrada sobre el eje de rotación 4 (desplazamiento entre los ejes 4 y 20 casi nulo): esto es obtenido de manera fina haciendo una primera serie de mediciones de distancias por los captadores 71 o 72 y minimizando el armónico de orden 1 de la descomposición de Fourier de las lecturas de los captadores 71 o 72 correspondientes.

Adquisición de los datos de distancia.

Este procedimiento comprende a continuación una adquisición (por los medios 6) de datos de distancias que comprenden:

- 50 - para al menos dos planos de medición distintos 81 y 82, estando equipado cada plano de medición (respectivamente 81 u 82) de al menos tres captadores de distancia (respectivamente 71 o 72) que rodean el objeto 5, y

- para cada captador de distancia (respectivamente 71 o 72) de cada plano de medición (respectivamente 81 o 82),

una medición (por interferometría) de un dato de distancia representativo de una distancia (contenida en este plano respectivamente 81 o 82) entre una superficie exterior del objeto 5 y este captador de distancia medida en el plano de medición de este captador (respectivamente 71 o 72).

5 El procedimiento comprende una reiteración de la adquisición de datos de distancias para varios valores de rotación del objeto 5 alrededor del eje de rotación 4 con relación al sistema de referencia de distancia 9 en el que los captadores de distancia 71 y 72 son fijos. A cada iteración, los datos de distancia son medidos simultáneamente sobre todo los planos de medición 81 y 82 y para todos los captadores 7 de estos planos de medición.

10 El punto de cada interferómetro 7 sobre el objeto 5 se desplaza típicamente una velocidad media (continua o discontinua) del orden de $100 \mu\text{m.s}^{-1}$.

Los datos adquiridos por los captadores 7 son indicados $s_{h,k}(\varphi)$ con:

- S , una distancia (típicamente en nm)

- $\varphi \in [0, 2\pi]$ en radianes, ángulo de rotación del objeto 5 alrededor del eje 4 por pasos de $2\pi/N$ radianes

15 - N el número de puntos de medición (es decir el número de interacciones), siendo N de preferencia un número entero par y de preferencia una potencia de 2, y siendo típicamente igual a cien o a algunos centenares (típicamente entre 100 y 300) para un objeto 5 cuya parte casi cilíndrica tiene un diámetro de aproximadamente 3 mm y teniendo cada captador 7 un diámetro de integración ϕ_{int} de aproximadamente 100 micrones (o menos),

- $k \in [1, 4]$, un número entero positivo correspondiente al número del captador en el interior de su plano 81 u 82

- $h \in \{z_1, z_2\}$ las dos alturas de medición sobre el objeto 5 (en μm)

20 Así, $s_{h,k}(\varphi)$ es la distancia, contenida en el plano de medición 81 ($h=z_1$) u 82 ($h=z_2$) situado a la altura h a lo largo del eje Z , entre:

- la superficie exterior del objeto 5, y

- el captador $n^\circ k$ del plano de medición 81 ($h=z_1$) u 82 ($h=z_2$) situado a la altura h a lo largo del eje Z

25 para la posición angular φ del objeto 5 alrededor de su eje de rotación 4. Sin embargo, de manera general, un dato de distancia $s_{h,k}(\varphi)$ no es necesariamente en nm, sino puede por ejemplo ser un dato interferométrico en unidades arbitraria y proporcional a esta distancia.

Cada plano de medición 81 u 82 es definido por su altura h a lo largo del eje Z , con $h=z_1$ para el plano de medición 81 o $h=z_2$ para el plano de medición $h=z_2$.

Para cada plano de medición de altura h , cada captador 7 está definido por su número k .

30 El objeto 5 está definido por su posición angular φ alrededor de su eje de rotación 4 en el momento de una medición de datos de distancia.

Obtención de datos representativos de la línea de contorno 14.

35 Este procedimiento comprende, para cada plano de medición (respectivamente 81 u 82), una obtención (por los medios 11) de datos representativos de la línea de contorno 14 del objeto 5 a partir de los datos de distancias medidas por todos los captadores (respectivamente 71 o 72) de este plano de medición (respectivamente 81 o 82) y para diferentes valores de rotación φ del objeto 5 alrededor de su eje de rotación 4, estando contenida la línea de contorno 14 en este plano de medición (respectivamente 71 o 72), comprendiendo dicha obtención de datos una toma en cuenta de una variación de inclinación y/o de traslación del eje de rotación 4 (o del objeto 5 o de la zona 2) en el sistema de referencia de distancia 9 durante la adquisición de los datos de distancia y en particular durante la rotación de la zona 2 o del objeto 5 alrededor del eje 4, es decir entre las diferentes iteraciones de la adquisición de datos de distancias.

40 Las etapas siguientes describen el procedimiento de medida de circularidad (u obtención de la línea de contorno 14) del objeto 5 en cada uno de los niveles $h = z_1$ y $h = z_2$ teniendo en cuenta la variación de inclinación y/o de traslación del eje de rotación 4 (o del objeto 5 o de la zona 2) en el sistema de referencia de distancia 9 durante la rotación de la zona 2 o del objeto 5 alrededor del eje 4. Se omite a partir de aquí el índice h , considerando que la descripción que va a seguir es aplicable al caso $h=z_1$ para el plano de medición 81 o $h=z_2$ para el plano de medición $h=z_2$.

45 Para obtener datos representativos de la línea de contorno 14 del objeto 5 en un plano de medición (respectivamente 81 u 82), es preciso utilizar una serie de mediciones de distancias en este plano de medición (respectivamente 81 u 82) que han sido medidas mientras la posición del eje de rotación 4 estaba bien centrada con relación al objeto 5 en este plano 81 u 82:

- la figura 12 ilustra la posición del eje de rotación 4 con relación al objeto 5 para las mediciones por los captadores 71 en el plano 81; esta configuración es obtenida haciendo una o varias series de mediciones de distancia por los captadores 71 con una rotación del objeto 5 alrededor de su eje 4 y minimizando el armónico de orden 1 de la descomposición de Fourier de las lecturas de los captadores 71; y

- 5 - la figura 13 ilustra la posición del eje de rotación 4 con relación al objeto 5 para las mediciones por los captadores 72 en el plano 82; esta configuración es obtenida haciendo una o varias series de mediciones de distancia por los captadores 72 con una rotación del objeto 5 alrededor de su eje 4 y minimizando el armónico de orden 1 de la descomposición de Fourier de las lecturas de los captadores 72.

A cada paso de rotación φ , cada captador de un plano de medición 81 u 82 ve:

- 10 - los componentes $x(\varphi)$ e $y(\varphi)$ del desplazamiento del eje de rotación 4 en este plano de medición
- la variación del radio $dr(\varphi)$ de la parte casi cilíndrica del objeto 5.

La ecuación general de la lectura de los captadores 7 es:

$$s_k(\varphi) = x(\varphi) \cdot \cos \varphi_k + y(\varphi) \cdot \sin \varphi_k + dr(\varphi - \varphi_k)$$

- 15 Siendo φ_k la posición angular de cada captador k (71 o 72) alrededor del eje de rotación 4 en el sistema de referencia 9 o 16, no variando esta posición angular φ_k durante la rotación del objeto 5 alrededor del eje 4.

La solución (x, y, dr) de esta ecuación pasa por la transformada de Fourier:

$$s_k(\varphi) = x(\varphi) \cdot \cos \varphi_k + y(\varphi) \cdot \sin \varphi_k + dr(\varphi - \varphi_k) \quad TF \Leftrightarrow$$

$$S_{kn}(\varphi) = X_n \cdot \cos \varphi_k + Y_n \cdot \sin \varphi_k + dR_n \cdot e^{-in\varphi_k}$$

con $n \in [1, N]$

- 20 Se obtiene un sistema de ecuaciones lineales en el dominio de las frecuencias para cada armónico n:

$$\begin{bmatrix} s_{1n} \\ s_{2n} \\ \dots \\ s_{kn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi_1 & \sin \varphi_1 \\ \cos \varphi_2 & \sin \varphi_2 \\ \dots & \dots \\ \cos \varphi_k & \sin \varphi_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{-in\varphi_1} \\ e^{-in\varphi_2} \\ \dots \\ e^{-in\varphi_k} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_n \\ Y_n \\ R_n \end{bmatrix}$$

Que se escribe matricialmente:

$$\vec{S}_n = H_n \cdot \vec{X}_n$$

Esto es resuelto por los mínimos cuadrados para cada armónico n:

$$\hat{X}_n = (H_n^T \cdot H_n)^{-1} H_n^T \cdot \vec{S}_n \quad \text{con } \hat{X}_n \text{ un estimador de } \vec{X}_n$$

donde $N_n = H_n^T \cdot H_n$ es la matriz normal

- 25 y $\vec{E}_n = H_n \cdot \hat{X}_n - \vec{S}_n$ es el error residual

Se eligen los ángulos φ_k para evitar una pérdida de armónico del orden n según el criterio siguiente:

$$\text{Det}(N_n) \neq 0, \forall n$$

Concretamente, los φ_k tienen valores fijos en el dispositivo 1 que no varían y permanecen los mismos durante la rotación del objeto 5 alrededor del eje 4. En la práctica, se tiene de preferencia:

- 30 $\Phi_1 = 0.00000$ radianes

$$\Phi_2 = 0.95720 \text{ radianes}$$

$$\Phi_3 = 2.35619 \text{ radianes}$$

$$\Phi_4 = 3.60792 \text{ radianes}$$

Se va a buscar minimizar $\vec{e}_k$ haciendo variar los ϕ_k : $\vec{e}_k(\phi) \xleftrightarrow{TF} \vec{E}_n$ error residual en el dominio espacial $\vec{e}_k = f(S_k, \phi_k)$ en el dominio angular $\hat{\phi}_k \leftrightarrow \min(\vec{e}_k)$.

Luego, el algoritmo de resolución es el siguiente:

- elección de los ϕ_k nominales

5 - transformada de Fourier de las lecturas de los k captadores 7:

$$\vec{S}_k(\phi) \xleftrightarrow{TF} \vec{S}_n$$

- comienzo del bucle de optimización: se hacen variar los ϕ_k para tener $\sigma(\vec{e}_k)$ mínimo, donde σ es la desviación tipo centrada de $\vec{e}_k(\phi)$

• Para cada armónico n:

- 10 • Cálculo de la matriz $H_n = f(\phi_k)$
- Cálculo de los coeficientes $\hat{X}_n = (H_n^T \cdot H_n)^{-1} H_n^T \cdot \vec{S}_n$
- Cálculo del error residual en el dominio de frecuencias $\vec{E} = H_n \cdot \hat{X}_n - \vec{S}_n$
- Construcción del vector $\vec{E}$ cuyos componentes son los $\vec{E}_n$ con $n \in \{2, \dots, \frac{N}{2} + 1\}$ y $\vec{E}$ es una transformada de Fourier (TF) de una señal hermitiana $\vec{e}_k(\phi)$.

15 • Cálculo del error residual en el dominio espacial

$$\vec{E} \xleftrightarrow{TF^{-1}} \vec{e}_k(\phi)$$

• cálculo de la desviación tipo de $\sigma(\vec{e}_k)$

- Fin del bucle de optimización

- Cálculo de los coeficientes $\hat{X}_n = (H_n^T \cdot H_n)^{-1} H_n^T \cdot \vec{S}_n$ definitivos

20 - Construcción del vector $\vec{X}$ cuyos componentes son los $\vec{X}_n$ con $n \in \{2, \dots, \frac{N}{2} + 1\}$ y $\vec{X}$ es una TF de una señal hermitiana $\hat{x}(\phi)$

- Cálculo de la solución en el dominio espacial

$$\hat{X} \xleftrightarrow{TF^{-1}} \hat{x}(\phi) \approx \begin{bmatrix} x(\phi) \\ y(\phi) \\ dr(\phi) \end{bmatrix}$$

El cálculo de las coordenadas polares de los puntos $\vec{P}_{c_n}$ del objeto 5 para cada nivel h (es decir de la línea de contorno 14 en el plano de medición de la altura h) es entonces: $\vec{P}_{c_\phi} = \begin{bmatrix} r_0 + dr(\phi) \\ \phi \\ h \end{bmatrix}$ con r_0 el radio nominal de la parte casi cilíndrica del objeto 5 y dr las desviaciones de la superficie exterior de esta parte casi cilíndrica con relación a este radio nominal.

Así, según la invención, se nota que se puede hacer la diferencia entre:

- la variación de la distancia entre un captador 7 y la superficie del objeto 5 debida a una variación de esta superficie, y

30 - la variación de la distancia entre un captador 7 y la superficie del objeto 5 debida a una variación de posición del eje de rotación 4 del objeto 5.

Comparando, para datos adquiridos en el mismo momento, las variaciones de posición del eje 4 del objeto 5 para los

planos de medición distintos 81 y 82, se es capaz además de decir si esta variación de posición es una variación de posición por traslación o por rotación:

5 - por ejemplo, si durante un intervalo de tiempo δt entre dos medidas por los captadores 7, el eje de rotación 4 se desplaza en el plano 81, pero no en el plano 82, se tiene una rotación del eje 4 alrededor de un eje perpendicular al eje 4 y que pasa por el plan 82, y

- por ejemplo, si durante un intervalo de tiempo δt entre dos medidas por los captadores 7, el eje de rotación 4 se desplaza exactamente en la distancia y según la misma dirección en los planos 81 y 82, se tiene únicamente una traslación del eje 4.

Se observa además que la separación entre:

10 - la variación de la distancia entre un captador 7 y la superficie del objeto 5 debida a una variación de esta superficie, y
- la variación de la distancia entre un captador 7 y la superficie del objeto 5 debida a una variación de posición del eje de rotación 4 del objeto 5,

es realizable solamente con tres captadores 7 por plano de medición 81 u 82, como por ejemplo también se ha descrito en el documento CN103363921A.

15 Adquisición de las imágenes tridimensionales 191 a 196

Este procedimiento comprende, para cada plano (respectivamente 81 u 82) de medición entre al menos uno de los planos de medición, una adquisición, por el captador de imagen (respectivamente 151 o 152) de una imagen tridimensional 191 de una cara del objeto 5, estando formada la imagen de este plano de medición sobre esta imagen tridimensional 191, y una reiteración de esta adquisición de imagen 192 a 196 para varios valores de rotación del objeto 5
20 alrededor de su eje de rotación 4 frente a este captador de imagen (respectivamente 151 o 152) en el sistema de referencia de imagen 16 en el que el captador de imagen (respectivamente 151 o 152) es fijo.

Cada imagen tridimensional 191 a 196 puede formar la imagen además de la totalidad o parte de una cara de la muestra 23 llevada por el objeto 5.

En el seno del captador de imagen 151 o 152, se sirve:

25 - del interferómetro de luz blanca para un objeto 5 y/o muestra 23 reflectante, y
- del microscopio de contraste de foco para un objeto 5 y/o muestra 23 estructurada pero no reflectante.

Los datos de cada imagen tridimensional 191 a 196 número m para el plano de medición situado a la altura h tienen la forma de tablas $I_{h,m}$ constituida de puntos o píxeles p definidos por $\vec{p} = \begin{bmatrix} c \\ l \\ v \end{bmatrix}$ con:

- v, un escalar (en nm)

30 - (c,l) las coordenadas del píxel en el sistema local de la imagen y cuyo origen es el centro de la imagen

- $\varphi_m = \frac{2\pi}{M} m$ con el número entero $m \in [0, M-1]$, siendo φ_m el ángulo de rotación del objeto 5 en la toma de la imagen

$I_{h,m}$ por el captador de imagen a la altura h (captador 151 para $h=z_1$ y captador 152 para $h=z_2$), siendo M-1 el número de imágenes tomadas por este captador de imagen en total, siendo M-1 típicamente igual a algunas decenas (típicamente entre 20 y 30) para una parte casi cilíndrica del objeto 5 que tiene aproximadamente 3 mm de diámetro y teniendo cada
35 imagen una anchura de aproximadamente 500 micrones; sólo seis imágenes están representadas en la figura 6 para no sobrecargarla,

- $h \in (z_1, z_2)$ las dos alturas de medición sobre el objeto 5,

- las coordenadas (c,l) están supuestas en dimensiones métricas. Son calculadas en función del campo del captador (respectivamente 151 o 152) del número y del tamaño de los píxeles.

40 La anchura de cada imagen tridimensional 191 a 196 a lo largo de su coordenada c está comprendida típicamente entre 100 μm y 1000 μm , típicamente igual a 500 μm .

La anchura de cada imagen tridimensional 191 a 196 a lo largo de su coordenada l está comprendida típicamente entre 100 μm y 1000 μm , típicamente igual a 300 μm .

45 La resolución espacial lateral de cada imagen tridimensional 191 a 196 a lo largo de su coordenada c (en el plano de las figs. 7 a 10) es inferior o igual a 10 μm .

La resolución espacial lateral de cada imagen tridimensional 191 a 196 a lo largo de su coordenada l (en el plano de las figs. 8 y 10, perpendicularmente al plano de las figs. 7 y 9) es inferior o igual a $10\ \mu\text{m}$.

La resolución espacial longitudinal de cada imagen tridimensional 191 a 196 a lo largo de su coordenada v (En el plano de las figs. 7 y 11, perpendicularmente al plano de las figs. 8 y 10) es inferior a $100\ \text{nm}$, idealmente inferior o igual a $10\ \text{nm}$.

Los datos que caracterizan espacialmente la superficie exterior del objeto 5 son:

- (r, φ, z) , sus coordenadas cilíndricas
- (x, y, z) , sus coordenadas cartesianas

Sincronización

Una sincronización entre las medidas siguientes es asegurada por el sistema de control-mando 10:

- circularidades en z_1 y z_2 por captadores de distancia 7 (adquisición de los datos de distancia), y
- adquisición de las imágenes tridimensionales (tres dimensiones espaciales) por el captador de imágenes 151 y/o 152, incluyendo las zonas de medición de circularidad.

Los medios de mando 10 comprenden al menos una interfaz 30 de control y de transferencia de datos, por ejemplo de tipo TCPIP.

Por el contrario, en referencia a las figs. 12 y 13, si la parte cilíndrica del objeto 5 presenta una inclinación con relación a la dirección del eje de rotación 4, entonces el objeto 5 describe un cono de revolución sobre 360° de rotación cuando explora diferentes posiciones 38, 39, 40, 41 alrededor del eje 4. Se debe volver a centrar cada sección sobre el eje de rotación 4 para efectuar medidas. Hay por tanto una falta de sincronización de las medidas entre los diferentes planos de medición 81, 82:

- la figura 12 ilustra la posición del eje de rotación 4 con relación al objeto 5 para las mediciones por los captadores 71 en el plano 81; esta configuración es obtenida haciendo una o varias series de mediciones de distancia por los captadores 71 con una rotación del objeto 5 alrededor de su eje 4 y minimizando el armónico de orden 1 de la descomposición de Fourier de las lecturas de los captadores 71; y

- la figura 13 ilustra la posición del eje de rotación 4 con relación al objeto 5 para las mediciones por los captadores 72 en el plano 82; esta configuración es obtenida haciendo una o varias series de mediciones de distancia por los captadores 72 con una rotación del objeto 5 alrededor de su eje 4 y minimizando el armónico de orden 1 de la descomposición de Fourier de las lecturas de los captadores 72.

La inclinación de la parte cilíndrica del objeto 5 con relación al eje de rotación 4 es minimizada por medios mecánicos manuales de las rotaciones alrededor respectivamente de los ejes X e Y o por mecanización.

Se mide la inclinación residual de la parte cilíndrica del objeto 5 con relación al eje de rotación 4 por la medición de la excentricidad de un círculo o línea de contorno 14, 142 de un plano de medición respectivamente 81 u 82 cuando el otro círculo o línea de contorno 14, 141 del otro plano de medición respectivamente 82 u 81 está centrado.

Orientación de las imágenes tridimensionales de un mismo plano de medición entre ellas; corrección de la inclinación residual y del «wobble»

Este procedimiento comprende, antes del ensamblaje de las diferentes imágenes tridimensionales en un mismo plano de medición (respectivamente 81 u 82), una orientación (en el sistema de referencia de imagen 9) por los medios 12, de cada imagen tridimensional de este plano de medición con relación a las otras imágenes tridimensionales de este mismo plano de medición, siendo determinada esta orientación en función de una variación de inclinación del objeto 5 con relación al sistema de referencia de imagen 9 durante la adquisición de esta diferentes imágenes tridimensionales. Esta variación de inclinación es medida según dos ángulos de los que:

- un ángulo alrededor del eje óptico 21 del captador de imágenes (respectivamente 151 o 152) que ha hecho la adquisición de estas imágenes tridimensionales, y
- un ángulo alrededor del eje 22 perpendicular al eje 21 y sensiblemente perpendicular al eje de rotación 4 o de elongación 20.

Se procede de la manera siguiente para corrección del «wobble» (es decir de « la oscilación » del objeto 5 o de la variación de inclinación del objeto 5 en el sistema de referencia 9 y/o 16).

Para cada nivel h , las imágenes $I_{h,m}$ del captador de imágenes situado a la altura h (respectivamente captador 151 para $h=z_1$ y captador 152 para $h=z_2$) son orientadas en el espacio con una inclinación de la parte cilíndrica del objeto 5 y las

variaciones angulares del eje de rotación 4 $w_x(\varphi_m)$ y $w_y(\varphi_m)$ calculadas a partir de las mediciones de los captadores de distancias 7 con:

5 $tg w_y(\varphi_m) = (dr_{z2}(\varphi_m) - dr_{z1}(\varphi_m))/(z_2 - z_1)$, siendo los $dr_{zi}(\varphi_m)$ los medidos por los captadores de distancia 7 o calculados a partir de éstos en el plano vertical que contiene el eje óptico del captador de imágenes (respectivamente 151 o 152) a la toma de vista de índice m;

$tg w_x(\varphi_m) = (dr_{z2}(\varphi_m + \pi/2) - dr_{z1}(\varphi_m + \pi/2))/(z_2 - z_1)$, siendo $dr_{zi}(\varphi_m + \pi/2)$ los medidos por los captadores de distancia 7 o calculados a partir de éstos en el plano vertical perpendicular al eje óptico del captador de imagen (respectivamente 151 o 152) a la toma de vista de índice m.

10 i_x e i_y , los componentes del ángulo de inclinación de la parte cilíndrica del objeto 5 con relación al eje de rotación 4 según la dirección es radial y longitudinal del captador de imagen (respectivamente 151 o 152).

Las sumas de estas contribuciones según estos ejes son: $a_x = i_x + w_x$ y $a_y = i_y + w_y$

Cada pixel $\vec{p} = \begin{bmatrix} c \\ l \\ v \end{bmatrix}$ de la imagen $I_{h,m}$ sufre las transformaciones siguientes:

$$\vec{p}' = R_y \cdot \vec{p} \quad \text{con} \quad R_y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & tg a_y & 1 \end{bmatrix}$$

$$\vec{p}'' = R_x \cdot \vec{p}' \quad \text{con} \quad R_x = \begin{bmatrix} \cos a_x & \text{sen } a_x & 0 \\ -\text{sen } a_x & \cos a_x & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

O entonces:

15 $\vec{p}^{ll} = R_1 R_2 R_3 \cdot \vec{p}^l$ siendo las R_i matrices de cizalladura (o « shearing matrices ») de ángulo α_y con respecto a los píxeles.

Las etapas siguientes describen el procedimiento en cada uno de los niveles $h=z_1$ y $h=z_2$. Se omite a partir de aquí el índice h.

20 Para la compensación de las imágenes en el sistema de coordenadas del objeto 5, con el fin de estar en el sistema (x,y,z) del objeto 5, cada imagen I_m sufre:

$$\vec{p}^{lll} = R_z \cdot \vec{p}^{ll} \text{ con } R_z = \begin{bmatrix} \cos \phi_m & -\text{sen } \phi_m & 0 \\ \text{sen } \phi_m & \cos \phi_m & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \vec{V} = \begin{bmatrix} r_0 \cos \phi_m \\ -r_0 \text{sen } \phi_m \\ 0 \end{bmatrix}$$

y r_0 el radio nominal del cilindro.

$$\begin{bmatrix} r \\ \varphi \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{x^2 + y^2} \\ \text{atan} \left(\frac{y}{x} \right) \\ z \end{bmatrix}. \quad \text{El pixel se escribe entonces} \quad \vec{p}''' = \begin{bmatrix} r \\ \varphi \\ z \end{bmatrix}$$

La imagen I_m es convertida en coordenadas cilíndricas:

Ensamblaje de las imágenes tridimensionales de un mismo plano de medición

25 Este procedimiento comprende, para cada plano de medición (respectivamente 81 u 82) que haya sido el objeto de adquisición de imágenes tridimensionales 191 a 196, un ensamblaje (por los medios 13) de diferentes imágenes tridimensionales adquiridas para este plano de medición (respectivamente 81 u 82) de manera que se obtengan datos tridimensionales de la superficie de contorno 18 del objeto 5 (y eventualmente de la totalidad o parte de la muestra 23), comprendiendo el ensamblaje una definición de posiciones relativas de esas diferentes imágenes por medio de datos representativos de la línea de contorno 14 contenida en este mismo plano de medición (respectivamente 81 u 82).

Una primera definición de las posiciones relativas de las imágenes tridimensionales puede ser efectuada según el eje Z si el captador 25 de altura que tiene como objetivo el objeto 5 toma referencia de una variación de la altura del objeto 5 entre las diferentes imágenes tridimensionales adquiridas.

35 La definición de las posiciones relativas de las imágenes tridimensionales comprende además, de manera más fina, para cada imagen tridimensional de un plano de medición (respectivamente 81 u 82), un algoritmo de mínimos cuadrados que minimizan una desviación entre:

- los datos representativos de la línea de contorno 14 del objeto 5 contenido en este plano de medición (respectivamente 81 u 82), y

- esta imagen tridimensional de este plano de medición (respectivamente 81 u 82).

Véase de manera más detallada cómo se procede.

- 5 Se comienza por una correlación en 2D de imágenes tridimensionales por un par de imágenes sucesivas de índice m y $m+1$ (o M y 0): cada par de imágenes I_m y I_{m+1} $m \in [0, M-1]$, de un nivel h presenta una zona común que se acomodan una con relación a la otra por interrelación:

- la operación se efectúa sobre los píxeles $\vec{p}^{III} = \begin{bmatrix} r \\ \phi \\ z \end{bmatrix}$

- el vector desplazamiento $\vec{V}_{d_{m+1}} = \begin{bmatrix} 0 \\ \phi_{d_{m+1}} \\ z_{d_{m+1}} \end{bmatrix}$ es calculado tal que $C(d\phi, dz)$ es máximo en $(\phi_{d_{m+1}}, z_{d_{m+1}})$ con:

$$C(d\phi, dz) = \frac{\sum_{\phi} \sum_z I_m(\phi, z) I_{m+1}(\phi + d\phi, z + dz)}{\sqrt{\sum_{\phi} \sum_z I_m(\phi, z)^2} \sqrt{\sum_{\phi} \sum_z I_{m+1}(\phi, z)^2}}$$

- 10
- - El tratamiento es efectuado hasta $\vec{V}_{d_M}$, desplazamiento entre I_{M-1} e I_0 .

Se calcula el cierre de los desplazamientos de imágenes: la suma de los vectores desplazamiento debe ser nula:

$$\vec{r}^* = \sum_m \vec{V}_{d_m} = \begin{bmatrix} 0 \\ \sum_m \phi_{d_m} \\ \sum_m z_{d_m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

- 15 Se calculan las coordenadas cilíndricas de los píxeles de imágenes: si esta suma no es nula, se compensa el residuo r sobre los vectores V_{di} por valor entero de píxeles. Para cada imagen I_m $m \in [0, M-1]$, los píxeles $\vec{p}^{III}$ son corregidos en coordenadas cilíndricas del vector desplazamiento y del residuo r_m eventual: $\vec{p}^{III} = \vec{p}^{III} + \sum_{i=1}^m (\vec{V}_{d_i} - \vec{r}_i)$ por valor entero de píxeles.

Los puntos de compensación que provienen de la medición de circularidad se escriben en la forma:

$$\vec{P}_{c_{\phi}} = \begin{bmatrix} r_{c_{\phi}} \\ \phi \\ h \end{bmatrix} \text{ con } h \in (z_1, z_2)$$

- 20 Para la compensación de las imágenes sobre los puntos $\vec{P}_{c_{\phi}}$ cada imagen I_m es compensada en r por comparación de los $r_{c_{\phi}}$ de los J puntos $\vec{P}_{c_{\phi}}$ comunes a la imagen en zonas dS enfrentadas.

La dimensión dS corresponde al diámetro de integración ϕ_{int} del captador de distancia:

$$\phi_{dS} = \phi_{int}$$

- 25 Sobre estas zonas dS centrada sobre los $\vec{P}_{c_{\phi}}$, se promedian los r_{dS} de los píxeles correspondientes. Se minimiza entonces $\sum_l (r_{dS} - r_{c_{\phi}})^2$ por imagen para calcular una corrección dr de la imagen.

Las coordenadas definitivas de los píxeles de imagen en coordenadas cilíndricas son:

$$\vec{p}^{IIII} = \vec{p}^{III} + \begin{bmatrix} dr \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

las zonas comunes a dos imágenes son promediadas en r por píxel.

Se obtiene entonces un modelo digital de la superficie exterior de una parte de interés del objeto 5 o de todo el objeto 5

(eventualmente con la totalidad o parte de la muestra 23).

El conjunto de las etapas, a partir de las adquisiciones de datos de distancia y de las imágenes tridimensionales hasta la obtención del modelo digital (es decir de los datos tridimensionales de la superficie de contorno 18) del objeto 5 y eventualmente de la totalidad o parte de la muestra 23 dura típicamente de aproximadamente 15 a 30 minutos.

- 5 Utilización del modelo digital y ventajas del dispositivo 1 según la invención y del procedimiento según la invención puesta en práctica por el dispositivo 1.

Se puede a continuación tomar el objeto 5 y colocarle por ejemplo en un aparato que genera un haz de radiación (corpúscular o electromagnético) o en un microscopio electrónico de barrido (MEB) o en cualquier otro aparato. La identificación de una característica clave (por ejemplo marca o grabado sobre la parte casi cilíndrica del objeto 5) entre una posición en este aparato y este modelo digital obtenido por ensamblaje de las diferentes imágenes tridimensionales 191 a 196 permite orientarse libremente sobre el objeto 5, sin utilización de un objeto de metrología.

- 10

Este modelo digital es transferido en otro aparato como sistema de coordenadas para atribuir a posteriori datos de análisis multimodales y multi-escalas.

- 15 Este modelo digital permite conocer la forma exacta de la superficie exterior de una parte de interés del objeto 5 o de todo el objeto 5 (eventualmente con la totalidad o parte de la muestra 23) para poder posicionar esta muestra con precisión, por ejemplo con relación a un haz de radiación (corpúscular o electromagnético).

Una ventaja del enfoque según la invención es restringir el número de captadores necesarios sobre el aparato experimental (por ejemplo una línea de luz o un MEB), dejando más espacio alrededor del conjunto 5, 23 para optimizar el ángulo sólido de otros detectores, tal como por ejemplo un detector de fluorescencia.

- 20 La combinación con métodos ópticos (WLI y contraste de foco) es nueva y permite desarrollar un modelo digital más rápidamente y más completo.

Una ventaja clave de la invención es ganar tiempo sobre otras experiencias: se puede encontrar una región de interés sobre la superficie del conjunto 5, 23 sin retardo, gracias al modelo digital en 3D. Esto representa una reducción de coste considerable, no solamente en el caso de las experiencias en un sincrotrón, sino también para otros tipos de microscopios o de análisis complementarios multimodales y multi-escalas. La invención permite igualmente automatizar ciertas experiencias, al nivel de las zonas de interés a analizar.

- 25

Finalmente, se observa que en el dispositivo 1:

- para cada plan 81 u 82, el número de imágenes tridimensionales M-1 tomadas por el captador de imagen respectivamente 151 o 152 es inferior al número N de puntos de medición de cada captador respectivamente 71 o 72 de este plano de medición para obtener datos tridimensionales (es decir un modelo digital) de una superficie de contorno 18 del objeto 5 (y eventualmente de la totalidad o parte de la muestra 23), y/o

- 30

- para cada plano 81 u 82, cada captador respectivamente 71 o 72 tiene una resolución espacial longitudinal (típicamente inferior o igual a 1 nm) para su medida de distancia (entre una superficie exterior del objeto 5 y este captador de distancia) inferior a la resolución espacial longitudinal (típicamente inferior o igual a 10 nanómetros) de la medida de altura de motivos de la superficie exterior del objeto 5 por el captador respectivamente 151 o 152 a lo largo de la coordenada v, es decir a lo largo de un eje que une esta superficie exterior al captador 151 o 152 respectivamente.

- 35

Según la invención, se pasa por los datos de distancia de los captadores 7 para separar, con relación al perfil real del objeto 5, los errores debidos a la variación de inclinación y/o de traslación del eje de rotación 4.

Se utilizan además los datos de distancia de los captadores 7 para ensamblar las imágenes tridimensionales.

- 40 Según la invención, se gana así:

- en tiempo, pues es más rápido sobre-muestrear con precisión el objeto 5 con datos unidimensionales de distancia de los captadores 7 (que son muy rápido de adquirir) mejor que con imágenes tridimensionales de los captadores 151, 152 a fin de hacer la separación de errores, es decir medir la convolución entre la forma del objeto 5 y los errores de la rotación alrededor del eje 4;

- 45 - en dinero, pues es más económico tener al menos 3 captadores 7 de datos unidimensionales de distancia por plan 81 u 82 mejor que al menos 3 interferómetros de luz blanca y/o al menos tres microscopios de contraste de foco por plano 81 u 82 para hacer esta separación de errores, y

- en resolución, pues:

- se gana en resolución para la separación de errores, teniendo los captadores 7 una mejor resolución espacial longitudinal que los captadores 151 y 152, y

- 50

- 5 ○ se gana en resolución para el modelo digital (que es equivalente a los datos tridimensionales de la superficie de contorno 18) del objeto 5 y eventualmente de la totalidad o parte de la muestra 23, pues en lugar de ensamblar las M-1 imágenes tridimensionales 191 a 196 basándose únicamente sobre los puntos de correspondencia entre los pares de imágenes tridimensionales 191 al 196 que se solapan, se dispone de datos de referencia suplementarios en forma de la línea de contorno 14 que puede con poco coste y con poco tiempo ser sobre-muestreada con un gran número N de puntos de medida, y que además es de preferencia una línea cerrada lo que evita o limita la incoherencia de ensamblaje (o « stitching ») cuando después de haber ensamblado todas las imágenes 191 a 196 entre ellas dos a dos partiendo de la primera imagen 191 hasta la última imagen 196 se termina por ensamblar la última imagen 196 a la primera imagen 191.
- 10 Otra utilización posible del procedimiento o dispositivo según la invención descrita puede ser caracterizar el sistema de nano posicionamiento 3 utilizado comprendido el medio de rotación 31 y/o caracterizar la estabilidad vibratoria y térmica del sistema 3 de nano posicionamiento.
- Una ventaja de la invención es poder determinar la calidad de uno o varios nano posicionadores de una manera concisa y rápida. Esto es también interesante para proveedores de sistema de nano posicionamiento.
- 15 Desde luego, la invención no está limitada a los ejemplos que acaban de ser descritos y pueden ser aportadas numerosas modificaciones a estos ejemplos sin salir del marco de la invención.
- En particular:
- para una rotación del objeto 5 alrededor del eje de rotación 4 con relación a un sistema de referencia de distancia 9 en el que los captadores de distancia 7 son fijos, y/o
- 20 - para una rotación del objeto 5 alrededor de su eje de rotación 4 frente al captador de imagen 151 o 152 en un sistema de referencia de imagen en el que el captador de imagen es fijo,
- el objeto 5 puede ser fijo con relación al bastidor 17 del dispositivo 1 y todos los captadores 7 y/o todos los captadores 151, 152 pueden estar montados en rotación alrededor del eje 4 sobre un medio de rotación (platino de rotación) común.
- Además, se pueden prever modos de realización con más de dos planos de medición 81, 82.
- 25 Además:
- las medidas por los captadores 71, 151 o 72, 152 de un mismo plano de medición 81 u 82, y/o
 - las medidas por los captadores 71 y 72 de diferentes planos de mediciones 81 y 82, y/o
 - las medidas por los captadores 151 y 152 de diferentes planos de mediciones 81 y 82,
- son de preferencia sincronizadas, pero ello no es obligatorio.
- 30 Bien entendido, las diferentes características, formas, variantes y modos de realización de la invención pueden ser asociados unos con otros según diversas combinaciones en la medida en que no son incompatibles o exclusivos unos de los otros. En particular todas las variantes y modos de realización descritos precedentemente pueden ser combinados entre sí, sin salir del alcance de la invención tal como ha sido reivindicada en las reivindicaciones.

REIVINDICACIONES

1. procedimiento de caracterización en tres dimensiones de un objeto (5) que comprende:

- un suministro del objeto (5),

- una adquisición de datos de distancias que comprenden:

- 5 ○ para al menos dos planos de medición (81, 82) distintos, estando equipado cada plano de medición con al menos tres captadores (71, 72) de distancia que rodean al objeto, y
- para cada captador (71; 72) de distancia de cada plano de medición (81; 82),

una medida de un dato de distancia representativo de una distancia entre una superficie exterior del objeto y este captador (71; 72) de distancia medida en el plano de medición (81; 82) del captador,

- 10 - una reiteración de la adquisición de datos de distancias para varios valores de rotación del objeto alrededor de un eje de rotación (4) con relación a un sistema de referencia de distancia (9) en el que los captadores (71, 72) de distancia son fijos,

- 15 - para cada plano de medición (81; 82), una obtención de datos representativos de una línea de contorno (14) del objeto a partir de los datos de distancias medidas por todos los captadores (71; 72) de este plano de medición y para diferentes valores de rotación del objeto (5) alrededor de su eje de rotación (4), estando contenida la línea de contorno (14) en este plano de medición (81; 82), comprendiendo dicha obtención de datos representativos de una línea de contorno una toma en cuenta de una variación de inclinación y/o de traslación del eje de rotación (4) en el sistema de referencia de distancia (9) durante adquisiciones de los datos de distancia,

- 20 - para cada plano de medición (81; 82) entre al menos uno de los planos de medición, una adquisición, por un captador de imagen (151; 152), de una imagen tridimensional (191) de una cara del objeto (5), siendo formada la imagen de este plano de medición (81; 82) sobre esta imagen tridimensional (191), y una reiteración de esta adquisición de imagen (192-196) para varios valores de rotación del objeto (5) alrededor de su eje de rotación (4) frente a este captador de imagen (151; 152) en un sistema de referencia de imagen (16) en el que el captador de imagen (151; 152) es fijo,

- 25 - para cada plano de medición (81; 82) que ha sido el objeto de adquisición de imágenes tridimensionales (191-196), un ensamblaje de diferentes imágenes tridimensionales (191-196) adquiridas para este plano de medición (81; 82), de manera que se obtengan datos tridimensionales de una superficie de contorno (18) del objeto, comprendiendo el ensamblaje una definición de posiciones relativas de las diferentes imágenes (191-196) por medio de datos representativos de la línea de contorno (14) retenida en este plano de medición (81; 82).

- 30 2. Procedimiento según la reivindicación 1, caracterizado por que la definición de las posiciones relativas de las imágenes tridimensionales comprende, para cada imagen tridimensional (191; 192; 193; 194; 195; 196) de un plano de medición (81; 82), un algoritmo de mínimos cuadrados que minimiza una desviación entre:

- los datos representativos de la línea de contorno (14) del objeto contenido en este plano de medición (81; 82), y

- esta imagen tridimensional (191; 192; 193; 194; 195; 196) de este plano de medición (81; 82).

- 35 3. Procedimiento según la reivindicación 1 o 2, caracterizado por que comprende, antes del ensamblaje de las diferentes imágenes tridimensionales, una orientación de cada imagen tridimensional con relación a las otras imágenes tridimensionales, siendo determinada esta orientación en función de una variación de inclinación del objeto (5) con relación al sistema de referencia de imagen (16) durante la adquisición de estas diferentes imágenes tridimensionales.

- 40 4. Procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, caracterizado por que el objeto se extiende a lo largo de un eje de elongación (20), formando el eje de elongación y el eje de rotación (4) un ángulo inferior a 0,01 rad.

5. Procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, caracterizado por que el objeto está montado sobre un soporte (3) térmicamente estabilizado y montado en rotación alrededor del eje de rotación (4), comprendiendo el procedimiento de preferencia además una verificación de la estabilización de una temperatura del objeto con variaciones de temperatura por debajo de un umbral de desviación de temperatura.

- 45 6. Procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, caracterizado por que cada captador de imagen comprende un interferómetro de luz blanca y/o un microscopio de contraste de foco.

7. Procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, caracterizado por que los captadores de distancia (71, 72) son captadores interferométricos y los datos de distancias son datos interferométricos.

- 50 8. Procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, caracterizado por que los captadores de distancia y el captador de imagen son de preferencia solidarios de un mismo bastidor (17), estando montado el objeto

sobre una platina (31) de desplazamiento dispuesta para la rotación del objeto alrededor del eje de rotación (4) con relación a este bastidor.

9. Dispositivo de caracterización, que comprende:

- una zona de objeto (2),

5 - medios (6, 7, 71, 72) para adquirir datos de distancias, estando repartidos estos medios de adquisición de datos de distancias sobre al menos dos planos de medición (81, 82) distintos, estando equipado cada plano de medición (81; 82) de al menos tres captadores de distancia (71; 72) que rodean la zona de objeto, estando dispuesto cada captador de distancia (71; 72) para medir en su plano de medición (81; 82) un dato de distancia representativo de una distancia entre:

- una superficie exterior de un objeto dispuesto en la zona de objeto (2) siendo solidaria de la zona de objeto y

10 • este captador de distancia (71; 72)

y ello para diferentes valores de rotación de la zona de objeto (2) alrededor de un eje de rotación (4) con relación a un sistema de referencia de distancia (9) en el que los captadores de distancia (71; 72) son fijos,

15 - para cada plano de medición (81; 82), medios (10) para obtener datos representativos de una línea de contorno (14) del objeto a partir de datos de distancias adquiridos que comprenden datos de distancias medidas por todos los captadores (71; 72) de este plano de medición (81; 82) y para diferentes valores de rotación de la zona de objeto (2) alrededor de su eje de rotación (4), estando contenida esta línea de contorno en este plano de medición (81; 82) estando de preferencia dispuestos los medios de obtención de datos representativos de una línea de contorno para una toma en cuenta de una variación de inclinación y/o de traslación del eje de rotación (4) en el sistema de referencia de distancia (9) durante adquisiciones de los datos de distancia),

20 - para cada plano de medición (81; 82) entre al menos uno de los planos de medición, un captador de imagen (151; 152) dispuesto para adquirir una imagen tridimensional (191) de una cara del objeto dispuesto en la zona de objeto (2), siendo formada la imagen de este plano de medición (81; 82) sobre esta imagen tridimensional, estando dispuesto el captador de imagen para reiterar la adquisición de imagen (192-196) para varios valores de rotación de la zona objeto (2) alrededor de su eje de rotación (4) frente a este captador de imagen (151; 152) en un sistema de referencia de imagen (16) en el que el captador de imagen está fijo,

25 - para cada plano de medición (81; 82) entre al menos uno de los planos de medición, medios para ensamblar diferentes imágenes tridimensionales (191-196) adquiridas para este plano de medición, de manera que obtengan datos tridimensionales de una superficie de contorno (18) del objeto, estando dispuesto los medios de ensamblaje para definir las posiciones relativas de las diferentes imágenes (191-196) por medio de los datos representativos de la línea de contorno (14) contenida en este plano de medición (81; 82).

30 10. Dispositivo según la reivindicación 9, caracterizado por que los medios de ensamblaje están dispuestos para que la definición de las posiciones relativas de las imágenes tridimensionales comprenda, para cada imagen tridimensional de un plano de medición, un algoritmo de los mínimos cuadrados que minimizan una desviación entre:

- los datos representativos de la línea de contorno del objeto contenido en este plano de medición, y

35 - esta imagen tridimensional de este plano de medición.

11. Dispositivo según la reivindicación 9 o 10, caracterizado por que comprende medios para, antes de un ensamblaje de diferentes imágenes tridimensionales, orientar cada imagen tridimensional con relación a las otras imágenes tridimensionales en función de una variación de inclinación de la zona de objeto con relación al sistema de referencia de imagen durante la adquisición de estas diferentes imágenes tridimensionales.

40 12. Dispositivo según una cualquiera de las reivindicaciones 9 a 11, caracterizado por que comprende un soporte para la zona de objeto, estando montado dicho soporte en rotación alrededor del eje de rotación, comprendiendo dicho soporte medios de estabilización térmica, comprendiendo el dispositivo además medios de verificación de la estabilización de una temperatura de la zona de objeto con variaciones por debajo de un umbral de desviación de temperatura.

45 13. Dispositivo según una cualquiera de las reivindicaciones 9 a 12, caracterizado por que cada captador de imagen puede comprender un interferómetro de luz blanca y/o microscopio de contraste de foco.

14. Dispositivo según una cualquiera de las reivindicaciones 9 a 13, caracterizado por que los captadores de distancia son captadores interferométricos y los datos de distancia son datos interferométricos.

50 15. Dispositivo según una cualquiera de las reivindicaciones 9 a 14, caracterizado por que los captadores de distancia y el captador de imagen son solidarios de un mismo bastidor, estando montada la zona de objeto sobre una platina de desplazamiento dispuesta para la rotación de la zona de objeto alrededor del eje de rotación con relación a este bastidor.

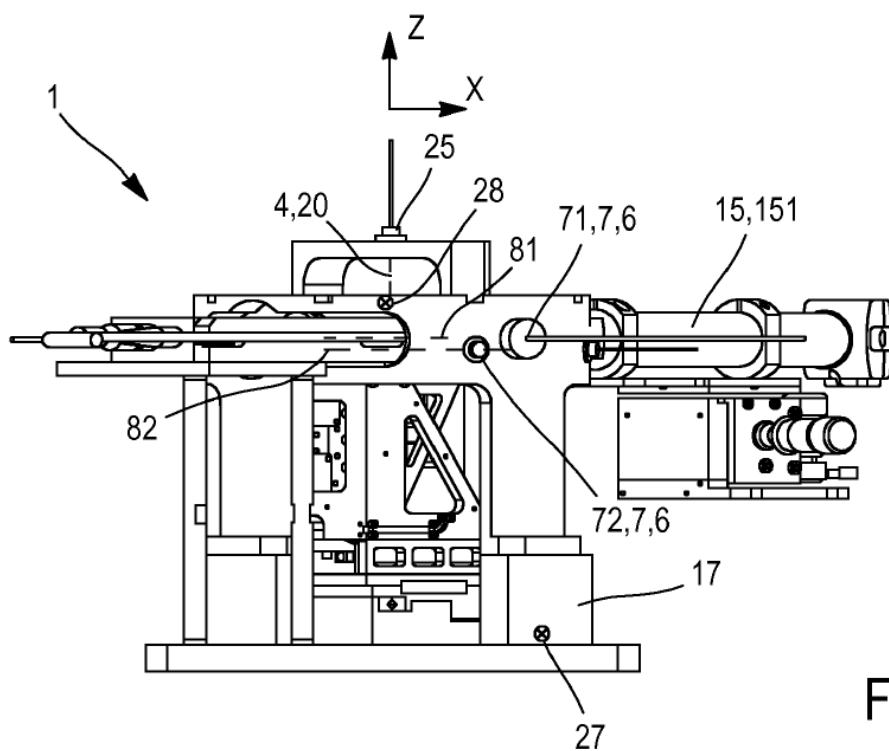


FIG. 1

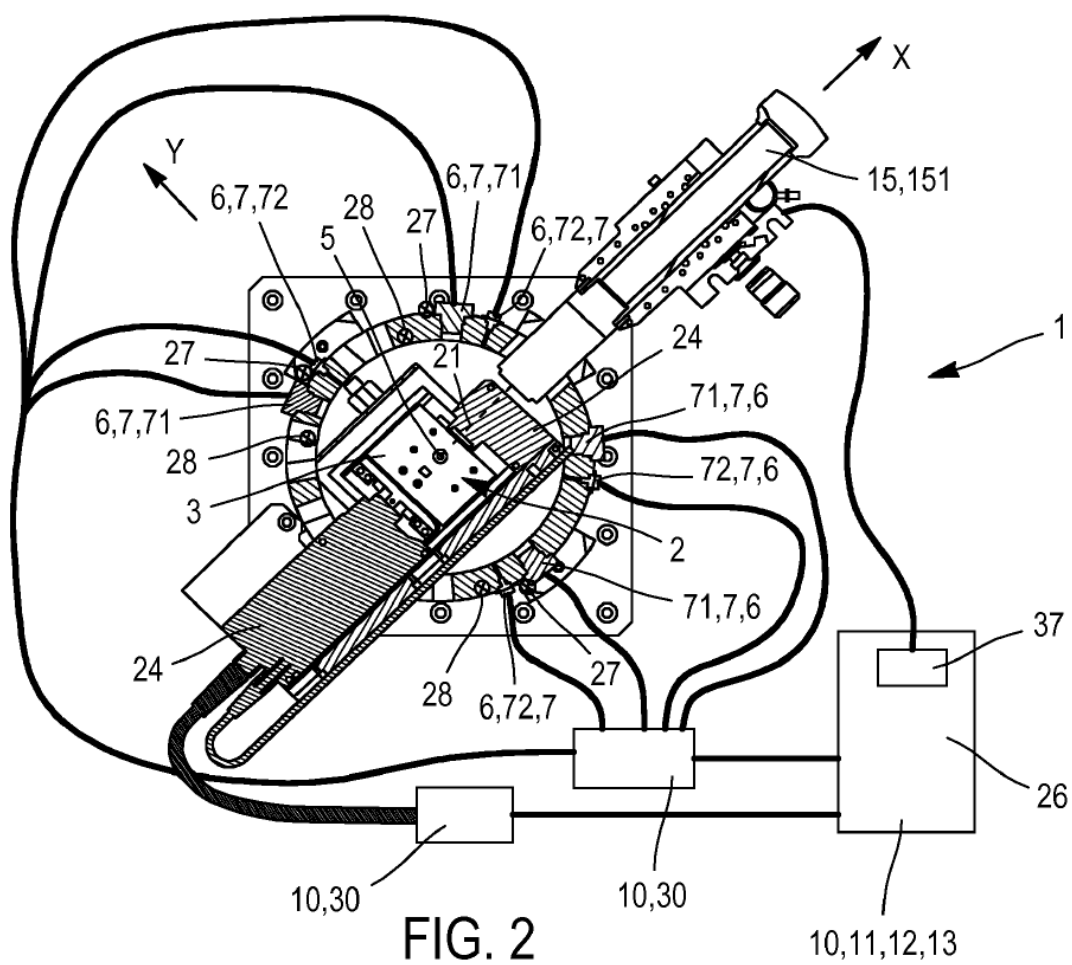


FIG. 2

10,11,12,13

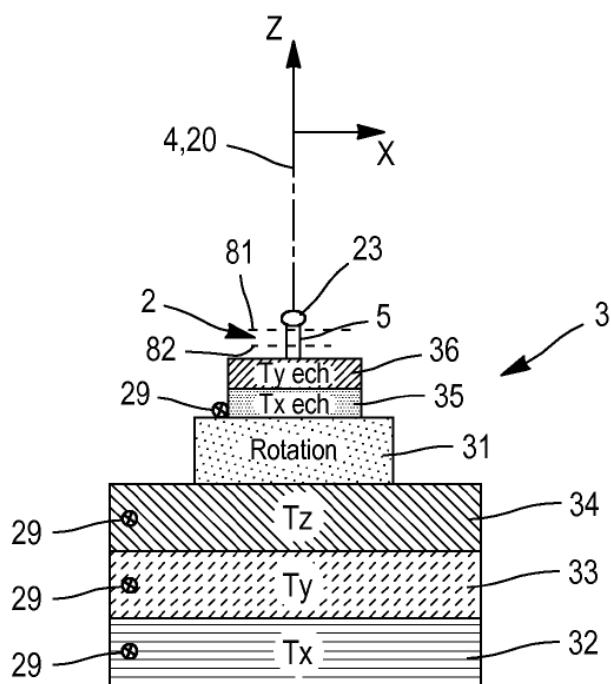


FIG. 3

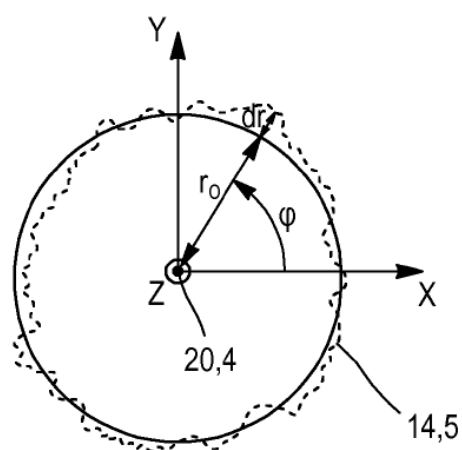


FIG. 4

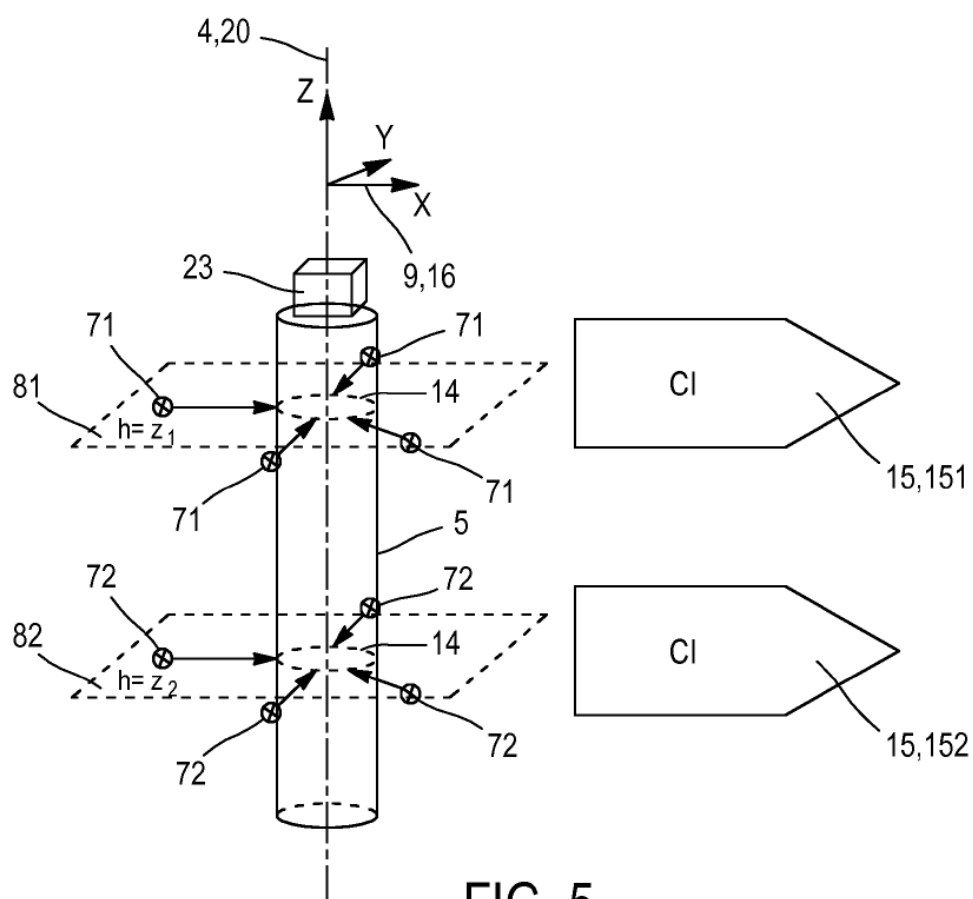


FIG. 5

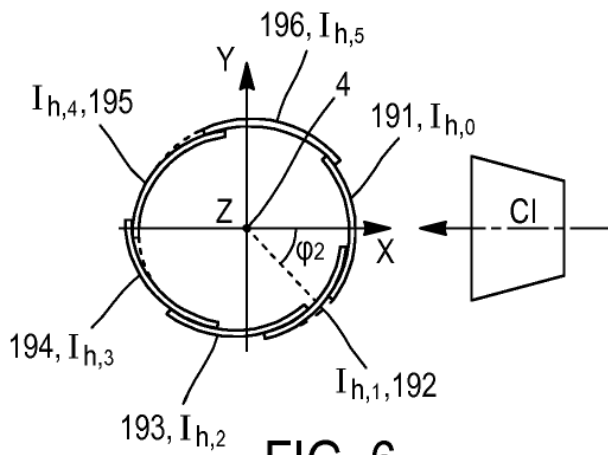


FIG. 6

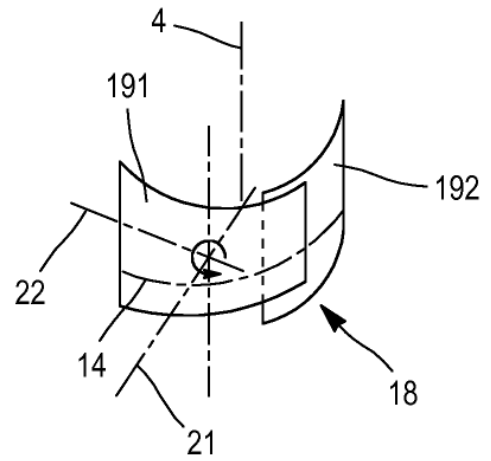


FIG. 11

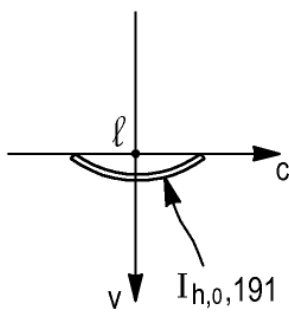


FIG. 7

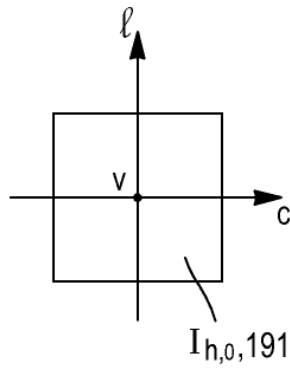


FIG. 8

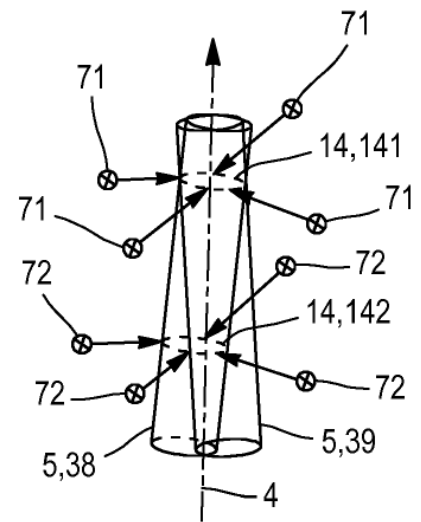


FIG. 12

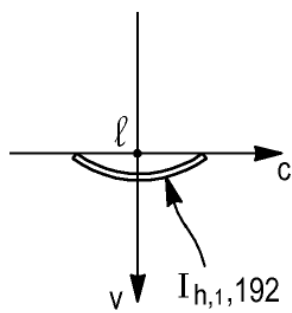


FIG. 9

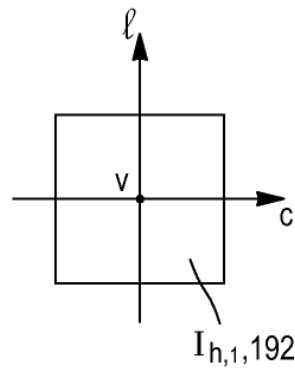


FIG. 10

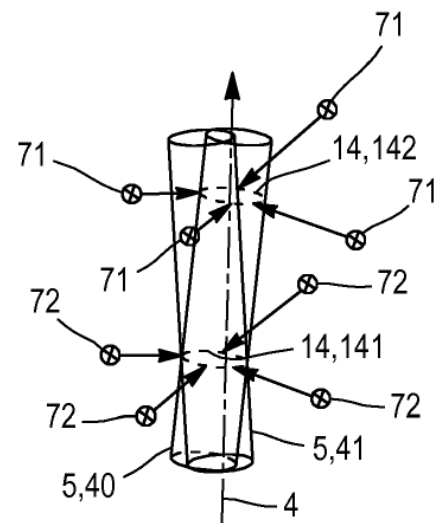


FIG. 13