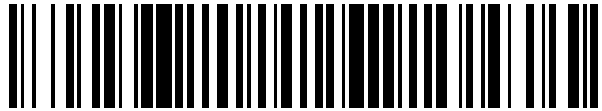


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 819 018**

51 Int. Cl.:

G01S 17/46 (2006.01)

G01S 17/42 (2006.01)

G01S 7/481 (2006.01)

G01S 7/497 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **28.03.2013 PCT/GB2013/050838**

87 Fecha y número de publicación internacional: **03.10.2013 WO13144649**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **28.03.2013 E 13717821 (6)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **15.07.2020 EP 2831624**

54 Título: **Sistema y método de medición de coordenadas**

30 Prioridad:

29.03.2012 GB 201205563

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

14.04.2021

73 Titular/es:

**NPL MANAGEMENT LIMITED (100.0%)
Hampton Road, Teddington
Middlesex TW11 0LW, GB**

72 Inventor/es:

**HUGHES, EDWARD BENJAMIN;
VEAL, DANIEL WALTON y
WARDEN, MATTHEW STUART**

74 Agente/Representante:

FERNÁNDEZ POU, Felipe

ES 2 819 018 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

Sistema y método de medición de coordenadas

5 La presente invención se refiere a un método y sistema de medición de coordenadas tal como un sistema de medición de coordenadas para usar, por ejemplo, en metrología de gran volumen y ensamble asistido por metrología y metrología de coordenadas en general.

10 A lo largo de la descripción y en las reivindicaciones más abajo, un sistema de medición de coordenadas se denominará sistema de detección de posición.

15 El documento WO 2008/067349 describe un sistema para localizar y marcar con exactitud y precisión una posición en el espacio mediante el uso de comunicaciones inalámbricas y robótica; el documento WO 01/47427 describe un sistema reflector para determinar la posición; el documento US 2003/234936 describe un interferómetro de exploración de frecuencia de trayectoria común; el documento WO 2011/029811 describe un dispositivo y un arreglo de reflector para determinar la posición.

20 Existen varios métodos para detectar la posición tridimensional de un objeto dentro de un volumen. Los métodos conocidos incluyen, por ejemplo, fotogrametría (o videogrametría), rastreador láser y multilateración.

25 Un rastreador láser utiliza una combinación de sensores de ángulo y extensión. Emite un haz láser colimado estrecho hacia un objetivo retroreflectante especial, como un retroreflector de montaje esférico (SMR). El SMR refleja el haz de regreso al instrumento a lo largo de la misma trayectoria que el haz emitido. Un sensor en el rastreador láser detecta el movimiento del SMR y dirige el rayo láser para seguir el SMR en todo momento. Los codificadores de ángulo en el mecanismo de dirección del haz miden ángulos verticales y horizontales desde el rastreador láser hasta el SMR y un sistema de medición de extensión basado en láser mide la distancia al SMR. Esta combinación de dos ángulos y una distancia dan las coordenadas tridimensionales del SMR en forma polar esférica.

30 Una desventaja de esta técnica, como ocurre con muchas técnicas de la técnica anterior, es que se requiere una línea de visión entre el instrumento individual y el objetivo. Cuando se usa la técnica, por ejemplo, en el ensamblaje de una construcción grande, como una aeronave, es difícil mantener la línea de visión entre el rastreador láser y el objetivo, particularmente a medida que los componentes se mueven.

35 Una forma de superar el problema de la línea de visión es mover el sistema de medición de un lugar a otro. En el caso de un rastreador láser, sería necesario establecer un sistema de coordenadas consistente. Otro método es emplear un sistema de medición distribuido como la fotogrametría.

40 La fotogrametría implica la detección de la posición tridimensional de un objeto a partir de dos o más imágenes fotográficas tomadas desde diferentes posiciones. Las imágenes se pueden tomar una tras otra mediante el uso de la misma cámara, o simultáneamente mediante el uso de múltiples cámaras. Si las imágenes y coordenadas se procesan en tiempo real a velocidades de fotogramas de video, la técnica a menudo se llama videogrametría. Se pueden identificar varios puntos de referencia comunes en cada imagen y se puede construir matemáticamente una línea de visión (rayo) desde la imagen de la cámara hasta el punto de referencia físico. La dirección de cada rayo con relación a la cámara se puede describir en términos de dos ángulos. Si se conoce la ubicación (posición y orientación) de las cámaras, la intersección de estos rayos determina las coordenadas tridimensionales del punto. Si se toman suficientes fotografías y se identifican suficientes puntos de referencia, se dice que el sistema está sobre determinado y se puede resolver para determinar las ubicaciones y orientaciones de las cámaras, así como también las coordenadas del punto de referencia. El sistema por lo tanto se autocalibra.

50 En la práctica, es normal usar iluminación de luz flash en combinación con objetivos altamente reflectantes ubicados en puntos de interés en el objeto que se mide. Estos objetivos son normalmente planos, bidimensionales y de formas regulares. La combinación de alta reflectividad, iluminación con luz flash y forma regular produce imágenes de alto contraste y facilita la identificación y el procesamiento de imágenes.

55 La desventaja de estos objetivos es que reflejan la iluminación en una distancia angular limitada y efectivamente solo son visibles desde un lado.

60 También se conocen sistemas para fotogrametría en los que se usan objetivos activos. Uno de estos sistemas comprende diodos emisores de luz (LED) conectados a una sonda portátil, que, a su vez, se usa para sondear los puntos a medir. Luego se usa una pluralidad de cámaras para detectar la luz emitida por los LED y el ángulo en el que se recibe desde la ubicación de los LED, y desde allí se puede calcular la posición y orientación de la sonda y la punta de la sonda. Al igual que con los objetivos reflectantes mencionados anteriormente, los objetivos LED tienen una distancia angular limitada de operación. Esto limita la separación máxima de las cámaras, lo que significa que la precisión se reduce a medida que la sonda se aleja de las cámaras. Por lo tanto, dicho sistema está limitado a un volumen relativamente pequeño. Como resultado de esto, el sistema a menudo tiene que reorganizarse y/o reposicionarse para medir una característica diferente.

5 Algunos sistemas intentan abordar este problema de distancia angular limitada y extensión mediante la introducción de redundancia en el sistema. Por ejemplo, reemplazar un solo instrumento con un instrumento distribuido que rodea el volumen de medición proporciona cierta flexibilidad a los problemas de la línea de visión y supera el problema de la disminución de la precisión con la distancia entre un solo instrumento y el objetivo.

10 Uno de estos sistemas comprende una pluralidad de fuentes de láser giratorias en puntos fijos que rodean el volumen de medición. Una pluralidad de objetivos que comprenden fotodetectores cilíndricos se fijan a los objetos a medir. Cada uno de los objetivos produce un pulso cuando detecta un rayo láser que pasa. La sincronización de este pulso con respecto a la rotación de las fuentes de láser permite calcular el ángulo de incidencia de la luz de esa fuente de láser particular.

15 Este sistema tiene la ventaja de que puede tolerar cierta interrupción del haz siempre que al menos dos fuentes de láser sean visibles desde cada fotodetector. Sin embargo, dado que los haces de diferentes fuentes de láser son detectados por un fotodetector en diferentes puntos durante la rotación de las fuentes de láser, el movimiento del fotodetector entre la detección de luz de diferentes fuentes de láser tiene un efecto en la posición calculada. Esto significa que la posición calculada es solo una posición promedio durante un ciclo de las fuentes de láser giratorias.

20 Además, tanto las fuentes de láser como los fotodetectores que forman los objetivos son dispositivos activos que requieren energía y componentes complejos, lo que significa que introducir una redundancia adicional en el sistema para las fuentes o los objetivos es costoso.

25 Además, al igual que con la fotogrametría y otros sistemas de medición inherentemente basados en ángulos, se requiere un método auxiliar para introducir la escala en el sistema. Esto se logra típicamente mediante el uso de una longitud de referencia calibrada o una barra de escala.

30 Una desventaja adicional de los sistemas basados en mediciones ópticas de ángulos es que tales dispositivos son inherentemente menos precisos que los sistemas de mediciones de extensión óptica debido al efecto desproporcionado de la perturbación atmosférica en la dirección de un rayo de luz a lo largo de su longitud.

35 La técnica de multilateración es inherentemente más precisa que las técnicas basadas en ángulos. La multilateración utiliza una combinación de mediciones de extensión desde múltiples posiciones fijas a un objetivo en movimiento para determinar las coordenadas del objetivo. Si al menos cuatro dispositivos de medición de extensión se usan para rastrear el objetivo, el sistema está sobre determinado y se pueden determinar las ubicaciones y orientaciones de los dispositivos de medición de extensión, así como también las coordenadas del objetivo. La multilateración puede realizarse mediante rastreadores láser que miden la distancia absoluta al objetivo desde la fuente.

40 Sin embargo, a diferencia de la fotogrametría, la multilateración con rastreadores láser solo puede usarse para abordar un solo objetivo a la vez.

La presente invención busca proporcionar un sistema y método de detección de posición mejorada.

45 De acuerdo con un aspecto de la invención, se proporciona un sistema de detección de posición como en la reivindicación 1.

Preferentemente, el al menos un detector es una pluralidad de detectores.

Preferentemente, el al menos un emisor de luz es una pluralidad de emisores de luz.

50 En modalidades, el o cada detector se dispone de manera que, adyacente a un objetivo, una trayectoria óptica desde ese objetivo hasta el detector coincida con una trayectoria óptica a lo largo de la cual la luz incide sobre ese objetivo desde un emisor de luz.

55 En modalidades, el detector o cada detector tiene un emisor de luz correspondiente dispuesto de manera que una trayectoria óptica desde un emisor de luz a un objetivo coincida al menos parcialmente con una trayectoria óptica desde ese objetivo al detector correspondiente de manera que la luz incidente en un objetivo desde un emisor de luz sea retroreflejada a lo largo de una trayectoria óptica hacia el detector correspondiente.

60 Como se explicó anteriormente, un problema con la técnica anterior es que para la medición basada en el ángulo, a medida que un objetivo se aleja de un detector, el error en la medición del ángulo se vuelve cada vez más significativo, reduciendo la precisión de la medición. Al proporcionar un objetivo que se configura para actuar como un retroreflector para la luz incidente desde cualquier dirección, un objetivo puede estar rodeado preferentemente por detectores. En consecuencia, a medida que el objetivo se aleja más de un detector, es probable que se acerque a otro detector y, por lo tanto, a medida que el error se vuelve más significativo con respecto a un detector, se vuelve menos significativo con respecto a otro detector, y la precisión general por lo tanto, sigue siendo similar en todo el volumen.

65

Rodear un objetivo con detectores en lugar de tener detectores solo en un lado también puede aumentar la posibilidad de que el objetivo esté en la línea de visión de varios detectores y reducir la necesidad de detectores u objetivos redundantes.

5 Preferentemente, el o cada objetivo está rodeado de emisores de luz. Rodear un objetivo con emisores de luz en lugar de tener emisores de luz solo en un lado puede aumentar la posibilidad de que el objetivo esté en la línea de visión de varios emisores de luz y reducir la necesidad de emisores de luz u objetivos redundantes.

10 Cuando un objetivo está rodeado de emisores o detectores de luz, preferentemente hay al menos dos emisores o al menos dos detectores dispuestos alrededor del objetivo, de manera que el ángulo medido desde el objetivo que separa al menos dos detectores o al menos dos emisores es aproximadamente de 90°.

15 Preferentemente, el o cada objetivo es pasivo. Por lo tanto, se pueden introducir múltiples objetivos redundantes en el sistema a un coste relativamente bajo con relación a los sistemas que tienen objetivos activos. Con objetivos redundantes, es más probable que al menos uno de los objetivos para medir un objeto determinado esté dentro de la línea de visión de múltiples emisores y/o múltiples detectores.

Preferentemente, el o cada detector puede capturar una imagen de una pluralidad de objetivos en su campo de visión.

20 En una implementación, el o cada detector es una cámara digital de resolución y velocidad de píxeles suficientes para adaptarse a la velocidad de datos requerida por el sistema. La resolución de píxeles suficiente se define como un objetivo proyectado en el detector que consta de suficientes píxeles para una buena ubicación del centroide: cuantos más píxeles se usen para calcular el centroide, más precisa es su ubicación. En algunas modalidades, una imagen objetivo tiene al menos cinco píxeles de diámetro. La velocidad de datos (velocidad de fotogramas) está limitada por la cámara y el algoritmo computacional, y también se basa en el requisito de velocidad del proceso que se mide.

Las modalidades preferidas del sistema proporcionan flexibilidad, precisión y escalabilidad. El sistema se puede escalar para un volumen de diferente tamaño mediante el uso de más o menos detectores y emisores.

30 El o cada objetivo es generalmente esférico, y con mayor preferencia el o cada objetivo es una esfera. La superficie de un objetivo esférico puede actuar como una lente para enfocar la luz incidente en una región de la superficie exterior en un punto diametralmente opuesto de la superficie interna. Desde este punto, un porcentaje de la luz se refleja en la región en donde la luz fue originalmente incidente. El efecto de lente de esta región luego dirige la luz de regreso a lo largo de su trayectoria incidente. Un retroreflector esférico puede reflejar un haz nominalmente colimado que incide en su centro de regreso a lo largo de la trayectoria de incidencia. De manera similar, la porción de un haz más amplio incidente en el retroreflector se reflejará de regreso a lo largo de la trayectoria de incidencia.

40 Las ventajas de un retroreflector esférico incluyen que aparece como una fuente puntual y no está distorsionado por la perspectiva, como es el caso con la mayoría de los objetivos de fotogrametría convencionales. Los retroreflectores esféricos eliminan de esta manera una causa importante del error de medición. Pueden retroreflejar la luz incidente sobre el centro del retroreflector esférico, mejorando la identificación del centroide, que es otro factor importante en la precisión de los sistemas fotogramétricos. Los retroreflectores esféricos pasivos también son significativamente más baratos y livianos que los objetivos activos, ya que no contienen componentes electrónicos.

45 Preferentemente, el o cada objetivo aparece igual desde cualquier dirección. La identificación de un objetivo, por lo tanto, no depende del ángulo de visión entre el detector y el objetivo. Esto puede evitar la cantidad de luz retroreflejada recibida en un detector y la forma aparente del objetivo que cambia con el ángulo.

Preferentemente, el o cada objetivo comprende vidrio y con mayor preferencia se hace de vidrio.

50 Se ha demostrado que el o cada objetivo esférico actúa como un retroreflector cuando está compuesto de un material sólido con índice de refracción entre



55 y 2, y funciona de manera más eficiente con un índice de refracción entre 1,95 y 2.

60 Preferentemente, cada emisor de luz emite luz desde una fuente de luz y con mayor preferencia desde una fuente de láser en donde la luz emitida por cada emisor de luz es luz láser. En algunas modalidades, cada emisor de luz incluye dicha fuente de luz. En otras modalidades, cada emisor de luz incluye una fibra óptica que dirige la luz desde dicha fuente de luz. En modalidades adicionales, al menos un emisor de luz incluye dicha fuente de luz y al menos un emisor de luz incluye una fibra óptica que dirige la luz desde dicha fuente de luz. Proporcionar luz láser facilita la provisión de luz con una longitud de onda dentro de un intervalo predeterminado para el cual el objetivo tiene un índice de refracción preferente. En algunas modalidades, un emisor de luz no necesita incluir una fuente de luz. Por ejemplo, opcionalmente, puede usarse una sola fuente para generar luz para múltiples emisores. Esto puede ser, por ejemplo, una fuente de láser de fibra acoplada donde los divisores de fibra se usan para separar la luz láser en varias partes, y

la fibra óptica se usa para transportar cada parte a un emisor de luz.

En modalidades de la invención, cada emisor de luz se configura para emitir luz láser roja y el objetivo o cada objetivo comprende vidrio que para la luz roja tiene un índice de refracción en el intervalo preferente. En una modalidad, el o cada objetivo se hace de vidrio S-LAH 79 que tiene un índice de refracción de 1,996 para una longitud de onda de 632,8 nm.

Preferentemente, el sistema comprende una pluralidad de unidades de detección, cada unidad de detección que comprende un emisor de luz y un detector, en donde el detector de cada unidad de detección es operable para detectar y tomar mediciones de la luz retroreflejada originalmente emitida por el emisor de luz de la misma unidad de detección. Preferentemente, el emisor de luz de cada unidad de detección se fija al detector de la misma unidad de detección.

Preferentemente, el emisor y el detector de cada unidad de detección se disponen de manera que una trayectoria óptica desde el emisor a un objetivo coincida sustancialmente con una trayectoria óptica desde el objetivo al detector. El emisor y el detector de cada unidad de detección también se disponen preferentemente de manera que la longitud de la trayectoria óptica desde el emisor hasta el objetivo sea sustancialmente igual a la longitud de la trayectoria óptica desde el objetivo hasta el detector.

El o cada emisor de luz comprende medios para divergir la luz para hacer que la luz emitida diverja. Los medios para divergir la luz pueden ser, por ejemplo, una lente o un espejo curvo. Los medios para divergir la luz preferentemente se configuran para para divergir la luz para iluminar una región generalmente cónica.

Configurar el o cada emisor de luz de manera que la luz emitida diverja, por ejemplo en un cono, significa que el o cada emisor de luz puede iluminar un volumen mayor respecto al caso que sería si el emisor de luz emitiera un haz colimado. Por lo tanto, existe un volumen mayor desde el cual la luz puede retroreflejarse al detector o cada detector y, por lo tanto, el campo de visión del detector o de cada detector puede aumentarse. Esto proporciona ventajas, que incluyen la necesidad de menos detectores para monitorear un volumen. Preferentemente, el campo de visión del detector de cada unidad de detección es la región iluminada por el emisor de luz de la misma unidad de detección.

Preferentemente, el o cada detector se dispone para detectar la luz reflejada directamente en un emisor de luz y con mayor preferencia el detector de cada unidad de detección se dispone para detectar la luz retroreflejada directamente en el emisor de luz de la misma unidad de detección. Esto es capaz de superar los problemas de la técnica anterior en los que las trayectorias ópticas de la luz emitida por un emisor y detectada por un detector no se solapan con precisión. Por ejemplo, una fuente de luz flash en forma anillo dispuesta alrededor de un detector, con el retroreflector preferente, provocaría que no se detectara suficiente luz retroreflejada, ya que la mayor parte de la luz retroreflejada se dirige directamente de regreso hacia la luz flash en forma de anillo en lugar de dirigirse hacia el detector. Por lo tanto, un detector de acuerdo con una modalidad preferida de la invención puede maximizar la luz retroreflejada detectada.

Preferentemente, la superposición de las trayectorias ópticas de la luz emitida y detectada se logra mediante la iluminación a través de la lente. Preferentemente, el o cada emisor de luz se configura para emitir luz a lo largo y en un eje correspondiente a un eje alrededor del cual se configura un detector correspondiente para recibir luz. El o cada emisor de luz puede comprender medios para dirigir la luz configurada para dirigir la luz emitida por el o cada emisor de luz en una dirección predeterminada y para dirigir la luz retroreflejada a un detector, preferentemente el detector de la misma unidad de detección. El o cada medio para dirigir la luz comprende preferentemente una lente, pero puede comprender cualquier aparato de dirección de la luz, como un espejo curvo. El o cada medio para dirigir la luz preferentemente comprende además un divisor de haz.

Los medios para dirigir la luz que comprenden un divisor de haz pueden permitir que la luz se introduzca en el emisor de luz transversalmente a una dirección principal de emisión desde la unidad de detección.

Preferentemente, el o cada divisor de haz se complementa con una placa de un cuarto de longitud de onda para minimizar la cantidad de luz perdida.

Cada unidad de detección puede comprender una cámara para proporcionar el detector.

Todas las unidades de detección pueden sincronizarse mediante el uso de un mecanismo de activación común para cada adquisición de la imagen.

Las modalidades de la invención pueden usarse en un modo de fotogrametría en donde el o cada detector se configura para tomar mediciones de los ángulos en los que se recibe la luz retroreflejada mediante el uso de técnicas de triangulación de fotogrametría estándar. El procesador puede procesar tales mediciones de ángulos de una pluralidad de detectores o de un solo detector en una pluralidad de ubicaciones para derivar ubicaciones de posición para el objetivo o para cada objetivo.

Una ventaja de este modo es que hay poca restricción sobre dónde se debe colocar el detector o cada detector para

cada medición.

El modo de fotogrametría se calibra preferentemente, por ejemplo, mediante el uso de una barra de escala.

5 Para ayudar a la calibración de este modo, cada detector o unidad de detección puede tener fijado al mismo al menos un objetivo. Mediante el uso de la técnica descrita anteriormente, se pueden determinar las posiciones relativas de cada uno de los detectores para proporcionar un sistema de coordenadas de referencia para medir la posición de los objetos. Esto puede reducir el tiempo y la habilidad necesarios para calibrar un sistema con el fin de proporcionar mediciones precisas. También puede ayudar con el monitoreo de la deriva para garantizar la exactitud continua del sistema.

10 Las modalidades de la invención pueden usarse en modo de multilateración en donde el o cada detector se configura para medir la distancia absoluta de uno o cada objetivo desde el detector respectivo. La interferometría de exploración de frecuencia puede usarse para medir la distancia absoluta, por ejemplo, al modular o ajustar la longitud de onda de la luz emitida por el o cada emisor de luz.

15 La interferometría de exploración de frecuencia es un método para medir inequívocamente la diferencia de trayectoria óptica (OPD), D , entre los dos extremos de un interferómetro en comparación con la OPD conocida, L , de un interferómetro de 'referencia'. Por ejemplo, si ambos interferómetros se iluminan con el mismo láser, que luego se sintoniza en un intervalo de frecuencia $\Delta\nu$, el cambio de fase, $\Delta\Phi$, inducido en el interferómetro de referencia será

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi}{c} L \Delta\nu$$

20 donde, c , es la velocidad de la luz. De manera similar, el cambio de fase, $\Delta\theta$, inducido en el interferómetro desconocido será

$$\Delta\theta = \frac{2\pi}{c} D \Delta\nu$$

30 La longitud desconocida, D , es simplemente dada por

$$D = \frac{\Delta\theta}{\Delta\Phi} L$$

35 Los expertos en la técnica reconocerán que existen numerosas variaciones y mejoras en este esquema básico. Por ejemplo, el análisis en el dominio de la frecuencia puede usarse para distinguir las señales de múltiples objetivos que se iluminan simultáneamente.

40 Si la longitud del interferómetro de referencia, L , se ha calibrado adecuadamente, entonces habrá trazabilidad entre las mediciones tomadas por el detector o cada detector y el medidor. También puede mejorar en gran medida la fidelidad de las mediciones debido a los efectos ambientales, como la flexión del haz debido a la variación en el índice de refracción a lo largo de la trayectoria óptica, las coordenadas determinadas a partir de los datos de longitud son típicamente de un orden de magnitud más preciso que las coordenadas determinadas a partir de los datos del ángulo.

45 Sin embargo, usada de forma aislada, la interferometría de exploración de frecuencia no sería capaz de distinguir qué distancia medida estaba asociada con qué objetivo de una manera computacionalmente eficiente. Aunque puede usarse un enfoque de "fuerza bruta" que intente todas las combinaciones posibles.

50 Las modalidades de la invención pueden usarse en un modo combinado en donde el o cada detector se configura para tomar mediciones tanto del ángulo en donde se recibe la luz retroreflejada como de la distancia absoluta desde el detector respectivo del o cada objetivo desde el cual la luz es retroreflejada. El procesador puede usar las mediciones de ángulo para correlacionar qué mediciones de distancia se relacionan con qué objetivo. Una vez que se ha realizado esta correlación, el procesador puede usar las mediciones de distancia absoluta para calcular con precisión la posición del objetivo o de cada objetivo.

55 Además, no es necesario que la distancia absoluta entre el detector o cada detector y el retroreflector o cada retroreflector se mida e indexe a un objetivo particular. En cambio, se podría determinar una extensión de extensiones discretas posibles y la extensión "correcta" (o inequívoca) elegida según la opción más probable determinada por la distancia objetivo-detector derivada de los datos de extensión y/o datos de ángulo de uno o más detectores.

60 Las modalidades preferidas proporcionan un sistema y método de detección de posición mejorado, basados en objetivos omnidireccionales, que combina la precisión de la multilateración con la capacidad simultánea de objetivos múltiples de la fotogrametría mientras supera la línea de visión y disminuye la precisión con los problemas de extensión.

Preferentemente hay una pluralidad de detectores.

Como se describió anteriormente, a pesar de su mayor precisión sobre la fotogrametría, la multilateración implementada convencionalmente con rastreadores láser solo se puede usar con un único objetivo. Sin embargo, mediante el uso de mediciones de ángulo para correlacionar mediciones de distancia desde diferentes detectores, las modalidades preferidas de la presente invención pueden utilizar la técnica de multilateración más precisa para calcular la posición de múltiples objetivos.

La combinación del modo de multilateración y el modo de fotogrametría puede aumentar la robustez y la confiabilidad del sistema porque las coordenadas del objetivo se derivan esencialmente de una combinación de dos sistemas sobredeterminados.

El procesador puede procesar mediciones mediante el uso de software matemático que emplea algoritmos de fusión y ajuste de datos. La combinación de fotogrametría, multilateración y el software matemático puede proporcionar un sistema muy flexible, robusto, autocalibrado y de compensación de deriva. Puede proporcionar una mejor calidad de datos y más redundancia de datos.

De acuerdo con otro aspecto de la invención, se proporciona un método como en la reivindicación 13.

Las características de este método pueden corresponder a las características descritas con respecto a los sistemas descritos anteriormente.

También se describe en la presente descripción una unidad de detección que incluye un detector y un emisor de luz, en donde el emisor de luz se configura para emitir, lejos de la unidad de detección, luz a lo largo y sobre un eje correspondiente a un eje sobre y alrededor del cual la unidad de detección se configura para recibir luz, para la detección por el detector.

Las modalidades de la invención son descritas más abajo, a manera de ejemplo solamente, con referencia a los dibujos acompañantes, en los cuales:

La Figura 1 es un dibujo esquemático de un objetivo para usar en un sistema de acuerdo con una modalidad de la invención;

La Figura 2 es un diagrama esquemático de un sistema de detección de posición de acuerdo con la modalidad de la Figura 1, configurado para medir un objeto;

La Figura 3 es una representación esquemática de una sonda portátil para usar en el sistema de detección de posición de la modalidad de las Figuras 1 y 2;

La Figura 4 es un diagrama esquemático de una sección transversal de una unidad de detección para usar en el sistema de detección de posición de las Figuras 1 a 3;

La Figura 5 es un diagrama esquemático de una sección transversal de una unidad de detección de acuerdo con una modalidad de la invención;

La Figura 6 es un diagrama esquemático de un sistema de detección de posición de acuerdo con una modalidad de la invención;

La Figura 7 es una vista general esquemática del sistema de detección de posición de la Figura 6;

La Figura 8 es un diagrama esquemático de un divisor de fibra del sistema de detección de posición de las Figuras 6-7;

La Figura 9 es un diagrama esquemático de una referencia de longitud de onda para usar en el sistema de detección de posición de las Figuras 6-8;

La Figura 10 es un diagrama esquemático de una referencia de disparo para usar en el sistema de detección de posición de las Figuras 6-9;

La Figura 11 es un diagrama esquemático de una unidad de detección para usar en el sistema de detección de posición de las Figuras 6-10; y

La Figura 12(a) es un gráfico que muestra una curva de absorción para el gas de la celda de la referencia de longitud de onda de la Figura 9 y la Figura 12(b) es un gráfico que muestra en detalle una línea de absorción del gráfico de la Figura 12(a).

Las modalidades de la invención pueden utilizar mediciones basadas en ángulos y/o mediciones de distancia absoluta. Con referencia a las Figuras 1 a 5, más abajo se describen modalidades que utilizan la medición basada en ángulo.

Con referencia a la Figura 1, un objetivo 10 comprende una esfera de vidrio. La esfera se hace de vidrio S-LAH 79 que tiene un índice de refracción de 1,996 para la luz con una longitud de onda de 632,8 nm. El material se ha elegido para esta modalidad para trabajar con luz láser roja. Sin embargo, pueden usarse diferentes materiales, particularmente si se usa una frecuencia de luz diferente. El material tendría preferentemente un índice de refracción en el intervalo de 1,9 a 2,1 o con mayor preferencia de 1,95 a 2 para la luz que se usa.

Como se puede ver en la Figura 1, la luz que incide en el centro del objetivo, a lo largo de una trayectoria 16 en una región 12 del objetivo 10, se enfoca en un punto 14 diametralmente opuesto a la región 12. Esto ocurre como resultado del efecto de lente del objetivo esférico 10. Un porcentaje de la luz se refleja desde el punto 14 de vuelta a la región

12, donde el efecto de lente del objetivo esférico 10 dirige la luz reflejada de regreso a lo largo de la trayectoria incidente 16 hacia la fuente de la luz. El objetivo 10 actúa de esta manera como un retrorreflector.

5 Como el objetivo 10 es esférico, aparecerá sustancialmente igual y tendrá sustancialmente las mismas propiedades para todas las direcciones de incidencia. Por lo tanto, el efecto retroreflectante se produce para la luz de cualquier ángulo de incidencia y, de esta manera, el objetivo 10 sirve como un retrorreflector para la luz incidente desde cualquier dirección.

10 La Figura 2 es un diagrama esquemático de un sistema de detección de posición 18 mediante el uso de los objetivos 10 como se describe con respecto a la Figura 1.

15 El sistema 18 que se muestra en la Figura 2 se dispone para detectar la posición de un objeto 38 dentro de un volumen 40. El volumen 40 puede ser, por ejemplo, un salón de ensamblaje o un volumen más pequeño. El sistema 18 comprende una pluralidad de unidades de detección 20 dispuestas en varios lugares alrededor del volumen. Cada unidad de detección 20 se monta en un trípode 22 para mayor estabilidad.

Más abajo se describe una unidad de detección 20 con referencia a la Figura 4.

20 Como se puede ver en la Figura 4, una unidad de detección 20 comprende un detector 24 y un emisor de luz que incluye una fuente de luz 26.

El detector 24 es cualquier detector adecuado para detectar y tomar mediciones de luz, que incluyen el ángulo de incidencia de la luz. Los ejemplos de dicho detector incluyen un sensor CCD o CMOS de alta resolución.

25 La fuente de luz 26 es un diodo láser. En esta modalidad, la fuente de luz 26 se configura para emitir luz láser roja a una longitud de onda de 632,8 nm. Sin embargo, pueden usarse otras frecuencias de luz, que incluyen las infrarrojas u otras frecuencias de luz visible. Además, pueden usarse otras fuentes de luz que pueden funcionar para emitir luz dentro de un intervalo predeterminado de longitudes de onda, como los LED. Preferentemente, la fuente de luz es un láser y preferentemente está polarizada linealmente.

30 La unidad 20 también incluye un divisor de haz de polarización 28 entre un primer conjunto de lentes 30 y un segundo conjunto de lentes 32. El divisor de haz 28 se dispone para ser coaxial con el primer conjunto de lentes 30 y el segundo conjunto de lentes 32. Se proporciona una placa de cuarto de longitud de onda 29 después del primer conjunto de lentes 30 y el divisor de haz 28. La placa de cuarto de onda puede cambiar la polarización de la luz para permitirle atravesar (en lugar de reflejarse dentro) el cubo divisor de haz 28 y alcanzar el detector 24 después de que se haya reflejado por el objetivo.

35 Puede usarse un divisor de haz no polarizador en lugar de un divisor de haz polarizador 28, en cuyo caso no se requeriría la placa de cuarto de onda 29 para cambiar la polarización.

40 La fuente 26 es operable para emitir un haz de luz polarizada hacia el divisor del haz en un ángulo transversal al eje del primer y segundo conjuntos de lentes 30 y 32. Se proporciona un cable de fibra óptica 34 para guiar la luz desde la fuente hacia el divisor de haz 28. En esta modalidad, el emisor de luz comprende la fuente de luz 26, el cable de fibra óptica 34, el divisor de haz 28 y el primer conjunto de lentes 30. Sin embargo, en algunas modalidades, la fuente 45 26 se dispone para emitir luz directamente al divisor de haz 28 sin la necesidad del cable de fibra óptica 34.

50 El divisor de haz 28 se dispone para redirigir el haz de luz desde el diodo láser 26 hacia y coaxialmente con el primer conjunto de lentes 30. El primer conjunto de lentes 30 se configura para hacer que el haz de luz diverja y se emita desde la unidad de detección para iluminar una región cónica 36 del volumen 40. Sin embargo, la región 36 no tiene que ser cónica. Cualquier divergencia de la luz aumenta el campo de visión de la unidad de detección 20 y por lo tanto, reduce el número de unidades de detección 20 requeridas y/o reduce la cantidad de unidades de detección 20 que necesitan ser redirigidas durante la operación.

55 El arreglo también da como resultado que el primer conjunto de lentes 30 se configure para hacer que la luz que se ha reflejado desde la región 36 se dirija hacia el divisor de haz 28. El divisor de haz 28 permite que parte de la luz retroreflejada pase al segundo conjunto de lentes 32. El segundo conjunto de lentes 32 se configura para enfocar la luz recibida desde el divisor de haz 28 sobre el detector 24 de manera que la posición en el detector 24 en la que se enfoca la luz se correlaciona directamente con el ángulo con respecto al eje del primer y segundo conjuntos de lentes 60 30, 32 en las cuales fue incidente el primer conjunto de lentes 30.

Hay otras modalidades en las que no se requiere el segundo conjunto de lentes 32.

65 El detector 24 es operable para tomar mediciones de la luz detectada. En particular, el detector 24 es operable para medir el ángulo con relación al eje del primer y segundo conjunto de lentes 30, 32 en el que incide la luz retroreflejada en el primer conjunto de lentes 30 mediante el uso de la correlación descrita anteriormente.

- 5 La modalidad preferida descrita anteriormente de la unidad de detección 20 comprende un primer y segundo conjuntos de lentes 30, 32. Cada uno de los primer y segundo conjuntos de lentes 30, 32 comprende múltiples elementos de lente. Sin embargo, el primer y el segundo conjunto de lentes 30, 32 se pueden reemplazar con una sola lente para cada uno. Alternativamente, puede usarse uno o más espejos curvos para reemplazar cada uno de los primer y segundo conjuntos de lentes 30, 32. El primer y el segundo conjunto de lentes 30, 32 pueden omitirse por completo. Sin embargo, en este caso, la región 36 iluminada por el emisor de luz tendrá un tamaño limitado, reduciendo el campo de visión de la unidad de detección 20.
- 10 Las modalidades de la invención omiten el divisor de haz 28 y la placa de cuarto de longitud de onda 29, pero un extremo del cable de fibra óptica 34 se dirige para guiar la luz a lo largo del eje del primer conjunto de lentes 30. Una modalidad se muestra en la Figura 5.
- 15 Con referencia nuevamente a la Figura 2, como se describió anteriormente, cada unidad de detección 20 es operable para iluminar una región 36 del volumen 40. Las unidades de detección 20 se disponen de manera que la pluralidad de regiones 36 que se iluminan dan como resultado que todo el volumen 40 esté iluminado.
- 20 Puede haber objetivos fijos 50 ubicados dentro del volumen 40 que proporcionan puntos de referencia fijos que definen un marco de coordenadas.
- 25 El objeto 38 tiene fijado al mismo una pluralidad de objetivos 10, siendo los objetivos 10 como se describe en relación con la Figura 1. En un modo de operación, los objetivos fijos 10 fijados al objeto 38 pueden usarse para determinar la posición y orientación del objeto 38 en el marco de coordenadas definido por los objetivos fijos 50.
- En otro modo operativo, una sonda 42 puede usarse para medir características en un objeto 38. La sonda 42 se describe más abajo en más detalle con referencia a la Figura 3.
- 30 La Figura 3 muestra una sonda 42 que comprende un cuerpo de sonda 44 que se extiende lejos de una punta de sonda 46. La punta de la sonda 46 puede usarse para sondear el objeto 38.
- 35 El cuerpo de la sonda 44 tiene extendido lejos de él en varias posiciones a lo largo de su longitud y en varios ángulos, los soportes de objetivo 48 sobre cada uno de los cuales se monta un objetivo 10 de acuerdo con la Figura 1.
- De esta manera, la sonda 42 proporciona un medio por el cual las coordenadas de la punta de la sonda 46 pueden ubicarse incluso si la punta de la sonda 46 está oculta a la vista de las unidades de detección 20. Con referencia nuevamente a la Figura 2, como se describió anteriormente, cada una de las unidades de detección 20 puede tener fijada a la misma una pluralidad de objetivos 10 de acuerdo con la Figura 1. Las sondas 42 se pueden sostener con la mano para proporcionar una capacidad de sondeo manual.
- 40 Los objetivos fijos 50 pueden tener la forma de una pluralidad de objetivos de referencia 50 que comprenden un objetivo 10 en un trípode u otra forma de soporte o fijación, que se proporcionan en varias ubicaciones dentro del volumen 40 para proporcionar puntos de referencia con respecto a los cuales se puede comparar la posición de los objetivos 10 fijados al objeto 38. Los objetivos de referencia 50 pueden proporcionar una referencia dimensional para introducir la escala en el sistema desde la cual los datos de ángulo pueden convertirse en longitud, cuando el sistema está operando solo en el modo de fotogrametría.
- 45 Las unidades de detección 20 están todas sincronizadas y configuradas para comunicarse con un procesador central (no mostrado). La comunicación es por una conexión de radio inalámbrica. Sin embargo, pueden usarse otros medios de comunicación, como una conexión por cable.
- 50 Cada uno de los detectores se configura para comunicar cualquier medición tomada al procesador central.
- La operación preferida del sistema 18 se describe a continuación.
- 55 Primero, el sistema 18 está calibrado. Un posible método de calibración es mediante el uso de un artefacto tridimensional que comprende una pluralidad de objetivos 50 en una configuración conocida que se ha medido independientemente, por ejemplo con un rastreador láser.
- Una pluralidad de unidades de detección 20 se disponen alrededor del volumen 40. Cada una de las unidades de detección funciona de manera que la fuente 26 emite luz.
- 60 La luz emitida por la fuente 26 es transportada por el cable de fibra óptica 34 al divisor de haz 28.
- 65 El divisor de haz 28 redirige la luz al primer conjunto de lentes 30, lo que hace que la luz que diverge sea emitida para iluminar la región 36 del volumen 40.
- La pluralidad de unidades de detección 20 puede estar dispuesta de manera que al menos uno de los objetivos 10

fijados a cada unidad de detección 20 esté dentro de las regiones 36 de al menos otras dos unidades de detección 20. Como se describió anteriormente, se puede colocar una pluralidad de objetivos de referencia fijos 50 dentro del volumen 40.

5 La luz de una de las unidades de detección 20 que incide sobre un objetivo 10 o 50 se retrorefleja hacia la unidad de detección que originalmente emitió la luz como se describe en relación con la Figura 1.

10 La luz retrorreflejada que incide en el primer conjunto de lentes 30 de la unidad de detección 24 que originalmente emitió la luz es dirigida por el primer conjunto de lentes 30 a través de la placa de cuarto de longitud de onda 29 y el divisor de haz 28, y se dirige por el segundo conjunto de lentes 32 sobre el detector 24.

15 Los detectores 24 de cada una de las unidades de detección 20 toman mediciones de la posición en el detector 24 en el que se detecta la luz. A partir de estos datos, se calcula el ángulo con respecto al eje del primer y segundo conjuntos de lentes 30, 32 en el que incide la luz en el primer conjunto de lentes.

Cada uno de los detectores 24 comunica estas mediciones al procesador central.

20 El procesador central se opera para procesar las mediciones de cada una de las unidades de detección para determinar la posición relativa de las unidades de detección 20 (en algunas modalidades, la posición relativa de las cámaras) mediante algoritmos de ajuste de paquetes. Los expertos en la técnica estarán familiarizados con el ajuste del paquete que, en un solo modelo matemático, calcula simultáneamente los parámetros de orientación interior y exterior de la unidad de detección 20 o cámara (longitud focal, posición, orientación, etc.), así como también las coordenadas del objetivo para un número ilimitado de objetivos y unidades de detección 20 o cámaras. Esta técnica se basa en las ecuaciones de colinealidad, que vinculan la coordenada del objetivo 2D en el plano de la imagen con la posición 3D de los objetivos en el espacio del objeto, así como también con la orientación y posición 3D de la unidad de detección/cámara. Por ejemplo,

30
$$x = x_0 + f \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} + \Delta x$$

y

35
$$y = y_0 + f \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} + \Delta y$$

40 donde x_0 y y_0 son los principales desplazamientos de puntos (distancia desde el centro de la imagen a la intersección del eje óptico y el plano de la imagen), x y y son las coordenadas del objetivo 2D en el plano de la imagen, f es la longitud focal, los valores indexados

$$r_{ii}$$

45 son elementos de la matriz de rotación 3x3 de la unidad de detección/orientación de la cámara, (X,Y,Z) son las coordenadas del objetivo 3D en el espacio del objeto, y (X_0,Y_0,Z_0) son las coordenadas 3D de la unidad de detección/cámara.

50 Las mediciones se procesan mediante el uso de algoritmos de resolución comunes, como el ajuste de mínimos cuadrados, donde muchas instancias de las ecuaciones de colinealidad anteriores (dos ecuaciones para cada objetivo visto por una unidad de detección/cámara, sin límite para el número de objetivos o unidades de detección/cámaras) se resuelven simultáneamente. Los expertos en la técnica reconocen que un cálculo riguroso de la incertidumbre es inherente al método de mínimos cuadrados.

55 Como la posición de los objetivos de referencia 50 ya se conoce, esto proporciona las posiciones de las unidades de detección 20. Esto es capaz de calibrar el sistema 18 proporcionando un sistema de coordenadas de referencia con respecto al cual se puede determinar la posición del objeto 38 a medir como se describe a continuación.

Una vez que el sistema se ha calibrado, se puede detectar la posición del objeto 38.

60 Una pluralidad de objetivos 10 y/o una o más sondas 42 se usan para sondear el objeto 38.

65 Las unidades de detección 20 se hacen funcionar como se describió anteriormente, pero ahora los detectores 24 detectan los objetivos 10 fijados al objeto 38, así como también los objetivos de referencia 50. Los detectores 24 se operan para tomar mediciones como se describió anteriormente y estas mediciones se comunican al procesador como se describió anteriormente.

Mediante el uso del sistema de coordenadas de referencia determinado a partir de las mediciones relativas de las unidades de detección 20, se calcula la posición relativa de los objetivos 10, fijados al objeto 38 o proporcionados como los objetivos de referencia 50, que están dentro del campo de visión de más de una unidad de detección 20.

5 La posición relativa del objeto 38 se determina de esta manera.

Sin embargo, la calibración del sistema 18 no necesita realizarse como una etapa separada antes de que se detecte la posición del objeto 38. La calibración del sistema 18 puede realizarse al mismo tiempo que el cálculo de la posición del objeto 38. Realizar una calibración constantemente mientras el sistema 18 está en funcionamiento puede proporcionar monitoreo de deriva para asegurar la precisión continua del sistema.

Con referencia a las Figuras 6 a 12, más abajo se describen modalidades que utilizan la medición de distancia absoluta.

15 La Figura 6 muestra un sistema de detección o medición de posición 118 mediante el uso de los objetivos 110. Los objetivos 110 corresponden a un objetivo 10 como se describe con respecto a la Figura 1.

El sistema que se muestra en la Figura 6 se diseña para detectar la posición de un objeto (no mostrado) dentro de un volumen 140. El sistema 118 comprende una pluralidad de unidades de detección 120 dispuestas en varios lugares alrededor del volumen 140.

La Figura 7 es una vista general esquemática del sistema de medición 118. La luz de una fuente de luz en forma de láser sintonizable 126, que funciona preferentemente a longitudes de onda entre 1530 nm y 1560 nm, se envía a través de una fibra óptica a un amplificador de fibra dopada con erbio (EDFA) 152. El EDFA 152 amplifica la luz, lo que aumenta su energía. La salida del EDFA 152 se envía a través de una fibra óptica a un árbol divisor de fibra 154. El árbol divisor de fibra 154 distribuye la luz que llega a su entrada entre múltiples salidas. Estas salidas comprenden una referencia de frecuencia 156, una referencia de disparo 158 y una o más unidades de detección en forma de cabezales de medición 120. La referencia de frecuencia 156, la referencia de disparo 158 y los cabezales de medición 120 producen cada uno una señal o señales electrónicas que son digitalizadas por un ADC 160. Los datos registrados por el ADC 160 se envían a un ordenador 162 para su análisis y almacenamiento.

La Figura 8 es un ejemplo esquemático de un árbol divisor de fibra 154. El árbol divisor de fibra comprende una serie de divisores de fibra de 2x2, dispuestos para distribuir la luz enviada a una fibra de entrada entre múltiples fibras de salida. El ejemplo ilustrado en la Figura 8 distribuye la luz uniformemente a 8 fibras de salida, sin embargo, pueden usarse diferentes disposiciones de divisores de fibra para distribuir la luz de manera uniforme o desigual a diferentes números de fibras de salida.

La Figura 9 muestra la referencia de frecuencia 156. La luz de una de las salidas del árbol divisor de fibra 154 se envía a la referencia de frecuencia 156. Sale del extremo de la fibra y es colimado por una lente colimadora 164 en un haz de espacio libre. Este haz se divide en dos partes con un divisor de haz de placa 166. Una primera porción de este haz dividido se dirige a un fotodiodo monitor 168. Una segunda porción del haz dividido se dirige a través de una celda transparente 170 que contiene un gas, por ejemplo acetileno, y la porción del haz que se transmite a través de esta celda 170 se dirige sobre un fotodiodo de la celda 172. El divisor de haz de vidrio 166 a través del cual pasa el haz colimado está en ángulo y/o sostenido para dirigir los haces creados por los reflejos no deseados lejos de los fotodiodos 168, 172, para evitar que perturben las mediciones.

La Figura 10 muestra la referencia de disparo 158. La luz de una de las salidas del árbol divisor de fibra 154 se envía a la fibra de entrada de la referencia de disparo, donde se dirige a través de un divisor de fibra 50:50 174. La luz que sale de las dos salidas del divisor de fibra 174 se envía a través de longitudes de la fibra óptica antes de ser recombinada en un segundo divisor de fibra 50:50 176. Los dos divisores de fibra 50:50 174, 176 y la fibra que los conecta forman un interferómetro de fibra Mach-Zehnder. Las dos longitudes de fibra entre los divisores de fibra 50:50 174, 176 tienen diferentes longitudes, creando una diferencia de trayectoria óptica entre la luz que viaja por cada brazo. La luz que sale de cada salida del segundo divisor de fibra 50:50 176 se dirige a uno de un par de fotodiodos 178, 180. Estos son preferentemente fotodiodos equilibrados; un par de fotodiodos amplificados fabricados para tener propiedades de ganancia similares. Las salidas eléctricas de los dos fotodiodos 178, 180 se envían a un amplificador diferencial 182. La salida del amplificador diferencial 182, que es una señal proporcional a la diferencia en las dos señales de fotodiodo, se envía a un comparador cero 184. El comparador cero 184 genera un valor lógico booleano que indica el signo (positivo o negativo) de su señal de entrada. El borde ascendente de la salida del comparador cero se usa para activar adquisiciones de muestras en el ADC 160 de datos de la referencia de frecuencia 156 y los cabezales de medición 120.

La Figura 11 es una ilustración de un cabezal de medición 120. Cada cabezal de medición 120 se proporciona con luz de su propia salida del árbol divisor de fibra dedicado. Esto se alimenta a la fibra de entrada del cabezal de medición 120. Luego se dirige a lo largo de una longitud de fibra óptica 186 al puerto 1 de un circulador de fibra 188. La luz que entra al puerto 1 del circulador de fibra 188 sale del puerto 2 del circulador de fibra, donde viaja a lo largo de una longitud de fibra 190, llegando al extremo de la fibra. Este extremo de fibra es pulido plano (es decir, el plano del

extremo de la fibra es perpendicular a una línea que apunta a lo largo del cuerpo de la fibra). Aproximadamente el 4 % de la luz que llega al extremo de la fibra se reflejará nuevamente en la fibra 190 hacia el puerto 2 del circulador de fibra 188. La luz que entra al puerto 2 del circulador 188 sale del puerto 3 del circulador a un detector en forma de fotodiodo 200.

5 La longitud de la fibra 190 entre el circulador 188 y el extremo de la fibra se mantiene lo más corta posible (por ejemplo, 10 cm) e idealmente debería ser de manera que la longitud de la trayectoria óptica a lo largo de esta fibra 190 sea inferior a una distancia de medición mínima. Esta consideración se debe a la retrodispersión de luz de Rayleigh que
10 viaja hacia el extremo de la fibra en esta sección de fibra óptica. La luz retrodispersada de Rayleigh crea un componente de ruido que solo afecta a longitudes de medición más cortas que la longitud de la trayectoria óptica de esta fibra. Por lo tanto, al mantener la longitud de la trayectoria óptica de esta longitud de fibra más corta que una distancia de medición mínima, es posible realizar mediciones que no se vean afectadas por este componente de ruido.

15 La luz que sale del extremo de la fibra se emite en un cono de luz. El cabezal de medición es sensible a los objetivos 110 dentro de este cono de luz. En general, es ventajoso alterar el intervalo de ángulos iluminados por la luz emitida desde el extremo de la fibra para alterar el intervalo de ángulos a los que el cabezal de medición 120 es sensible. La figura muestra una lente bicóncava simple usada para aumentar el intervalo de ángulos iluminados. Sin embargo, son posibles diferentes métodos para alterar el intervalo de ángulos iluminados, por ejemplo, un espejo curvo, una rejilla de difracción o un modulador de luz espacial y también son posibles diferentes configuraciones de ángulos iluminados,
20 por ejemplo, mediante el uso de una lente cilíndrica.

La Figura 6 muestra un arreglo de ejemplo de varios cabezales de medición 120 alrededor de un volumen de medición 140. En este ejemplo, el volumen de medición consiste en un volumen en el que los objetivos 110 están dentro de todos los volúmenes de detección 136 de los cabezales de medición. Si la línea de visión entre un objetivo 110 y un
25 cabezal de medición 120 está bloqueada, este arreglo aún puede realizar mediciones, ya que en general habrá una línea de visión desde el objetivo 110 a suficientes otros cabezales de medición 120 para determinar su ubicación. Son posibles otras disposiciones de cabezales de medición 120.

Una medición comprende variar la longitud de onda del láser sintonizable 126 de una manera nominalmente lineal, mientras se registran simultáneamente las tensiones de la referencia de frecuencia 156 y los cabezales de medición 120 con el ADC 160. Estas mediciones se registran a intervalos determinados por la referencia de disparo 158 como se describe más abajo. Luego, estos datos se envían al ordenador 162 para analizar, con el análisis generado que brinda información sobre ubicaciones relativas de los cabezales de medición 120 y los objetivos 110.
30

Parte de la energía del láser va, a través del EDFA 152 y el divisor 154, a la referencia de disparo 158. En la referencia de disparo, el interferómetro Mach-Zehnder genera dos señales, 180 grados fuera de fase, que varían nominalmente en forma de seno con la frecuencia del láser. Estas señales se detectan con los fotodiodos y el amplificador diferencial 182 genera la diferencia entre las dos señales. Esta señal de diferencia es en sí misma una señal sinusoidal, pero tiene una tensión de desplazamiento cero. El comparador 184 genera una señal de onda cuadrada a partir de la salida del amplificador diferencial 182. Esta señal se envía a la entrada de activación de muestra del ADC. El ADC toma muestras de los datos de la referencia de frecuencia y los cabezales de medición como se discutió anteriormente en un borde ascendente de esta señal de disparo.
35

Parte de la energía del láser va, a través del EDFA 152 y el divisor 154, a la referencia de frecuencia 156. El propósito de la referencia de frecuencia 156 es proporcionar información sobre la frecuencia del láser en varios puntos durante el barrido de frecuencia del láser. El gas contenido en la celda 170 en la referencia de frecuencia absorbe parte de la luz que la atraviesa. La fracción de luz absorbida es dependiente de la frecuencia del láser. La curva de fracción de absorción versus frecuencia (o longitud de onda) se llama una curva de absorción. Una curva de absorción típica se muestra en la Figura 12(a). Consiste en un nivel de referencia que es aproximadamente transparente, con la presencia de muchas líneas de absorción; regiones estrechas de longitud de onda de fuerte absorción. En la Figura 12(b) se muestra un detalle de una de estas líneas de absorción. Las longitudes de onda centrales de varias de estas líneas de absorción tienen valores conocidos y altamente estables.
45

El propósito del fotodiodo del monitor 168 en la referencia de frecuencia, que registra la luz que no pasa a través de la celda, es para compensar las fluctuaciones en la energía del láser durante la medición. La señal de tensión registrada por el fotodiodo de la celda 172 se divide por la señal de tensión registrada por el fotodiodo del monitor 168. Esto crea una señal que es proporcional a la absorbancia de la celda en la longitud de onda del láser actual y no se ve afectada por las variaciones en la energía del láser.
50

Las tensiones de fotodiodos se registran en todo el barrido de frecuencia del láser. Los tiempos durante la medición en los que la longitud de onda del láser estaba en el centro de una línea de absorción se encuentran, por ejemplo, al realizar un ajuste de mínimos cuadrados a los datos registrados. Entonces se sabe que el valor de la longitud de onda del láser en estos momentos es la longitud de onda correspondiente a la longitud de onda central del pico de absorción.
55

En cada cabezal de medición 120, la luz reflejada desde el extremo de la fibra óptica 190 forma el brazo de referencia de un interferómetro. La luz emitida desde el extremo de la fibra, reflejada en un objetivo y acoplada nuevamente a la
60

fibra 190, forma otro brazo del interferómetro. La luz de ambos brazos del interferómetro sale del puerto 3 del circulador 188 y es detectada por el fotodiodo del detector 200. La interferencia entre la luz en estos dos brazos del interferómetro genera una señal de intensidad sobre el fotodiodo 200, I_{det} ,

$$I_{det} = I_{ref} + I_{med} + 2\sqrt{I_{ref}I_{med}} \cos(2\pi Dv/c) \quad (1)$$

donde I_{ref} e I_{med} son las intensidades individuales de los brazos de referencia y de medición respectivamente, D es la diferencia de la trayectoria óptica entre los brazos de referencia y medición, y v es la frecuencia del láser.

Si múltiples objetivos 110 están dentro del campo de visión del cabezal de medición 120, se generarán múltiples señales de interferencia, por ejemplo, entre el brazo de referencia y los brazos de medición o entre los brazos de medición. En general, solo la interferencia entre el brazo de referencia y los brazos de medición individuales es observable, debido a la energía mucho menor en los brazos de medición en comparación con el brazo de referencia.

Se calcula la transformada de Fourier de la señal registrada de cada cabezal de medición 120. Esta contiene picos en frecuencias proporcionales a las distancias de los objetivos, más una frecuencia de desplazamiento debido a la longitud de la trayectoria óptica adicional provocada por el haz que atraviesa el material con un índice de refracción mayor que 1 (como el vidrio que forma una lente divergente y el vidrio que forma el objetivo), que debe calibrarse. Esta frecuencia de desplazamiento puede calibrarse mediante el uso del conocimiento de la geometría y el índice de refracción del material involucrado, o al incluir los desplazamientos como parámetros en el mismo proceso de ajuste de mínimos cuadrados que determina las posiciones de los cabezales de medición y objetivos, que se describe más adelante. Estos picos de transformada de Fourier se ubican y se determinan sus frecuencias (por ejemplo, mediante el uso de un método de ajuste de mínimos cuadrados), lo que da como resultado un conjunto de frecuencias medidas para cada cabezal de medición 120.

Una vez que se ha restado el desplazamiento calibrado, estas frecuencias son proporcionales a las distancias de los objetivos. La constante de proporcionalidad se calcula mediante el uso de la referencia de frecuencia 156. Debido al uso de la referencia de disparo 158, los datos se muestrean a intervalos constantes de frecuencia láser, δv . De la ecuación (1), las frecuencias medidas son por lo tanto

$$f = 2\pi D \delta v / c \quad (2)$$

La ecuación (2) se puede reorganizar para calcular D ,

$$D = fc / 2\pi \delta v. \quad (3)$$

La δv desconocida se calcula mediante el uso de la referencia de frecuencia 156. Los centros de dos picos de absorción de diferencia de frecuencia conocida Δv_{dif} se ubican, por ejemplo, por mínimos cuadrados que ajustan los datos en los alrededores de cada pico. Se calcula el número de muestras m entre los dos picos. Tenga en cuenta que esto puede ser hacerse con una precisión mejor que 1 muestra ya que los picos en sí mismos pueden ubicarse con una precisión mejor que 1 muestra. Entonces es posible calcular δv como $\delta v = \Delta v_{dif} / m$.

Con δv conocido, la D correspondiente a cada frecuencia medida se calcula mediante el uso de la ecuación (3). Los expertos en la técnica se darán cuenta de que D corresponde a una diferencia de trayectoria óptica y que calcular una distancia física precisa a partir de esto requiere calcular el índice de refracción del aire ambiente. Este es un procedimiento común y puede realizarse, por ejemplo, al medir la temperatura y la humedad del aire y mediante el uso de cualquiera de las diversas ecuaciones que relacionan estas cantidades con el índice de refracción para determinar el índice de refracción del aire ambiente.

Inicialmente no se sabe qué objetivo 110 corresponde a qué distancia medida. Por lo tanto, un algoritmo de identificación del objetivo se debe realizar para determinar esto. Este algoritmo toma como entradas los conjuntos de mediciones de distancia de cada sensor y también opcionalmente información a priori sobre la ubicación relativa de algunos cabezales de medición 120 u objetivos 110. A partir de esto, identifica qué distancia medida desde cada cabezal de medición 120 corresponde a qué objetivo 110. Esto puede hacerse, por ejemplo, al realizar el análisis en la siguiente etapa para todos los arreglos posibles de objetivos y seleccionar el que mejor concuerde con los datos.

Cuando se ha asignado una correspondencia entre las distancias medidas y los objetivos, las posiciones relativas de todos los cabezales de medición y objetivos se determinan mediante el uso de un ajuste de mínimos cuadrados para las distancias medidas entre los cabezales de medición y los objetivos.

Se pueden hacer modificaciones a las modalidades anteriores. Por ejemplo, el sistema de detección de posición 18 descrito con referencia a las Figuras 2 a 5 puede combinarse con el sistema de medición 118 descrito con referencia a las Figuras 6 a 12 para proporcionar un sistema que proporciona simultáneamente una medición de distancia absoluta y basada en ángulo. En una de tales modificaciones, las unidades de detección 20 del sistema 18 pueden dejar incorporadas en ellas las características de un cabezal de medición 120 como se describe con referencia a las

Figuras 6 a 12.

5 Los sistemas descritos anteriormente tienen aplicación en muchas industrias diferentes, especialmente en el ensamblaje y la fabricación de componentes y ensambles de alto valor, el mecanizado guiado por metrología, el ensamblaje asistido por metrología, la fabricación sin guía mecánica, las soluciones de metrología híbrida y la medición de coordenadas generales.

10 Pueden usarse en la medición general de componentes y ensambles, por ejemplo para determinar las dimensiones precisas y/o la posición relativa y las orientaciones de esos componentes y ensambles.

15 Dado que las mediciones realizadas por diferentes unidades de detección 20 y/o cabezales de medición 120 se toman simultáneamente, el sistema es capaz de detectar la posición de cualquier objetivo dado 10, 110 en un momento preciso en el tiempo, en lugar de calcular un promedio durante un período de tiempo. Por lo tanto, el sistema tiene una aplicación particular para rastrear el movimiento de objetos con precisión en 6 grados de libertad. Esto es de ayuda durante el ensamblaje de un aparato complejo en el que los componentes necesitan moverse para conectarse o alinearse con precisión. Las mediciones simultáneas desde diferentes unidades de detección 20 y/o cabezales de medición 120 pueden reducir el error en el cálculo de la posición y por lo tanto, reducen el error en la construcción del ensamble. Por lo tanto, existen aplicaciones en ensamblaje asistido por medición y asistido por metrología y el ensamblaje sin guía mecánica.

20 Los ejemplos del ensamblaje de aparatos complejos en los que las modalidades de la invención se pueden emplear de manera útil incluyen en la industria aeroespacial, para el ensamblaje de componentes de una aeronave tal como el fuselaje. Sin embargo, otros sistemas de ensamblaje asistidos por medición también pueden emplear útilmente el sistema descrito anteriormente.

25 Así como también, además del ensamblaje, el sistema descrito anteriormente se puede emplear de manera útil en el control y la orientación del robot y para monitorear los ensambles existentes, por ejemplo, para garantizar su estabilidad continua. Los ejemplos de ensamblajes que se pueden monitorear beneficiosamente con un sistema de acuerdo con las modalidades de la invención incluyen guías mecánicas de ensamblaje, turbinas eólicas y máquinas de herramienta. Las posibles mediciones precisas y exactas con los sistemas descritos anteriormente permiten detectar la deriva y la desalineación con precisión y en una etapa temprana para mejorar el rendimiento y la seguridad y mantener la calibración de los ensambles.

35 La divergencia de la luz emitida para iluminar, por ejemplo, una región cónica permite que un gran volumen se monitoree continuamente. Esto hace que el sistema de acuerdo con las modalidades de la invención sea adecuado para el seguimiento en tiempo real de objetos en movimiento, como por ejemplo, para la aplicación gravimétrica en naves espaciales para rastrear objetos flotantes.

40 Otras aplicaciones de las modalidades de la invención incluyen, por ejemplo, las industrias de cine y televisión, y tecnologías automotrices, de generación de energía, de defensa y espaciales, por ejemplo, pruebas térmicas de vacío de estructuras.

45 Las modalidades de la invención también se pueden usar para la medición de alineación general y el análisis de deformación, tal como medir la deformación dinámica de una estructura grande tal como una turbina eólica.

REIVINDICACIONES

1. Un sistema de detección de posición para detectar la posición tridimensional de una pluralidad de objetivos (110), que incluye:
 5 una pluralidad de objetivos (110), en donde cada objetivo (110) se configura para actuar como un retroreflector para la luz incidente desde cualquier dirección;
 al menos un emisor de luz para iluminar los objetivos (110), el o cada emisor de luz que es para iluminar una pluralidad de los objetivos (110) e incluye un elemento divergente para la luz divergente;
 10 al menos un detector para detectar y tomar mediciones de la luz retroreflejada desde los objetivos (110); y
 un procesador para procesar mediciones tomadas por cada detector para determinar la posición tridimensional de los objetivos (110) mediante el uso de mediciones de distancia absoluta determinadas a partir de mediciones de al menos un detector mediante el uso de interferometría de exploración de frecuencia; en donde cada objetivo es refractivo y generalmente esférico.
- 15 2. Un sistema de detección de posición de acuerdo con cualquier reivindicación anterior, en donde al menos un detector es una pluralidad de detectores.
3. Un sistema de detección de posición de acuerdo con cualquier reivindicación anterior, en donde el al menos un emisor de luz es una pluralidad de emisores de luz.
- 20 4. Un sistema de detección de posición de acuerdo con cualquier reivindicación anterior, en donde el o cada elemento divergente se configura para divergir la luz emitida para iluminar una región generalmente cónica.
5. Un sistema de detección de posición de acuerdo con cualquier reivindicación anterior, en donde el o cada elemento divergente incluye una lente.
- 25 6. Un sistema de detección de posición de acuerdo con cualquier reivindicación anterior, en donde el o cada emisor de luz incluye un elemento de dirección para dirigir la luz configurada para dirigir la luz emitida en una dirección predeterminada y para dirigir la luz retrorreflejada a un detector;
 30 en donde el elemento de dirección incluye preferentemente una lente e incluye opcionalmente un divisor de haz.
7. Un sistema de detección de posición de acuerdo con cualquier reivindicación anterior, en donde el o cada emisor de luz incluye una fuente de láser y la luz emitida por cada emisor de luz es luz láser.
- 35 8. Un sistema de detección de posición de acuerdo con cualquier reivindicación anterior, en donde la luz que cada emisor de luz se configura para emitir tiene una longitud de onda dentro de un intervalo predeterminado de longitudes de onda.
- 40 9. Un sistema de detección de posición de acuerdo con la reivindicación 8, en donde:
 cada objetivo (110) es esférico y sólido; y
 a una longitud de onda dentro del intervalo predeterminado de longitudes de onda, cada objetivo (110) tiene un índice de refracción en el intervalo de 1,9 a 2,1, preferentemente en el intervalo de 1,95 a 2 y con la máxima preferencia en el intervalo de 1,995 a 2.
- 45 10. Un sistema de detección de posición de acuerdo con cualquier reivindicación anterior, en donde el o cada detector se dispone para detectar la luz retroreflejada directamente en un emisor de luz.
- 50 11. Un sistema de detección de posición de acuerdo con cualquier reivindicación anterior, en donde el o cada detector es operable para tomar mediciones que incluyen los ángulos en los que se recibe la luz retroreflejada, en donde el procesador es preferentemente operable para usar las mediciones de ángulo para correlacionar qué mediciones se relacionan con qué objetivo (110).
- 55 12. Un sistema de detección de posición de acuerdo con cualquier reivindicación anterior, en donde el o cada detector es operable para tomar mediciones de luz retroreflejada para determinar un ángulo desde el detector a uno o más de los objetivos (110) desde los cuales se retroreflejó la luz retroreflejada.
- 60 13. Un método para determinar la posición tridimensional de uno o más objetos, que incluye:
 fijar una pluralidad de objetivos (110) a uno o más objetos, en donde cada objetivo (110) es refractivo y generalmente esférico y se configura para actuar como un retroreflector para la luz incidente desde cualquier dirección;
 65 iluminar los objetivos (110) con luz divergente de al menos un emisor de luz que incluye un elemento divergente para la luz divergente;
 detectar y tomar mediciones de la luz retroreflejada desde los objetivos (110) y determinar las distancias absolutas a los objetivos (110) mediante el uso de interferometría de exploración de frecuencia; y
 procesar las mediciones de la luz retroreflejada para determinar la posición tridimensional de los objetivos (110)

y de allí determinar la posición tridimensional del uno o más objetos.

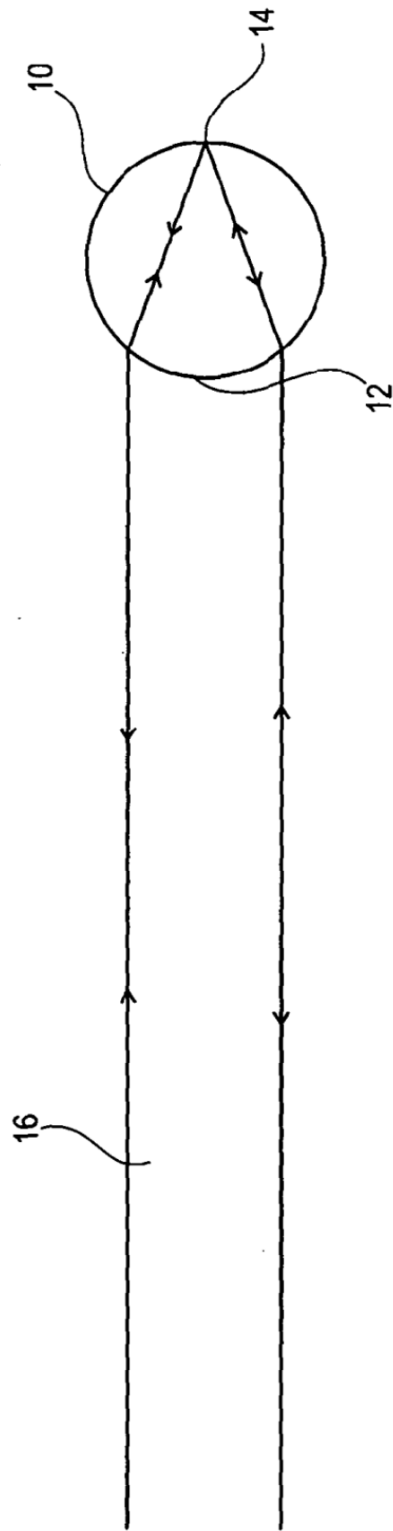


Figure 1

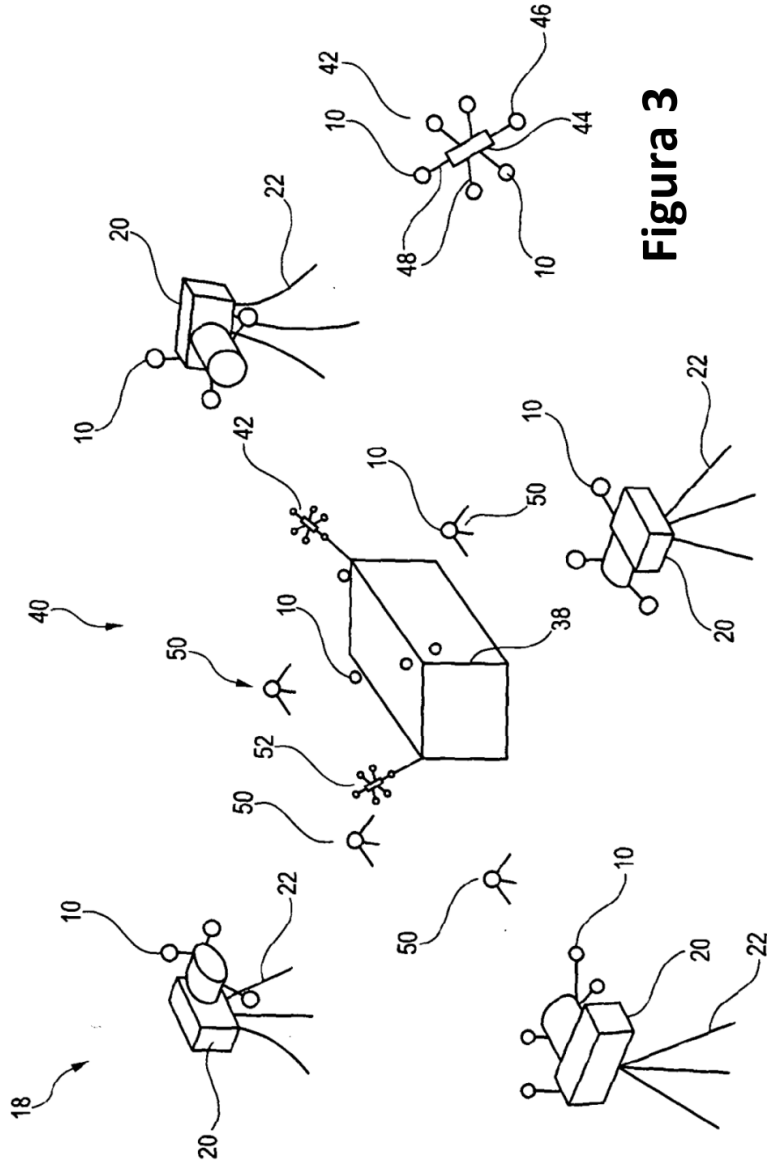


Figure 3

Figure 2

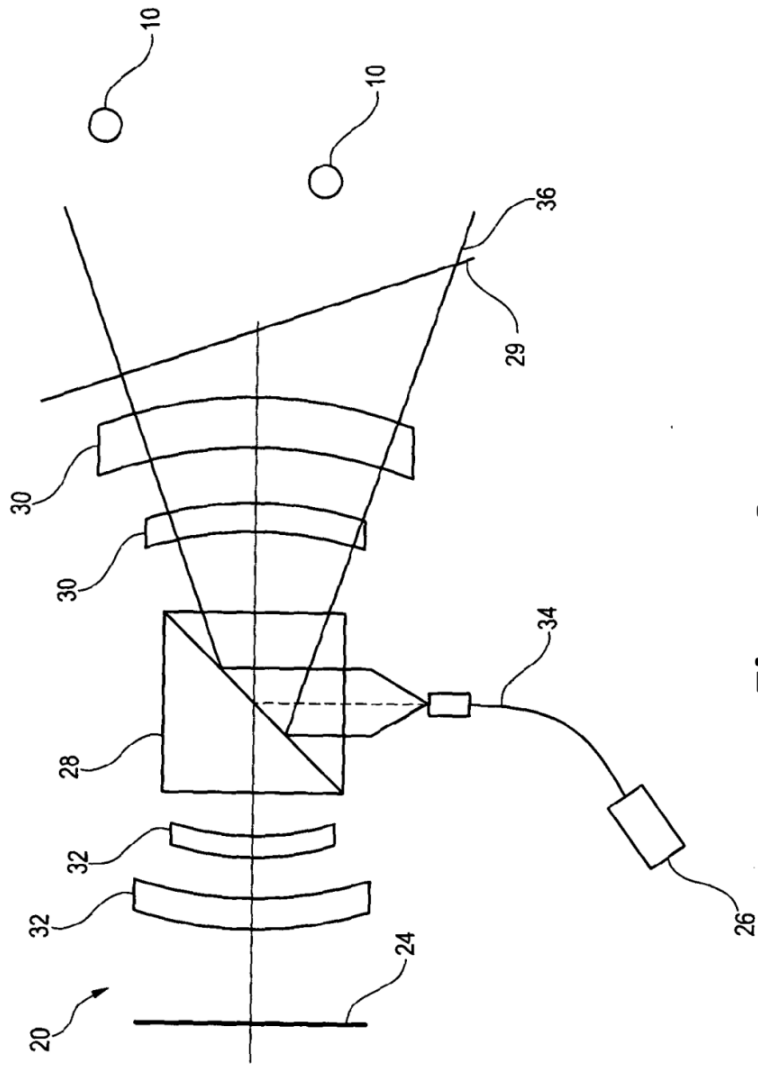


Figure 4

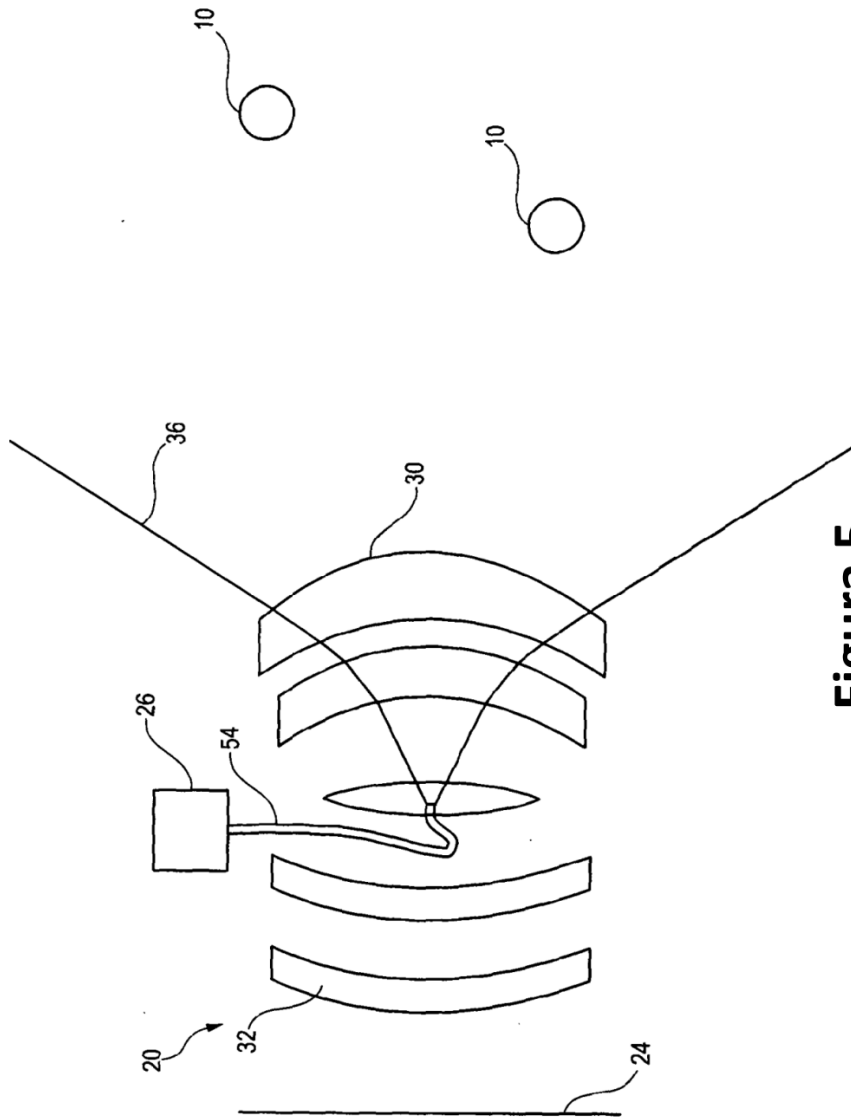


Figure 5

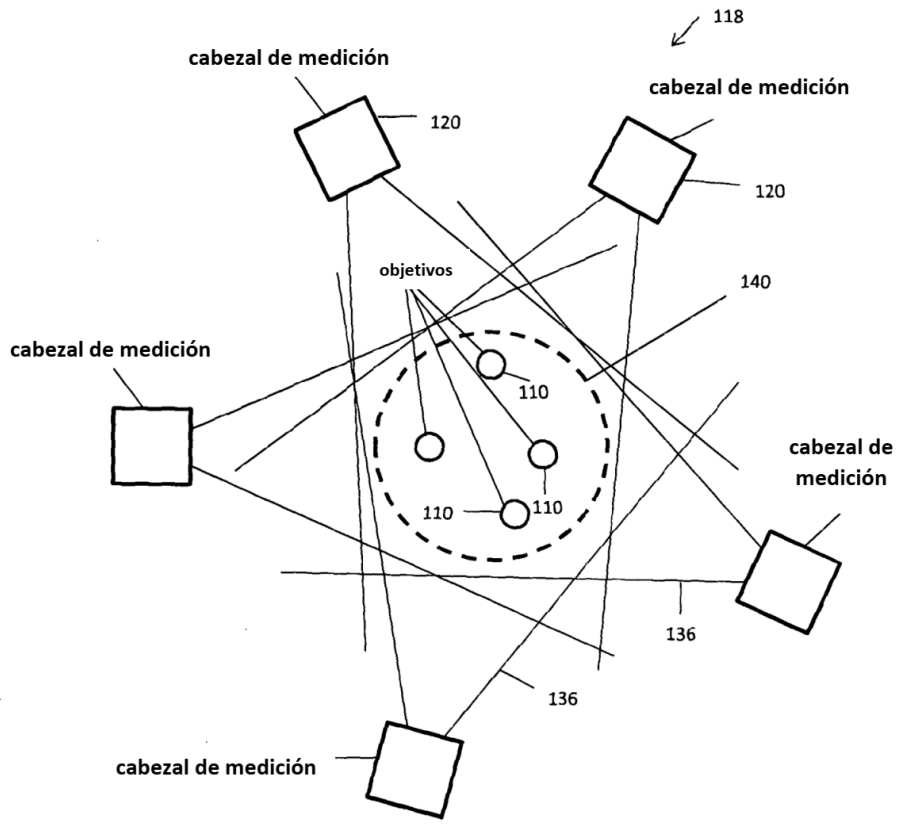


Figura 6

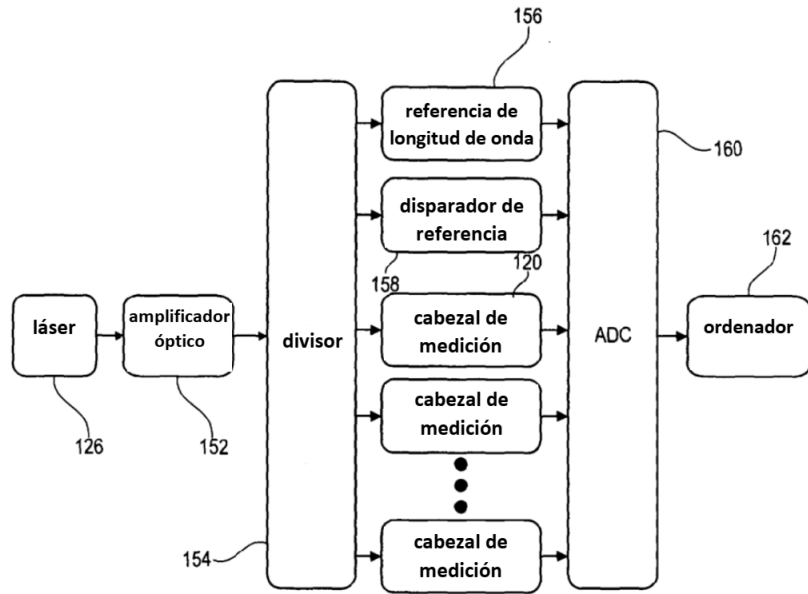


Figura 7

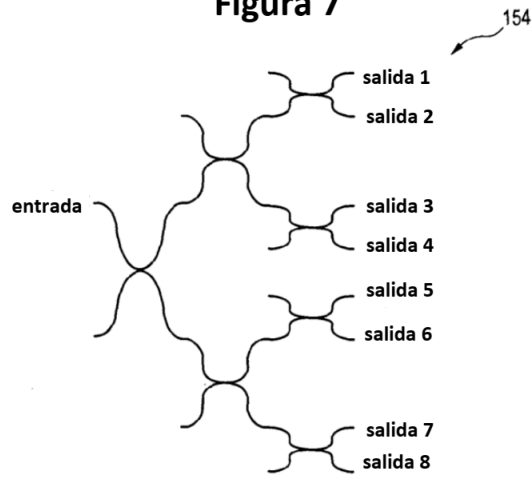


Figura 8

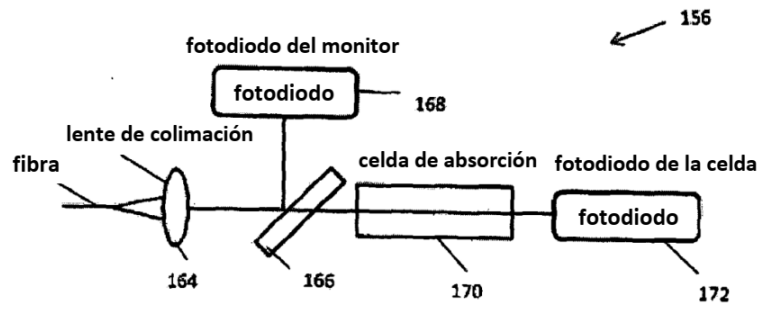


Figura 9

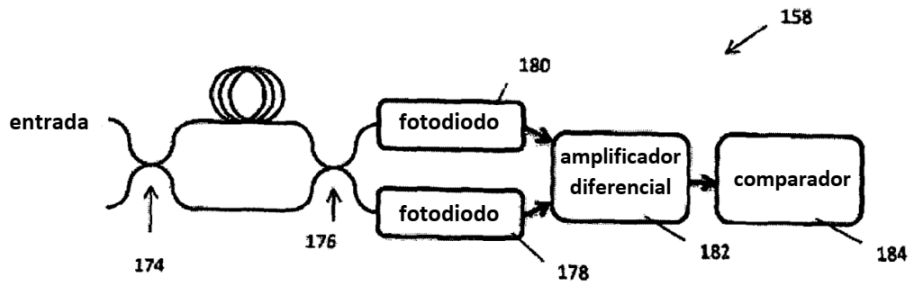


Figura 10

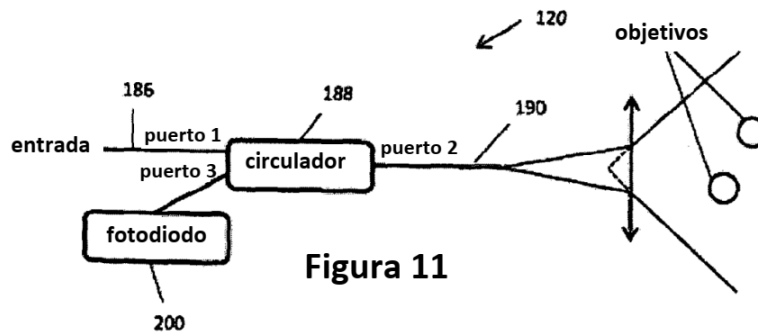


Figura 11

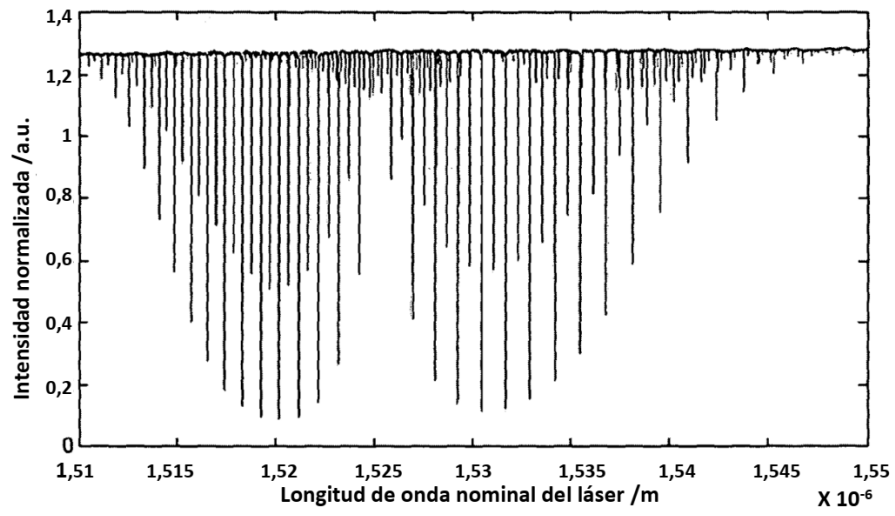


Figura 12 (a)

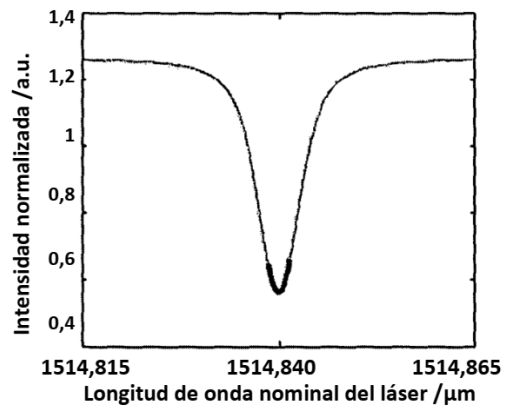


Figura 12 (b)