

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 475 941**

51 Int. Cl.:

**G01B 5/008** (2006.01)

**G01B 21/04** (2006.01)

**B25J 9/16** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **14.09.2007 E 07827693 (8)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **07.05.2014 EP 2188586**

54 Título: **Método de alineación de sistemas de referencia de brazo de una máquina de medición de múltiples brazos**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**11.07.2014**

73 Titular/es:

**HEXAGON METROLOGY S.P.A. (100.0%)  
VIA VITTIME DI PIAZZA DELLA LOGGIA 6  
10024 MONCALIERI, IT**

72 Inventor/es:

**VERDI, MICHELE y  
RICCI, EMANUELE**

74 Agente/Representante:

**CARVAJAL Y URQUIJO, Isabel**

**ES 2 475 941 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

Método de alineación de sistemas de referencia de brazo de una máquina de medición de múltiples brazos

Campo de la técnica

5 La presente invención se refiere a un método de alineación de sistemas de referencia de brazo de una máquina de medición de múltiples brazos.

Antecedentes de la técnica

10 Como es sabido, las máquinas de medición de múltiples brazos comprenden dos o más unidades de medición, cada con su propia herramienta de medición, que funcionan de forma coordinada bajo el control de un sistema de control común. Las unidades de medición se colocan normalmente con sus volúmenes de medición respectivos uno al lado del otro y solapándose en una pequeña intersección, por lo tanto el volumen de medición global de la máquina está definido por los volúmenes de medición combinados de las unidades individuales. Por tanto, las máquinas de medición de múltiples brazos del tipo anterior son adecuadas, en particular, para medir partes de gran tamaño, tal como bastidores de vehículos o componentes de aeronaves.

15 En una realización típica, a la que hace referencia la siguiente descripción por conveniencia y meramente a modo de ejemplo, la máquina comprende dos unidades de medición cartesianas de brazo horizontal ubicadas sobre lados opuestos del volumen de medición, y cada unidad comprende una columna que puede moverse a lo largo de un primer eje longitudinal con respecto al volumen de medición, un carro que está fijado a la columna y que puede moverse a lo largo de un segundo eje vertical, y un brazo que está fijado al carro y que puede moverse con respecto a este a lo largo de un tercer eje horizontal perpendicular al primer eje y en sentido transversal con respecto al volumen de medición.

20 En las máquinas de múltiples brazos que emplean unidades de medición de coordenadas (en particular, las máquinas con dos brazos horizontales), la alineación del sistema cartesiano de referencia de uno de los dos brazos (el brazo secundario o "esclavo") con respecto al otro (el brazo "primario" o "maestro") es vital para el rendimiento de la medición en el modo de dos brazos.

25 El método de alineación usual comprende medir una esfera colocada de forma diversa en la intersección entre los volúmenes de medición de las dos unidades y, por consiguiente, rotar y trasladar el sistema cartesiano de referencia del brazo secundario con respecto al del brazo primario.

30 El rendimiento de las máquinas de medición en el modo de múltiples brazos depende estrechamente de la precisión de compensación y la estabilidad dimensional de las unidades individuales, y de la precisión y la estabilidad de los resultados del procedimiento de alineación anterior.

35 Esto último, en particular, está afectado por la deformación de ambas unidades de medición causada por variaciones en la temperatura ambiente, lo que puede dar como resultado la distorsión de la geometría de ambas unidades, no recuperable por completo por el procedimiento de compensación geométrica, y el alargamiento de las partes componentes de las unidades (transductores, vigas, etc.), lo que a menudo da como resultado unos errores de medición lo bastante graves como para perjudicar el rendimiento.

La distorsión de las unidades individuales también da como resultado unos errores de medición incluso graves en el modo de múltiples brazos.

40 Actualizar con frecuencia la alineación de los sistemas cartesianos de referencia de cada unidad de una máquina de múltiples brazos es por tanto de vital importancia, si bien realmente difícil, si no imposible, de hacer en el caso de los sistemas de medición en línea, lo que descarta una esfera fija montada sobre el suelo por razones obvias de adaptación.

Otro factor que afecta al rendimiento de las máquinas de múltiples brazos es el peso de la pieza a máquina, que puede dar lugar a una deformación significativa del cimiento y / o bancada sobre el que se instalan las unidades, afectando de este modo a las condiciones de alineación determinadas sin carga de las unidades.

45 Una forma de minimizar este efecto es alinear los sistemas con la configuración de la pieza a máquina en su lugar, a pesar de que a menudo el propio tamaño de la pieza a máquina evita esto. Una "maqueta" es otra posible solución, pero a menudo poco práctica y técnicamente impracticable, al comportar movimientos adicionales, posiblemente interfiriendo con piezas fijas de apoyo de pieza a máquina dedicadas, y posiblemente difiriendo, de manera considerable, de la configuración de carga de la pieza a máquina real. El problema con esta solución se ve agravado adicionalmente por la variación de la carga con diferentes piezas a máquina.

50

La única solución a estos problemas radica en el sobredimensionamiento del cimientado y / o bancada, aumentando de este modo el coste de la máquina.

El documento EP 1 607 194 divulga un sistema robótico que comprende una pluralidad de robots provistos con unos medios para calibrar su posición relativa.

- 5 En particular, un primer robot tiene una cámara montada sobre el mismo y un segundo robot tiene una porción característica que se hace que se mueva de tal modo que la imagen de la porción característica detectada por la cámara adopta un tamaño o posición objetivo. El mismo proceso se repite varias veces a la vez que se cambia la posición del estado inicial de los robots con el fin de calibrar la posición relativa entre los robots.

Divulgación de la invención

- 10 Un objeto de la presente invención es la provisión de un método de alineación de sistemas de referencia de brazo de una máquina de medición de múltiples brazos, que se diseña para eliminar los inconvenientes que se han mencionado en lo que antecede, asociados habitualmente con los métodos conocidos.

De acuerdo con la presente invención, se proporciona un método de alineación de sistemas de referencia de brazo de una máquina de medición de múltiples brazos, tal como se reivindica en la reivindicación 1.

- 15 La invención (que también puede aplicarse a las máquinas no cartesianas y a sistemas que no sean de múltiples brazos de dos brazos) prevé actualizar de manera periódica la matriz de alineación por medio de uno o más miembros de referencia ubicados sobre la estructura de por lo menos una de las unidades de medición y mensurables por la otra unidad.

Los miembros de referencia pueden ser:

- 20 a) una o más esferas calibradas ubicadas sobre el extremo de uno de los brazos y a las que puede acceder con facilidad el palpador sobre el otro brazo o, en un ejemplo no cubierto por la invención, ubicadas sobre una herramienta dedicada intercambiable con las herramientas de medición y que puede alojarse en el almacén de cambio de herramientas;
- 25 b) indicadores dedicados, si la máquina está equipada solo con palpadores sin contacto, que no pueden medir con facilidad las esferas anteriores.

Por medio de programas de medición apropiados que se activan de manera automática o por el operario junto con cambios en el tipo de pieza a máquina o en las condiciones ambientales, tal como variaciones en la temperatura, la invención prevé actualizar la matriz de alineación, mejorando de este modo el rendimiento de la medición y reduciendo en gran medida el coste en términos del dimensionamiento del cimientado y / o bancada.

- 30 Además, el método puede aplicarse a la porción ocupada por la pieza a máquina real del volumen local común a ambos brazos, mejorando potencialmente, de este modo, el rendimiento de la medición y también potenciando la versatilidad del sistema, que puede usarse de este modo para medir piezas a máquina tanto de gran como de pequeño tamaño (bastidores de vehículos y paneles).

Breve descripción de los dibujos

- 35 Una realización preferida y no limitante de la presente invención se describirá a modo de ejemplo con referencia a los dibujos adjuntos, en los que:

- la figura 1 muestra una vista en planta esquemática de una máquina de medición de dos brazos de acuerdo con la presente invención;
- 40 la figura 2 muestra una vista frontal esquemática de la máquina de la figura 1;
- la figura 3 muestra un detalle esquemático de una unidad de medición de la máquina de la figura 1;
- la figura 4 muestra un diagrama de flujo de un procedimiento para alinear los sistemas de referencia de la máquina de la figura 1 en la fase de instalación de la máquina;
- la figura 5 muestra la ubicación de un miembro de referencia durante el procedimiento que se muestra en el diagrama de flujo de la figura 4;
- 45 la figura 6 muestra un diagrama de flujo de una primera operación en la actualización de la alineación de los sistemas de referencia de las unidades de medición de máquina de la figura 1;
- la figura 7 muestra un diagrama de flujo de una segunda operación en la actualización de la alineación de los sistemas de referencia de las unidades de medición de máquina de la figura 1.

Mejor modo para llevar a cabo la invención

Con referencia a las figuras 1 y 2, el número 1 indica como un todo una máquina de medición cartesiana de dos brazos.

5 La máquina 1 comprende sustancialmente una bancada 2 que define una superficie de referencia horizontal 3; y dos unidades de medición de brazo horizontal 4, 5 para mover unas herramientas de medición 6, 7 respectivas con respecto una superficie de referencia 3.

10 La unidad de medición 4 comprende una columna 8 que puede moverse a lo largo de una guía 9 que se extiende a lo largo de un lado longitudinal de la bancada 2 y paralela a un eje X de un conjunto de tres ejes de coordenadas X, Y, Z que definen un sistema de referencia solidario con la bancada 2. La guía 9 puede ser de cualquier tipo convencional, y solo se muestra de forma esquemática en la figura 1.

La unidad de medición 4 también comprende un carro 10 que está fijado a y que puede moverse a lo largo de la columna 8 a lo largo del eje Z; y un brazo horizontal 11 que está fijado al carro 10 y que puede moverse a lo largo del eje horizontal Y.

15 La herramienta de medición 6 se fija a un reborde de extremo 12 del brazo 11, preferiblemente por medio de un cabezal articulado 13 conocido, con dos grados de libertad rotacional, para ajustar la posición de la herramienta de medición 6.

20 De forma similar, la unidad de medición 5 comprende una columna 15 que puede moverse a lo largo de una guía 16 que se extiende a lo largo del lado longitudinal opuesto de la bancada 2 hasta la guía 9 y en paralelo al eje X; un carro 17 que está fijado a y que puede moverse a lo largo de la columna 15 en una dirección paralela al eje Z; y un brazo horizontal 18 que está fijado al carro 17 y que puede moverse en una dirección paralela al eje Y.

La herramienta de medición 7 se fija a un reborde de extremo 19 del brazo 18, preferiblemente por medio de un cabezal articulado conocido 20 con dos grados de libertad rotacional.

25 Las partes en movimiento de las unidades de medición 4, 5 y los cabezales articulados 13, 20 se controlan mediante unos motores eléctricos (que no se muestran), controlados a su vez por una unidad de control y de procesamiento 24 que está conectada con unos transductores de posición lineal conocidos (que no se muestran) que están asociados con los ejes de la máquina, y con unos transductores angulares conocidos (que no se muestran) que están asociados con los cabezales articulados 13, 20.

Tal como se muestra con más claridad en la figura 3, el reborde 12 del brazo 11 de la unidad 4 está equipado, de forma conveniente, con una esfera de referencia 25 para el fin que se explica en lo sucesivo.

30 Cada unidad de medición 4, 5 tiene su propio volumen de medición definido por la totalidad de las posiciones que puede alcanzar la herramienta de medición junto con variaciones en la posición de los ejes de la máquina. Los dos volúmenes de medición, que se indican M1 y M2, tienen necesariamente una intersección I y definen de forma conjunta el volumen de medición M de la máquina 1 al funcionar en el modo de "dos brazos".

35 Para funcionar en el modo de dos brazos, los sistemas de referencia de ambos brazos han de estar alineados, es decir, las mediciones de ambas unidades 4, 5 han de hacer referencia a un sistema de referencia común.

Suponiendo que el sistema de referencia X, Y, Z que se define en lo que antecede es el de la unidad 4 (la unidad primaria o "maestra"), puede introducirse un segundo sistema de referencia x, y, z que está asociado con la unidad 5 (la unidad secundaria o "esclava").

40 La alineación de los dos sistemas de referencia comprende rotar y trasladar el sistema de referencia de la unidad esclava 5 de tal modo que sus ejes son paralelos a y tienen el mismo origen que los del sistema de referencia de la unidad maestra 4.

Matemáticamente, esto equivale a la aplicación de una transformación de coordenadas  $\tau$ :

$$\mathbf{P} = \tau \mathbf{p} = \mathbf{T} + \mathbf{R} \mathbf{p} \quad (1)$$

en la que:

45  $\mathbf{P}$  es el vector de tres componentes (X, Y, Z) de las coordenadas de sistema maestro;  
 $\mathbf{p}$  es el vector de tres componentes (x, y, z) de las coordenadas de sistema esclavo;

**T** es un vector de translación de tres componentes (tx, ty, tz) que determina la posición del origen del sistema de coordenadas esclavo en el sistema de coordenadas maestro; y  
**R** es una matriz de rotación (3 por 3).

5 Cuando se configura la máquina 1, la compensación geométrica de rutina de las unidades 4 y 5 y la calificación de las herramientas de medición 6 y 7 se ve seguida por la alineación de los sistemas de referencia de las unidades 4 y 5, que comprende las etapas de:

1) Adquirir los errores angulares entre los dos sistemas de referencia, y determinar por lo tanto los coeficientes de la matriz **R**.

Un método simple, y fácil de automatizar, de determinar solo componentes de rotación es tal como sigue (figura 4).

10 Se hace que la esfera móvil 25, solidaria con el brazo 11, se mueva de forma sucesiva por la unidad 4 a lo largo de una cuadrícula definida por n posiciones en un plano paralelo a los ejes X y Z (es decir, un plano de Y constante) en la intersección I (figura 4), por ejemplo se mueve hasta nueve posiciones dispuestas en tres filas horizontales (y definiendo de este modo unas líneas de Z e Y constante r1, r2, r3 respectivas - figura 5). Las coordenadas Pi del centro de la esfera 25 en el sistema esclavo se adquieren en cada una de las posiciones anteriores, y la operación se realiza para la totalidad de las posiciones en un ciclo de medición automático definido por los bloques 31 a 35 en el diagrama de la figura 4.

Por medio de un método de optimización, por ejemplo de mínimos cuadrados, es posible por lo tanto calcular el plano que se aproxima mejor a los 9 puntos en el sistema de referencia esclavo x, y, z (bloque 36), y calcular las direcciones de los ejes X, Y, Z en el sistema esclavo (bloque 37).

20 Más específicamente, el vector unitario de la dirección Y puede calcularse como perpendicular al plano calculado. Las tres filas de puntos de Z constante prevén determinar las tres líneas que se aproximan mejor a las mismas en el sistema x, y, z. El vector unitario de la dirección X puede calcularse a partir de los cosenos directores de la "media" de dichas líneas, haciendo referencia la expresión "línea media" a la línea definida por la media de los ángulos formados por las tres líneas con cada uno de los ejes de sistema x, y, z.

25 Por último, el vector unitario de la dirección Z puede determinarse como el producto vectorial de los vectores unitarios de las direcciones X e Y.

Al final del procedimiento, se conocen por tanto los cosenos directores de los ejes X, Y, Z en el sistema x, y, z y, por lo tanto, las componentes de la matriz **R** (bloque 38).

30 2) Determinar el vector **T** mediante la medición, por ambas unidades 4 y 5, de una esfera fija ubicada en un punto en el volumen de medición.

Dadas las coordenadas en ambos sistemas de coordenadas de un punto específico en el volumen de medición, y dada la matriz **R**, los elementos del vector **T** pueden determinarse a partir de (1), mediante la medición de la esfera fija por medio de la unidad 4 (bloque 39) y la unidad 5 (bloque 40), y el cálculo del vector **T** (bloque 41) a partir de las coordenadas del centro de la esfera adquiridas en ambos sistemas de referencia.

35 Al final de este procedimiento, que se realiza como parte de la configuración post-instalación de la máquina, la alineación de los sistemas de referencia puede considerarse completada.

En realidad, no obstante, las componentes de la matriz **R** y el vector **T** pueden variar con el tiempo con respecto a las determinadas originalmente en la fase de configuración de la máquina.

40 Las componentes de rotación pueden verse afectadas por variaciones en la geometría y la posición mutua de los brazos de la máquina - normalmente debido a la temperatura, o la deformación causada por la carga de pieza a máquina.

45 Al frente de los factores térmicos que afectan al rendimiento de las máquinas de múltiples brazos se encuentra lo que se conoce como deriva térmica, que da lugar a deformación de los transductores y las partes estructurales de la máquina, dando como resultado a su vez un desplazamiento en los puntos en el interior del volumen de medición. La cantidad de desplazamiento depende no solo de la cantidad de esfuerzo térmico que se aplique, sino también de la ubicación del punto considerado en el interior del volumen de medición. Tal deformación produce variaciones tanto en la matriz **R** como en el vector **T**.

En lo que respecta a la carga de pieza a máquina, esta puede producir unas variaciones significativas en cabeceo y alabeo, que posiblemente difieren de un brazo al otro, dependiendo de la posición más o menos simétrica de la pieza a máquina con respecto a los brazos.

5 Para actualizar de manera periódica la matriz **R** y el vector **T**, se requiere una etapa de calibración adicional, antes de la entrega de la máquina al usuario, y que comprende determinar la posición de la esfera 25 con respecto al brazo 11 (por ejemplo con respecto al centro del reborde). Esto se hace mediante la colocación de la esfera 25 en un punto en la intersección I de los volúmenes de medición M1 y M2, en la que esta puede detectarse por la unidad 5; y se memorizan las coordenadas alcanzadas por la unidad 4.

10 La esfera 25 se mide a continuación mediante la herramienta de medición 7 de la unidad 5, y se calculan y se memorizan las coordenadas del centro de la esfera móvil 25 con respecto al brazo 11 de la unidad 4, dando de este modo la posición del centro de la esfera 25 en función de las coordenadas de máquina de la unidad 4.

15 La etapa de calibración anterior concluye la configuración de la máquina. Los procedimientos de actualización de alineación de sistema de referencia que se describen en lo sucesivo pueden realizarse por el usuario, no requieren personal especializado como en el caso de los procedimientos anteriores y, por encima de todo, no comportan un tiempo de parada de alto coste y prolongado de la máquina.

La alineación puede actualizarse o bien completamente (el vector **T** y la matriz **R**) o bien de manera parcial, es decir, solo componentes de translación.

20 Una actualización completa se recomienda en el caso de un cambio significativo en el peso de la pieza a máquina, o en el primer turno de la semana, o en el caso de unas variaciones significativas en la temperatura ambiente, y es un procedimiento de una vez por semana probable.

Una actualización parcial se recomienda en el caso de colisión violenta entre la herramienta de medición y la pieza a máquina, siempre que la aguja de lectura de la herramienta de medición se cambie por una del mismo tipo, o en el caso de variaciones suaves en la temperatura ambiente, y es un procedimiento de una vez por día probable.

A) Actualizar la alineación angular.

25 Este procedimiento se describe con referencia al diagrama de flujo de la figura 6.

Un ciclo de medición automático (bloques 43-47) se activa para medir la esfera móvil 25 sobre la unidad 4 en un número k de posiciones discretas en la intersección I por medio de la unidad 5. El número de posiciones puede definirse por el usuario, dependiendo del tipo de pieza a máquina.

30 El bloque 49 calcula el error de alineación angular  $E_r$  en una o más direcciones previamente determinadas. Si se detectan unos errores de alineación angular por debajo de un primer umbral, las unidades 4 y 5 se siguen considerando apropiadamente alineadas, y el procedimiento de actualización se pospone (bloque 50).

Si se detecta un error de alineación angular por encima de un segundo umbral sustancialmente más alto (S2) (bloque 51), se supone que la herramienta de medición 7 de la unidad 5 ha dejado de estar calificada, por lo tanto el procedimiento de actualización se interrumpe para volver a calificar la herramienta de medición 7 (bloque 53).

35 Por último, si se detecta un error de alineación angular entre el primer y el segundo umbral, la alineación se actualiza (bloque 52) mediante un procedimiento similar al procedimiento de alineación inicial (se hace que la esfera móvil 25 se mueva mediante la unidad 4 a lo largo de una cuadrícula de puntos en un plano de Y constante y se mide por la unidad 5; el vector unitario que define la dirección Y se calcula como perpendicular al plano que se aproxima a los puntos adquiridos; el vector unitario de la dirección X se calcula a partir de las líneas interpolando sucesiones de puntos de Z constante; y el vector unitario de la dirección Z se calcula como el producto vectorial de los vectores unitarios que definen las direcciones X e Y).

40

Una matriz de rotación residual **R'** se calcula de este modo, y la cual se usa para corregir la matriz de rotación **R** memorizada (la nueva matriz de rotación es igual a la matriz de rotación residual multiplicada por la matriz de rotación memorizada).

45 B) Actualizar componentes de translación.

Este procedimiento se describe con referencia al diagrama de flujo de la figura 7.

5 La esfera móvil (25) se coloca mediante la unidad 4 en una posición en la intersección I (bloque 56) y se mide por la unidad 5 (bloque 58); se calculan las coordenadas del centro de la esfera (bloque 60); y el error de translación **Et** se calcula (bloque 61) como la diferencia entre las coordenadas del centro de la esfera calculadas en función de las mediciones de la unidad 5, y las coordenadas del centro de la esfera calculadas en función de las coordenadas de posición de la unidad 4.

Si un error de translación se detecta por debajo (en valor absoluto o con referencia a cada componente individual) de un primer umbral S3 (bloque 62), las unidades 4 y 5 se siguen considerando apropiadamente alineadas, y el procedimiento de actualización se pospone.

10 Si un error de translación se detecta por encima de un segundo umbral sustancialmente más alto (S4) (bloque 63), se supone que la herramienta de medición 7 de la unidad 5 ha dejado de estar calificada, por lo tanto el procedimiento de actualización se interrumpe para volver a calificar la herramienta de medición 7 (bloque 65).

15 Por último, si se detecta un error de translación entre el primer y el segundo umbral, un vector **T'** se calcula como la diferencia entre las coordenadas del centro de la esfera medidas por la unidad 5 y las que resultan de las coordenadas de la unidad 4, y se usa para corregir el vector **T** memorizado (bloque 64). Es decir, el nuevo (corregido) vector **T** es igual a la suma del vector **T'** y el vector de translación memorizado.

Se realizan ambos procedimientos A) y B) para una actualización completa, y solo el procedimiento B) para una actualización parcial.

Las ventajas del método de acuerdo con la presente invención serán evidentes a partir de la descripción anterior.

20 En particular, la alineación de los sistemas de referencia de las unidades 4 y 5 puede actualizarse con frecuencia por el usuario, siempre que se requiera por sucesos que afecten a las condiciones operativas (colisión, variaciones en la temperatura ambiente, cambio de una pieza a máquina a otra, etc.).

En sí, el procedimiento de actualización es rápido, y no comporta artefactos montados sobre el suelo.

El método asegura un alto grado de precisión de medición de la máquina junto con variaciones en las condiciones ambiente, sin necesidad alguna de trabajo especializado, y sin tiempo de parada prolongado alguno de la máquina.

25 Por último, debido a que la actualización de la alineación de los sistemas de referencia prevé compensar los errores causados por la deformación de la bancada o cimiento cuando se carga la pieza a máquina, la bancada y / o cimiento puede fabricarse más ligero sin cambio alguno en la precisión. En particular, la máquina puede usarse por encima del suelo, caso en el cual el cimiento no puede, obviamente, ser demasiado rígido por razones de resistencia estructural del edificio.

30 Evidentemente, pueden hacerse cambios en la presente invención sin, no obstante, alejarse del alcance de las reivindicaciones adjuntas.

En particular, la máquina puede comprender más de dos unidades, y las unidades pueden ser no cartesianas.

35 El procedimiento de actualización puede realizarse usando diferentes herramientas de medición, tal como sensores sin contacto. Por último, el procedimiento de alineación inicial puede realizarse de cualquier otra forma conocida, por ejemplo mediante el ajuste de la esfera fija de forma sucesiva en diversas posiciones en la intersección I de los volúmenes de medición M1 y M2 de las unidades 4 y 5, y la determinación de las coordenadas del centro de la esfera en las diversas posiciones por medio de ambas unidades 4 y 5. Matemáticamente, si **P<sub>i</sub>** y **p<sub>i</sub>** son las posiciones medidas en los sistemas maestro y esclavo, respectivamente, la matriz de rotación **R** se determina mediante la minimización de la función de error:

40 
$$F = \sum_i (\mathbf{P}_i - \tau(\mathbf{R}, \mathbf{T}) \mathbf{p}_i) \quad (2)$$

lo que puede hacerse, por ejemplo, usando el método de mínimos cuadrados. Obviamente, cuanto mejor sea la aproximación, mayor será el número de posiciones de esfera *i*.

Como alternativa, puede usarse un artefacto complejo, que comprende, por ejemplo, un número de esferas en unas posiciones previamente determinadas relativas.

45

## REIVINDICACIONES

- 5 1. Un método de alineación de sistemas de referencia de brazo de una máquina de medición de múltiples brazos (1) que comprende por lo menos dos unidades de medición (4, 5), teniendo cada una un brazo móvil (11, 18), y una herramienta de medición (6, 7) que puede moverse mediante dicho brazo (11, 18) en un volumen de medición (M1, M2) respectivo; teniendo los volúmenes de medición (M1, M2) de dichas unidades de medición (4, 5) una intersección (I), y definiendo como un todo un volumen de medición de máquina (M) igual a los volúmenes de medición combinados (M1, M2) de las unidades de medición individuales; y comprendiendo el método las etapas de:
- 10 fijar por lo menos un miembro de referencia (25) al brazo (11) de por lo menos una primera de dichas unidades de medición (4);  
 10 calificar cada una de dichas herramientas de medición (6, 7) de las unidades de medición (4, 5) respectivas;  
 alinear los sistemas de referencia (X, Y, Z; x, y, z) de dichas unidades de medición cuando se configura la máquina (1); y  
 15 actualizar de manera periódica la alineación de dichos sistemas de referencia mediante la detección de dicho miembro de referencia (25) por medio de por lo menos otra de dichas unidades de medición (5); haciendo que el miembro de referencia (25) se mueva hasta un número de posiciones en dicha intersección (I) mediante la primera unidad de medición (4).
2. Un método tal como se reivindica en la reivindicación 1, **caracterizado por que** dicho miembro de referencia (25) está afianzado rígidamente a dicho brazo (11) de dicha primera unidad de medición (4).
- 20 3. Un método tal como se reivindica en la reivindicación 2, **caracterizado por que** dicho miembro de referencia (25) es una esfera.
4. Un método tal como se reivindica en una de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado por** comprender la etapa de determinar la posición de dicho miembro de referencia (25) con respecto a dicho brazo (11) de dicha primera de dichas unidades de medición (4) por medio de dicha otra de dichas unidades de medición (5).
- 25 5. Un método tal como se reivindica en una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado por que** dicha etapa de actualizar la alineación de los sistemas de referencia comprende actualizar una matriz de rotación (R) y un vector de translación (T).
6. Un método tal como se reivindica en una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, **caracterizado por que** dicha etapa de actualizar la alineación de los sistemas de referencia comprende solo actualizar un vector de translación (T).
- 30 7. Un método tal como se reivindica en una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado por que** dicha etapa de actualizar comprende realizar un ciclo de medición automático, en el que dicho miembro de referencia (25) se coloca en dicha intersección (I) mediante dicha primera de dichas unidades de medición (4) y se mide mediante dicha otra de dichas unidades de medición (5).
- 35 8. Un método tal como se reivindica en una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado por que** dicha etapa de actualizar se inicia tras la detección de un error residual que varía entre un valor umbral mínimo (S1; S3) y un valor umbral máximo (S2; S4).



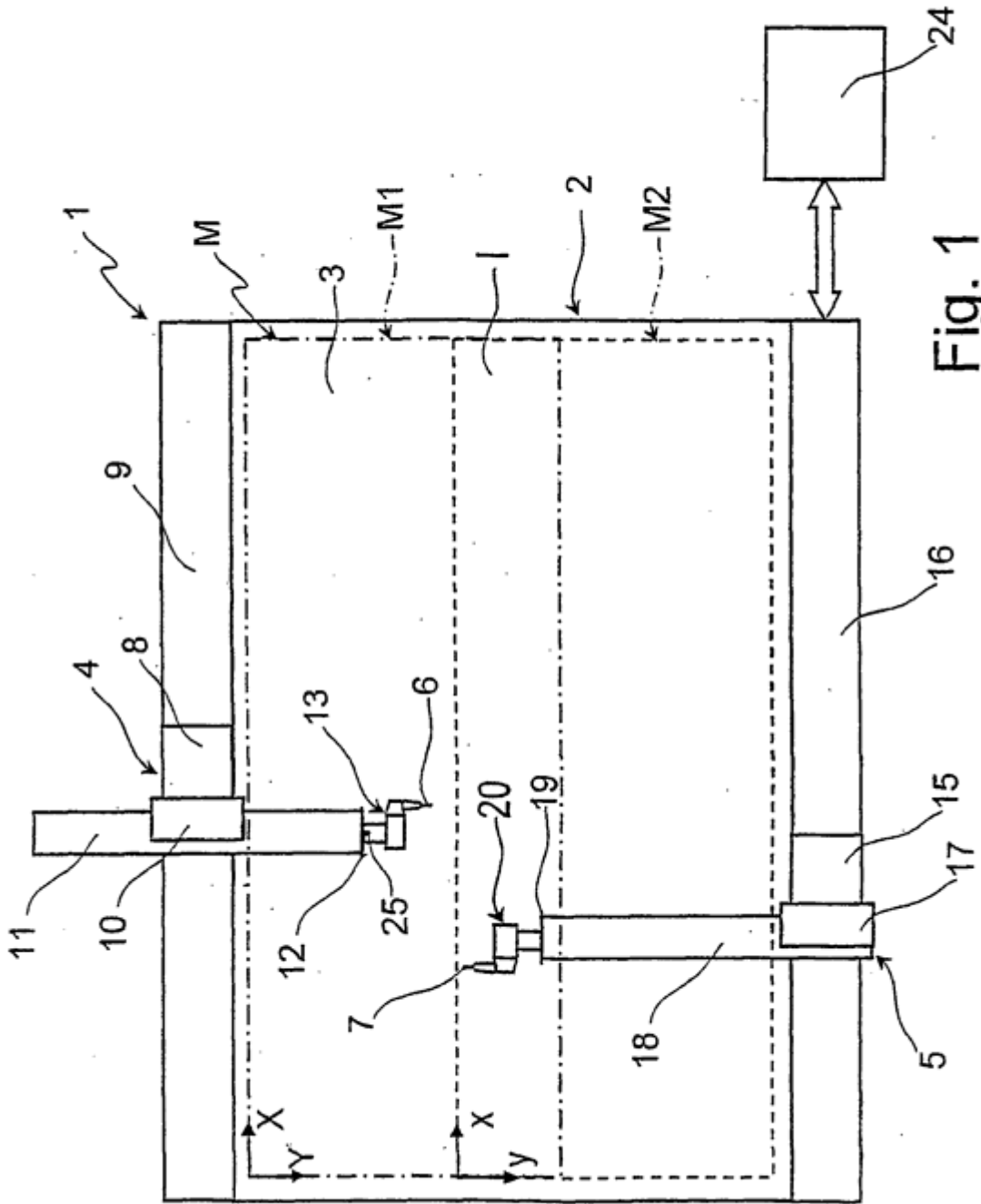


Fig. 1

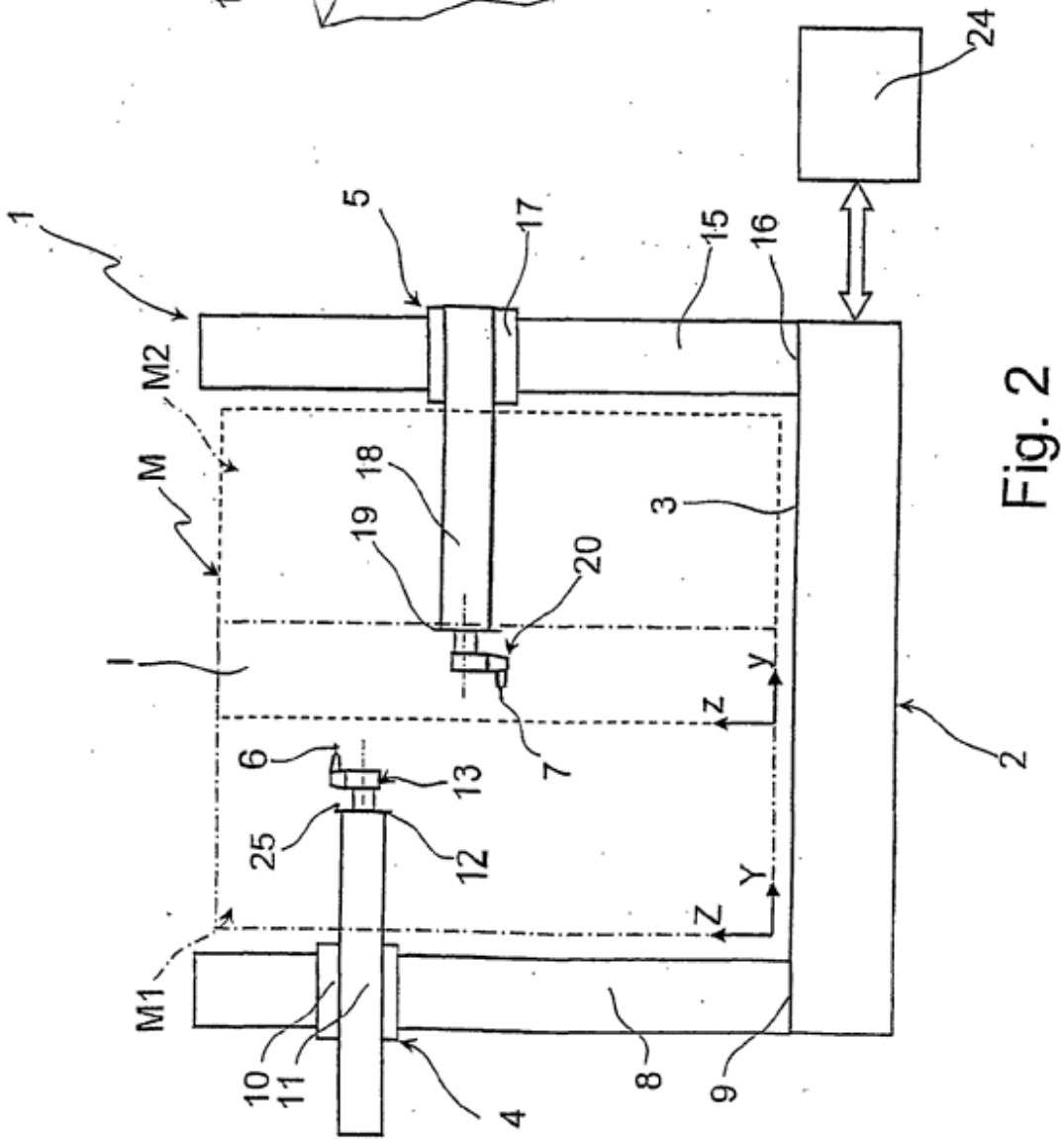


Fig. 2

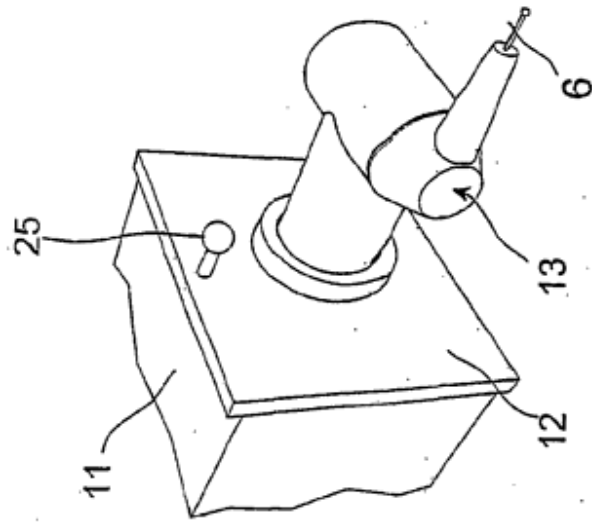


Fig. 3

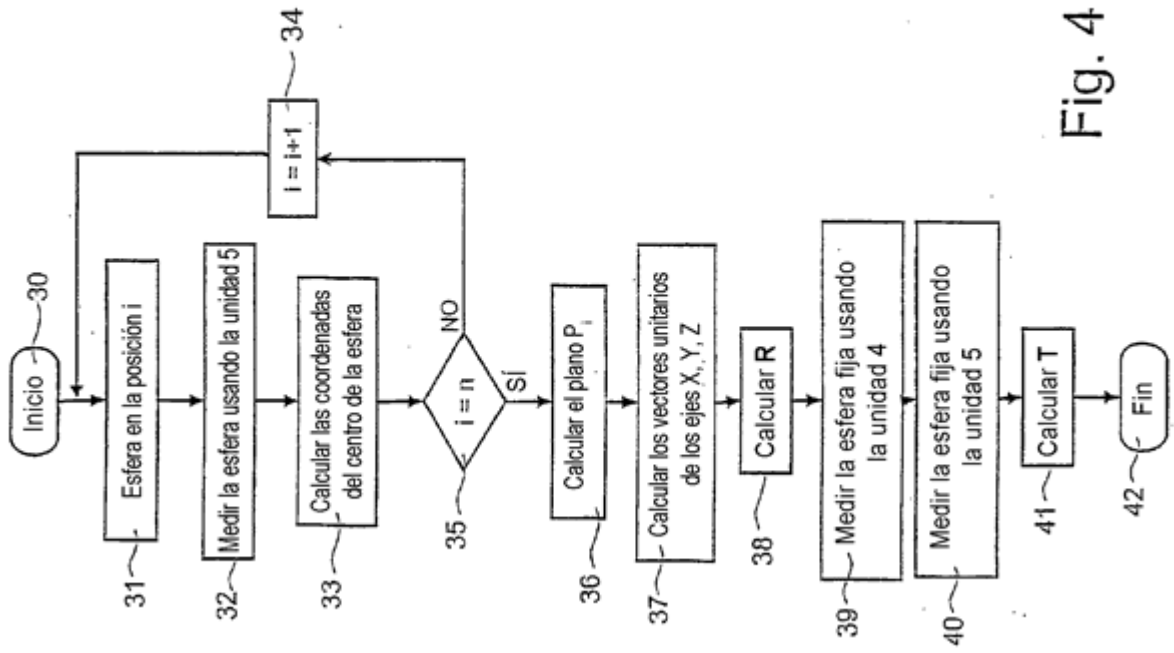


Fig. 4

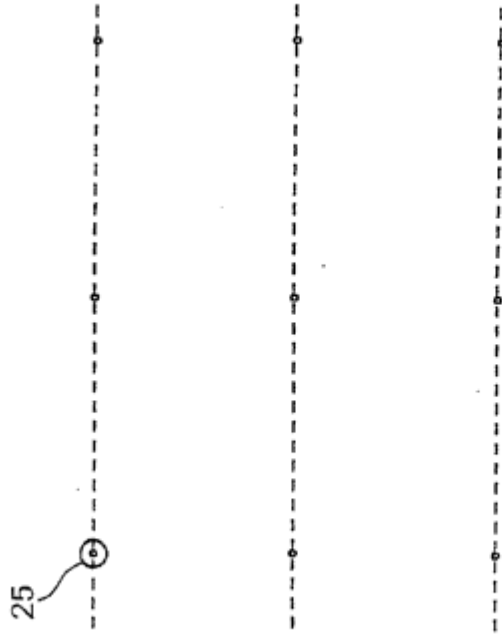


Fig. 5

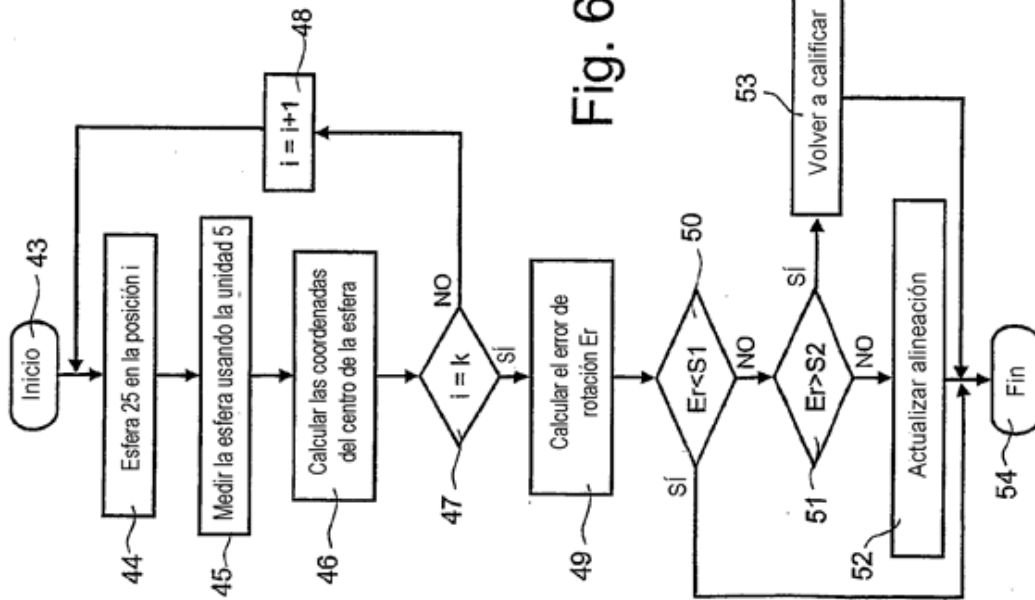


Fig. 6

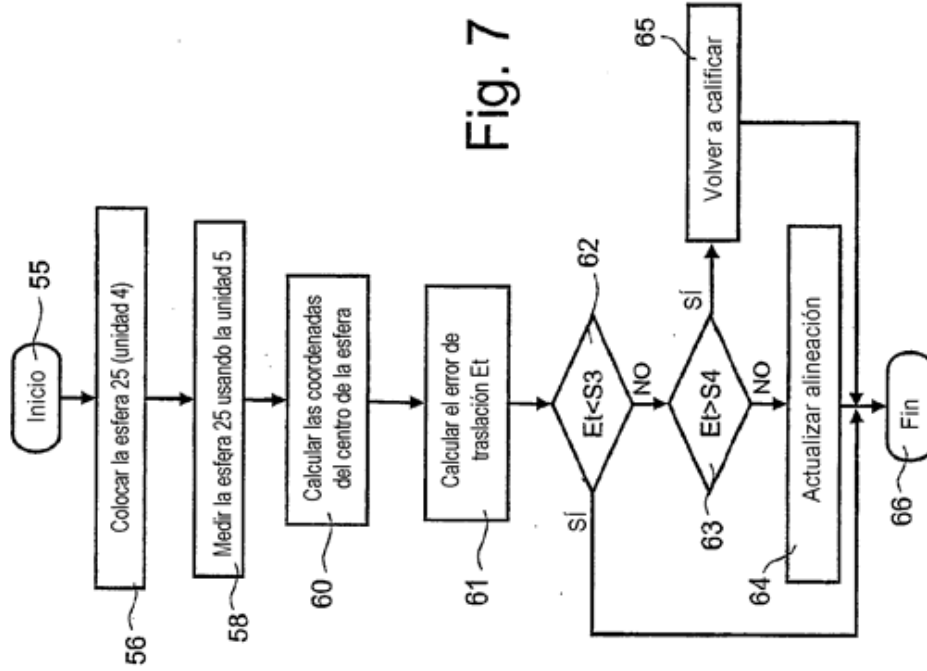


Fig. 7