

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **3 015 447**

51 Int. Cl.:

B22F 10/20 (2011.01)
B22F 10/30 (2011.01)
B22F 12/00 (2011.01)
B29C 64/153 (2007.01)
B29C 64/268 (2007.01)
B33Y 30/00 (2015.01)
G05B 19/401 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

- 86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **05.07.2021 PCT/GB2021/051698**
 87 Fecha y número de publicación internacional: **13.01.2022 WO22008885**
 96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **05.07.2021 E 21746089 (8)**
 97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **26.02.2025 EP 4175781**

54 Título: **Mejoras en o relacionadas con un escáner óptico para dirigir la radiación electromagnética a distintas ubicaciones dentro de un campo de escaneado**

30 Prioridad:

06.07.2020 GB 202010315

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
05.05.2025

73 Titular/es:

**RENISHAW PLC (100.00%)
New Mills
Wotton-under-Edge, Gloucestershire GL12 8JR,
GB**

72 Inventor/es:

**MCMURTRY, DAVID ROBERTS y
DARDIS, JOHN**

74 Agente/Representante:

ELZABURU, S.L.P

ES 3 015 447 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

Mejoras en o relacionadas con un escáner óptico para dirigir la radiación electromagnética a distintas ubicaciones dentro de un campo de escaneado

Campo de invención

5 La presente invención se refiere a mejoras en o relacionadas con un escáner óptico para dirigir la radiación electromagnética a diferentes lugares dentro de un campo de escaneado. La invención tiene una aplicación particular, pero no exclusiva, para determinar la alineación de dicho escáner óptico, en particular un escáner en un aparato de fabricación aditiva. La invención tiene una aplicación particular, pero no exclusiva, para un aparato de fusión de lecho de polvo basado en láser y, más particularmente, un aparato de fusión de lecho de polvo que comprende múltiples trenes ópticos, cada tren óptico para dirigir de forma independiente un haz láser.

Antecedentes

15 Los aparatos de fusión de lecho de polvo producen objetos mediante la solidificación capa por capa de un material como, por ejemplo, un material de polvo metálico, utilizando un haz de alta energía como, por ejemplo, un haz láser. Se forma una capa de polvo en un plano de trabajo a lo largo de un lecho de polvo contenido en un manguito de construcción bajando una plataforma de construcción en el manguito de construcción para bajar el lecho de polvo, dosificando un montón de polvo adyacente al lecho de polvo bajado y esparciendo el montón de polvo con un recubridor a lo largo (de un lado a otro lado) del lecho de polvo para formar la capa. A continuación, se solidifican porciones de la capa de polvo correspondientes a una sección transversal de la pieza de trabajo que se va a formar mediante la irradiación de estas áreas con el haz dirigido a las ubicaciones requeridas en el lecho de polvo mediante un tren óptico. El haz funde o sinteriza el polvo para formar una capa solidificada. Después de la solidificación selectiva de una capa, el lecho de polvo se baja en un espesor de la capa recién solidificada y se esparce otra capa de polvo sobre la superficie y se solidifica, según sea necesario.

25 Para formar el objeto según lo deseado es necesario que el tren óptico dirija el haz láser a las posiciones requeridas. Para garantizar que esto sea así, el tren óptico se calibra antes de comenzar la construcción y se revisa periódicamente para garantizar que el tren óptico permanezca en la alineación requerida.

30 El documento WO94/15265 describe la colocación de una lámina de Mylar con una gran cantidad de celdas cuadradas impresas sobre la misma sobre una superficie objetivo y el marcado de cada celda con el haz láser. A continuación, la lámina se convierte en formato digital mediante el escaneo con un escáner digital convencional y la ubicación de la marca láser en relación con el centroide de la celda se utiliza para actualizar los factores de corrección para esa celda. Dicha calibración se lleva a cabo periódicamente.

35 Una limitación de la precisión y repetibilidad de este proceso es la resolución del escáner, que normalmente es de alrededor de 48 um/píxel. Además, la intensidad y la calidad de la marca láser pueden variar a lo largo del plano de trabajo y, cuando se utiliza para calibrar un sistema multiláser, entre láseres, hace que el análisis de imágenes sea propenso a errores. Normalmente, se deben llevar a cabo varias iteraciones del proceso para lograr la precisión deseada y el disparo del láser para cada iteración puede tardar hasta 40 minutos. Por consiguiente, el proceso puede llevar mucho tiempo.

40 El documento US5832415 describe un método para calibrar el control de deflexión de un haz láser para un sistema de creación rápida de prototipos. Un medio sensible a la luz se expone a un haz láser en posiciones predeterminadas para generar un patrón de prueba. Una cámara de vídeo se mueve progresivamente a lo largo del patrón de prueba producido para producir porciones de patrón correspondientes del patrón de prueba con la cámara. Se utiliza un programa de evaluación para componer las porciones de patrón digitalizadas en un patrón general. Las coordenadas de imagen del patrón general se comparan con las coordenadas digitalizadas de un patrón de referencia producido fotomecánicamente. Una tabla de corrección necesaria para el control del escáner para desviar el haz láser se modifica sobre la base de la comparación.

45 El documento US6483596 describe un método para calibrar el control de un dispositivo de radiación en un sistema de creación rápida de prototipos, en donde se dispone una placa de calibración en una posición definida en el sistema de creación rápida de prototipos. La placa de calibración tiene un lado superior con una primera región y una segunda región separada de la primera región. La primera región está provista de cruces de referencia ópticamente detectables y la segunda región tiene un medio que es sensible a la radiación del dispositivo de radiación. Se produce un patrón de prueba de cruces exponiendo el medio a la radiación en posiciones deseadas predeterminadas definidas por datos de coordenadas de posición. Las regiones primera y segunda se digitalizan, por ejemplo, por medio de un escáner de píxeles, una cámara de vídeo o una cámara digital, y se calculan datos de corrección a partir de la comparación de las cruces de referencia y las cruces del patrón de prueba.

55 El documento EP2186625 describe un método para corregir la distorsión geométrica de los proyectores de luz digitales utilizados en un sistema de creación rápida de prototipos. Se utiliza una cámara para visualizar un patrón de prueba no compensado creado por cada proyector de luz digital. Cada patrón de prueba no compensado se compara con el patrón de prueba ideal para generar un mapa de corrección de patrones.

5 El documento WO2014/180971 describe un método de calibración automática de un dispositivo para la producción generativa de una pieza de trabajo tridimensional que comprende un primer y un segundo escáneres. Sobre una capa aplicada de material o un objetivo, se produce un primer patrón de prueba utilizando el primer escáner y se produce un segundo patrón de prueba utilizando el segundo escáner. El primer y el segundo patrones de prueba pueden ser un patrón de rejilla específico con una constante de red específica o un patrón de puntos. Se utiliza una cámara calibrada para capturar una imagen del primer y el segundo patrones de prueba y comparar el primer y el segundo patrones de prueba con un patrón de referencia almacenado en la memoria de un dispositivo de control. El primer y el segundo escáneres se calibran de manera que las desviaciones de los patrones de prueba correspondientes con respecto al patrón de referencia caigan por debajo de un valor deseado. El método de calibración puede comprender un método de autocorrelación o un método de coincidencia.

15 El documento WO2015/040433 describe el uso de un artefacto calibrado para generar un mapa de desplazamientos para diferentes ubicaciones del foco del haz láser a lo largo de un área de trabajo. El artefacto calibrado comprende una placa de Invar que tiene una serie de características que se pueden identificar mediante el análisis de imágenes. Se mueven ópticas orientables de manera que una esquina en la que se intersecan cuatro cuadrados se ubica en un centro de una imagen capturada por una cámara sobre el eje. El láser se dispara para generar una marca en el artefacto y se determina un desplazamiento de la marca con respecto a una ubicación esperada. El aparato también puede comprender un artefacto de calibración que permanece en un lugar en el aparato durante la construcción. El haz láser se puede enfocar en el artefacto de calibración entre la solidificación de capas de polvo para determinar utilizando la cámara sobre el eje si el haz láser se ha desviado de su posición calibrada durante la construcción.

20 El documento WO2015/083104 describe un método y un dispositivo para calibrar al menos un sistema de escaneado durante la fabricación de un objeto mediante fabricación aditiva, en donde se miden las coordenadas de una o varias posiciones de referencia en el sistema de coordenadas relativas de cada sistema de escaneado, tras lo cual se adapta la calibración de cada uno de los sistemas de escaneado a partir de las coordenadas medidas de las posiciones de referencia. En cada una de las posiciones de referencia se provee un sensor que permite detectar cuándo el punto de incidencia de un rayo se sitúa en la posición de referencia.

30 El documento WO2016/085334 describe un aparato y un método para producir un objeto mediante fabricación aditiva. El aparato comprende un soporte para posicionar el objeto en relación con el nivel de la superficie de un baño de material. Se provee un dispositivo de registro que comprende una unidad de cámara para captar imágenes de un elemento de calibración provisto sobre o cerca del soporte. Además, se dispone una unidad de control, conectada al dispositivo de registro, para utilizar una característica geométrica del elemento de calibración obtenida por el dispositivo de registro para controlar la posición de la radiación electromagnética emitida por el dispositivo de solidificación. Se pueden proveer cuatro o seis elementos de calibración posicionados en dos lados opuestos del baño de material generalmente rectangular.

35 El documento US2018/0345412 describe un método para calibrar un sistema óptico, en donde al menos los medios de escaneo se mueven con respecto a la cámara de construcción de la posición de producción a la posición de calibración y se mide un valor real para al menos un parámetro del sistema óptico y el valor real medido se compara con un valor seleccionado para dicho parámetro. A continuación, los medios de escaneo se devuelven a la posición de producción y el sistema óptico se ajusta de manera que el valor real de al menos un parámetro se corresponda con el valor seleccionado del parámetro correspondiente, donde posteriormente se fabrica el producto. En la posición de calibración, el haz, por medio de los medios de escaneo, puede incidir en un dispositivo de calibración que contiene al menos dos, y preferiblemente al menos tres, sensores de posición para medir la posición del punto de incidencia del haz en diferentes posiciones en un plano de calibración bidimensional.

45 El documento US2010/0292947 A1 describe un método y un sistema para reducir un error de posicionamiento al posicionar un haz de luz sobre una pieza de trabajo o desde ella. Un detector de visión se coloca con su eje óptico alineado con una trayectoria del haz láser. Mediante esta disposición, la luz visible procedente de una pieza de trabajo, una plataforma o una plantilla de calibración se desplaza a lo largo de la misma trayectoria que el haz láser. Un sistema de posicionamiento de galvanómetro se calibra utilizando imágenes capturadas por el detector de visión.

50 El documento JP200826478 describe un método para ajustar un aparato de mecanizado por haz láser que tiene una fuente de luz láser, un escáner galvanométrico y una tabla de calibración. El método incluye: disponer sobre un plano objetivo una placa de escala que tiene múltiples marcas de escala, accionar el escáner galvanométrico y determinar un valor de corrección observando cada una de las marcas de escala de la placa de escala con una cámara, y obtener la tabla de calibración de la cámara para el escáner galvanométrico.

55 Los documentos US2019/270161 A1 y WO2019/197138 A1 describen métodos para calibrar una máquina de procesamiento para producir componentes tridimensionales mediante la irradiación de capas de polvo, en donde la máquina de procesamiento tiene un dispositivo de escaneo para posicionar un haz láser en un campo de procesamiento. El método comprende barrer retroreflectores esféricos con un haz láser.

El documento WO2009/026520 A1 describe sistemas y métodos para calibrar un sistema de formación de imágenes sólidas. El sistema y los métodos escanean un haz láser sobre una placa de calibración que tiene una superficie que no dispersa la luz con múltiples marcas fiduciales que dispersan la luz en una matriz periódica.

El documento US2020/023585 A1 describe un dispositivo y un método para calibrar un sistema de irradiación, en donde el sistema de irradiación se utiliza para fabricar una pieza de trabajo tridimensional. El haz láser se escanea a lo largo de una estructura de calibración que comprende dos porciones de calibración. Las porciones de calibración tienen la forma de depresiones dentro de una región de base en forma de huecos alargados formados por corte.

5 El documento EP3730234 A1 describe un sensor óptico configurado para detectar una señal de dispersión del haz láser generado al reflejarse en múltiples marcas de calibración y la plataforma de construcción. Un dispositivo informático está configurado para recibir la señal de dispersión del sensor óptico y para alinear los cabezales láser de manera que la señal de dispersión se alinee con las múltiples marcas de calibración y de manera que los cabezales láser se alineen entre sí. Las marcas de calibración pueden incluir patrones como, por ejemplo, un patrón de
10 cuadrícula, un patrón de puntos y/o un patrón de tablero de ajedrez.

El documento WO2020/006260 A1 describe un sistema de impresión tridimensional para solidificar una resina fotocurable en una manera capa por capa en un plano de construcción. Un módulo de escaneo está configurado para escanear el haz de luz sobre una placa transparente colocada en la trayectoria óptica entre el módulo de escaneo y un plano de construcción. La placa transparente tiene al menos una característica reflectante en la trayectoria óptica. Un sensor está
15 montado sobre la placa de vidrio y está posicionado para recibir la luz reflejada desde la característica reflectante.

El documento US2020/001526 A1 describe un sistema de impresión tridimensional que comprende un módulo de escaneo y una abertura, cerrada por una placa transparente, para permitir que el haz de escaneo aborde completamente el plano de construcción. Una característica reflectante está montada debajo de la placa transparente. Durante el funcionamiento, un sensor puede monitorear una intensidad de radiación reflejada por la característica reflectante y un controlador puede recibir y analizar una señal del sensor para determinar una reducción en el nivel de potencia de los haces que alcanzan el plano de construcción. El controlador puede aumentar una dosis de energía en compensación.
20

Compendio de la invención

Según un primer aspecto de la invención, se provee un método para determinar una alineación de un escáner óptico para dirigir un haz electromagnético a ubicaciones dentro de un campo de escaneo según la reivindicación 1.

25 El método para determinar una alineación del escáner óptico puede permitir el uso de un fotodetector para detectar la radiación electromagnética reflejada como, por ejemplo, un fotodiodo, que integra la intensidad a lo largo de un campo de visión del sensor, en lugar de un detector espacial más costoso y complejo como, por ejemplo, una cámara o un detector sensible a la posición (PSD, por sus siglas en inglés). La resolución espacial del método se logra reposicionando el haz electromagnético mediante el escáner óptico como, por ejemplo, mediante un escaneo, por
30 ejemplo un escaneo de trama, en lugar de mediante una resolución espacial del detector. Esto puede resolver problemas con los métodos basados en cámaras o PSD como, por ejemplo, un requisito para alinear y/o determinar una alineación entre la imagen capturada por la cámara y el haz electromagnético y la distorsión de la imagen a través de un tren óptico, por ejemplo como resultado de la óptica de enfoque y/o un divisor de haz.

35 El método puede comprender la detección de la radiación electromagnética reflejada con un fotodetector en el eje montado para detectar la radiación electromagnética que se desplaza de regreso a lo largo de un tren óptico utilizado para entregar el haz electromagnético.

40 El haz electromagnético puede ser un haz láser emitido desde un láser de fibra y el fotodetector puede estar dispuesto para detectar la radiación electromagnética que se desplaza en sentido inverso a través de una fibra de emisión o una óptica de emisión del haz del láser de fibra. De esta manera, el fotodetector puede detectar luz en una longitud de onda de excitación del haz electromagnético como, por ejemplo, una longitud de onda láser, que se refleja en una óptica de emisión del haz de la fibra óptica a lo largo de la misma trayectoria en la que el haz electromagnético se emite a la superficie de trabajo. Por consiguiente, no se requiere una alineación separada de la óptica de emisión del haz y del fotodetector con un eje óptico de un tren óptico del escáner óptico.

45 El método puede comprender dirigir la radiación electromagnética que se desplaza hacia atrás en la fibra óptica, como, por ejemplo, en el material que rodea un núcleo de fibra óptica de distribución de la fibra óptica, al fotodetector. La radiación electromagnética que se desplaza hacia atrás en la fibra óptica puede ser dirigida al fotodetector por un divisor que elimina la radiación electromagnética que se desplaza hacia atrás, por ejemplo en el material de recubrimiento de la fibra óptica que rodea el núcleo de fibra óptica de distribución. El divisor puede estar integrado en una fibra de distribución o en una óptica de distribución de haz del láser de fibra. El divisor puede comprender un
50 eliminador de modos de revestimiento que dirige la radiación electromagnética en el material de recubrimiento al fotodetector. El divisor puede comprender un núcleo de fibra óptica de detector en contacto óptico con el núcleo de fibra óptica de distribución, en donde el núcleo de distribución y el núcleo de fibra óptica de detector están rodeados por un material de recubrimiento común, estando el segundo núcleo de fibra óptica dirigido hacia el fotodetector.

55 El método puede comprender un método para calibrar el escáner óptico, que comprende calcular un mapa de calibración para el escáner óptico a partir de la señal de demanda correspondiente y la posición de referencia. El método puede comprender un método para validar la alineación del escáner óptico, que comprende determinar si existe un desplazamiento entre la posición de referencia y una posición de demanda correspondiente a la señal de demanda correspondiente.

- 5 El elemento de referencia puede comprender una superficie reflectante irradiada por la radiación electromagnética. La superficie reflectante del elemento de referencia puede estar en una interfaz entre la atmósfera gaseosa y el elemento de referencia. Preferiblemente, el elemento de referencia es opaco a la radiación electromagnética. La superficie reflectante puede proveer una alta reflexión especular a una longitud de onda del haz electromagnético, por ejemplo, la superficie reflectante puede proveer más del 50 %, preferiblemente más del 60 %, más preferiblemente más del 70 % y lo más preferiblemente más del 80 % de reflexión especular a una longitud de onda del haz electromagnético. La cantidad de reflexión especular lograda por la superficie reflectante puede medirse con un brillómetro. Para lograr una reflexión especular tan alta, la superficie reflectante puede ser una superficie reflectante pulida como, por ejemplo, una superficie pulida de metal.
- 10 El método puede comprender determinar cuándo el haz electromagnético se dirige a una posición de referencia en el campo de escaneado dado por el elemento de referencia a partir de un cambio en la intensidad de la radiación electromagnética detectada para diferentes posiciones del haz electromagnético en el elemento de referencia. El método puede comprender determinar cuándo el haz electromagnético se dirige a la posición de referencia a partir de cuando una intensidad de la radiación electromagnética detectada está en un máximo, por ejemplo cuando el haz electromagnético está en incidencia normal a una superficie circular o esférica del elemento de referencia. El método puede comprender determinar cuándo el haz electromagnético se dirige a la posición de referencia a partir de cuando una intensidad de la radiación electromagnética detectada está en un máximo desde los múltiples puntos en el elemento de referencia. De esta manera, la posición de referencia no se define solo por cuando una intensidad de la radiación detectada cambia entre el haz electromagnético que apunta lejos y hacia el elemento de referencia sino también a partir de un cambio en la intensidad a medida que el haz electromagnético se dirige a diferentes puntos en el elemento de referencia. Se puede ajustar una curva a la intensidad de la radiación detectada y la señal de demanda correspondiente es la señal de demanda que hace que el escáner óptico dirija el haz electromagnético a una posición en el elemento de referencia que da como resultado una intensidad pico. Esto puede deberse a que la superficie reflectante del elemento de referencia tiene una forma tal que una cantidad de radiación electromagnética del haz electromagnético retroreflejado desde la superficie reflectante depende de un ángulo de incidencia del haz electromagnético con respecto a la superficie reflectante. La superficie reflectante puede estar dispuesta de tal manera que, si el haz electromagnético incide en la superficie reflectante en un ángulo que se aleja de la incidencia normal, el haz electromagnético se refleja lejos del escáner óptico y la intensidad de la radiación reflejada detectada es relativamente pequeña en comparación con la intensidad de la radiación reflejada detectada cuando el haz electromagnético tiene una incidencia normal con respecto a la superficie reflectante. Por consiguiente, el elemento de referencia no es un retroreflector, ya que el elemento de referencia rara vez devuelve la luz reflejada a su fuente. Los retroreflectores reflejan la radiación de vuelta a su fuente con una dispersión mínima en un amplio rango de ángulos de incidencia.
- 20 El uso del principio de reflexión especular retroreflejada, donde la luz se refleja de manera eficiente en un ángulo igual pero opuesto, puede dar como resultado una señal detectada más alta y una selectividad espacial mejorada. Las señales detectadas más altas pueden dar como resultado señales con relaciones señal/ruido más altas.
- 25 Preferiblemente, la superficie reflectante provee una reflexión sustancialmente uniforme del haz electromagnético en toda su extensión. En otras palabras, no hay sustancialmente ninguna modulación en la reflectividad de la superficie de la superficie reflectante. No es necesario que la superficie reflectante provea tales cambios en la reflectividad porque el ángulo de incidencia del haz electromagnético en la superficie reflectante curva provee un cambio suficiente en la señal detectada.
- 30 El elemento de referencia puede comprender una esfera metálica. Una esfera metálica puede tener una alta tolerancia a los daños causados por el haz electromagnético, lo cual permite utilizar el escáner con un haz electromagnético más cercano a o a potencias de procesamiento (p. ej., potencias utilizadas para fundir polvo metálico o mecanizar piezas metálicas), lo cual garantiza que el estado térmico de los escáneres durante la calibración coincida estrechamente con el estado térmico durante el procesamiento/la construcción.
- 35 El elemento de referencia comprende una superficie circular o esférica de manera que cuando el haz electromagnético se dirige a un centro de un círculo o esfera, como se define por la superficie circular o esférica, el haz electromagnético tiene una incidencia normal con respecto a la superficie circular o esférica. De esta manera, cuando el haz electromagnético se dirige al centro del círculo o esfera, como se define por la superficie circular o esférica, la mayor proporción de la radiación electromagnética se retrorefleja a lo largo de una trayectoria del haz electromagnético. Por consiguiente, al analizar un cambio en la intensidad de las señales detectadas es posible identificar cuándo el haz electromagnético se dirige al centro del círculo o esfera, como se define por la superficie circular o esférica. Al ubicar el centro en una posición de referencia dentro del campo de escaneado como, por ejemplo, una posición de referencia en el plano de trabajo, es posible comparar la posición de demanda que hace que el haz electromagnético se dirija a esta posición de referencia con la posición de referencia y determinar si existe un desplazamiento entre las dos.
- 40 En el caso en que el escáner óptico esté dispuesto para dirigir el haz electromagnético hacia un plano de trabajo, todos los puntos de la superficie circular o esférica del elemento de referencia intersecado por un plano perpendicular al plano de trabajo se encuentran a la misma distancia, r , del centro. El centro puede estar en el plano de trabajo.
- 45 Se entenderá que el término "superficie circular o esférica" tal como se utiliza en la presente memoria incluye una

superficie que forma un círculo o esfera completos y una superficie que forma una fracción de un círculo o esfera. Además, "superficie circular o esférica" incluye superficies cóncavas, así como convexas y, por lo tanto, incluye superficies "internas" de un círculo o esfera incompletos. El elemento de referencia puede comprender una bola (por ejemplo, una esfera) o una fracción de una esfera como, por ejemplo, un hemisferio o una forma que tenga una superficie circular como, por ejemplo, un cilindro, un hemis cilindro u otra fracción de un cilindro, toro, hemitoro u otra fracción de un toro. Una ventaja de una superficie esférica en lugar de circular es que la superficie esférica ubicará el haz electromagnético en un punto en dos dimensiones, mientras que una superficie circular no esférica solo puede ubicar el haz electromagnético en una dimensión.

El escáner óptico puede estar dispuesto para dirigir el haz electromagnético a ubicaciones en un plano de trabajo y el elemento de referencia puede estar ubicado de manera que un centro de una esfera, como se define por la superficie esférica, esté ubicado en el plano de trabajo.

El elemento de referencia puede ser parte de un artefacto de calibración, en donde la posición de referencia es una posición predeterminada del elemento de referencia en el artefacto de calibración. Por ejemplo, la posición de referencia puede ser una posición relativa a una característica de ubicación del artefacto de calibración como, por ejemplo, un soporte cinemático, que ubica el artefacto de calibración en un aparato que comprende el escáner óptico, un dato u otro elemento de referencia del artefacto de calibración.

El método puede comprender la ubicación de múltiples elementos de referencia en el campo de escaneado. Los múltiples elementos de referencia pueden comprender una matriz de elementos de referencia y la posición de referencia es una posición dentro de un plano común, p. ej., un plano de calibración, en relación con los otros elementos de referencia, por ejemplo, como parte del artefacto de calibración. Los múltiples elementos de referencia pueden comprender una matriz de elementos de referencia, comprendiendo cada elemento de referencia una superficie circular o esférica, en donde los centros, como se definen por las superficies circulares o esféricas, se encuentran en un plano común. El método puede comprender la ubicación de la matriz de elementos de referencia de manera que el plano común coincida sustancialmente con el plano de trabajo, por ejemplo, dentro de +/-100 µm del plano de trabajo.

La posición de referencia se puede determinar utilizando una sonda de detección de superficie como, por ejemplo, un disparador táctil o una sonda de detección de superficie de escaneo montada en una máquina de posicionamiento de coordenadas como, por ejemplo, una máquina de medición de coordenadas (CMM, por sus siglas en inglés) o una máquina herramienta. El artefacto de calibración se puede insertar de manera extraíble en el aparato que comprende el escáner óptico de modo que se pueda colocar en el plano de trabajo del escáner óptico entre operaciones como, por ejemplo, entre construcciones de fabricación aditiva.

Un radio de curvatura de la superficie esférica está entre z_R y $4z_R$, y preferiblemente $2z_R$ y $4z_R$, en donde z_R es la longitud de Rayleigh del haz electromagnético dada por:

$$z_R = \frac{(\pi \cdot \omega_0^2)}{\lambda} \quad (1)$$

donde ω_0 es el radio del haz en el foco y λ es la longitud de onda del haz electromagnético. En el foco, los frentes de onda de un haz electromagnético enfocado actúan como una onda plana y el radio de curvatura es infinito. Sin embargo, a medida que uno se aleja del foco, los frentes de onda se curvan antes de volverse rápidamente planos. Por consiguiente, para obtener una reflexión adecuada del haz electromagnético cerca pero alejado del foco, es deseable que la superficie esférica del elemento de referencia corresponda sustancialmente a la curvatura del frente de onda en ese punto. Se cree que las superficies esféricas tienen un radio de curvatura de la superficie esférica entre z_R y $4z_R$, y preferiblemente $2z_R$ y $4z_R$, reflejará adecuadamente el haz electromagnético.

Para un láser Nd-YAG que funciona a 1064 nm, el radio de curvatura puede estar entre 5 mm y 10 mm, y preferiblemente 6 mm.

El método puede comprender la reubicación del elemento de referencia en el campo de escaneado, por ejemplo dentro del plano de trabajo, de una primera ubicación a una segunda ubicación y la realización de las etapas del método descritas anteriormente tanto para la primera como para la segunda ubicaciones. La primera y la segunda ubicaciones pueden estar espaciadas por menos de un ancho del elemento de referencia en una dirección en la cual se reubica el elemento de referencia. Cuando los múltiples elementos de referencia están en la segunda ubicación, uno de los elementos de referencia puede estar espaciado por menos de un ancho del elemento de referencia del u otro elemento de referencia cuando los múltiples elementos de referencia están en la primera ubicación. La primera y la segunda ubicaciones pueden estar definidas por dos conjuntos de soportes cinemáticos que definen dos posiciones repetibles para el elemento de referencia. De esta manera, una densidad de puntos de datos puede ser mayor que una densidad de los elementos de referencia. La reducción de un ancho del elemento de referencia por debajo de un cierto tamaño puede estar restringida por la necesidad de que la curvatura de la superficie esférica se corresponda sustancialmente con la del frente de onda del haz electromagnético.

El método puede comprender escanear en trama el elemento de referencia o cada uno de ellos dos veces, primero con un escaneo unidireccional o bidireccional de líneas de escaneo que se extienden en una primera dirección y

segundo con un escaneo unidireccional o bidireccional de líneas de escaneo que se extienden en una segunda dirección transversal a la primera dirección. La segunda dirección puede ser perpendicular a la primera dirección. Una densidad de puntos de datos a lo largo de una dirección de las líneas de escaneo puede ser mayor que perpendicular a las líneas de escaneo porque el espaciado entre los puntos de recolección de datos a lo largo de la línea de escaneo puede ser menor que el espaciado entre las líneas de escaneo. Al escanear el elemento de referencia o cada uno de ellos en dos direcciones, una transversal como, por ejemplo, perpendicular, a la otra, se aumenta la densidad de puntos de datos. El método puede comprender escanear en trama el elemento de referencia o cada uno de ellos una o más veces con un escaneo unidireccional o bidireccional de líneas de escaneo que se extienden en una o más direcciones adicionales transversales a la primera y segunda direcciones. En una realización preferida, el elemento de referencia o cada uno de ellos se escanea en trama al menos cuatro veces, cada una en una dirección diferente, por ejemplo, con una separación de 45 grados.

La potencia del láser utilizada para escanear el elemento de referencia puede ser inferior a la potencia del láser operativo utilizado para llevar a cabo operaciones como, por ejemplo, una construcción de fabricación aditiva, después de determinar la alineación de un escáner óptico.

El método puede comprender la realización del método anterior para múltiples escáneres ópticos del mismo aparato, en donde los campos de escaneo de los escáneres ópticos se superponen y el mismo elemento de referencia se utiliza para calibrar varios de los múltiples escáneres. De esta manera, se verifica una alineación de cada escáner óptico con respecto a la misma posición de referencia y se puede verificar/validar una alineación de los escáneres ópticos entre sí.

El escáner óptico o cada uno de ellos pueden comprender al menos un elemento óptico móvil para dirigir el haz electromagnético a diferentes posiciones dentro del campo de escaneado. El elemento óptico puede ser un espejo montado para girar alrededor de un eje. La rotación del espejo puede ser impulsada por un galvanómetro.

El escáner óptico o los múltiples escáneres ópticos pueden comprender parte de un aparato de fabricación aditiva en el cual se construye un objeto capa por capa formando sucesivamente una capa de polvo e irradiando selectivamente la capa con el haz electromagnético para consolidar regiones de la capa. Las capas de polvo pueden formarse en el plano de trabajo. El elemento de referencia puede estar montado en el aparato de manera que el escáner óptico pueda dirigir la radiación electromagnética sobre el elemento de referencia cuando el polvo está presente en el aparato de fabricación aditiva. Por ejemplo, el elemento de referencia puede estar montado para que sea móvil sobre la capa de polvo como, por ejemplo, en un recubridor para formar las capas de polvo, o en una ubicación fija con respecto a la capa de polvo como, por ejemplo, en un lado del lecho de polvo. En este último caso, el elemento de referencia puede estar montado por encima del plano de trabajo del lecho de polvo de manera que el elemento de referencia no esté cubierto por el polvo, por ejemplo, el elemento de referencia puede estar sujeto por encima del plano de trabajo sobre un vástago o columna.

Según un segundo aspecto de la invención, se provee un aparato según la reivindicación 14.

El aparato puede comprender un láser de fibra y el fotodetector puede estar dispuesto para detectar la radiación electromagnética que se desplaza en sentido inverso a través de una fibra de suministro o una óptica de suministro de haz del láser de fibra. Por ejemplo, el aparato puede comprender un divisor dispuesto para eliminar la radiación electromagnética que se desplaza en sentido inverso en la fibra óptica y dirigir la radiación electromagnética al fotodetector. El escáner óptico puede comprender al menos un elemento óptico móvil y el fotodetector está dispuesto para detectar la radiación electromagnética reflejada al fotodetector a través del al menos un elemento óptico móvil a lo largo de la misma trayectoria en la que el haz electromagnético se suministra a la superficie de trabajo.

El aparato puede comprender el elemento de referencia. El elemento de referencia puede estar montado en el aparato de tal manera que el escáner óptico pueda dirigir la radiación electromagnética hacia el elemento de referencia cuando el polvo está presente en el aparato de fabricación aditiva. Por ejemplo, el elemento de referencia puede estar montado para que sea móvil sobre la capa de polvo como, por ejemplo, en un recubridor para formar las capas de polvo, o en una ubicación fija con respecto a la capa de polvo como, por ejemplo, en un lado del lecho de polvo. En este último caso, el elemento de referencia puede estar montado por encima del plano de trabajo del lecho de polvo de tal manera que el elemento de referencia no esté cubierto por el polvo, por ejemplo, el elemento de referencia puede estar colocado por encima del plano de trabajo sobre un vástago o columna.

Se puede proveer un soporte de datos que tenga instrucciones en el mismo que, cuando son ejecutadas por un controlador de un aparato que comprende un escáner óptico para dirigir un haz electromagnético a ubicaciones dentro de un campo de escaneo y un detector para detectar radiación electromagnética reflejada, hacen que el controlador genere señales de demanda para el escáner óptico para hacer que el escáner óptico dirija el haz electromagnético a múltiples puntos diferentes en un campo de escaneo en donde está ubicado un elemento de referencia, que incluye al menos un punto, y preferiblemente múltiples puntos, en el elemento de referencia; recibir señales del detector del detector; determinar a partir de las señales del detector cuándo se dirige el haz electromagnético a una posición de referencia en el campo de escaneo dada por el elemento de referencia a partir de una comparación de una intensidad de las señales detectadas para los diferentes puntos; y determinar una señal de demanda correspondiente que hace que el escáner óptico dirija el haz electromagnético a la posición de referencia.

Las instrucciones, cuando son ejecutadas por el controlador, pueden hacer que el controlador determine cuándo el haz electromagnético se dirige a la posición de referencia desde cuando una intensidad de la radiación electromagnética detectada está en un máximo, por ejemplo cuando la radiación electromagnética tiene una incidencia normal en la superficie del elemento de referencia.

- 5 Las instrucciones, cuando las ejecuta el controlador, pueden hacer que el controlador determine un mapa que mapea las señales de demanda a posiciones dentro de un campo de escaneo.

Las instrucciones, cuando son ejecutadas por el controlador, pueden hacer que el controlador determine si existe un desplazamiento entre la posición de referencia y una posición de demanda correspondiente a la señal de demanda correspondiente.

- 10 Se puede proveer un soporte de datos que tenga instrucciones en el mismo que, cuando son ejecutadas por un procesador, hacen que el procesador reciba señales de detector generadas por un detector cuando un escáner óptico dirige un haz electromagnético a múltiples puntos diferentes en un campo de escaneo en donde se encuentra ubicado un elemento de referencia; determine a partir de las señales del detector cuándo se dirige el haz electromagnético a una posición de referencia en el campo de escaneo dada por el elemento de referencia a partir de una comparación de una intensidad de las señales detectadas; y determine una señal de demanda correspondiente que hace que el escáner óptico dirija el haz electromagnético a la posición de referencia.
- 15

Un artefacto de calibración de un escáner óptico puede comprender múltiples elementos de referencia, teniendo cada elemento de referencia una superficie circular, en donde el centro de un círculo definido por cada superficie circular está ubicado dentro de un plano común.

- 20 Un radio de curvatura de la superficie esférica está entre z_R y $4z_R$, y preferiblemente $2z_R$ y $4z_R$, donde z_R es la longitud de Rayleigh del haz electromagnético dada por:

$$z_R = \frac{(\pi \cdot \omega_0^2)}{\lambda} \quad (1)$$

en donde ω_0 es el radio del haz en el foco y λ es la longitud de onda del haz electromagnético. En el foco, los frentes de onda de un haz electromagnético enfocado actúan como una onda plana y el radio de curvatura es infinito. Sin embargo, a medida que uno se aleja del foco, los frentes de onda se curvan antes de volverse rápidamente planos. Por consiguiente, para obtener una reflexión adecuada del haz electromagnético cerca pero alejado del foco, es deseable que la superficie esférica del elemento de referencia corresponda sustancialmente a la curvatura del frente de onda en ese punto. Se cree que las superficies esféricas tienen un radio de curvatura de la superficie esférica entre z_R y $4z_R$, y preferiblemente $2z_R$ y $4z_R$, reflejará adecuadamente el haz electromagnético.

25

- 30 Un aparato de fabricación aditiva puede comprender un láser de fibra para generar un haz láser que comprende una fibra óptica, un escáner óptico para dirigir el haz láser de un extremo de la fibra óptica a múltiples ubicaciones en un plano de trabajo, un fotodetector y un divisor para eliminar la radiación electromagnética que se desplaza hacia atrás en la fibra óptica y dirigir la radiación electromagnética al fotodetector.

- 35 El divisor puede estar dispuesto para dividir la radiación electromagnética que se desplaza hacia atrás en el material de revestimiento de la fibra óptica que rodea un núcleo de fibra óptica de distribución. El divisor puede comprender un eliminador de modos de revestimiento que dirige la radiación electromagnética en el material de revestimiento hacia el fotodetector. El divisor puede comprender un núcleo de fibra óptica de detector en contacto óptico con el núcleo de fibra óptica de distribución, en donde el núcleo de distribución y el núcleo de fibra óptica de detector están rodeados por un material de revestimiento común, estando dispuesto el segundo núcleo de fibra óptica para dirigir la radiación electromagnética hacia el fotodetector.
- 40

- 45 Un método de fabricación aditiva puede comprender detectar con un fotodetector integrado en un láser de fibra, la radiación electromagnética emitida desde un lecho de polvo en donde se consolida el material utilizando un haz electromagnético generado por el láser de fibra, en donde el haz electromagnético es dirigido a diferentes posiciones en el lecho de polvo por al menos un elemento óptico móvil de un escáner óptico; y correlacionar cada señal del detector generada por el fotodetector con una posición del elemento óptico o una señal de demanda que provoca el movimiento del elemento óptico móvil.

- 50 Se puede proveer un soporte de datos que tenga instrucciones en el mismo que, cuando son ejecutadas por un procesador, hacen que el procesador reciba señales de detector generadas por un fotodetector integrado en un láser de fibra de un aparato de fabricación aditiva, detectando el fotodetector la radiación electromagnética emitida desde un lecho de polvo en donde se consolida material utilizando un haz electromagnético generado por el láser de fibra, en donde el haz electromagnético es dirigido a diferentes posiciones en el lecho de polvo por al menos un elemento óptico móvil de un escáner óptico; y correlacione cada señal de detector del fotodetector con una posición del elemento óptico o una señal de demanda que provoca el movimiento del elemento óptico móvil.

- 55 Un método para determinar un retardo de señal en un aparato de procesamiento puede comprender un escáner óptico para dirigir un haz electromagnético a ubicaciones dentro de un campo de escaneo y un fotodetector para detectar la

radiación reflejada a lo largo de una trayectoria óptica del haz electromagnético, comprendiendo el método ubicar un elemento de referencia dentro de un campo de escaneo del escáner óptico; controlar el escáner óptico para hacer que el haz electromagnético se dirija a múltiples puntos diferentes en el elemento de referencia; detectar la radiación electromagnética reflejada utilizando el fotodetector; y determinar el retardo de señal a partir de señales del fotodetector generadas por el fotodetector y un tiempo durante el cual se registran las señales del fotodetector.

El elemento de referencia puede tener una propiedad geométrica conocida; y, para cada retardo de señal candidato de múltiples retardos de señal candidatos, asociar cada señal del fotodetector con una posición de coordenadas definida por una señal de posición del haz desplazada temporalmente de la señal del fotodetector por el retardo de señal candidato y determinar una propiedad geométrica de una representación espacial resultante del elemento de referencia formado a partir de las señales del fotodetector; y determinar que el retardo de señal es el retardo de señal candidato que reproduce más fielmente la propiedad geométrica conocida.

La señal de posición del haz puede ser una señal de posición del haz de demanda enviada al escáner óptico por un controlador y el retardo de la señal es un retardo entre el controlador que emite la señal de posición del haz de demanda y una señal del fotodetector para esa posición del haz que se registra, por ejemplo, por el controlador. El controlador puede registrar un momento en donde se emite cada posición de demanda y un momento en donde se recibe cada señal del fotodetector y aplicar el retardo de la señal para determinar qué posición de demanda asociar a qué señal del fotodetector. La señal de posición del haz puede ser una señal de posición medida, por ejemplo, una posición de un elemento de dirección del escáner óptico, y el retardo de la señal es un retardo entre un controlador que registra la señal de posición medida y el controlador que registra una señal del fotodetector para esa posición del haz.

La propiedad geométrica conocida puede ser una característica de un perfil del elemento de referencia como, por ejemplo, una relación de longitud a ancho de la forma. En el caso en que el perfil sea una elipse como, por ejemplo, un círculo, la relación puede ser una relación de los ejes mayor y menor de la elipse. Por ejemplo, el elemento de referencia puede comprender un perfil circular y la relación de los ejes mayor y menor puede ser 1:1. El método puede comprender determinar una relación de la longitud y el ancho de la representación del elemento de referencia formado a partir de las señales del fotodetector para cada retardo de señal candidato y determinar qué retardo de señal candidato da como resultado una relación más cercana a la relación conocida del elemento de referencia. Sin embargo, se entenderá que la propiedad geométrica puede ser una propiedad geométrica diferente que define un perfil como, por ejemplo, un ángulo de un vértice o ángulos de un conjunto de vértices, longitudes de una o más líneas o relaciones de los ángulos de dichos vértices o las longitudes de las líneas.

Un aparato puede comprender un escáner óptico para dirigir un haz electromagnético a ubicaciones dentro de un campo de escaneo, un fotodetector para detectar radiación electromagnética reflejada y un controlador dispuesto para generar señales de demanda para el escáner óptico para hacer que el escáner óptico dirija el haz electromagnético a múltiples puntos diferentes en un elemento de referencia dentro del campo de escaneo; recibir señales del detector del fotodetector; y determinar el retardo de la señal a partir de las señales del fotodetector generadas por el fotodetector y un tiempo durante el cual las señales del fotodetector son registradas por el controlador.

El elemento de referencia puede tener una propiedad geométrica conocida; y el controlador puede estar dispuesto para, para cada retardo de señal candidato de múltiples retardos de señal candidatos, asociar cada señal del fotodetector a una posición de coordenadas definida por una señal de posición del haz desplazada temporalmente de la señal del fotodetector por el retardo de señal candidato y determinar una propiedad geométrica de una representación resultante del elemento de referencia formado a partir de las señales del fotodetector; y determinar que un retardo de señal real es el retardo de señal candidato que reproduce más fielmente la propiedad geométrica conocida.

Se puede proveer un soporte de datos que tenga instrucciones en el mismo que, cuando son ejecutadas por un procesador, hacen que el procesador reciba señales de fotodetector generadas por un fotodetector de un aparato que comprende un escáner óptico para dirigir un haz electromagnético a ubicaciones dentro de un campo de escaneo, el fotodetector para detectar radiación electromagnética reflejada, las señales de fotodetector generadas cuando el haz electromagnético se dirige a múltiples puntos diferentes en un elemento de referencia dentro del campo de escaneo; y determinar el retardo de señal a partir de las señales de fotodetector generadas por el fotodetector y un tiempo durante el cual se registran las señales de fotodetector.

El elemento de referencia puede tener una propiedad geométrica conocida; y las instrucciones pueden hacer que el controlador, para cada retardo de señal candidato de múltiples retardos de señal candidatos, asocie cada señal del fotodetector a una posición de coordenadas definida por una señal de posición del haz desplazada temporalmente de la señal del fotodetector por el retardo de señal candidato y determine una propiedad geométrica de una representación resultante del elemento de referencia formado a partir de las señales del fotodetector; y determine que un retardo de señal real es el retardo de señal candidato que reproduce más fielmente la propiedad geométrica conocida.

Un método para comprobar un aparato puede comprender múltiples escáneres, cada escáner óptico para dirigir un haz electromagnético correspondiente a ubicaciones en un plano de trabajo, comprendiendo el método determinar si las posiciones de coordenadas de un primer y segundo escáneres de los múltiples escáneres están alineadas en el plano de trabajo; controlar cada uno de los primer y segundo escáneres para dirigir el haz electromagnético correspondiente a una posición de referencia dentro del aparato; determinar para cada uno de los primer y segundo

escáneres si una posición de demanda que hace que el haz electromagnético correspondiente se dirija a la posición de referencia es diferente de una posición de demanda esperada; y generar una señal de salida indicativa de un cambio en el plano de trabajo en relación con los planos de calibración del primer y segundo escáneres si las posiciones de demanda tanto para el primer como para el segundo escáneres corresponden a las posiciones de demanda esperadas pero el primer y el segundo escáneres no están alineados en el plano de trabajo.

Los haces electromagnéticos de los escáneres ópticos pueden desalinearse en el plano de trabajo debido a un desplazamiento relativo en los planos de calibración de los escáneres ópticos y/o debido a un desplazamiento en el plano de trabajo con respecto al plano de trabajo. La alineación relativa de los escáneres ópticos se puede determinar utilizando un detector sensible a la posición (PSD) en el eje o una cámara dentro de al menos uno de los escáneres ópticos, por ejemplo, utilizando el método descrito en el documento WO2017/187147 A1, que se incorpora a la presente memoria en su totalidad mediante referencia. El dirigir el haz electromagnético correspondiente a la posición de referencia puede comprender escanear el haz electromagnético a lo largo de un elemento de referencia en el aparato, por ejemplo como se describe en la presente memoria con referencia al primer aspecto de la invención. El dirigir el haz electromagnético correspondiente a la posición de referencia permite determinar si es un desplazamiento relativo en los planos de calibración lo que ha causado la desalineación (en cuyo caso, las posiciones de demanda que hacen que los haces electromagnéticos se dirijan a la posición de referencia habrán cambiado) o si es un desplazamiento en el plano de trabajo (en cuyo caso, las posiciones de demanda que hacen que los haces electromagnéticos se dirijan a la posición de referencia permanecerán iguales).

Al menos el primer escáner puede comprender un detector o una cámara sensibles a la posición en el eje para detectar una posición de una característica dentro de un campo de visión del tren óptico, y determinar si las posiciones de coordenadas del primer y segundo escáneres están alineadas en el plano de trabajo puede comprender controlar el primer y segundo escáneres de manera que un punto del haz electromagnético correspondiente o una característica formada por el haz electromagnético correspondiente del segundo escáner esté dentro del campo de visión del primer escáner y determinar una alineación relativa de las posiciones de coordenadas del primer y segundo escáneres a partir de una posición del punto o la característica dentro del campo de visión según se determina utilizando el detector o la cámara sensibles a la posición en el eje. El haz electromagnético o una característica formada por el haz electromagnético correspondiente del segundo escáner puede caer dentro del campo de visión del primer escáner durante la construcción y, por lo tanto, puede no ser necesario dirigir el primer y segundo escáneres a posiciones adicionales más allá de las requeridas para completar la construcción con el fin de lograr la condición requerida para determinar la alineación relativa de los escáneres ópticos.

La posición de referencia puede proveer mediante un elemento de referencia como el descrito anteriormente. Por ejemplo, el elemento de referencia puede comprender una superficie circular o esférica como, por ejemplo, la superficie de una bola.

Cada uno de los escáneres ópticos puede comprender un fotodetector en el eje (para escáneres que comprenden un PSD o una cámara, además del PSD o la cámara) para detectar cuándo el haz electromagnético correspondiente se dirige a la posición de referencia, por ejemplo un fotodetector como el descrito anteriormente con referencia al primer aspecto de la invención.

El método puede comprender ajustar una posición de un recubridor que forma una capa de polvo con respecto a una plataforma de construcción que soporta un lecho de polvo formado a partir de las capas de polvo en respuesta a la señal de salida. Por ejemplo, si la señal de salida indica que las posiciones de coordenadas de los haces electromagnéticos de los escáneres primero y segundo están desalineadas en el plano de trabajo pero las posiciones de los planos de calibración de estos escáneres permanecen sin cambios con respecto a una calibración anterior, por ejemplo llevada a cabo utilizando un artefacto de calibración como se describe en la presente memoria, se puede deducir que la desalineación se debe a un cambio en la ubicación del plano de trabajo. Esto puede deberse al desgaste del recubridor, la expansión térmica de la plataforma de construcción y/o un eje z en donde está montada la plataforma de construcción o imprecisiones en el movimiento de la plataforma de construcción y/o el recubridor durante la construcción. Se puede determinar una corrección que se aplicará a un posicionamiento relativo de la plataforma de construcción y/o del recubridor utilizando triangulación basada en las posiciones relativas de los puntos del haz electromagnético en el plano de trabajo cuando los haces electromagnéticos se dirigen a la misma posición en un plano en la posición nominal (en oposición a la real) del plano de trabajo.

El aparato puede comprender múltiples escáneres ópticos que incluyen un primer y un segundo escáneres ópticos, comprendiendo cada escáner óptico un tren óptico para dirigir un haz electromagnético correspondiente a ubicaciones en un plano de trabajo y un fotodetector en el eje para detectar la radiación electromagnética reflejada a lo largo del tren óptico; comprendiendo al menos el primer escáner óptico un detector o cámara sensible a la posición para detectar una posición de una característica dentro de un campo de visión; y un controlador dispuesto para controlar el primer y segundo escáneres ópticos de manera que un punto del haz electromagnético correspondiente o una característica formada por el haz electromagnético correspondiente del segundo escáner óptico esté dentro del campo de visión y determinar si las posiciones de coordenadas de un primer y segundo escáneres de los múltiples escáneres están alineadas en el plano de trabajo desde una posición del punto o la característica dentro del campo de visión según se determina utilizando el detector o cámara sensible a la posición en el eje, controlar el primer y segundo escáneres ópticos para escanear el haz electromagnético correspondiente a lo largo de una posición de referencia dentro del

5 aparato, determinar a partir del fotodetector cuándo el haz electromagnético correspondiente se dirige a la posición de referencia y una posición de demanda para cada uno del primer y segundo escáneres que hace que el haz electromagnético correspondiente se dirija a la posición de referencia, comparar la posición de demanda con una posición de demanda esperada y generar una señal de salida indicativa de un cambio en el plano de trabajo en relación con los planos de calibración del primer y segundo escáneres si las posiciones de demanda tanto para el primer como para el segundo escáneres corresponden a las posiciones de demanda esperadas pero el primer y el segundo escáneres no están alineados en el plano de trabajo.

10 Se puede proveer un soporte de datos que tenga instrucciones en el mismo que, cuando son ejecutadas por un controlador de un aparato, múltiples escáneres, cada escáner óptico para dirigir un haz electromagnético correspondiente a ubicaciones en un plano de trabajo, hacen que el aparato lleve a cabo el método descrito anteriormente para verificar el aparato.

15 Un método para determinar una alineación de un escáner óptico para dirigir un haz electromagnético a ubicaciones dentro de un plano de trabajo, siendo el escáner óptico movable con relación al plano de trabajo, puede comprender determinar un mapa de calibración para posicionar el haz electromagnético en el plano de trabajo por el escáner óptico para una primera posición del escáner óptico con relación al plano de trabajo; mover el escáner óptico a una segunda posición con relación al plano óptico; detectar con un fotodetector en el eje, que observa el plano de trabajo a lo largo de un eje óptico del tren óptico del escáner óptico utilizado para dirigir el haz electromagnético, un elemento de referencia y determinar una transformación del mapa de calibración en base a las señales del fotodetector.

20 El mapa de calibración puede determinarse utilizando un artefacto de calibración como se describe con referencia al primer aspecto de la invención. El elemento de referencia puede detectarse según el método del primer aspecto de la invención.

El método puede comprender la detección con un fotodetector en el eje de múltiples elementos de referencia. Esto puede permitir determinar una transformación para múltiples grados de libertad, como un balanceo, un cabeceo y una guiñada del escáner óptico a medida que se mueve de la primera posición a la segunda posición.

25 El mapa de calibración puede definir un plano de calibración a lo largo del cual se determina el posicionamiento del haz electromagnético según lo dirige el escáner óptico y la transformación del mapa de calibración puede comprender la alineación del plano de calibración con el plano de trabajo para la segunda posición del escáner óptico.

30 El aparato puede comprender un escáner óptico para dirigir un haz electromagnético a ubicaciones en un plano de trabajo, siendo el escáner óptico movable con relación al plano de trabajo; un fotodetector en el eje, que observa el plano de trabajo a lo largo de un eje óptico del tren óptico del escáner óptico utilizado para dirigir el haz electromagnético; y un controlador dispuesto para controlar el escáner óptico en base a un mapa de calibración para posicionar el haz electromagnético en un plano de calibración, que se alinea con el plano de trabajo para una primera posición del escáner óptico con relación al plano de trabajo; el controlador dispuesto además para determinar una posición de un elemento de referencia a partir de señales del fotodetector cuando el escáner óptico está en una segunda posición con relación al plano de trabajo y determinar una transformación del plano de calibración para alinear el plano de calibración con el plano de trabajo cuando el escáner óptico está en la segunda posición en base a las señales del fotodetector.

35 Se puede proveer un soporte de datos que tiene instrucciones en el mismo que, cuando son ejecutadas por un controlador de un aparato que comprende un escáner óptico para dirigir un haz electromagnético a ubicaciones en un plano de trabajo, siendo el escáner óptico movable con relación al plano de trabajo; y un fotodetector en el eje, que observa el plano de trabajo a lo largo de un eje óptico del tren óptico del escáner óptico utilizado para dirigir el haz electromagnético; en donde el controlador está dispuesto para controlar el escáner óptico en base a un mapa de calibración para posicionar el haz electromagnético en un plano de calibración, que se alinea con el plano de trabajo para una primera posición del escáner óptico con relación al plano de trabajo; hacer que el controlador determine una posición de un elemento de referencia a partir de señales del fotodetector cuando el escáner óptico está en una segunda posición con relación al plano de trabajo y determinar una transformación del plano de calibración para alinear el plano de calibración con el plano de trabajo cuando el escáner óptico está en la segunda posición en base a las señales del fotodetector.

40 Un método para caracterizar un haz láser dirigido por un escáner óptico puede comprender localizar un elemento de referencia dentro de un campo de escaneo del escáner óptico; controlar el escáner óptico para hacer que el haz láser se dirija a al menos un elemento de referencia; detectar la radiación electromagnética reflejada para diferentes longitudes focales del haz láser y determinar una característica del haz láser a partir de cómo la intensidad de la radiación electromagnética reflejada detectada varía con la longitud focal del haz láser.

45 La característica puede ser una ubicación de un punto focal del haz láser y/o una divergencia del haz láser. El elemento de referencia puede ser un elemento de referencia descrito con respecto al primer aspecto de la invención que comprende una superficie circular o esférica.

55 El aparato puede comprender un escáner óptico para dirigir un haz láser y un fotodetector en el eje, que detecta la radiación electromagnética reflejada a lo largo de un eje óptico del tren óptico del escáner óptico utilizado para dirigir

el haz electromagnético; y un controlador dispuesto para controlar el escáner óptico para hacer que el haz láser se dirija a al menos un elemento de referencia, en donde se altera una longitud focal del haz láser; y determinar una característica del haz láser a partir de cómo la intensidad de la radiación electromagnética reflejada detectada varía con la longitud focal del haz láser.

5 Se puede proveer un soporte de datos que tenga instrucciones en el mismo que, cuando son ejecutadas por un procesador, hacen que el procesador reciba señales de fotodetector de un aparato que comprende un escáner óptico para dirigir un haz láser, en donde el fotodetector detecta la radiación electromagnética reflejada a lo largo de un eje óptico del tren óptico del escáner óptico utilizado para dirigir el haz láser; en donde una longitud focal del haz láser se altera para diferentes señales de las señales del fotodetector, y se determina una característica del haz láser a partir de cómo la intensidad de la radiación electromagnética reflejada detectada varía con la longitud focal del haz láser.

10 El soporte de datos puede ser un soporte de datos no transitorio como, por ejemplo, una memoria no permanente, p. ej., RAM, una memoria permanente, p. ej., ROM, una memoria flash y dispositivos de almacenamiento de datos como, por ejemplo, discos duros, discos ópticos, o un soporte de datos transitorio como, por ejemplo, una señal electrónica u óptica.

15 Un aparato puede comprender un escáner óptico para dirigir un haz electromagnético a ubicaciones dentro de un campo de escaneo plano, un detector para detectar radiación electromagnética reflejada y un artefacto de referencia ubicado dentro del campo de escaneo plano, comprendiendo el artefacto de referencia una superficie reflectante curva que tiene un radio que se extiende desde el campo de escaneo plano, estando dispuesto el elemento de referencia de tal manera que una cantidad de radiación electromagnética del haz electromagnético retrorreflejado desde la superficie reflectante depende de un ángulo de incidencia del haz electromagnético hacia la superficie reflectante.

El elemento de referencia puede ser un elemento de referencia como el descrito con referencia a los aspectos anteriores de la invención.

20 Un método para determinar una alineación de un escáner óptico para dirigir un haz electromagnético a ubicaciones dentro de un campo de escaneo puede comprender ubicar un elemento de referencia dentro del campo de escaneo del escáner óptico, comprendiendo el elemento de referencia una superficie reflectante curva; controlar el escáner óptico para hacer que el haz electromagnético se dirija a múltiples puntos en la superficie reflectante curva; detectar la radiación electromagnética reflejada; determinar cuándo el haz electromagnético es normal a la superficie reflectante curva a partir de una comparación de una intensidad de la radiación electromagnética detectada para los diferentes puntos; y determinar una señal de demanda correspondiente que hace que el escáner óptico dirija el haz electromagnético al punto en donde el haz electromagnético es normal a la superficie reflectante curva.

Descripción de los dibujos

La Figura 1 muestra un aparato de fabricación aditiva según una realización de la invención;

la Figura 2 es una vista en planta del aparato de fabricación aditiva que se muestra en la Figura 1;

35 la Figura 3 es una vista en perspectiva del sistema de galvanómetro de un escáner óptico del aparato de fabricación aditiva que se muestra en las Figuras 1 y 2;

la Figura 4 es una vista esquemática del aparato de fabricación aditiva en donde se han ubicado los elementos de referencia;

40 la Figura 5 ilustra un haz láser en incidencia normal a una superficie esférica de un elemento de referencia y el pico resultante en la señal del detector generada por un fotodetector;

la Figura 6 ilustra un primer y un segundo haces láser procedentes de un primer y un segundo escáneres ópticos correspondientes del aparato de fabricación aditiva en incidencia normal sobre una superficie esférica de un elemento de referencia;

la Figura 7 ilustra la curvatura del frente de onda del haz láser con la distancia desde el foco;

45 la Figura 8 es un gráfico que ilustra cómo el radio de curvatura de los frentes de onda del haz láser cambia con la distancia del foco;

la Figura 9 es un gráfico que ilustra cómo la intensidad de las señales en incidencia normal varía con la posición de la esfera para esferas de diferentes radios;

50 la Figura 10 es una vista en perspectiva de una primera realización de un artefacto de calibración según la invención que comprende múltiples elementos de referencia dispuestos en una matriz cuadrada;

la Figura 11 es una vista en perspectiva de una segunda realización de un artefacto de calibración según la invención que comprende múltiples elementos de referencia dispuestos en una matriz empaquetada

hexagonalmente;

la Figura 12 es una vista en perspectiva de una placa de calibración para montar esferas para formar un artefacto de calibración mostrado en la Figura 10 que comprende huecos de montaje trilobulados para montar las esferas;

5 las Figuras 13a a 13f son vistas en sección transversal de métodos alternativos de montaje de las esferas en el elemento de calibración y otros elementos de referencia con superficies esféricas;

la Figura 14 es una vista lateral de un elemento de referencia montado en una varilla para montar el elemento de referencia asegurado en el aparato de fabricación aditiva y elevado por encima del plano de trabajo;

la Figura 15 es una vista lateral de un recubridor y un elemento de referencia montado en el recubridor;

10 las Figuras 16a y 16b ilustran las restricciones impuestas a una posición de un elemento de referencia resultante de un rango focal de los escáneres ópticos;

la Figura 17 ilustra una rutina de escaneo para escanear cada elemento de referencia según una realización de la invención;

la Figura 18a es una vista en planta de una superficie de montaje del artefacto de calibración y la Figura 18b es una vista en planta de una superficie de montaje de la plataforma de construcción;

15 las Figuras 19a a 19c muestran imágenes construidas a partir de las señales del fotodetector obtenidas para diferentes posiciones del haz láser en el elemento de calibración y cómo la imagen se distorsiona mediante la aplicación de diferentes retardos de canalización;

la Figura 20 es un gráfico que indica cómo una medida de los ejes mayor y menor de la imagen del elemento de calibración se altera con el retraso de la canalización; y

20 la Figura 21 es un diagrama de flujo que ilustra un método de calibración y seguimiento de la alineación de un plano de calibración de un escáner óptico según una realización de la invención.

Descripción de realizaciones

25 Con referencia a las Figuras 1 a 3, un aparato de fabricación aditiva según una realización de la invención comprende una cámara 101 de construcción que tiene en su interior una placa 115 de procesamiento que tiene una abertura en su interior y un manguito 116 de construcción que se extiende hacia abajo desde la abertura. Una plataforma 102 de construcción se puede bajar en el manguito 116 de construcción de manera que el manguito 116 de construcción y la plataforma 102 de construcción juntos definen un volumen 117 de construcción. La plataforma 102 de construcción soporta una placa 102a de sustrato de construcción, un lecho 104 de polvo y una pieza 103 de trabajo (objeto) a medida que la pieza de trabajo se construye mediante la fusión selectiva del polvo por láser. La plataforma 102 se baja dentro del volumen 117 de construcción bajo el control de un mecanismo de accionamiento (no se muestra) a medida que se forman capas sucesivas de la pieza 103 de trabajo. La placa 102a de sustrato de construcción se monta sobre la plataforma 102 de construcción utilizando formaciones 146 de montaje en la placa 102a de sustrato de construcción y la formación 149 de montaje en la plataforma 102 de construcción, que juntas definen una o más posiciones repetibles de la placa 102a de sustrato de construcción en la plataforma 102 de construcción. Las formaciones de montaje cinemáticas son del tipo descrito con más detalle a continuación con referencia a las Figuras 18a y 18b.

30 Las capas de polvo 104 se forman a medida que se construye la pieza 103 de trabajo mediante el aparato 108 de dispensación y un recubridor 109. Por ejemplo, el aparato 108 de dispensación puede ser un aparato como el descrito en el documento WO2010/007396. El aparato 108 de dispensación dispensa polvo sobre una superficie 115a superior definida por la placa 115 de procesamiento y se extiende a lo largo del lecho de polvo mediante el recubridor 109. Una posición de un borde inferior del recubridor 109 define un plano 110 de trabajo en donde se consolida el polvo.

35 Múltiples módulos 105a, 105b, 105c y 105d láser generan haces 118a, 118b, 118c, 118d láser para fundir el polvo 104. Cada módulo láser comprende una fibra 128a, 128b, 128c, 128d óptica y una óptica 127a, 127b, 127c, 127d de suministro de haz (BDO, por sus siglas en inglés) para suministrar el haz 118a, 118b, 118c, 118d láser al escáner 106a, 106b, 106c, 106d óptico correspondiente. El escáner 106a, 106b, 106c, 106d óptico dirige los haces 118a, 118b, 118c, 118d láser hacia áreas seleccionadas del lecho 104 de polvo para construir el objeto. Los haces 118a, 118b, 118c, 118d láser entran a través de una ventana 107 láser común.

40 Cada escáner 106a, 106b, 106c, 106d óptico comprende una óptica 121 de dirección móvil, como dos espejos 141a, 141b montados en galvanómetros 124a, 124b (es preciso ver la Figura 3), para dirigir el haz 118 láser en direcciones perpendiculares, X e Y, a lo largo del plano 110 de trabajo y una óptica 120 de enfoque como, por ejemplo, dos lentes móviles para cambiar el foco del haz 118 láser. El escáner óptico se controla de manera que la posición focal del haz 118 láser permanezca en el mismo plano 110 en el que el haz 118 láser se mueve a lo largo del plano 110 de trabajo. Los sensores 125a, 125b de posición angular están integrados en cada galvanómetro 124a, 124b para medir una posición angular del espejo 121a, 121b correspondiente.

50

Como se muestra en la Figura 4 y en las Figuras 16a y 16b, cada escáner 106a, 106b, 106c, 106d óptico es capaz de dirigir el haz 118a, 118b, 118c, 118d láser correspondiente sobre un campo 132a, 132b, 132c, 132d de escaneo. Dentro de la cámara 101 de construcción se encuentran elementos 111, 112 de referencia en forma de bolas (por ejemplo, esferas) elevadas por encima del plano 110 de trabajo y dentro de un campo 132a, 132b, 132c, 132d de escaneo de al menos uno de los escáneres 106a, 106b, 106c, 106d ópticos sin obstruir la trayectoria del haz 118a, 118b, 118c, 118d láser hasta el lecho 104 de polvo. Los elementos 111 y 112 de referencia también deben estar dentro del rango focal de la óptica 120 de enfoque móvil de los escáneres ópticos. La Figura 16b ilustra el rango focal (campo focal) de uno de los escáneres ópticos y cómo los elementos de referencia pueden ubicarse por encima del plano 110 de trabajo pero dentro del rango focal. Al ubicar los elementos 111, 112 de referencia por encima del plano 110 de trabajo, se puede reducir el riesgo de contaminación de los elementos 111, 112 de referencia con polvo.

En esta realización, como se muestra en la Figura 14, los elementos 111, 112 de referencia están montados en vástagos 135 de modo que sobresalgan de una pared de la cámara 101 de construcción hacia el campo focal del escáner óptico. El montaje 135 está hecho preferiblemente de Invar de modo que una ubicación de los elementos 111, 112 de referencia permanece sustancialmente fija bajo cambios térmicos. Por consiguiente, los elementos 111, 112 de referencia pueden actuar como un punto de referencia para comprobaciones durante la construcción y se hará referencia a ellos en adelante como elementos de referencia. Sin embargo, la altura z del campo focal es pequeña (normalmente, +/- 50 mm) y puede ser difícil montar los elementos 111, 112 de referencia sin interferir con el movimiento del recubridor. Por consiguiente, en una realización alternativa, mostrada en la Figura 15, los elementos de referencia están ubicados en el recubridor 109 y se mueven a lo largo del lecho 104 de polvo con el movimiento del recubridor. En esta realización alternativa, se pueden llevar a cabo comprobaciones del proceso de la calibración del escáner óptico durante la construcción, como se describe con más detalle a continuación, cuando los elementos 111, 112 de referencia están ubicados por encima del lecho 104 de polvo a lo largo de una trayectoria del haz 118 láser desde el escáner 106 óptico hasta el lecho 104 de polvo. La ubicación de los elementos 111, 112 de referencia en el recubridor 109 libera el espacio a ambos lados del lecho 104 de polvo para elementos móviles como, por ejemplo, los brazos del recubridor.

Cada módulo 105a, 105b, 105c y 105d láser comprende un fotodetector 131a, 131b, 131c, 131d y un divisor 130a, 130b, 130c, 130d integrado en la fibra 128a, 128b, 128c, 128d de suministro o BDO 127a, 127b, 127c, 127d, dirigiendo el divisor 130a, 130b, 130c, 130d la radiación electromagnética que se desplaza hacia atrás en la fibra óptica hacia el fotodetector 131a, 131b, 131c, 131d. En una realización, el divisor 130a, 130b, 130c, 130d comprende un eliminador de modos de revestimiento que dirige la radiación electromagnética en el material de revestimiento al fotodetector 131a, 131b, 131c, 131d. En otra realización, el divisor 130a, 130b, 130c, 130d comprende un núcleo de fibra óptica de detector en contacto óptico con el núcleo de fibra óptica de suministro, en donde el núcleo de suministro y el núcleo de fibra óptica de detector están rodeados por un material de revestimiento común, estando el segundo núcleo de fibra óptica dirigido hacia el fotodetector 131a, 131b, 131c, 131d.

El fotodetector 131a, 131b, 131c, 131d está dispuesto para detectar luz en una longitud de onda de excitación del haz electromagnético como, por ejemplo, una longitud de onda láser, que se refleja de vuelta a la BDO 127a, 127b, 127c, 127d del láser de fibra a lo largo de la misma trayectoria que el haz electromagnético se entrega a la superficie 110 de trabajo.

Además, cada escáner 106a, 106b, 106c, 106d óptico comprende un divisor 122 de haz que refleja el haz 118 láser y transmite longitudes de onda de radiación procedentes del plano 110 de trabajo del lecho 104 de polvo. El divisor 122 de haz puede estar dispuesto para transmitir longitudes de onda que difieren de una longitud de onda del haz láser. La radiación que pasa a través del divisor 122 de haz se suministra a un módulo 126 de detector y se dirige a un sensor 123 de baño de fusión en el eje en forma de un detector sensible a la posición (PSD). En otra realización, el sensor 123 de baño de fusión es un fotodetector único que integra la intensidad sobre el campo de visión o una cámara como, por ejemplo, un CCD. El sistema óptico puede comprender filtros adicionales para filtrar longitudes de onda que no son de interés antes de que la radiación incida sobre el sensor 123 de baño de fusión. Por ejemplo, solo la luz visible puede ser de interés como, por ejemplo, la emitida por el plasma, o la luz en el espectro infrarrojo que surge de las emisiones térmicas del baño de fusión/plasma.

Un controlador 140 maestro, que comprende el procesador 161 y la memoria 162, está en comunicación con módulos del aparato de fabricación aditiva, a saber, los módulos 105a, 105b, 105c, 105d láser, los escáneres 106a, 106b, 106c, 106d ópticos, la plataforma 102 de construcción, el aparato 108 de dispensación, la escobilla 109, los sensores 123a, 123b, 123c, 123d, 125a, 125b y el fotodetector 131a, 131b, 131c, 131d.

Como se muestra en la Figura 4, cada escáner 106a, 106b, 106c, 106d óptico comprende un controlador 171 de escáner que recibe señales de los detectores 123, 125a, 125b 131 del escáner 106 óptico. Los datos del sensor se informan del controlador 171 de escáner óptico al controlador 140 maestro de la manera descrita en el documento WO2018/087556. Esto permite correlacionar los datos de los sensores de diferentes módulos de detector dentro de un marco de referencia de tiempo común.

El controlador 140 maestro controla los módulos basándose en el software almacenado en la memoria 162, como se describe a continuación. El controlador 140 maestro puede emitir señales a un ordenador 172 externo, por ejemplo a través de una red como, por ejemplo, Internet. El procesamiento descrito a continuación puede ser compartido entre

el controlador 140 maestro y el ordenador 172 externo. Por ejemplo, el ordenador externo puede calcular un mapa de calibración y/o un retraso de la canalización, pero el controlador 140 maestro puede llevar a cabo comprobaciones integradas utilizando los elementos 111, 112 de referencia.

5 Antes de comenzar la construcción, se lleva a cabo una calibración de los escáneres 106a, 106b, 106c, 106d ópticos utilizando el artefacto 114 de calibración. El artefacto 114 de calibración comprende una matriz de elementos 113 de referencia, en esta realización en forma de una matriz de esferas montadas en un patrón regular sobre una placa 119 portadora. Los elementos 111, 112, 113 de referencia son opacos y reflejan los haces 118a, 118b, 118c, 118d láser, preferiblemente una reflexión especular en lugar de difusa, en la superficie de los elementos 111, 112, 113 de referencia (es decir, en la interfaz entre la atmósfera y el elemento 111, 112, 113 de referencia sólido). Los elementos 10 111, 112, 113 de referencia están hechos de un material que tiene una reflectividad suficientemente alta para los haces 118a, 118b, 118c, 118d láser y propiedades térmicas tales que no se produce ablación, fusión o daño en los elementos 111, 112, 113 de referencia cuando se exponen a los haces 118a, 118b, 118c, 118d láser. En esta realización, las esferas 113 son bolas de carburo de tungsteno pulidas de 12 mm de diámetro en una matriz de paso de 14 mm. El patrón regular puede ser una matriz cuadrada de las esferas, como se muestra en la Figura 10 o una matriz hexagonal, como se muestra en la Figura 11. Una disposición hexagonal logra un empaquetamiento más cercano de las esferas y, por lo tanto, permite una calibración de mayor resolución. Las esferas 113 están montadas de manera que sus centros se encuentran ubicados sustancialmente dentro del mismo plano, un denominado plano de calibración.

Se entenderá que se pueden utilizar otros elementos 111, 112, 113 de referencia con forma como, por ejemplo, hemisferios u otras secciones parciales de una esfera.

20 Las Figuras 12 y 13a muestran una formación de montaje de tres lóbulos para el montaje de las esferas 113 en la placa 119 portadora. Se forman huecos 129 en la placa 119 portadora, y las paredes que definen cada hueco están conformadas para comprender tres lóbulos. Las esferas 113 se encajan a presión en los huecos 129 para conectar los lóbulos de manera que una posición de la esfera en el hueco 129 esté definida por una posición de los lóbulos. Los huecos 129 trilobulados pueden formarse con alta precisión, por ejemplo mediante mecanizado, para definir con 25 precisión las posiciones de las esferas en la placa 119 portadora. La fuerza de sujeción provista por los trilóbulos del hueco 129 puede ser suficiente para mantener las esferas 113 en su lugar. Sin embargo, se puede utilizar adhesivo si es necesario.

En las Figuras 13b a 13f se muestran disposiciones alternativas.

30 La Figura 13b ilustra una placa 229 de sujeción que está asegurada a una placa 219 portadora en su periferia y tiene agujeros cortados en la misma, por ejemplo usando corte láser, para ubicar las esferas 113 en una matriz en la placa 219 portadora, estando las esferas 113 sujetas entre la placa 219 portadora y la placa 229 de sujeción.

35 La Figura 13c ilustra una placa 319 portadora que tiene orificios 329 formados en ella, por ejemplo mediante mecanizado, teniendo cada orificio 329 un radio menor que la esfera 113 correspondiente. Las esferas 113 se ubican conectando cada esfera 113 con un orificio 329 correspondiente y asegurando la esfera 113 en su lugar usando un adhesivo 330.

La Figura 13d ilustra una placa 319 portadora que tiene huecos 429 en forma de V formados en ella, por ejemplo mediante mecanizado, cada uno. Las esferas 113 se colocan conectando cada esfera 113 con un hueco 429 en forma de V correspondiente y asegurando la esfera 113 en su lugar utilizando un adhesivo 430.

40 En cada una de estas realizaciones, la colocación precisa de las esferas 113 sobre la placa 229, 329, 429 portadora se logra mediante el mecanizado preciso de características de montaje en la placa portadora, que actúan para ubicar las esferas. La característica de montaje puede asegurar además la esfera 113 en su lugar o la esfera puede asegurarse en su lugar utilizando un elemento/miembro de fijación adicional como, por ejemplo, un adhesivo.

45 Las Figuras 13e y 13f muestran una realización adicional de elementos 513 de referencia. En esta realización, los elementos 513 de referencia no son esferas completas sino varillas o pilares que tienen una superficie 514 esférica formada en la parte superior de las mismas. La superficie 514 esférica define un centro 515 al que se dirigirá el haz 118 láser cuando incida de forma normal sobre la superficie 514. Se mecanizan orificios 515 pasantes en una placa y se insertan las varillas en los orificios pasantes de manera que la superficie 514 esférica sobresalga del orificio 515 pasante. Los elementos 513 de referencia pueden pegarse en su lugar. Una disposición de este tipo permite que los centros definidos por las superficies 514 esféricas se ubiquen más cerca entre sí que en las realizaciones descritas 50 anteriormente con esferas 113.

55 Se cree que la separación que se puede lograr con bolas de tamaño adecuado para un haz láser de 1064 nm es suficiente para corregir los errores de "longitud de onda larga" como, por ejemplo, la escala, el desplazamiento y la distorsión de barril causados por la alineación del módulo óptico con el lecho y la alineación relativa de los dos espejos 141a, 141b galvanométricos entre sí. El mapa de errores para este tipo de fuente de error no es lineal, pero los errores no cambian de dirección rápidamente. Como resultado, los puntos de calibración espaciados por, por ejemplo, 12 mm, proveerán un conjunto de puntos lo suficientemente denso para corregir estos errores con la precisión requerida (decenas o unidades de micrómetros).

Sin embargo, se cree que también hay errores de "longitud de onda corta", por ejemplo, causados por la transducción de los motores del galvanómetro (errores del codificador) que pueden causar una contracción de hasta 50 micrómetros cuando los espejos 141a, 141b escanean a través de un ángulo. Se cree que esta contracción es única para cada galvanómetro. Esto puede imprimir una línea de error en la pieza, así como causar problemas localmente para mantener la alineación láser a láser. Para mapear estos errores, se cree que se requerirá un paso de centros más cercano a 5 mm o menos. Sin embargo, los errores causados por estos errores de longitud de onda corta son típicamente mucho más pequeños que los causados por los errores de longitud de onda más larga y pueden verse eclipsados por otros factores que pueden causar diferencias entre la pieza real producida y la pieza nominal como, por ejemplo, la deriva térmica y/o el desplazamiento de la pieza durante el proceso AM. Por consiguiente, el beneficio de corregir estos errores puede ser pequeño y, por lo tanto, puede ser aceptable no corregirlos.

El artefacto de calibración comprende además en una cara de montaje (inferior) características 147, 148 de montaje cinemático para acoplarse con formaciones 149 de montaje complementarias en la plataforma 102 de construcción. En esta realización, la cara inferior comprende dos conjuntos de formaciones de montaje, comprendiendo el primer conjunto formaciones 147a, 147b, 147c de montaje para ubicar el artefacto de calibración en una primera posición en la plataforma 102 de construcción y un segundo conjunto que comprende formaciones 148a, 148b, 148c de montaje para ubicar el artefacto de calibración en una segunda posición en la plataforma 102 de construcción. Cada conjunto de formaciones de montaje provee seis puntos de contacto para definir una posición del artefacto de calibración en seis grados de libertad. En esta realización, las formaciones de montaje comprenden tres bolas 147a, 147b, 147c; 148a, 148b, 148c que se acoplan a ranuras 149a, 149b, 149c complementarias. Cada ranura puede estar formada por dos rodillos paralelos. El movimiento del artefacto de calibración entre las dos posiciones requiere una rotación del artefacto de calibración, pero esto no es esencial y se pueden utilizar otras disposiciones de formaciones de montaje que no requieran una rotación del artefacto de calibración. En las dos posiciones del artefacto de calibración, se proveen esferas 113 en diferentes ubicaciones dentro del plano 110 de trabajo. De esta manera, se logra una mayor densidad de puntos de calibración utilizando el artefacto 114 de calibración, como se describe con más detalle a continuación.

Una vez que se ha ensamblado el artefacto 114 de calibración, la ubicación de los centros de las esferas 113, 513 entre sí se determina midiendo las esferas con un sistema de medición como, por ejemplo, una máquina de medición de coordenadas (CMM). Una cantidad suficiente de mediciones en una superficie de cada esfera permitirá calcular la posición de un centro de esa esfera. La posición del centro se puede medir con una precisión de 10 micrones o menos.

El método de calibración de los escáneres ópticos comprende la colocación del artefacto 114 de calibración sobre la plataforma 201 de construcción en la primera posición de manera que el plano de calibración sea sustancialmente coplanar con el plano 110 de trabajo. Esto se puede lograr elevando o bajando la plataforma 102 de construcción con el artefacto 114 de calibración y midiendo, por ejemplo utilizando calibradores de espesores, una posición del plano de calibración con relación a un borde inferior del recubridor 109. El artefacto de calibración puede tener almohadillas de apoyo formadas, por ejemplo mecanizadas, en el mismo sobre las cuales se ubican los calibradores de espesores, proporcionando las almohadillas de apoyo posiciones de montaje que tienen ubicaciones conocidas (debido a las mediciones con el sistema de medición, con relación al plano de calibración). Una vez que el artefacto de calibración se coloca como se desea, cada haz 118a, 118b, 118c, 118d láser se escanea a lo largo de cada esfera 113 utilizando el escáner 106a, 106b, 106c, 106d correspondiente.

La Figura 17 muestra los patrones de escaneo que ejecuta cada escáner 106a, 106b, 106c, 106d. Cada patrón de escaneo comprende múltiples líneas de escotilla paralelas separadas por una distancia, H de escotilla. El haz 118 láser puede escanearse a lo largo de cada línea de escotilla de forma continua. Sin embargo, en esta realización, el haz 118 láser se escanea a lo largo de cada línea de escotilla exponiendo una serie de puntos a lo largo de la línea de escotilla al haz 118 láser, en donde el haz 118 láser se apaga entre cada exposición puntual (durante un "salto"). Las líneas de escotilla sucesivas son escaneadas por los haces láser en direcciones opuestas (escaneo bidireccional). Sin embargo, en otra realización, se puede utilizar un escaneo unidireccional. Las exposiciones puntuales están espaciadas entre sí por una distancia, PD, por sus siglas en inglés, de punto. En esta realización, en lugar de escanear todo el plano 110 de trabajo, los haces 118 láser se escanean en parches 160, cada parche 160 ubicado en una posición de una esfera 113. Cada haz 118a, 118b, 118c, 118d láser se escanea en cuatro parches 160a, 160b, 160c, 160d sobre cada esfera 113. Para cada parche, la dirección de las líneas de escotilla para cada parche 160a, 160b, 160c, 160d es diferente. En esta realización, las líneas de escotilla están en ángulos de 0°, 45°, 90° y 135° entre sí. Cada escáner 106a, 106b, 106c, 106d escanea cada esfera 113, 513 de forma sucesiva e independiente (es decir, no simultáneamente) de los otros escáneres 106a, 106b, 106c, 106d.

A medida que cada haz 118a, 118b, 118c, 118d láser se escanea a lo largo de cada elemento 113 de calibración, el haz 118a, 118b, 118c, 118d láser se refleja desde el elemento de calibración. Si el haz 118 láser incide en la superficie en un sentido que se aleja de la incidencia normal, el haz láser se refleja lejos del escáner 106 óptico y cualquier señal generada por el fotodetector 131 del escáner 106 correspondiente es relativamente pequeña en comparación con la señal generada cuando el haz láser tiene una incidencia normal con respecto a la superficie. Este pico en la señal del fotodetector a medida que el haz láser se escanea a lo largo del elemento 113 de calibración se representa esquemáticamente en la Figura 5. El haz 118 láser tendrá una incidencia normal cuando se dirija a un centro de la esfera 113. Por consiguiente, el pico coincidirá con el haz 118 láser que se dirige a la posición de referencia conocida del centro de la esfera 113. Para los diferentes escáneres 106a, 106b, 106c, 106d, los haces 118b, 118c, 118d láser incidirán en diferentes puntos de la superficie de la esfera 113 cuando se dirijan hacia el centro de la misma esfera

113, como se muestra en la Figura 6.

Cada uno (o al menos uno) de los escáneres 106a, 106b, 106c, 106d ópticos puede comprender un campo 132 de escaneo que tiene una extensión suficiente para permitir el escaneo del haz 118a, 118b, 118c, 118d láser correspondiente a lo largo de toda la superficie del lecho 104 de polvo (denominado "campo completo" y como se muestra en la Figura 16a). En tal caso, cada uno (o al menos uno) de los escáneres 106a, 106b, 106c, 106d ópticos escanea todas las esferas 113 en el artefacto 114 de calibración. Sin embargo, en otra realización, los campos 132 de escaneo no cubren todo el lecho 104 de polvo, superponiéndose los campos de escaneo solo parcialmente dentro del área de la superficie del lecho de polvo. Esto se muestra en la Figura 4. En dicha realización, cada escáner 106a, 106b, 106c, 106d láser escaneará su haz 118a, 118b, 118c, 118d láser correspondiente solo sobre un subconjunto de las esferas 113.

El sistema registra una señal de demanda (como, por ejemplo, una posición de demanda) que hace que el escáner 106 óptico dirija el haz 118 láser a la posición de referencia conocida del centro de la esfera 113.

El artefacto 114 de calibración se mueve entonces a la segunda posición, en esta realización girando el artefacto de calibración para ubicar el artefacto en el otro conjunto de formaciones 148a, 148b, 148c de montaje. El artefacto 114 de calibración está dispuesto de tal manera que el movimiento a la segunda posición desde la primera posición ubica los elementos 113 de calibración en un nuevo conjunto de posiciones de referencia conocidas diferente del conjunto de posiciones de referencia conocidas provistas por la primera posición del artefacto 114 de calibración en la plataforma 102 de construcción. Por ejemplo, las nuevas posiciones de referencia conocidas pueden estar sustancialmente a mitad de camino entre las posiciones de referencia conocidas anteriores cuando el artefacto de calibración está en la primera posición. Por ejemplo, el movimiento puede reubicar las esferas 113 en las ubicaciones indicadas por las cruces en la Figura 10.

En esta nueva posición, se llevan a cabo mediciones para las nuevas posiciones de referencia conocidas de las esferas 113 como se describió anteriormente para determinar las señales de demanda para las nuevas ubicaciones. El movimiento del artefacto 114 de calibración aumenta la densidad de ubicaciones a lo largo del plano 110 de trabajo para las que se determinan las desviaciones.

En otras realizaciones, el artefacto 114 de calibración está dispuesto para poder moverse a otras posiciones para proveer una densidad aún mayor de mediciones de desviación a lo largo del plano 110 de trabajo.

En una realización adicional, el artefacto 114 de calibración está y/o solo puede estar ubicado en una posición en la plataforma 102 de construcción y se obtienen mediciones de desviación para esta única posición.

A partir de las mediciones obtenidas para la posición o cada posición del artefacto de calibración, se puede determinar un mapa de calibración como, por ejemplo, una función de error o una tabla de búsqueda, asociando las posiciones de demanda a las posiciones de referencia conocidas en el plano 110 de trabajo. Se puede utilizar la interpolación para determinar asociaciones para posiciones entre las posiciones de referencia conocidas medidas.

El mapa de calibración es utilizado por el controlador para modificar las señales de demanda enviadas al escáner 106 óptico durante una construcción de modo que el haz 118 láser se dirija hacia la ubicación deseada en el plano 110 de trabajo.

Como todos los escáneres 106a, 106b, 106c, 106d ópticos están calibrados a las mismas posiciones de referencia conocidas de los elementos 113 de calibración, el método de calibración también alinea los escáneres 106a, 106b, 106c, 106d ópticos entre sí.

El artefacto 114 de calibración también se puede utilizar para validar la calibración de los escáneres 106a, 106b, 106c, 106d ópticos antes y/o entre las construcciones. Por ejemplo, se puede llevar a cabo una rutina similar a la descrita anteriormente y el aparato puede generar una alerta si una desviación entre una posición de demanda (calculada utilizando el mapa de calibración) y la posición de referencia conocida difiere en una cantidad superior a un umbral predeterminado. El soporte cinemático permite que el artefacto 114 de calibración vuelva a la misma posición para la validación en donde se encontraba durante la calibración inicial. En respuesta a la alerta, se puede generar un nuevo mapa de calibración.

El tamaño de las esferas 111, 112, 113 se selecciona de tal manera que la curvatura de la superficie de la esfera coincida sustancialmente con la curvatura del frente de onda del haz 118 láser enfocado en el punto de contacto con la esfera 111, 112, 113. Esto se ilustra en las Figuras 7 y 8. En el foco (donde se encuentra el centro de la bola), los frentes de onda del haz 118 láser enfocado actúan como una onda plana y el radio de curvatura es infinito. Sin embargo, como se ilustra en la Figura 7, a medida que uno se aleja del foco, los frentes de onda se curvan antes de volverse rápidamente planos. Por consiguiente, para obtener una reflexión adecuada del haz 118 láser cerca pero lejos del foco, es deseable que la superficie esférica del elemento 113 de calibración corresponda sustancialmente a la curvatura del frente de onda en ese punto. El punto de inflexión (como se puede ver en la Figura 8) representa el radio de esfera más pequeño posible. Con referencia a la ecuación (1) anterior, se cree que una superficie esférica que tenga un radio de curvatura de entre zR y $4zR$ reflejará adecuadamente el haz 118 láser.

- La Figura 9 ilustra cómo la intensidad de la señal reflejada hacia atrás se reduce a medida que el centro de la esfera se aleja de la posición focal del haz 118 láser para esferas de diferentes tamaños. Como se puede ver, una esfera de menor tamaño provee un pico más nítido (que puede ser bueno para determinar con precisión cuándo el haz 118 láser se dirige a un centro de la esfera utilizando el fotodetector 131) pero, como consecuencia, una caída en la señal con la posición de la esfera es muy pronunciada en comparación con una esfera más grande. Por consiguiente, el uso de una esfera 113 más pequeña impone tolerancias más estrictas en la colocación precisa de la esfera 113 en la placa 119 portadora (en el ejemplo, la FWHM es de aproximadamente 2 mm para una bola de 12 mm de diámetro y de aproximadamente 6 mm para una bola de 16 mm de diámetro). Por consiguiente, la selección de un tamaño de las esferas debe tener en cuenta estos dos requisitos en competencia.
- Las bolas más grandes también se benefician del mayor tamaño del punto en la superficie y, por lo tanto, de la menor fluencia en la superficie. Esto ayuda a evitar daños en la bola. Los parámetros del láser se pueden cambiar para evitar daños en la superficie si, de lo contrario, la fluencia fuera demasiado grande.
- Durante la construcción, el posicionamiento del haz 118 láser por el escáner 106a, 106b, 106c, 106d óptico correspondiente puede desviarse, por ejemplo, debido al calentamiento de los componentes del aparato. La calibración de los escáneres 106a, 106b, 106c, 106d ópticos puede comprobarse y ajustarse durante la construcción mediante cada escáner 106a, 106b, 106c, 106d escaneando los elementos 111, 112 de referencia. El número de elementos 111, 112 de referencia es tal que cada escáner 106a, 106b, 106c, 106d óptico puede escanear al menos un elemento 111, 112 de referencia y, preferiblemente, más de un elemento 111, 112 de referencia para permitir que se determine la guiñada, el cabeceo, el balanceo y la traslación del plano de calibración.
- Periódicamente durante la construcción, por ejemplo después de que se haya completado un número determinado de capas, se hace que cada escáner 106a, 106b, 106c, 106d óptico escanee cada elemento 111, 112 de referencia que se encuentre dentro de su campo 132 de escaneo utilizando, por ejemplo, los patrones de escaneo como se muestra en la Figura 17. Al escanear los elementos 111, 112 de referencia, se ajusta un foco del haz láser a partir del mantenimiento normal del foco láser en el plano 110 de trabajo para tener en cuenta el posicionamiento de los centros de los elementos 111, 112 de referencia fuera del plano 110 de trabajo. Se determina si la posición de demanda corregida que hace que el haz 118 láser se dirija al centro de la esfera 111, 112 difiere de la posición de demanda esperada. Si es así, se determina que el escáner 106 óptico se ha desviado durante la construcción de su posición calibrada.
- El aparato puede simplemente generar una alerta si la desviación detectada durante la construcción está fuera de un umbral aceptable predeterminado.
- Como alternativa, el aparato puede determinar una corrección para ajustar la posición del haz 118 láser por el escáner 106 óptico para la desviación que se ha producido durante la construcción. La corrección puede realizar un ajuste para una inclinación, un cabeceo, un balanceo y una traslación determinados del plano de calibración del escáner 106 óptico determinados a partir de las desviaciones medidas.
- El escaneo de los elementos 111, 112 de referencia proveerá información sobre si los planos de calibración de los escáneres 106 ópticos se han desviado durante la construcción, pero los haces 118a, 118b, 118c, 118d láser aún pueden estar desalineados en el plano 110 de trabajo si una ubicación del plano 110 de trabajo se desplaza durante la construcción. Por ejemplo, la ubicación del plano 110 de trabajo puede cambiar durante la construcción debido a un cambio en la ubicación del borde inferior del recubridor 109, por ejemplo debido al desgaste, imprecisiones en el movimiento de la plataforma 102 de construcción y/o expansión térmica de la plataforma 102 de construcción, mecanismo 133 de accionamiento que controla el movimiento de la plataforma 102 de construcción y/o el recubridor 109. La información del escaneo de los elementos 111, 112 de referencia se puede utilizar junto con la información de los PSD 123 para determinar si el plano 110 de trabajo se ha desplazado.
- El lado izquierdo de la Figura 21 se refiere al método de calibración descrito anteriormente y se lleva a cabo antes de que comience la construcción. Durante la construcción, las señales del PSD 123 se registran al menos cuando otro de los haces 118a, 118b, 118c, 118d láser se encuentra en el campo de visión del PSD 123 del escáner 106a, 106b, 106c, 106d óptico. Esto se muestra en el recuadro de la esquina derecha de la Figura 21. En este ejemplo, un punto de haz láser del escáner 106a, 106b, 106c, 106d óptico (indicado como punto láser 1) está centrado y estacionario dentro del campo de visión del PSD de ese escáner 106. Un punto de haz láser de otro de los escáneres 106a, 106b, 106c, 106d ópticos (indicado como punto láser 2) se muestra atravesando el campo de visión. En esta realización, los haces láser se escanean a lo largo del lecho 104 de polvo utilizando una estrategia de escaneo de puntos, en donde el láser recorre una trayectoria de escaneo en una serie de puntos expuestos espaciados entre sí por una distancia de punto. Los datos de PSD se pueden recopilar cuando el haz láser correspondiente del escáner óptico se apaga durante un "salto" entre exposiciones de puntos. Durante este tiempo, el PSD 123 puede captar la posición de otro haz láser (como, por ejemplo, el punto láser 2) dentro del campo de visión.
- La trayectoria que sigue un punto láser del otro haz al cruzar el campo de visión dependerá del movimiento relativo entre el punto láser 1 y el punto láser 2 (el campo de visión se mueve junto con el punto láser 1). La Figura 21 muestra un ejemplo del punto láser 2 que se desplaza a través del campo de visión a lo largo de una trayectoria de arco formada por una serie de exposiciones puntuales. El disparo a los láseres 105 que forman el punto láser 1 y el punto láser 2 y la dirección de los haces 118 láser por los escáneres 106 ópticos están sincronizados de manera que hay momentos

en donde cada láser se dispara y el otro láser no, y se conoce el momento del movimiento relativo entre el punto láser 1 y el punto láser 2. Por ejemplo, un sistema de control determinista como, por ejemplo, el que se describe en el documento WO2017/085469, que se incorpora en la presente memoria en su totalidad mediante referencia, se utiliza para sincronizar el disparo y el movimiento de los láseres.

5 A partir de los datos PSD, se determina una diferencia, si la hubiera, entre una posición medida del punto láser 2 en el campo de visión y una posición esperada del punto láser 2 dentro del campo de visión. La posición esperada se determina a partir de las trayectorias planificadas previamente que deben seguir los puntos láser en el plano 110 de trabajo y el momento conocido en donde los haces láser recorren estas trayectorias. Cualquier diferencia entre las posiciones medidas y esperadas se registra como una desalineación de los planos de calibración de los escáneres 106 correspondientes.

10 Tal desalineación puede ser causada por un movimiento relativo entre los escáneres ópticos (y, por lo tanto, las posiciones relativas de los planos de calibración de los escáneres 106 ópticos) y/o un movimiento relativo entre los planos de calibración y el plano 110 de trabajo. Para corregir una desalineación relativa de los planos de calibración, se determina una transformación de corrección para realinear los planos de calibración. Si los planos de calibración permanecen alineados pero el plano 110 de trabajo se ha movido, entonces se pueden tomar medidas para realinear el plano 110 de trabajo con los planos de calibración. La ubicación del plano 110 de trabajo se puede alterar mediante un ajuste de una posición de la plataforma 102 de construcción después de que se haya extendido una capa de polvo mediante el recubridor 109 o un ajuste de una posición vertical del recubridor 109.

15 En una realización adicional, si se considera que el plano 110 de trabajo se ha movido en una cantidad superior a un umbral predeterminado, se puede generar una alerta que permita al usuario decidir qué acción tomar como, por ejemplo, reemplazar una escobilla limpiadora del recubridor 109 y/o detener la construcción.

20 Los datos obtenidos al escanear los elementos 111, 112 de referencia se pueden utilizar para distinguir entre las causas de la desalineación. Por ejemplo, si, al escanear cada elemento 111, 112 de referencia, la posición de demanda que hace que el haz 118 láser se dirija al centro de la bola permanece inalterada (dentro de un margen de error esperado) con respecto a una calibración inicial, entonces se puede concluir que una posición del plano de calibración del escáner óptico permanece inalterada y que la desalineación detectada en el plano 110 de trabajo se debe al movimiento del plano 110 de trabajo. Si la posición de demanda que hace que el haz 118 láser se dirija al centro de la bola ha cambiado (se encuentra fuera de un margen de error esperado), entonces se puede concluir que una posición del plano de calibración ha cambiado (por ejemplo, debido al movimiento del escáner 106 óptico debido a la expansión/contracción térmica de partes del aparato) y se determina una corrección de las posiciones de demanda para el desplazamiento medido en la posición del plano de calibración. Por ejemplo, para un número suficiente de elementos 25 30 111, 112 de referencia se deben determinar la guiñada, el cabeceo, el balanceo y la traslación del plano de calibración.

35 Para permitir la calibración y la comprobación incorporada, las señales del fotodetector 131, 123 deben estar asociadas a una posición en el plano 110 de trabajo con una precisión suficiente, por ejemplo, dentro de los 30 micrómetros y preferiblemente dentro de los 10 micrómetros. Para lograr esto, las señales del fotodetector se asocian a posiciones de demanda de señales de demanda enviadas al escáner 106 relevante. Sin embargo, debido a los retrasos en la transmisión de las señales entre el controlador 140 y los fotodetectores 123, 131, puede haber un retraso (el llamado "retraso de canalización") entre el controlador 140 que envía la señal de demanda al escáner 106 óptico y el controlador 140 que recibe las señales del fotodetector. El retraso de canalización está predeterminado.

40 Según una realización, para determinar el retraso de canalización, un elemento 111, 112, 113 de referencia es escaneado por el haz 118a, 118b, 118c, 118d láser correspondiente de cada escáner 106a, 106b, 106c, 106d. Para cada uno de un conjunto candidato de retrasos de canalización, cada señal del fotodetector 131 registrada durante el escaneo del elemento 111, 112, 113 de referencia se asocia a una posición de coordenadas definida por una señal de posición de demanda emitida al escáner 106 óptico por el controlador 140 en un momento anterior, tal como se indica por el retraso de la señal candidata. Se determina una propiedad geométrica de una representación resultante del elemento de referencia formada a partir de las señales del fotodetector. En esta realización, la propiedad geométrica es un eje mayor y un eje menor de la representación del elemento 111, 112, 113 de referencia. La propiedad geométrica del artefacto 111, 112, 113 de referencia es conocida. Por ejemplo, para una bola, se sabe que una representación bidimensional del artefacto debe producir un círculo en donde el eje mayor y el eje menor sean iguales. El retardo de señal real se determina como el retardo de señal candidato que reproduce de forma más precisa la propiedad geométrica conocida.

45 50 55 Con referencia a las Figuras 19a a 19c, se muestran tres representaciones de un elemento de referencia mediante el uso de los mismos conjuntos de datos de fotodetector y datos de posición de demanda pero diferentes retrasos de canalización. Como se puede ver, cambiar el retraso de canalización altera la forma del elemento de referencia en las representaciones. La Figura 20 es un gráfico que representa el tamaño de los ejes mayor y menor medido a partir de las representaciones del elemento de referencia para diferentes retrasos de canalización. Se puede ver que el tamaño medido de los ejes mayor y menor coincide sustancialmente con un retraso de canalización de aproximadamente 420 microsegundos. Un retraso de canalización determinado de esta manera se puede aplicar a las señales de fotodetector para los fotodetectores 123 y 131 al calibrar y verificar la calibración del aparato.

El método también puede comprender caracterizar el o cada haz 118a, 118b, 118c, 118d láser utilizando uno o más de los elementos 111, 112, 113 de referencia. Por ejemplo, los elementos de referencia pueden usarse para caracterizar el foco y la divergencia de cada haz 118a, 118b, 118c, 118d láser. En una realización, para uno o múltiples elementos 111, 112, 113, 513 de referencia, el escáner 106 óptico dirige el haz láser de manera que el haz láser sea normal a la superficie esférica del elemento 111, 112, 113, 513 de referencia y luego varía la longitud focal del haz láser utilizando la óptica 120 de enfoque móvil. Para múltiples posiciones de la óptica 120 de enfoque, se registran señales del fotodetector desde el fotodetector 131. El trazar la intensidad de la radiación electromagnética reflejada en función de la longitud focal dará una curva como la que se muestra en la Figura 8, en donde el pico coincide con el foco que se encuentra ubicado en un centro definido por la superficie esférica.

5
10
15
Se pueden realizar modificaciones y alteraciones a las realizaciones descritas anteriormente sin apartarse de la invención tal como se define en la presente memoria. Por ejemplo, en lugar de utilizar la luz láser retrorreflejada detectada para calibrar los escáneres ópticos, el aparato puede utilizar la radiación electromagnética detectada por los fotodetectores 123. Además, en lugar de utilizar los haces 118a, 118b, 118c, 118d láser de procesamiento para calibrar los escáneres 106a, 106b, 106c, 106d ópticos, se puede introducir un haz láser diferente en la trayectoria óptica de modo que sea coaxial con el haz láser de procesamiento. Por ejemplo, se puede utilizar un haz láser de alineación para el proceso de calibración.

20
El aparato puede comprender uno o más escáneres móviles con respecto al plano de trabajo, por ejemplo, múltiples escáneres montados en una unidad de "cabezal de impresión" móvil como, por ejemplo, se describe en el documento WO2014/199149, que se incorpora a la presente memoria en su totalidad mediante referencia. Para un aparato de este tipo, el proceso de calibración y/o verificación se puede llevar a cabo en cada una de múltiples ubicaciones del escáner óptico con respecto al plano 110 de trabajo. Por ejemplo, los elementos de referencia se pueden utilizar para determinar si el plano de calibración del escáner óptico se ha desplazado a medida que el escáner óptico se traslada con respecto al plano de trabajo y se aplica una corrección adecuada a las señales de demanda.

25
En lugar de escanear en trama los elementos 111, 112, 113 de referencia, se puede utilizar una operación de escaneado diferente, por ejemplo, una rutina de optimización de trayectoria activa en donde la trayectoria se modifica en función de la retroalimentación del fotodetector 131 en una búsqueda del punto de intensidad pico. En otra realización, se pueden utilizar trayectorias curvas como, por ejemplo, trayectorias circulares o espirales, que se van construyendo gradualmente sobre la superficie del elemento de referencia en lugar de un escaneado en trama.

30
35
En una realización adicional, los elementos 111, 112 de referencia pueden utilizarse en una rutina para alinear escáneres que han sido calibrados independientemente, en lugar de calibrarlos todos con un artefacto de calibración común. Por ejemplo, los escáneres calibrados utilizando la técnica convencional como se describe en el documento WO94/15265. En una realización de este tipo, los elementos 111, 112 de referencia, por ejemplo, ubicados dentro de regiones en donde se superponen los campos de escaneo de dos o más escáneres, se utilizan como puntos cardinales para una alineación aproximada de los planos de calibración de los escáneres 106a, 106b, 106c, 106d ópticos y luego se utilizan los PSD 123 se usan para proveer un ajuste fino a esta alineación.

40
La matriz de bolas 113 en el artefacto de calibración puede comprender una disposición y/o densidad diferentes de bolas 112. Por ejemplo, la no linealidad de los galvanómetros que mueven los espejos 141a, 141b móviles puede resolverse utilizando dos líneas transversales, por ejemplo, perpendiculares, de bolas que tengan una densidad suficientemente alta, como se describió anteriormente. A continuación, puede utilizarse una densidad menor de bolas 112 en el resto del artefacto de calibración para resolver la alineación del plano de calibración con el plano 110 de trabajo.

En lugar de o además de las formaciones 147, 148 de montaje que permiten que el artefacto de calibración se monte en dos o más posiciones en la plataforma 102 de construcción, el artefacto de calibración puede estar dispuesto para indexarse entre dos o más posiciones para cambiar la posición de los elementos 113 de calibración.

45
Los elementos 111, 112 de referencia pueden estar incorporados dentro de una superficie, la placa 115 de procesamiento u otra superficie que pueda estar expuesta a los haces 118a, 118b, 118c, 118d láser, en lugar de estar montados sobre o encima de la superficie.

50
Los elementos de referencia pueden estar dispuestos para emitir fluorescencia cuando un haz láser irradia el centro del elemento de referencia. En una realización de este tipo, se puede utilizar un fotodetector fuera del eje como, por ejemplo, un fotodetector en la cámara de construcción, que integra toda la luz entrante para detectar la radiación electromagnética cuando los elementos de referencia emiten fluorescencia. La correlación de las posiciones de demanda de los escáneres en el momento en que se detecta la fluorescencia con la posición de los elementos de referencia permite comprobar y/o calibrar los escáneres.

REIVINDICACIONES

1. Un método para determinar una alineación de un escáner (106a, 106b, 106c, 106d) óptico para dirigir un haz (118a, 118b, 118c, 118d) electromagnético a ubicaciones dentro de un campo (132a, 132b, 132c, 132d) de escaneo, comprendiendo el método ubicar un elemento (111, 112, 113) de referencia dentro del campo (132a, 132b, 132c, 132d) de escaneo del escáner (106a, 106b, 106c, 106d) óptico, comprendiendo el elemento (111, 112, 113) de referencia una superficie (514) circular o esférica de tal manera que cuando el haz (118a, 118b, 118c, 118d) electromagnético se dirige a un centro de un círculo o esfera, tal como se define por la superficie (514) circular o esférica, el haz (118a, 118b, 118c, 118d) electromagnético tiene una incidencia normal con respecto a la superficie (514) circular o esférica y una mayor proporción de la radiación (118a, 118b, 118c, 118d) electromagnética se retrorefleja a lo largo de una trayectoria del haz (118a, 118b, 118c, 118d) electromagnético, estando un radio de curvatura de la superficie (514) circular o esférica comprendido entre Z_R y $4Z_R$, en donde Z_R es una longitud de Rayleigh del haz (118a, 118b, 118c, 118d) electromagnético; controlar el escáner (106a, 106b, 106c, 106d) óptico para hacer que el haz (118a, 118b, 118c, 118d) electromagnético se dirija a múltiples puntos diferentes en el campo (132a, 132b, 132c, 132d) de escaneo, incluyendo al menos un punto en el elemento (111, 112, 113, 213, 513) de referencia; detectar la radiación (118a, 118b, 118c, 118d) electromagnética reflejada; determinar cuándo el haz (118a, 118b, 118c, 118d) electromagnético se dirige a una posición de referencia en el campo (132a, 132b, 132c, 132d) de escaneo dada por una ubicación del centro del elemento (111, 112, 113) de referencia a partir de una comparación de una intensidad de la radiación (118a, 118b, 118c, 118d) electromagnética detectada para los diferentes puntos; y determinar una señal de demanda correspondiente que hace que el escáner (106a, 106b, 106c, 106d) óptico dirija el haz (118a, 118b, 118c, 118d) electromagnético a la posición de referencia.
2. Un método según la reivindicación 1, en donde el elemento (111, 112, 113) de referencia comprende una superficie (514) reflectante irradiada por la radiación (118a, 118b, 118c, 118d) electromagnética, teniendo la superficie (514) reflectante una forma tal que una cantidad de luz retroreflejada depende de un ángulo de incidencia del haz (118a, 118b, 118c, 118d) electromagnético sobre la superficie (514) reflectante.
3. Un método según la reivindicación 1 o la reivindicación 2, en donde el elemento (111, 112, 113) de referencia comprende una superficie (514) reflectante irradiada por la radiación (118a, 118b, 118c, 118d) electromagnética dispuesta de tal manera que, si el haz (118a, 118b, 118c, 118d) electromagnético incide en la superficie (514) reflectante lejos de la incidencia normal, el haz (118a, 118b, 118c, 118d) electromagnético se refleja lejos del escáner (106a, 106b, 106c, 106d) óptico y una intensidad de radiación reflejada detectada es relativamente pequeña en comparación con una intensidad de radiación reflejada detectada cuando el haz (118a, 118b, 118c, 118d) electromagnético está en incidencia normal a la superficie (514) reflectante.
4. Un método según la reivindicación 2 o la reivindicación 3, en donde la superficie (514) reflectante es una superficie convexa.
5. Un método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende determinar cuándo el haz (118a, 118b, 118c, 118d) electromagnético se dirige a la posición de referencia desde cuando una intensidad de la radiación electromagnética detectada está en un máximo.
6. Un método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores que comprende localizar una matriz de elementos (113, 513) de referencia en el campo (132a, 132b, 132c, 132d) de escaneo, teniendo los elementos (113, 513) de referencia ubicaciones relativas conocidas dentro de un plano común.
7. Un método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende ubicar múltiples elementos (113, 513) de referencia en el campo (132a, 132b, 132c, 132d) de escaneo, cada elemento (113, 513) de referencia de los múltiples elementos (113, 513) de referencia comprende una superficie esférica, en donde los centros de las esferas, tal como se definen por las superficies esféricas, se encuentran en un/el plano común.
8. Un método según la reivindicación 6 o la reivindicación 7, que comprende ubicar los múltiples elementos (113, 513) de referencia de manera que el plano común coincida sustancialmente con un plano (110) de trabajo al que el haz (118a, 118b, 118c, 118d) electromagnético puede ser dirigido por el escáner (106a, 106b, 106c, 106d) óptico.
9. Un método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores que comprende reubicar el elemento (113, 513) de referencia en el campo (132a, 132b, 132c, 132d) de escaneo de una primera ubicación a una segunda ubicación y llevar a cabo las etapas del método tanto para la primera como para la segunda ubicaciones, en donde la primera y la segunda ubicaciones pueden estar espaciadas entre sí por menos de un ancho del elemento (113, 513) de referencia.
10. Un método según la reivindicación 8 o la reivindicación 9, que comprende reubicar los múltiples elementos (113, 513) de referencia en el campo (132a, 132b, 132c, 132d) de escaneo de una primera ubicación a una segunda ubicación, en donde, cuando los múltiples elementos (113, 513) de referencia están en la segunda ubicación, uno de los elementos (113, 513) de referencia está espaciado por menos de un ancho del elemento (113, 513) de referencia del u otro elemento (113, 513) de referencia cuando los múltiples elementos (113, 513) de referencia están en la primera ubicación y llevar a cabo las etapas del método tanto para la primera como para la segunda ubicaciones.
11. Un método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores que comprende escanear en trama el o cada

elemento (111, 112, 113, 213, 513) de referencia dos veces, primero con un escaneo unidireccional o bidireccional de líneas de escaneo que se extienden en una primera dirección y segundo con un escaneo unidireccional o bidireccional de líneas de escaneo que se extienden en una segunda dirección transversal a la primera dirección.

5 12. Un método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores que comprende llevar a cabo el método anterior para múltiples escáneres (106a, 106b, 106c, 106d) ópticos del mismo aparato, en donde los campos (132a, 132b, 132c, 132d) de escaneo de los escáneres (106a, 106b, 106c, 106d) ópticos se superponen y el mismo elemento (111, 112, 113, 213, 513) de referencia se utiliza para calibrar múltiples de los múltiples escáneres (106a, 106b, 106c, 106d).

10 13. Un método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende detectar la radiación electromagnética reflejada con un fotodetector (131a, 131b, 131c, 131d) en el eje montado para detectar la radiación electromagnética que se desplaza de regreso a lo largo de un tren óptico utilizado para entregar el haz electromagnético, en donde el haz electromagnético es un haz láser entregado desde un láser de fibra y el fotodetector (131a, 131b, 131c, 131d) está dispuesto para detectar la radiación electromagnética que se desplaza de regreso a través de una fibra (128a, 128b, 128c, 128d) de entrega o una óptica (127a, 127b, 127c, 127d) de entrega del haz del láser de fibra, en donde el fotodetector (131a, 131b, 131c, 131d) puede detectar luz en una longitud de onda de excitación del haz electromagnético, que se refleja a una óptica (127a, 127b, 127c, 127d) de entrega del haz de la fibra óptica a lo largo de la misma trayectoria en la que el haz electromagnético se entrega a la superficie (110) de trabajo y el método puede comprender el uso de un divisor (130a, 130b, 130c, 130d) integrado en una fibra (128a, 128b, 128c, 128d) de entrega o una óptica (127a, 127b, 127c, 127d) de entrega del haz del láser de fibra para dirigir la radiación electromagnética que se desplaza hacia atrás en la fibra (128a, 128b, 128c, 128d) de entrega o la óptica (127a, 127b, 127c, 127d) de entrega del haz al fotodetector (131a, 131b, 131c, 131d).

14. Un aparato que comprende un escáner (106a, 106b, 106c, 106d) óptico para dirigir un haz (118a, 118b, 118c, 118d) electromagnético a ubicaciones dentro de un campo (132a, 132b, 132c, 132d) de escaneo, un detector (131a, 131b, 131c, 131d) para detectar radiación (118a, 118b, 118c, 118d) electromagnética reflejada, y un controlador (140) dispuesto para generar señales de demanda para el escáner (106a, 106b, 106c, 106d) óptico para hacer que el escáner (106a, 106b, 106c, 106d) óptico dirija el haz (118a, 118b, 118c, 118d) electromagnético a múltiples puntos diferentes en un campo (132a, 132b, 132c, 132d) de escaneo en donde se encuentra un elemento (111, 112, 113, 213, 513) de referencia, comprendiendo el elemento (111, 112, 113, 213, 513) de referencia una superficie (514) circular o esférica de manera que cuando el haz (118a, 118b, 118c, 118d) electromagnético se dirige a un centro de un círculo o esfera, tal como se define por la superficie (514) circular o esférica, el haz (118a, 118b, 118c, 118d) electromagnético tiene una incidencia normal a la superficie (514) circular o esférica y una mayor proporción de la radiación (118a, 118b, 118c, 118d) electromagnética se retrorefleja a lo largo de una trayectoria del haz electromagnético, estando el radio de curvatura de la superficie (514) circular o esférica comprendido entre z_R y $4z_R$, en donde z_R es una longitud de Rayleigh del haz (118a, 118b, 118c, 118d) electromagnético, incluyendo los múltiples puntos al menos un punto en el elemento (111, 112, 113, 213, 513) de referencia; recibir señales del detector del detector (131a, 131b, 131c, 131d); determinar a partir de las señales del detector cuándo el haz (118a, 118b, 118c, 118d) electromagnético se dirige a una posición de referencia en el campo (132a, 132b, 132c, 132d) de escaneo dada por una ubicación del centro del elemento (111, 112, 113, 213, 513) de referencia a partir de una comparación de una intensidad de las señales detectadas para los diferentes puntos; y determinar una señal de demanda correspondiente que hace que el escáner (106a, 106b, 106c, 106d) óptico dirija el haz (118a, 118b, 118c, 118d) electromagnético a la posición de referencia.

15. Aparato según la reivindicación 14, en donde el detector es un fotodetector (131a, 131b, 131c, 131d) y el aparato comprende además un láser de fibra y el fotodetector (131a, 131b, 131c, 131d) está dispuesto para detectar la radiación electromagnética que se desplaza hacia atrás a través de una fibra (128a, 128b, 128c, 128d) de entrega o una óptica (127a, 127b, 127c, 127d) de entrega de haz del láser de fibra y el aparato puede comprender un divisor (130a, 130b, 130c, 130d) dispuesto para eliminar la radiación electromagnética que se desplaza hacia atrás en la fibra (128a, 128b, 128c, 128d) de entrega o la óptica (127a, 127b, 127c, 127d) de entrega de haz y dirigir la radiación electromagnética al fotodetector (131a, 131b, 131c, 131d).

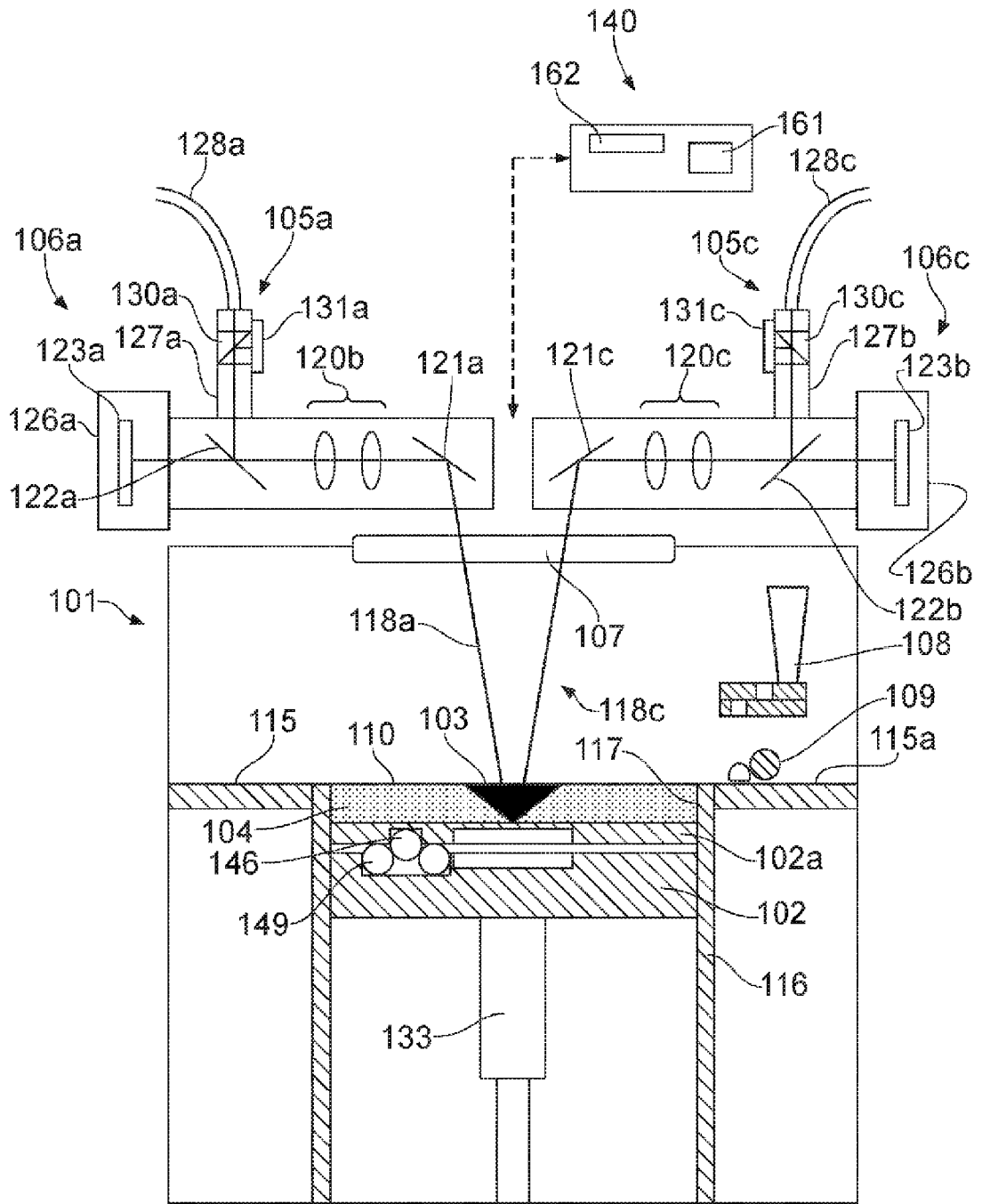


FIG. 1

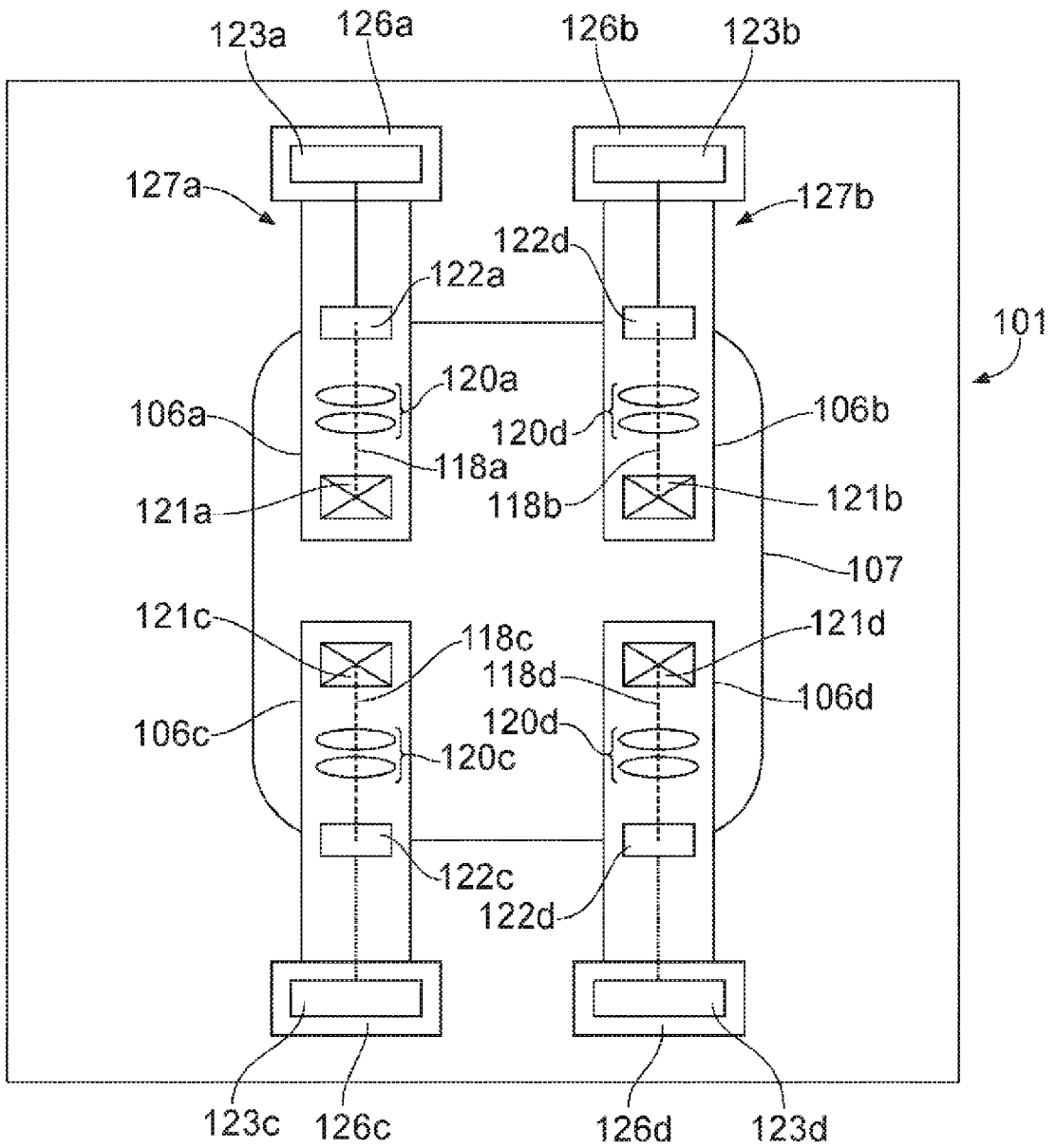


FIG. 2

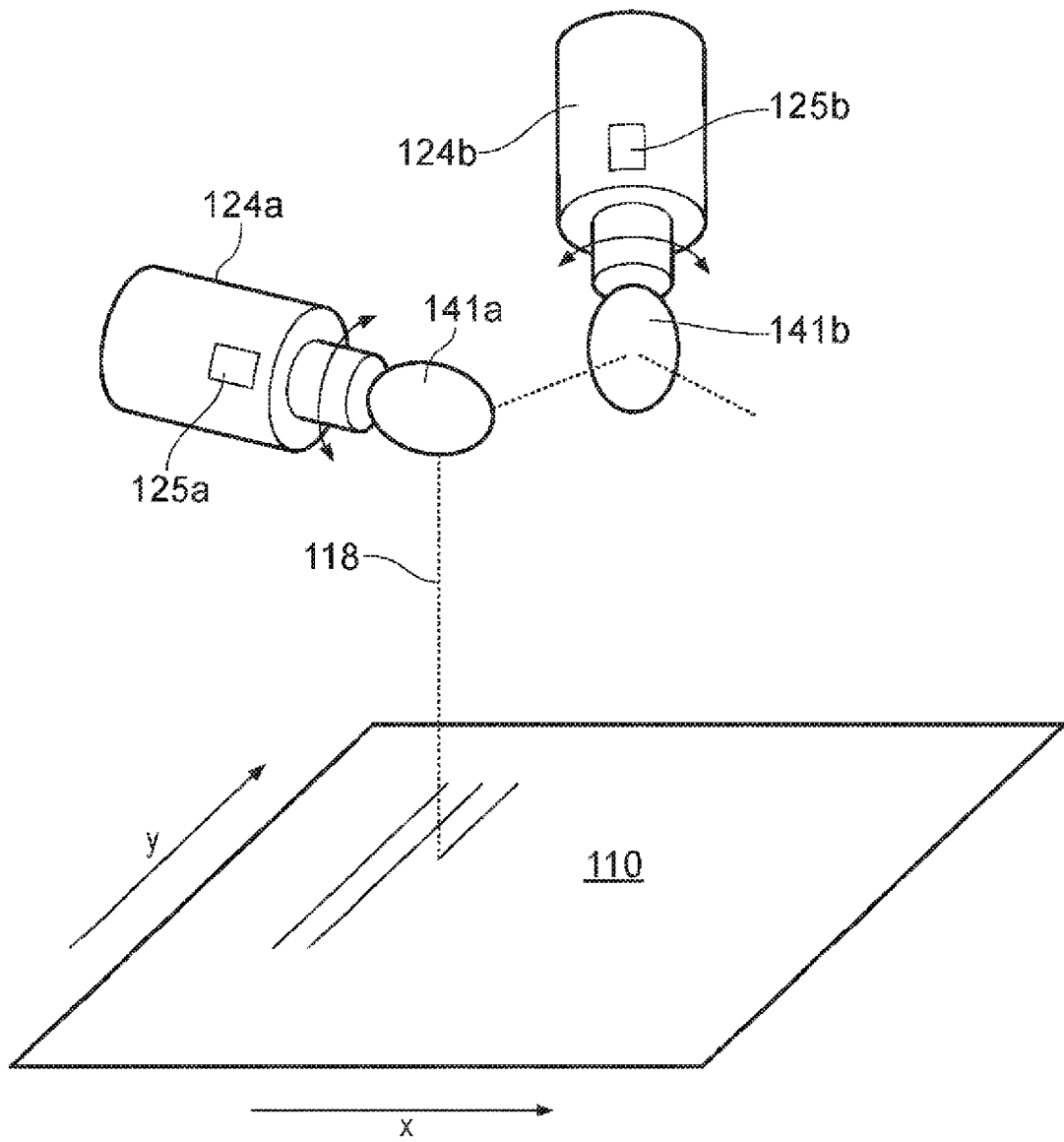


FIG. 3

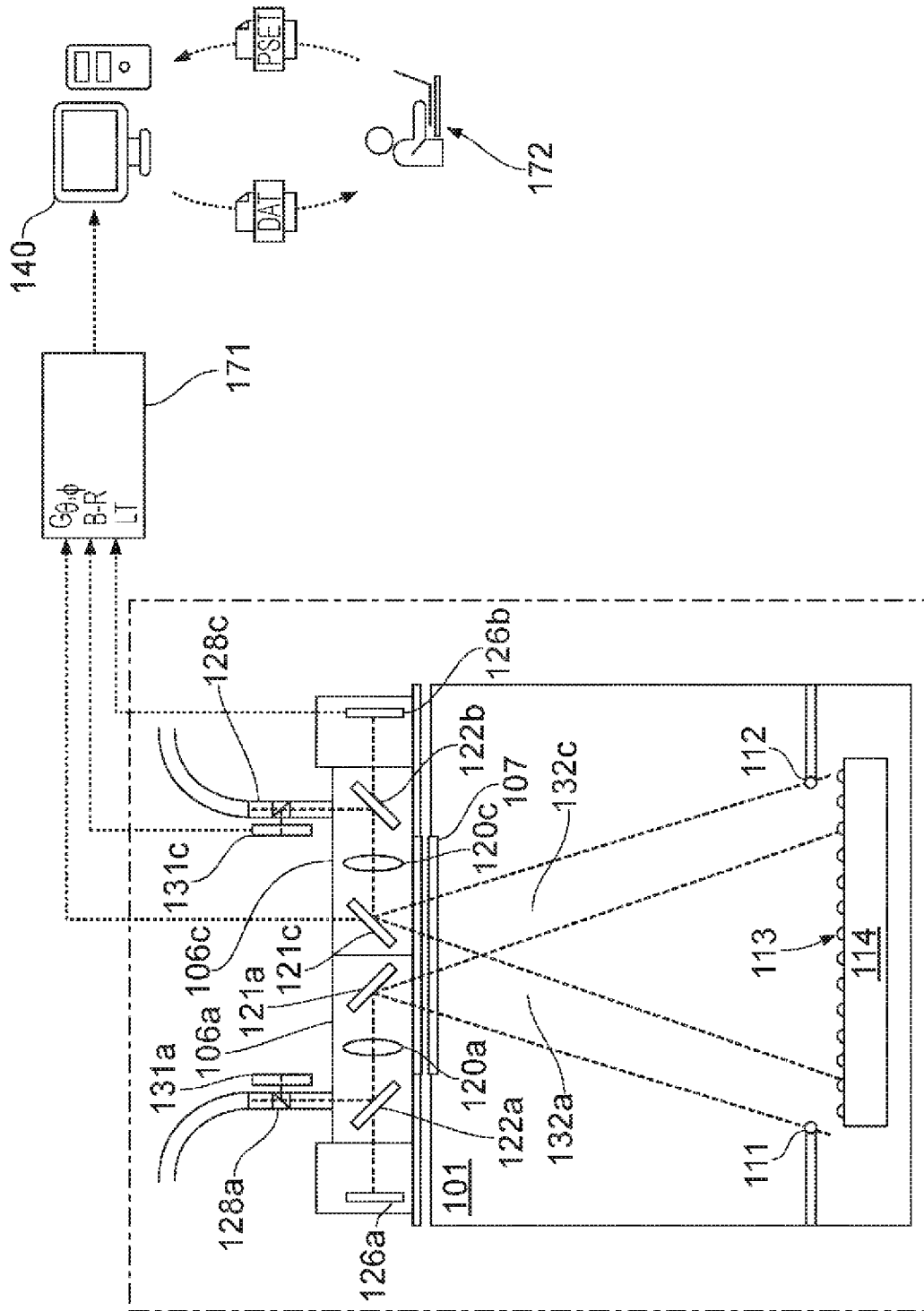


FIG. 4

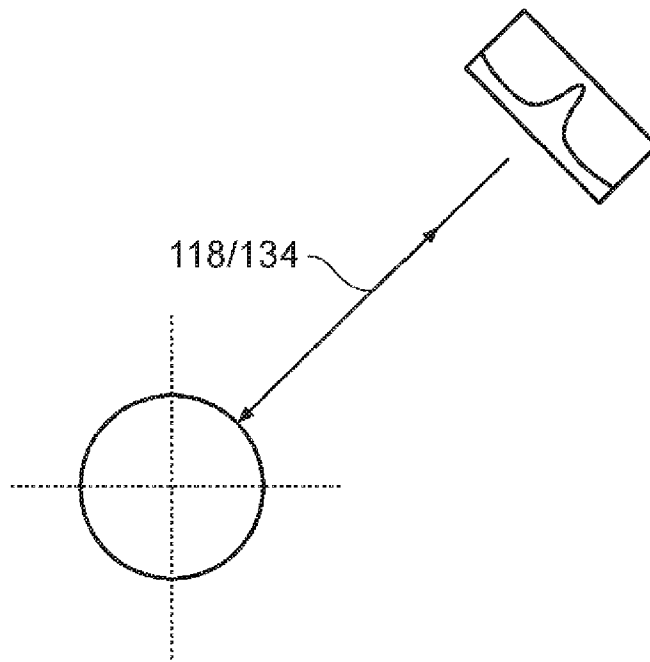


FIG. 5

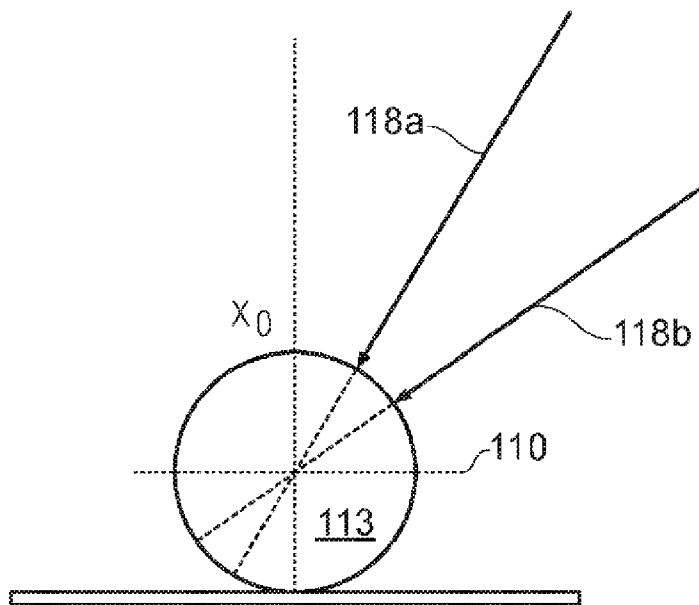


FIG. 6

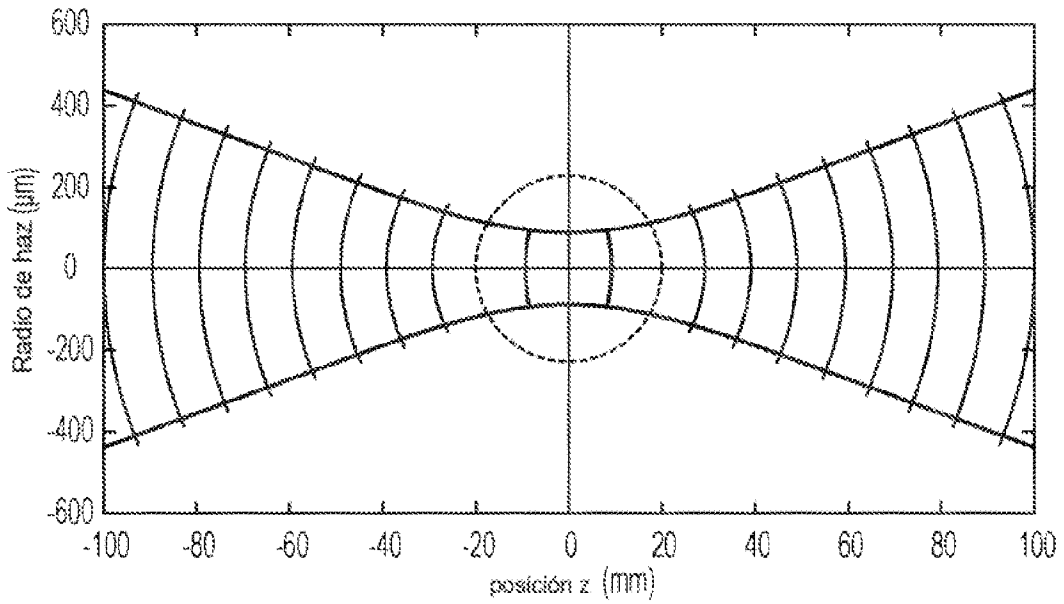


FIG. 7

Radio de Curvatura
(Longitud de Rayleigh: 5,3 mm)

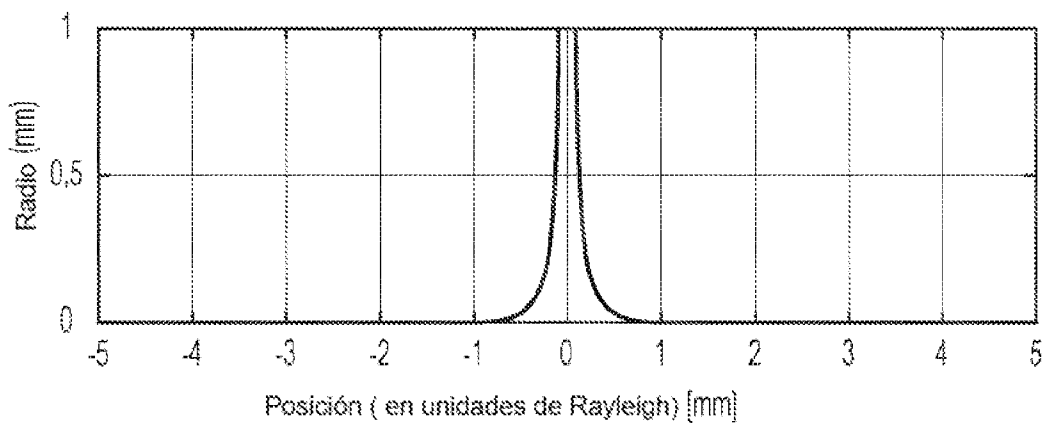
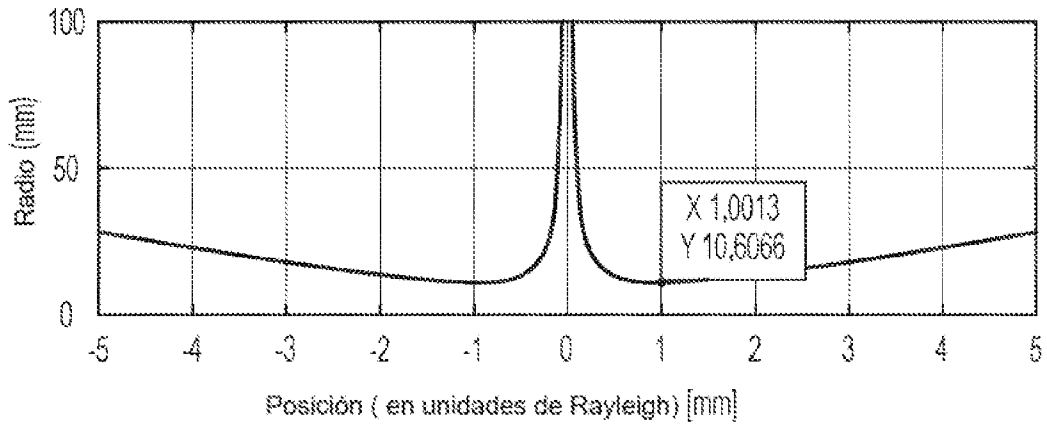


FIG. 8

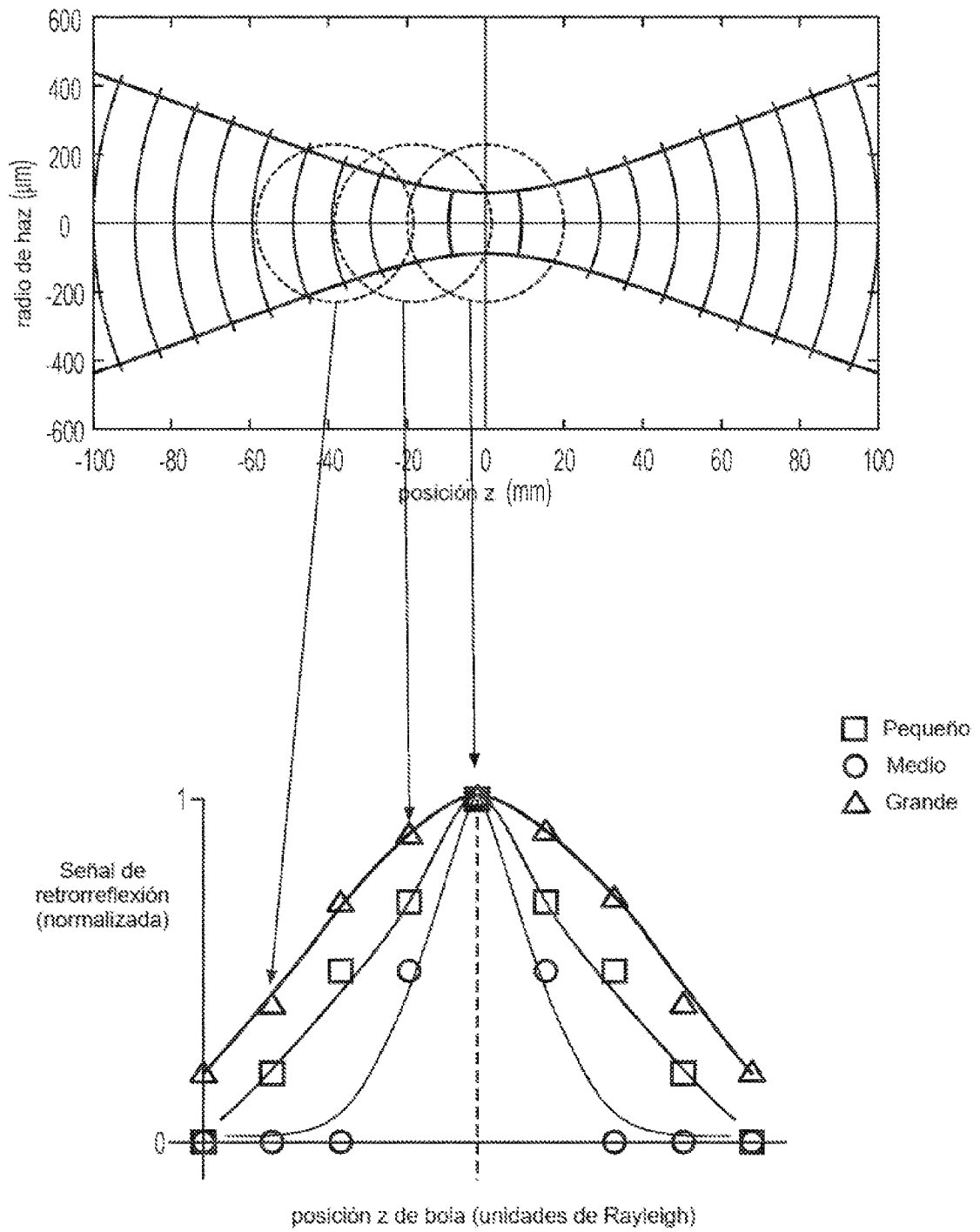


FIG. 9

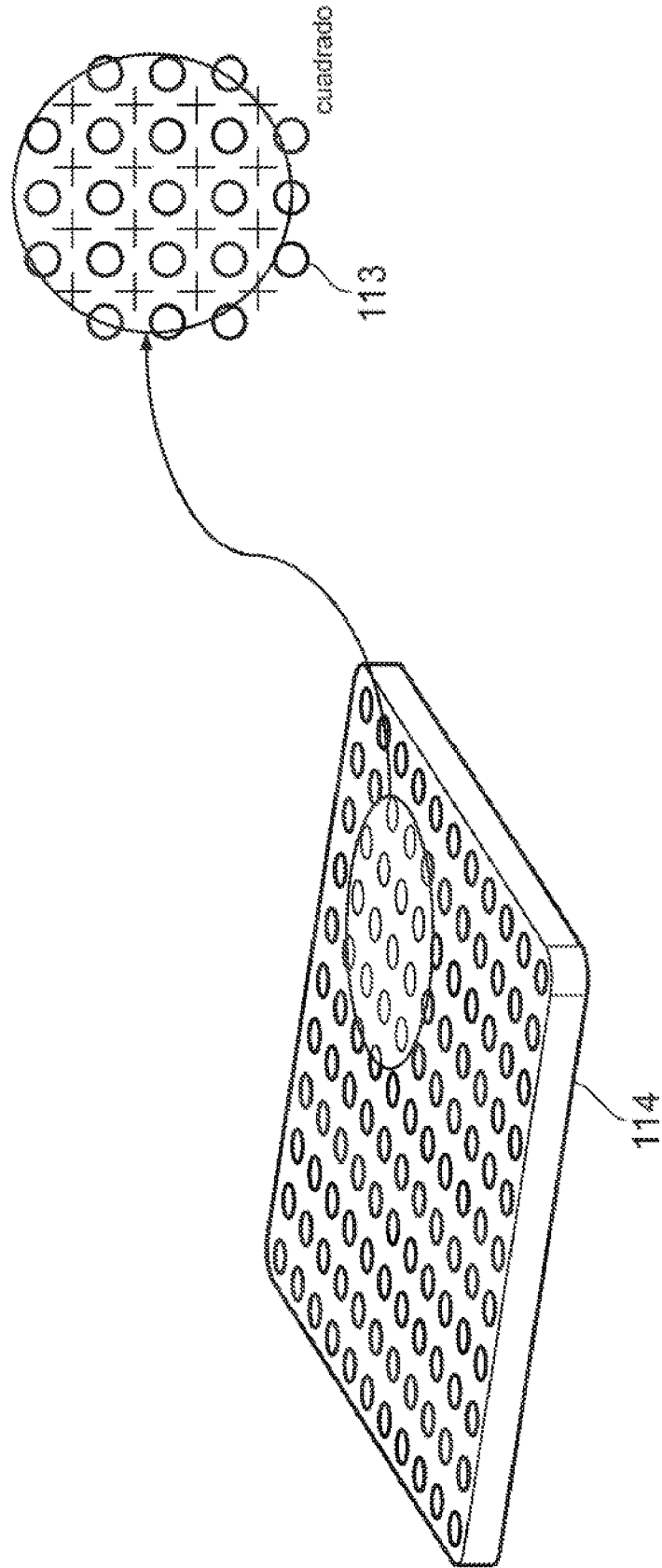


FIG. 10

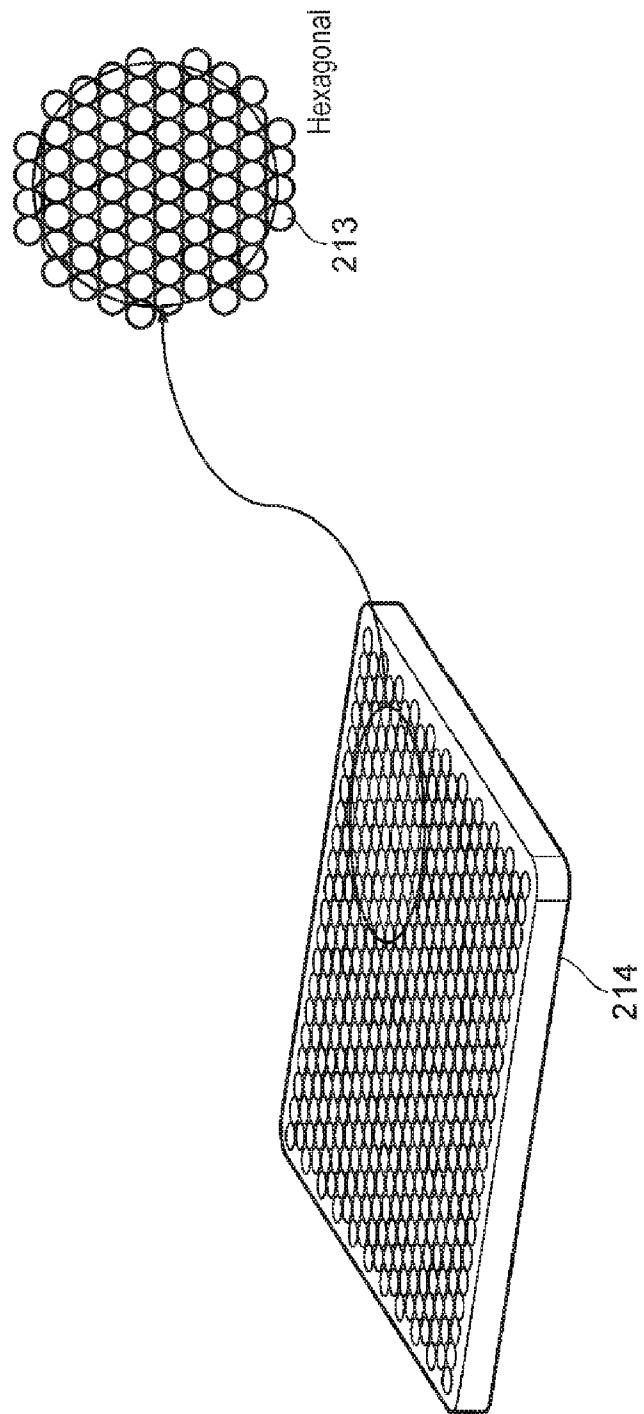


FIG. 11

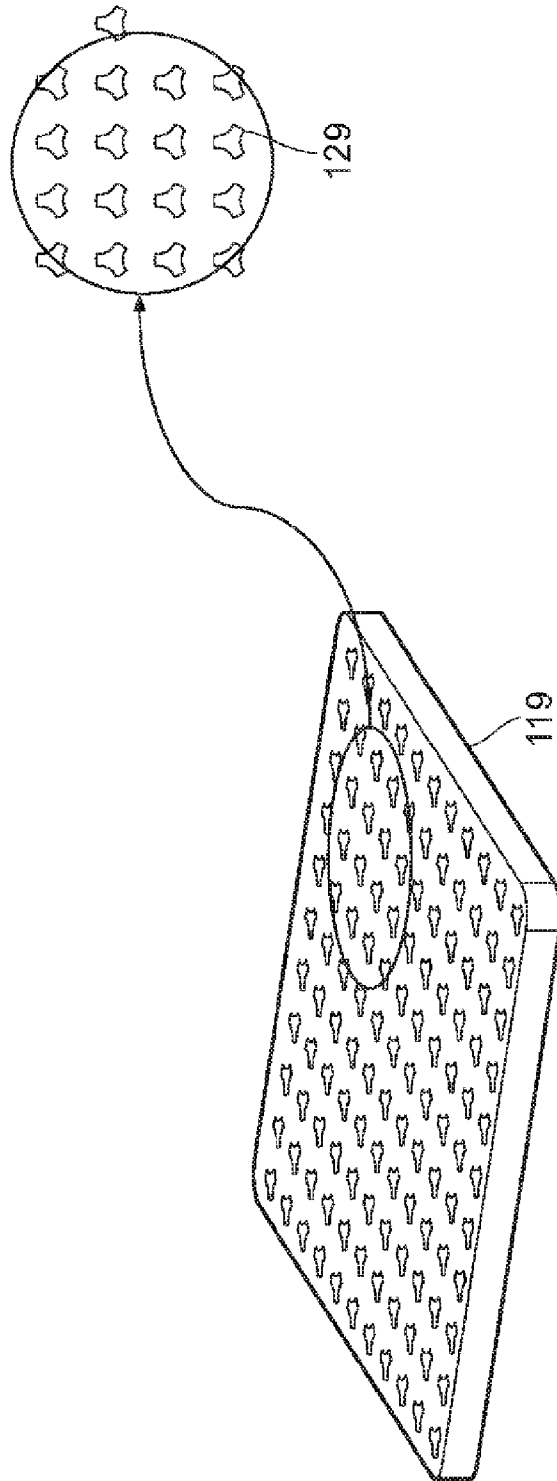


FIG. 12

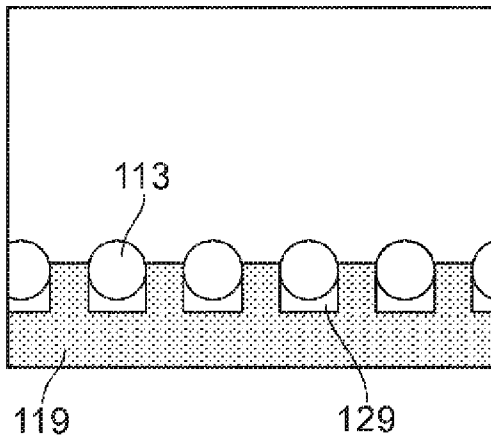


FIG. 13a

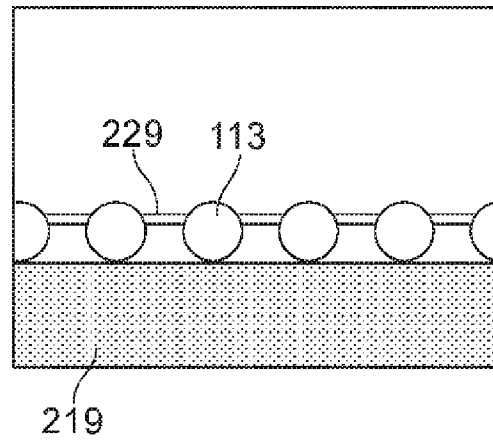


FIG. 13b

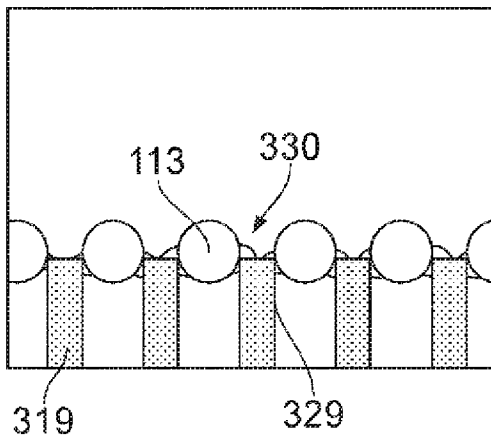


FIG. 13c

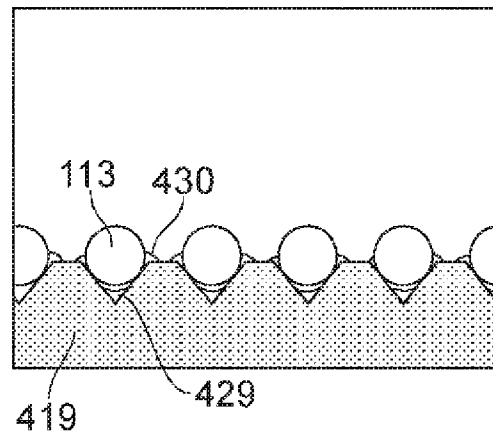


FIG. 13d

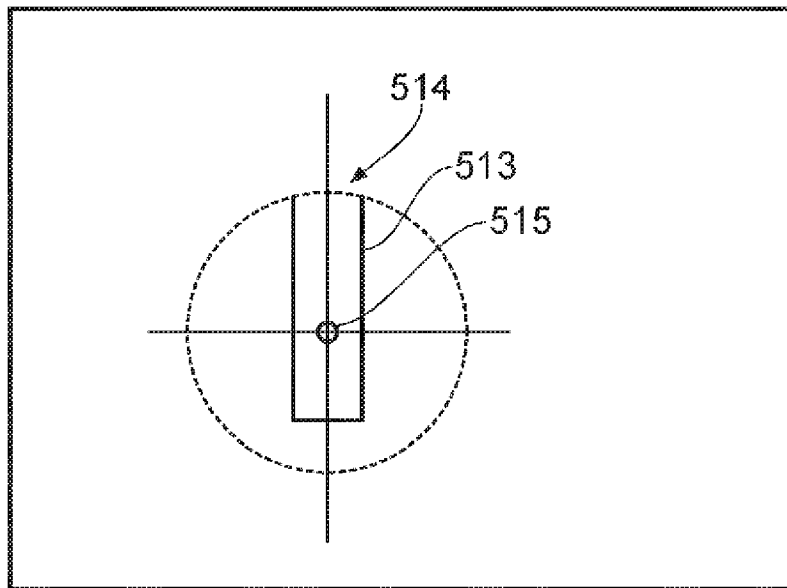


FIG. 13e

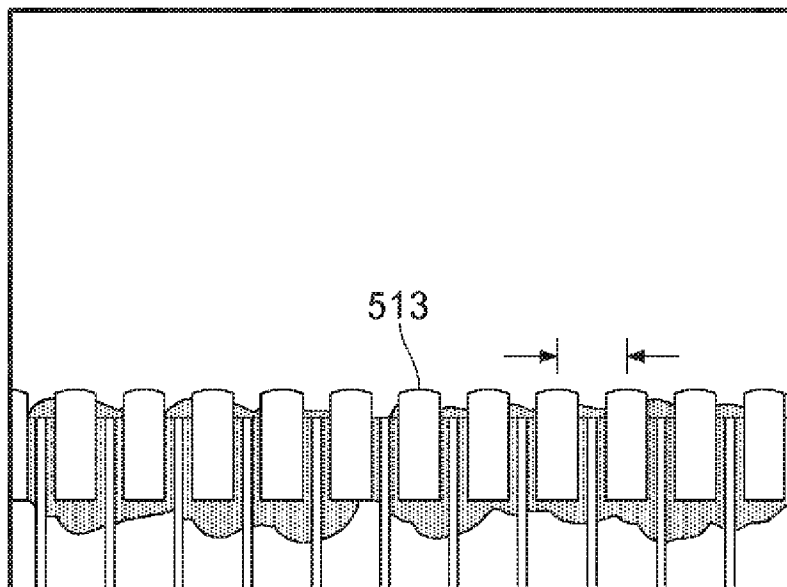


FIG. 13f

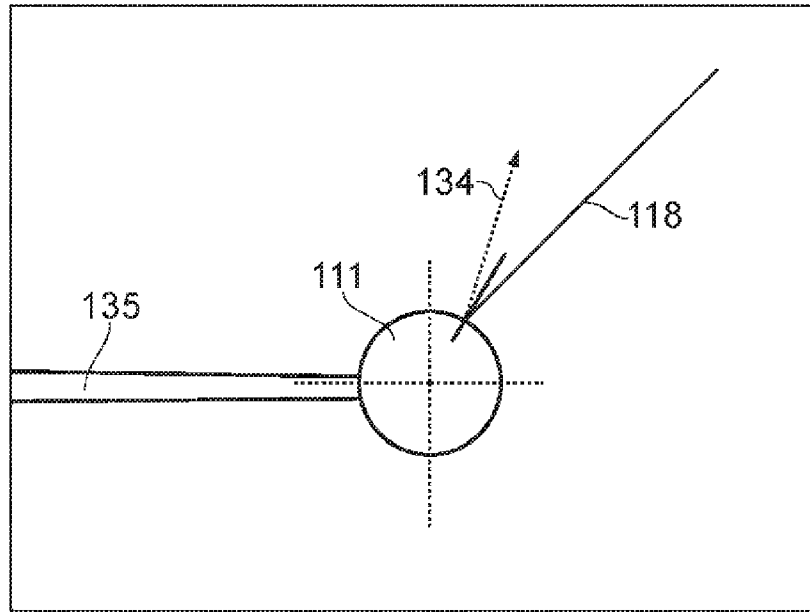


FIG. 14

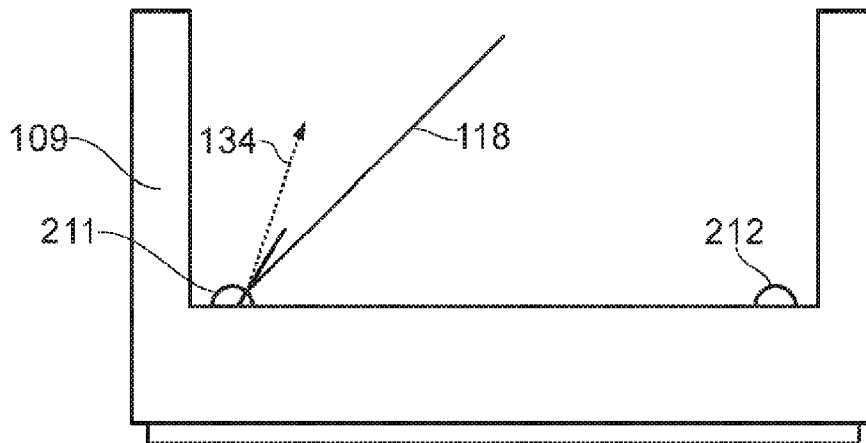


FIG. 15

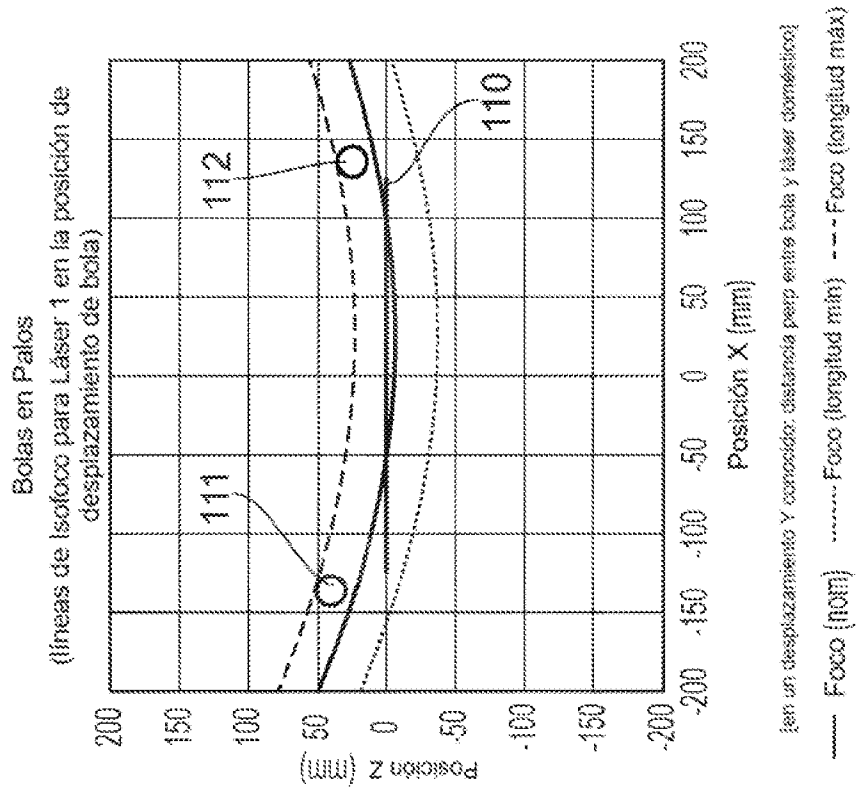


FIG. 16a

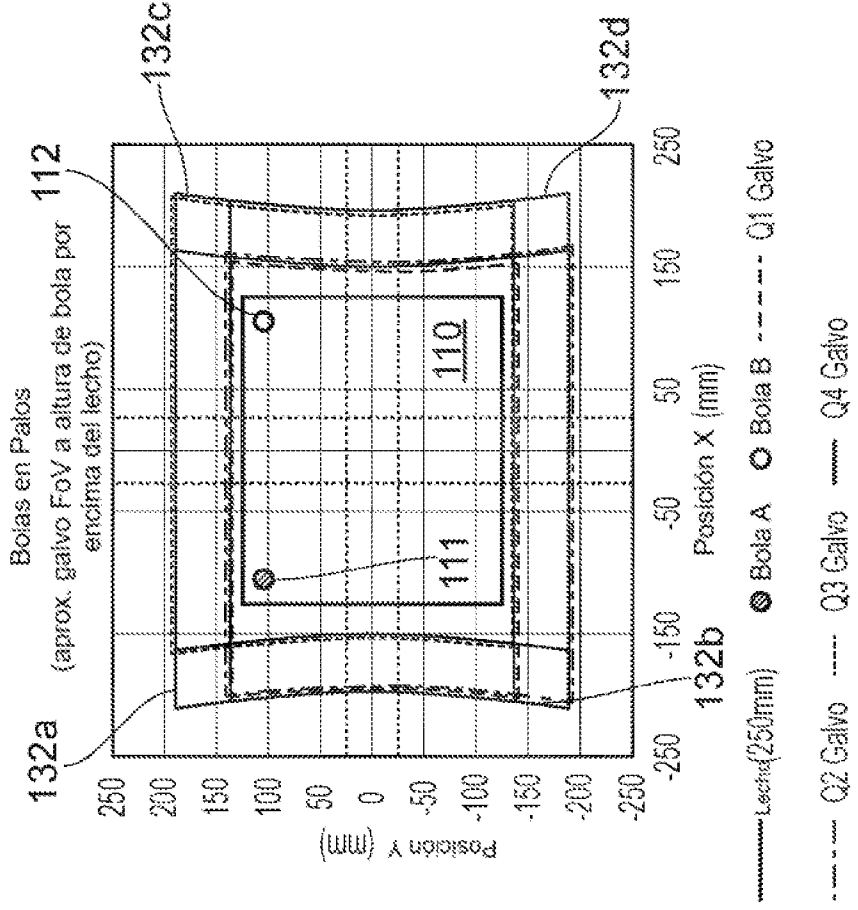


FIG. 16b

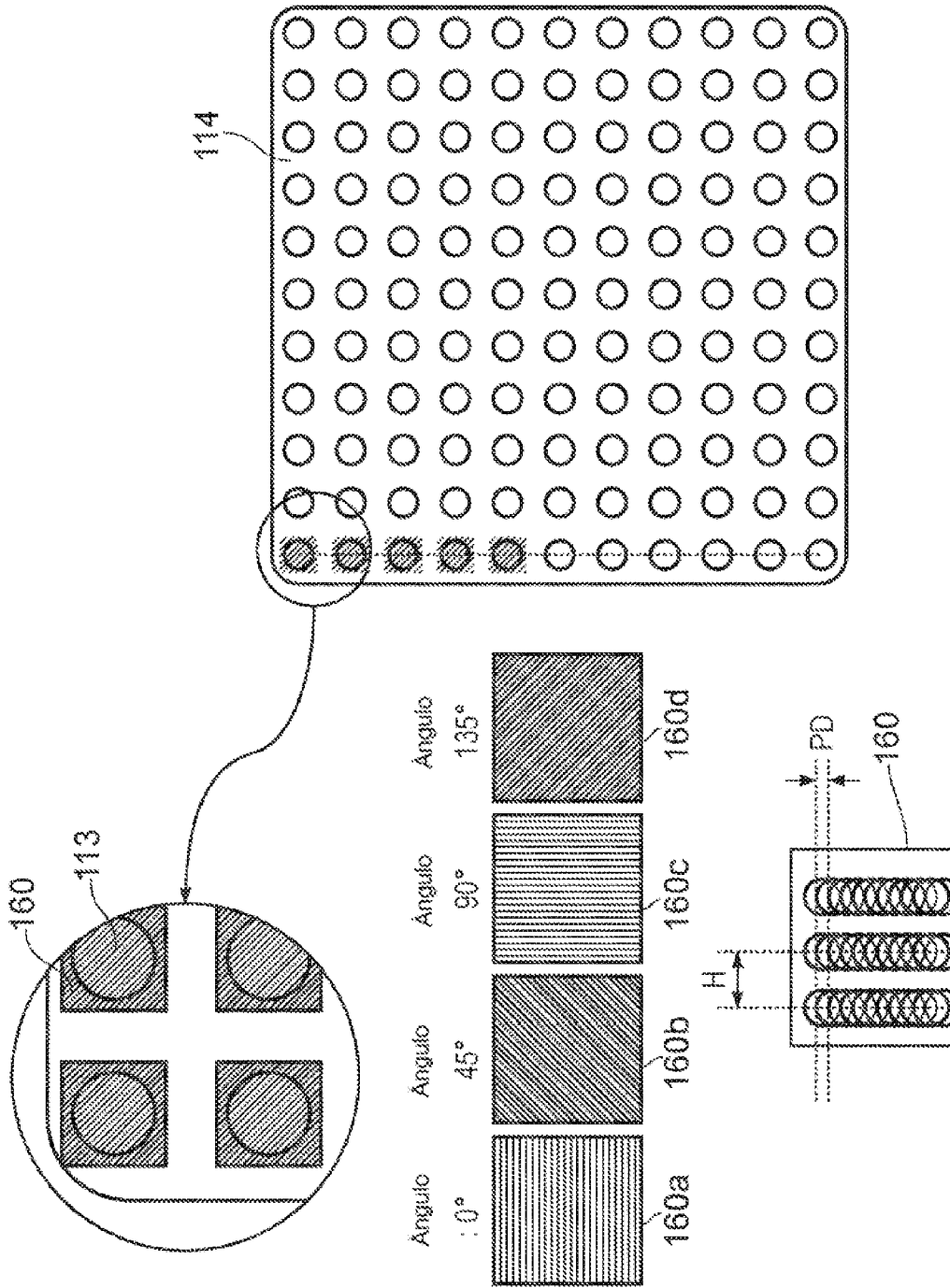


FIG. 17

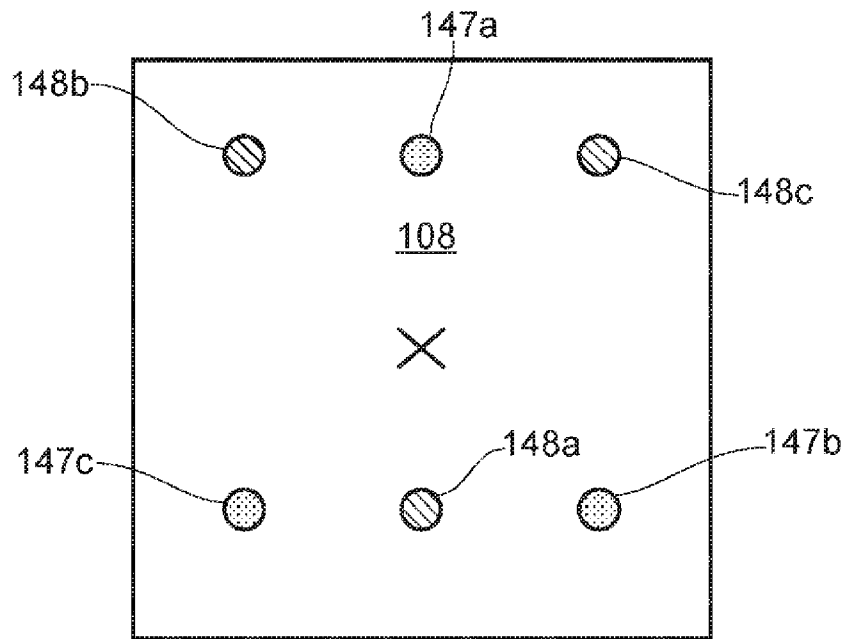


FIG. 18a

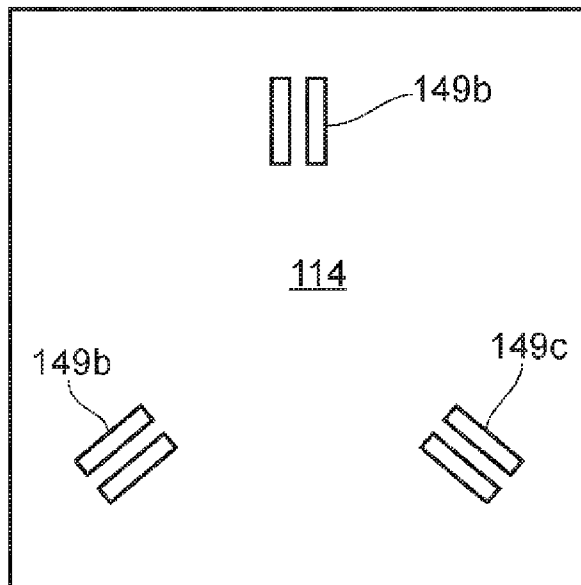


FIG. 18b

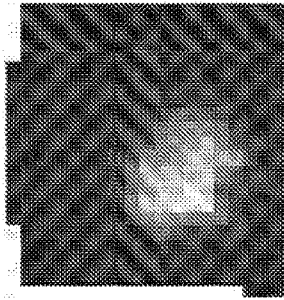


FIG. 19a

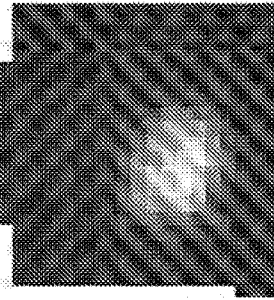


FIG. 19b

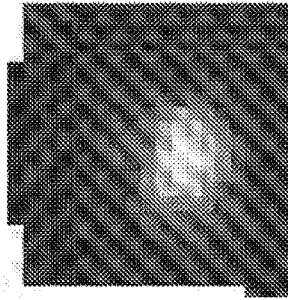


FIG. 19c

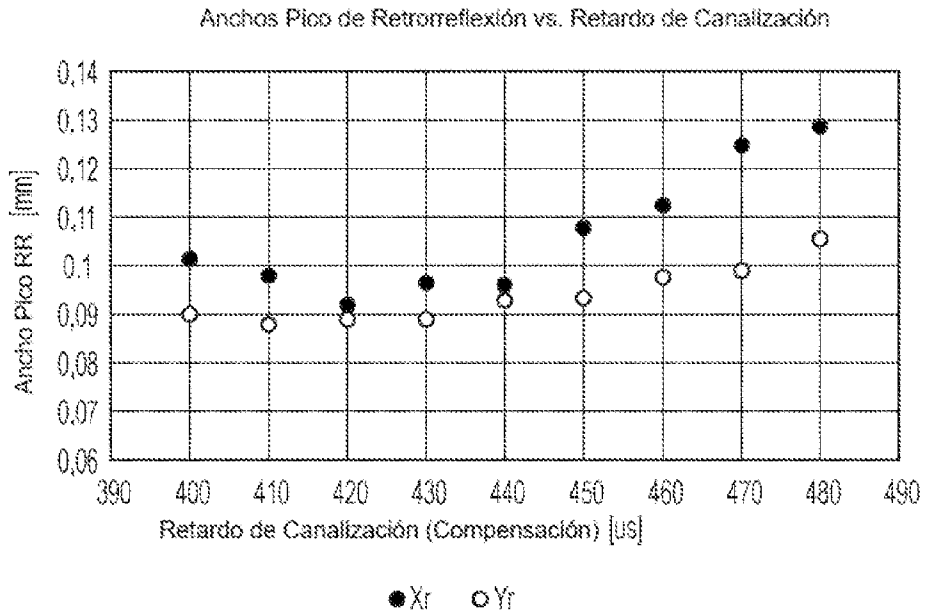


FIG. 20

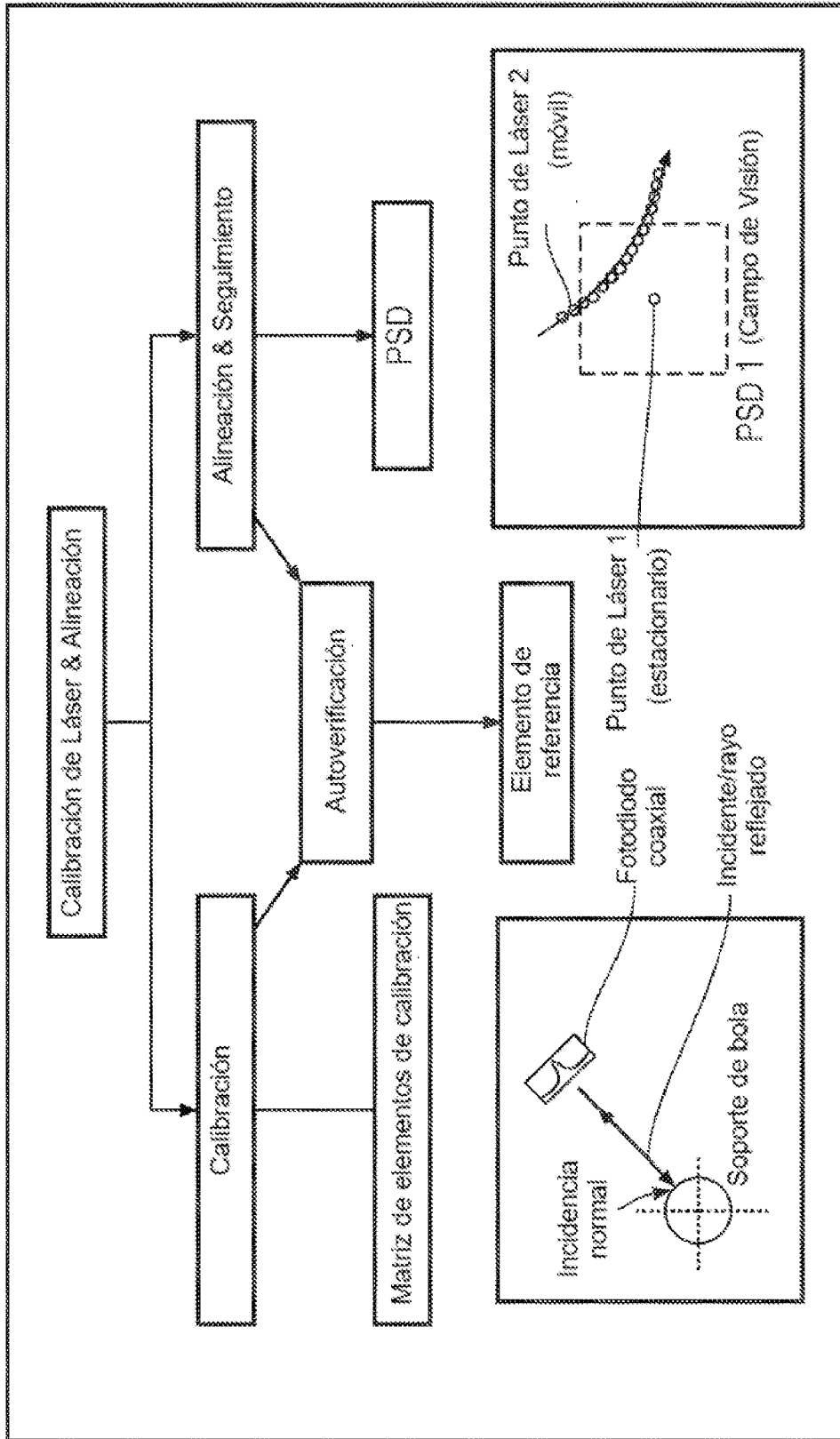


FIG. 21