



19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

11 Número de publicación: **2 359 801**

51 Int. Cl.:  
**G01B 21/04** (2006.01)  
**G01B 5/008** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Número de solicitud europea: **07859192 .2**  
96 Fecha de presentación : **27.12.2007**  
97 Número de publicación de la solicitud: **2167912**  
97 Fecha de publicación de la solicitud: **31.03.2010**

54 Título: **Compensación de errores de medición debidos a deformaciones dinámicas en una máquina de medición de coordenadas.**

30 Prioridad: **28.06.2007 PCT/IT2007/000465**

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:  
**27.05.2011**

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:  
**27.05.2011**

73 Titular/es: **HEXAGON METROLOGY S.p.A.**  
**Via Vittime di Piazza della Loggia 6**  
**10024 Moncalieri, IT**

72 Inventor/es: **Verdi, Michele;**  
**Guasco, Giampiero y**  
**Russo, Domenico**

74 Agente: **Carpintero López, Mario**

ES 2 359 801 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

Compensación de errores de medición debidos a deformaciones dinámicas en una máquina de medición de las coordenadas

### **Campo técnico**

- 5 La presente invención se refiere a una máquina de medición de las coordenadas y a un procedimiento para la compensación de los errores de medición debido a las deformaciones dinámicas.

### **Estado de la técnica anterior**

- 10 Como es sabido, las máquinas de medición de las coordenadas en general comprenden tres carros móviles a lo largo de los ejes de las coordenadas de un sistema de referencia cartesiano y diseñadas para desplazar un sensor de la medición dentro de un volumen de la medición. La máquina está diseñada para generar de salida las coordenadas de una pieza detectada por un sensor de la medición, calculadas como una función de la posición de los carros a lo largo de los ejes respectivos.

- 15 Más en concreto, la máquina de medición de las coordenadas comprende: una estructura de base provista de unas guías a lo largo de un primer eje, por ejemplo, una plataforma de granito o de otro material o si no, de una estructura de pilares; un primer carro, el cual se mueve sobre la estructura de base a lo largo del primer eje; un segundo carro, que es soportado por el primer carro y se mueve a lo largo de un segundo eje ortogonal con respecto al primer eje; y un tercer carro, el cual es soportado por el segundo carro y se mueve con respecto a aquél a lo largo de un tercer eje ortogonal con respecto a los dos primeros ejes. El sensor de medición es soportado por el tercer carro.

- 20 El primer eje es genéricamente horizontal; de acuerdo con el tipo de máquina, el segundo eje puede ser horizontal y el tercer eje vertical, o viceversa.

Por ejemplo, en máquinas del tipo de puente o pórtico, el primer carro comprende un miembro transversal horizontal que define el segundo eje sobre el cual se desliza el segundo carro, y el tercer carro está constituido por una columna, la cual es soportada por el segundo carro y es verticalmente móvil.

- 25 En máquinas del tipo de brazo horizontal, por el contrario, el primer carro comprende una columna vertical que define el segundo eje, a lo largo del cual se desliza el segundo carro, y el tercer carro está constituido por un brazo vertical, el cual es soportado por el segundo carro y es horizontalmente móvil.

Para el desplazamiento de los carros se utilizan motores eléctricos, los cuales transmiten las fuerzas de accionamiento a los carros por medio de unos mecanismos apropiados o, como alternativa, unos motores eléctricos lineales fijados con respecto al carro.

- 30 Las aceleraciones necesarias para llevar a cabo los ciclos de medición en tiempos cada vez más cortos requieren unas fuerzas de accionamiento elevadas, destinadas a inducir unas deformaciones elásticas de las piezas móviles de la máquina debido al efecto dinámico (inercial). Dichas deformaciones, las cuales son, así mismo, debidas a la estructura aligerada de las piezas móviles, pueden ser importantes para la precisión de la medición.

- 35 Con el fin de garantizar la clase de precisión de la máquina de medición, el error de la medición provocado por la deformación elástica debe ser estimado y, a continuación, compensado.

- 40 El documento US 2005/0102118 divulga el uso del láser en la determinación y compensación de los errores resultantes de las deformaciones elásticas en máquinas de medición de las coordenadas. Un emisor láser y un sensor se disponen sobre un miembro móvil de la máquina de medición de las coordenadas, con un reflector sobre un plano de referencia. La determinación y compensación de los errores se lleva a cabo sobre el desplazamiento relativo del reflector, por un lado, y por el emisor y el sensor, por el otro.

### **Objetivo de la invención**

El objetivo de la presente invención consiste en proporcionar una máquina de medición que haga posible la estimación precisa de los errores de medición debidos a las deformaciones mecánicas, así como un procedimiento para la compensación de los citados errores.

- 45 Los fines expuestos se consiguen mediante una máquina de medición de acuerdo con la Reivindicación 1, y mediante un procedimiento de acuerdo con la Reivindicación 9.

### **Breve descripción de los dibujos**

- 50 Para una mejor comprensión de la invención, descrita en los apartados que siguen, se incorporan algunas formas de realización preferentes, ofrecidas a modo de ejemplos no limitativos y con referencia a los dibujos adjuntos, en los que:

La Figura 1 ilustra una máquina de medición de puente de acuerdo con la presente invención;

la Figura 2 es una vista frontal en sección transversal parcial de la máquina de la Figura 1;

la Figura 3 es una vista en perspectiva esquemática de un carro de la máquina de la Figura 1, en un primer modo de deformación dinámica;

5 la Figura 4 es una vista frontal esquemática del carro de la Figura 3 en un segundo modo de deformación dinámica;

la Figura 5 es un diagrama de bloques de un procedimiento para la compensación de las deformaciones dinámicas que puede ser utilizado en una máquina de medición de acuerdo con la presente invención;

la Figura 6 es un diagrama de bloques de un modelo para la puesta en práctica del procedimiento;

10 la Figura 7 muestra unos gráficos de tiempo de cantidades físicas correlacionadas con un ciclo de movimientos del carro de la Figura 3;

la Figura 8 es una vista en perspectiva esquemática del carro de la máquina de medición de la Figura 1, de acuerdo con una forma de realización diferente de la invención;

la Figura 9 es una vista en perspectiva esquemática de una columna de la máquina de la Figura 1, de acuerdo con una forma de realización en variante de la presente invención;

15 la Figura 10 es una vista en perspectiva esquemática de una máquina de medición de brazo horizontal fabricada de acuerdo con la presente invención;

la Figura 11 es una vista en perspectiva esquemática y parcial de una máquina de pórtico fabricada de acuerdo con al presente invención.

**Forma de realización preferente de la invención**

20 En la primera forma de realización descrita, la máquina de medición 1 es del tipo de puente y comprende una plataforma 5 provista de unas superficie superior 6 del plano horizontal o superficie de referencia y una unidad móvil 7.

La unidad móvil 7 comprende un carro 8 accionado por motor, el cual se desliza sobre la plataforma 5 a lo largo de un primer eje horizontal (eje Y) de un sistema de referencia cartesiano (X, Y, Z) del volumen de medición.

25 El carro 8 presenta una estructura de puente y comprende dos montantes verticales 8a, 8b y un miembro transversal horizontal superior 8c que se extiende entre los extremos superiores de los montantes verticales 8a, 8b.

El montaje 8a comprende, en su extremo inferior, una corredera 9 accionada por motor, la cual puede deslizarse sobre unas guías 11 paralelas al eje Y e incorporada, de la forma conocida, en las inmediaciones de un borde longitudinal de la plataforma 5.

30 El miembro transversal 8c soporta una corredera 10 que se desliza sobre unas guías (no mostradas) a lo largo de un eje paralelo con un segundo eje (eje X) del sistema de referencia.

Montada sobre la corredera 10 se encuentra una columna vertical 12 que se mueve a lo largo de un eje (eje Z) del sistema de referencia. La columna vertical 12 soporta, en su extremo inferior, un sensor de medición 3 (de tipo conocido).

35 El carro 8, la corredera 10 y la columna 12 están provistos de unos respectivos motores 13, por ejemplo, unos motores lineales (de los cuales solo uno es visible en la Figura 2), los cuales controlan su desplazamiento a lo largo de los respectivos ejes de coordenadas.

40 La máquina de medición 1 es controlada por una unidad de control 14 provista de una sección motora 14a, la cual suministra las corrientes de suministro  $I_y$ ,  $I_x$ ,  $I_z$  a los motores eléctricos de los respectivos carros 8, 10, 12 para el desplazamiento del sensor de medición 3 a lo largo de los ejes Y, X y Z y, de ahí, su posicionamiento dentro del volumen de medición.

La máquina de medición 1 genera de salida -por medio de un software basado en algoritmos de tipo conocido- la posición  $x_a$ ,  $y_a$ ,  $z_a$  del sensor de medición 3 dentro del volumen de medición, mediante la detección de la posición de las correderas a lo largo de los respectivos ejes X, Y y Z.

45 En las condiciones de funcionamiento descritas con anterioridad, la posición del sensor de medición 3 está afectada por un error de posición  $e_x$ ,  $e_y$ ,  $e_z$  de tipo dinámico con respecto a los valores medidos  $x_a$ ,  $y_a$ ,  $z_a$  debido al hecho de que la estructura mecánica de la unidad móvil 7 que soporta el sensor de medición 3 (principalmente el montante vertical 8a, el miembro transversal 8c y el área de conexión entre el extremo superior del montante 8a y el miembro

transversal 8c) se deforma elásticamente debido a las fuerzas conferidas por los motores eléctricos que accionan las correderas 8 y 10.

La deformación de la unidad móvil 7 de la máquina de medición 1 se ejemplifica con referencia a las Figuras 3 y 4.

5 La Figura 3 ilustra las deformaciones provocadas por las deformaciones del carro 8 a lo largo del eje Y. Dichas deformaciones comprenden principalmente:

- . la flexión del montante 8a;
- . la flexión del miembro transversal 8c;
- . torsión del montaje 8a alrededor del eje Z; y
- . la torsión del miembro transversal alrededor del eje X.

10 La Figura 4 ilustra, por el contrario, las deformaciones provocadas por el desplazamiento de la corredera 10 a lo largo del eje X.

Dichas deformaciones comprenden principalmente:

- . una deformación de la junta entre el montante 8a y el miembro transversal 8c;
- . la flexión del miembro transversal 8c;
- 15 . la rotación del montante 8a alrededor del eje Y; y
- . una traslación del miembro transversal 8c a lo largo del eje X.

20 En la etapa de calibración (identificación del modelo dinámico) el error de posición  $e_x$ ,  $e_y$  a lo largo de los ejes Y y X se mide directamente mediante el montaje, sobre la superficie de referencia 6, de un transductor de posición 15 de dos dimensiones (de tipo conocido) no sometido a las deformaciones de las piezas móviles de la máquina y mediante la medición de la diferencia (esto es, el error de posición  $e_x$ ,  $e_y$ ) entre la posición  $x_g$ ,  $y_g$  del cabezal del sensor de medición 3 obtenida sobre el transductor de posición 15 de dos dimensiones y la posición ( $x_a$  e  $y_a$ ) tal como es detectada por la máquina, esto es,  $e_x = x_g - x_a$ ,  $e_y = y_g - y_a$ . El error de posición  $e_z$  es desdeñable.

25 Por ejemplo, las funciones del transductor de posición 15 de dos posiciones pueden conseguirse mediante el sistema de comparación VM 182 fabricado por la compañía HEIDENHAIN utilizado para la calibración de las máquinas.

También instalado sobre la máquina de medición 1 se encuentra un sensor láser 16, el cual suministra información sobre las deformaciones dinámicas que la unidad móvil 7 experimenta durante los desplazamientos del carro 8 y de la corredera 10 ( por lo que respecta a las deformaciones, véase lo que se dice con referencia a las Figuras 3 y 4).

30 Con referencia concreta a la Figura 2, el sensor láser 16 está alojado en una cavidad longitudinal 24 del miembro transversal 8c y comprende un emisor láser 22 fijado en un extremo de la cavidad 24 y una diana. Una diana 28 fijada en el extremo opuesto de la cavidad 24. El emisor 22 emite un haz 26 de rayos láser que atraviesa la cavidad 24 en paralelo al eje X e incide en la diana 28.

35 Convenientemente, el emisor 22 es soportado por una barra vertical 20, la cual es lo más rígida posible, y que se extiende por dentro de una cavidad vertical 19 del montante 8a y presenta un primer extremo inferior 20a rígidamente fijado a la corredera 9 (9y, por tanto, no afectada por las deformaciones del montante vertical 8a) y un segundo extremo superior que se proyecta desde el montante 8a en la cavidad 24 del miembro transversal 8c, sobre el cual está fijado el dispositivo emisor láser 22.

40 La diana 28 está constituida por un PSD (Dispositivo de Detección de la Posición, de tipo conocido), el cual detecta los desplazamientos del punto de incidencia del haz 26 de rayos láser a lo largo de dos ejes paralelos a los ejes Y y Z del sistema de referencia, como una función de la deformación de la estructura mecánica con respecto a una posición de referencia correspondiente a un estado no deformado.

45 Los desplazamientos  $m_y$ ,  $m_z$  del haz de rayos láser detectado sobre la diana 28 a lo largo de los ejes Y y Z, junto con otra información, hace posible rastrear el origen (por ejemplo, por medio de las técnicas descritas más adelante) de las deformaciones dinámicas experimentadas por la estructura mecánica como resultado del movimiento de los ejes Y y X.

En una etapa de calibración inicial (bloque 100, Figura 2), se define un modelo de entrada - salida M, el cual describe el comportamiento mecánico de la máquina de medición 1 (dicha etapa se define, así mismo, como una etapa de identificación del modelo).

5 En particular, el modelo de entrada - salida M (Figura 6) es multivariable y recibe en la entrada (u) las corrientes de suministro de los dos motores para el control de los respectivos desplazamientos a lo largo de los ejes X y Y (se ha verificado como gasto de partida que la dinámica debida a los desplazamientos de la corredera a lo largo del eje Z conduce a errores desdeñables), y genera de salida (y) una pluralidad de cantidades que comprenden la posición ya, xa del sensor de medición 3 obtenida a partir de los ejes de la máquina, los errores de posición ey, ex, introducidos por la elasticidad de la máquina 1 a lo largo de los ejes X y Y medidos por medio del transductor de posición 14 de dos dimensiones, y las deformaciones my, mz de la máquina medidas por el sensor láser 16.

Debido a la linealidad del fenómeno respecto para pequeñas perturbaciones, el entero modelo se divide en dos modelos:

- 10 - un primer modelo M1, el cual recibe en la entrada la corriente ly del motor del eje Y y genera de salida la posición ya a lo largo del eje Y, así como los errores de posición ey, ex y las mediciones de deformación my, mz a lo largo de los ejes X e Y, y
- 15 - un segundo modelo M2, en todo equivalente al modelo M1, el cual recibe en la entrada la corriente lx del motor del eje X, y genera de salida la posición xa a lo largo del eje X, así como los errores de posición ey, ex y las mediciones de deformación my, mz a lo largo de los ejes Y y Z.

De hecho, a un esfuerzo a lo largo de uno de los ejes se corresponde un componente de error principal a lo largo del mismo eje y un componente secundario (debido a los acoplamientos mecánicos) a lo largo del eje ortogonal. El error global de la máquina deriva de la superposición de los efectos de los componentes de los errores proporcionados por los dos modelos (esta parte se clarificará más adelante).

20 A continuación se describe la definición del primer modelo M1 con respecto a uno de los ejes (el eje Y) en tanto en cuanto el procedimiento de definición del segundo modelo M2 con respecto al otro eje (eje X) es totalmente equivalente.

El modelo M1 presenta como cantidad de entrada u la corriente. Las cantidades de salida ly son:

- 25 . la posición ya a lo largo del eje Y suministrada por la máquina 1;
- . las deformaciones my, mz a lo largo de los ejes Y y Z medidas por el sensor láser 16; y
- . el error de posición ey, ex a lo largo de los ejes Y y X medido por el transductor de posición 15 de dos dimensiones.

Las ecuaciones diferenciales que diferencian el modelo M1 son

$$x = Ax + Bu + K\varepsilon$$

$$y = Cx + Du + \varepsilon$$

30 en las que

u es la entrada medida (la corriente ly al motor), y las cantidades de salida, x las variables de estado de la dinámica, y  $\varepsilon$  el proceso de innovación resultante de la identificación. Finalmente, A, B, C, D y K son matrices del modelo.

En particular,

$$u = \begin{bmatrix} ly \end{bmatrix}$$

$$y = \begin{bmatrix} ya \\ my \\ mz \\ ex \\ ey \end{bmatrix}$$

35

40

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} & a_{16} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} & a_{26} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} & a_{36} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} & a_{46} \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} & a_{54} & a_{55} & a_{56} \\ a_{61} & a_{62} & a_{63} & a_{64} & a_{65} & a_{66} \end{pmatrix} \quad B = \begin{pmatrix} b_{11} \\ b_{21} \\ b_{31} \\ b_{41} \\ b_{51} \\ b_{61} \end{pmatrix}$$

$$C = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & c_{15} & c_{16} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} & c_{25} & c_{26} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} & c_{35} & c_{36} \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & c_{44} & c_{45} & c_{46} \\ c_{51} & c_{52} & c_{53} & c_{54} & c_{55} & c_{56} \end{pmatrix} \quad D = \begin{pmatrix} d_{11} \\ d_{21} \\ d_{31} \\ d_{41} \\ d_{51} \end{pmatrix}$$

$$K = \begin{pmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} & k_{15} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & k_{24} & k_{25} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & k_{34} & k_{35} \\ k_{41} & k_{42} & k_{43} & k_{44} & k_{45} \\ k_{51} & k_{52} & k_{53} & k_{54} & k_{55} \\ k_{61} & k_{62} & k_{63} & k_{64} & k_{65} \end{pmatrix}$$

5 Por lo que respecta a la definición del proceso de innovación, puede hacerse referencia al texto de Lennart Ljung titulado "Identificación Sistema - Teoría para el usuario" ["System Identification - Theory for the user"], Prentice-Hall, Upper Saddle River, N.J., 1999.

10 Las cantidades de entrada  $u$  y las cantidades de salida  $y$  son medidas y registradas durante un serie de ciclos de trabajo (bloque 110) en el cual se hace trasladar el carro 8a lo largo del eje Y, sometiendo la máquina 1 a una aceleración que provoca la deformación de la propia máquina como resultado del efecto dinámico. A continuación, se identifica el modelo dinámico de entrada - salida  $M1$  que describe el comportamiento dinámico de la máquina, mediante el ajuste de la relación de las cantidades de entrada  $u$  con las cantidades de salida  $y$ .

Un ejemplo típico de ciclo de trabajo utilizado para la identificación, se muestra en la Figura 3b.

15 El carro 8 del eje Y está fabricado para efectuar, con un control de bucle cerrado, un desplazamiento, empezando desde un estado fijo, con una ley de movimiento que contempla (Figura 7), una primera etapa de aceleración a la cual se corresponde una rampa de velocidad  $T1$ , una segunda etapa a velocidad constante, una tercera etapa de desaceleración  $T3$ , hasta que de nuevo se detiene. El correspondiente a esta ley de movimiento es un ciclo de corrientel caracterizado por una etapa positiva durante la aceleración, un valor reducido durante el movimiento a velocidad constante y una etapa negativa durante la desaceleración.

Durante la etapa de calibración, las cantidades de entrada  $u$  y las cantidades de salida  $y$  son muestreadas, con un periodo de muestreo de  $500 \mu s$ , y almacenadas.

20 Las muestras de las cantidades de entrada y de salida son suministradas a un algoritmo de identificación el cual, con una técnica de probabilidad máxima aplicada a un modelo de innovación lineal caracterizado por un quintuplo de las matrices  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$ ,  $K$  identifica el modelo de entrada - salida  $M1$  tal y como se describe por el sistema de ecuaciones diferenciales ofrecido con anterioridad (para la definición del algoritmo de máxima probabilidad, puede hacerse referencia al texto de Lennart Ljug titulado "Identificación Sistemas - Teoría para el usuario" ["System of Identification - Theory for the user"], Prentice-Hall, Upper Saddle River, N.J., 1999).

Para ser preciso, el modelo no es constante a lo largo de todo el volumen de medición de la máquina, de manera que se llevan a cabo diferentes etapas de calibración similares a las descritas con anterioridad para cubrir el entero volumen de medición.

5 La variabilidad del modelo afecta a los ejes X y Z, de manera que el volumen de medición ha sido medido en una pluralidad de secciones (por ejemplo nueve secciones: inferior izquierda, inferior central, inferior derecha, centro izquierda, ... ) en las cuales los respectivos modelos M1a, M1b, M1c, ..., M1n han sido definidos.

Un modelo global M1compl ha sido definido y se aproxima a los diversos modelos M1a, M1b, M1c, ... , M1n en el volumen de medición.

10 En particular, se ha destacado cómo las matrices A, B, D y K de los diversos modelos son sustancialmente constantes a lo largo de todo el volumen de medición, mientras que solo parte de la matriz C cambia en el volumen de medición.

15 El modelo global M1compl comprende, en consecuencia, las matrices A, B, D y K que no varían en el volumen de medición y presentando una matriz C una porción (las filas correspondientes a las señales de error ex, ey) con parámetros variables, la cual es una función de las coordenadas de los ejes X e Y, y, por tanto, varía en el volumen de medición:

$$C = C(xa, za)$$

20 Dicha función  $C = C(xa, za)$  es no lineal con respecto a los ejes X y Z y se obtiene mediante la interpolación de las matrices C de los diversos modelos M1a, M1b, M1c, ... M1n, en las diferentes secciones del volumen de medición utilizando unas funciones b-spline (con lo respecto a la definición de las funciones spline véase el texto de M. Broen, C. Harris titulado "Modelo y Control Adaptativo NeuroDifuso" [NeuroFuzzy Adaptative Modelling and Control", Prentice-Hall Internatioal (RU) Limited, 1994).

Al final de la etapa de calibración, el transductor de calibración 15 es retirado.

25 Continuando con la definición del modelo global M1compl que representa la "signatura" de la máquina concreta sometida a calibración, la etapa 100 es a continuación seguida por una etapa 200 en la cual, empezando a partir del modelo global M1compl, es diseñado un filtro estimador 1.

Para esta etapa del diseño el modelo M1compl es representado (en el dominio del tiempo, siendo posible una representación similar de manera discreta) de la siguiente forma:

$$x = AX + BU + K\varepsilon$$

$$y = C1x + D1u$$

30  $z = C2x + D2u$

en las que:

$$u = \begin{bmatrix} ly \end{bmatrix}$$

$$y = \begin{bmatrix} ya \\ my \\ mz \end{bmatrix}$$

$$z = \begin{bmatrix} ex \\ ey \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} & a_{16} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} & a_{26} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} & a_{36} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} & a_{46} \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} & a_{54} & a_{55} & a_{56} \\ a_{61} & a_{62} & a_{63} & a_{64} & a_{65} & a_{66} \end{pmatrix} \quad B = \begin{pmatrix} b_{11} \\ b_{21} \\ b_{31} \\ b_{41} \\ b_{51} \\ b_{61} \end{pmatrix}$$

$$C1 = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & c_{15} & c_{16} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} & c_{25} & c_{26} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} & c_{35} & c_{36} \end{pmatrix} \quad D1 = \begin{pmatrix} d_{11} \\ d_{21} \\ d_{31} \end{pmatrix}$$

$$C2 = \begin{pmatrix} c_{41} & c_{42} & c_{43} & c_{44} & c_{45} & c_{46} \\ c_{51} & c_{52} & c_{53} & c_{54} & c_{55} & c_{56} \end{pmatrix} \quad D2 = \begin{pmatrix} d_{41} \\ d_{51} \end{pmatrix}$$

Destacadas entre las salidas son las medidas (distinguidas por el símbolo y en el sistema ilustrado con anterioridad) y las no medidas, las cuales deben ser estimadas (distinguidas por el símbolo z en el sistema ilustrado con anterioridad).

La matriz C1 comprende las tres primeras filas de la matriz C, y la matriz C2 las dos últimas filas de la matriz C. Así mismo, la matriz D1 comprende las primeras tres filas de la matriz D, y la matriz D2 las dos últimas filas de la matriz D.

Por lo que respecta a la variabilidad en el volumen de medición, de acuerdo con esta nueva representación del modelo, solo la matriz C2 es efectivamente una función de la posición de los ejes X y Z, mientras que todas las demás matrices son constantes:

$$C2 = C2(xa, za)$$

El filtro estimador 1 está diseñado para aplicar unas técnicas analíticas de filtrado robusto (en conexión con ello, véase el texto de P. Colaneri, A. Locatelli, J.C. Jeromlt titulado "Teoría y diseño de control, un punto de vista del RH2-RH-inf" ["Control theory and design, a RH2-RH-inf viewpoint", Academic Press, 1997] sobre la base del modelo global M1compl identificado con anterioridad.

Una técnica eficaz para hacer posible la mejora de la precisión del estimador consiste en aceptar que dicho filtro suministrará una estimación retardada en el tiempo (interpolación). Esta técnica se describe por ejemplo, en el artículo de P. Bolzerem, P. Colaneri, y G. De Nicolao titulado "alisado de retardo fijo de H-infinito de Tiempo Discreto" ["Discrete-time H-Infinity fixed lag smoothing"] IEEE Trans. On Signal Processing, Vol. 52, n. 1, pp. 132-141, 2004].

En otras palabras, en el instante de tiempo t el estimador permite disponer de la estimación de las informaciones dinámicas correspondientes al instante (t - Delta). Delta es el retardo de tiempo que es suficientemente corto para no poner en peligro la eficiencia de la máquina permitiendo la pronta disposición de las mediciones llevadas a cabo, pero suficientemente largo para mejorar la precisión de la estimación. Prácticamente, se ha descubierto que un valor de Delta igual a pocos centenares de segundo es adecuado.

El filtro estimador  $\hat{M}1$  suministra una estimación del error en respuesta a los valores medidos de las cantidades de entrada u y de la salida y (las mediciones ya a lo largo del eje Y y los valores de deformación my, mz).

El filtro estimador  $\hat{M}1$  está representado por las ecuaciones:

30

$$\dot{\hat{x}} = \hat{A}\hat{x} + Bu + \hat{K}y$$

$$\hat{z} = C2(xa, za)\hat{x} + D2u$$

5 donde  $y$  es el vector de las salidas medidas por la máquina y  $u$  es el vector de las entradas, y donde las matrices  $\hat{A}$ ,  $\hat{K}$  son el resultado del diseño del estimador empezando a partir de las matrices  $A$ ,  $B$ ,  $K$ ,  $C1$ ,  $D1$ , de acuerdo con las técnicas de filtrado robusto a las que se hizo referencia con anterioridad.

De esta manera, el filtro estimador  $\hat{M}1$ , genera de salida una estimación del error de tipo dinámico.

10 Las matrices del filtro estimador  $\hat{M}1$  de tipo lineal, de acuerdo con su definición, son almacenadas e integradas en el software de medición de la máquina para la estimación del error no conocido (bloque 400).

Las operaciones ilustradas con anterioridad son repetidas para la corriente del eje X con el fin de definir un filtro estimador  $\hat{M}2$ . Los resultados procedentes de los filtros  $\hat{M}1$  y  $\hat{M}2$  son sumados conjuntamente como resultado de la superposición de los efectos.

15 El procedimiento descrito con anterioridad es un ejemplo no limitativo de la manera en que pueden ser utilizadas analíticamente las mediciones  $m_y$ ,  $m_z$  para la estimación del comportamiento dinámico de la máquina. Es por supuesto, posible, utilizar cualquier otro procedimiento apropiado para la finalidad indicada.

Las Figuras 8 a 11 ilustran diversas forma de realización de máquinas de medición, o de partes de las mismas, las cuales utilizan sensores láser para la estimación de las deformaciones de tipo dinámico.

20 La Figura 8 ilustra una máquina de puente 30 similar a la de la Figura 1, en la cual, sin embargo, el sensor láser 16 es utilizado para obtener las mediciones  $m_x$ ,  $m_y$  correlacionadas con otros componentes de deformación de la máquina.

25 Más en concreto, el emisor láser 22 es soportado por una barra horizontal 31, la cual está alojada dentro de la cavidad 24 del miembro transversal 8c y presenta un extremo rígidamente fijado al extremo superior del montante 8a del carro 8 y un extremo opuesto que soporta el emisor láser 22. El emisor 22 emite un haz 26 de rayos láser hacia abajo. El haz 26 atraviesa una cavidad del montante 8b del carro 8 e incide en un PSD 28 fijado en el centro del pie del montante 8b.

Este tipo de configuración permite la detección específica de la torsión del miembro transversal alrededor del eje X y la flexión del miembro transversal 8c en el plano XY, después de lo cual el PSD 28 mide los valores de desalineación  $m_x$ ,  $m_y$  del haz 26 de rayos láser con respecto a una posición no deformada.

30 La Figura 9 ilustra otra forma de realización en la cual un sensor 16 está instalado dentro de la columna 12, con el emisor 22 fijado con respecto a un soporte rígido 32, el cual está fijado al extremo superior de la propia columna, y con el PSD 28 fijado al extremo inferior 23. En consecuencia, esta configuración detecta la flexión dinámica de la columna 12 en las direcciones X e Y.

35 Los sistemas de las Figuras 8 y 9 pueden ser combinados entre sí y / o con el de la Figura 2 de tal manera que se pueda contar con un número más alto de cantidades de salida medibles del modelo y, en consecuencia, estimar las deformaciones efectivas de tipo dinámico de la unidad móvil 7,, con mayor precisión.

Las Figuras 10 y 11 ilustran soluciones similares aplicadas a otros tipos de máquina.

40 Por ejemplo, la Figura 10 ilustra una máquina de brazo horizontal 40, que comprende una columna vertical 42, la cual se mueve sobre una plataforma 43 a lo largo de un primer eje X; un carro móvil 44, el cual es soportado por la columna 42 y se mueve a lo largo de un segundo eje vertical Z; y un brazo horizontal 45, el cual es soportado por el carro 44 y se mueve longitudinalmente a lo largo del tercer eje horizontal Y.

En este caso, el sensor láser 16 incorpora el emisor 22 fijado sobre un soporte rígido 32 fijo con respecto a un pie 46 de la columna, y el PSD 28 fijado en las inmediaciones de un extremo libre superior 47 de la propia columna. Cualquier flexión de la columna en las direcciones X e Y es de esta forma detectada.

45 Un sistema similar podría ser instalado, así mismo, en el brazo horizontal 45 para la detección de cualquier flexión del propio brazo en las direcciones X y Z.

La Figura 11 ilustra el carro 50 de una máquina de pórtico 51. El carro 50 se mueve a lo largo de un eje Y sobre un par de guías 52, 53 soportadas por unos pilares (no ilustrados).

5 El carro 50 está constituido por una corredera 54 accionada por motor que se mueve a lo largo de la guía 52, una corredera de soporte 55 que se mueve a lo largo de la guía 53, y un miembro móvil 56 transversal a las guías 52, 53, la cual presenta los extremos fijados, respectivamente, a las correderas 52, 53. El miembro móvil 56 define unas guías (no ilustradas) para su deslizamiento en la dirección X de un carro adicional (no ilustrado tampoco) diseñado para sostener una columna que se mueve en una dirección vertical (Z).

10 El sensor láser comprende en este caso un emisor 22, fijo con respecto a la corredera 54, y un PSD 28, fijo con respecto a la corredera 55. Esta configuración es apropiada para la detección de cualquier flexión del miembro móvil 56 en la dirección Y.

10 Para un examen de las características de las máquinas 1, 30, 40 y 51, las ventajas que posibilita la presente invención son evidentes.

En particular, el uso de los sensores láser 16 hace posible detectar de una manera sencilla y no costosa las cantidades medibles correlacionadas con las deformaciones de las partes móviles de la máquina derivadas del efecto dinámico.

15 Dichas cantidades pueden ser utilizadas en tiempo real para el cálculo y compensación de los errores de medición provocados por las deformaciones estructurales de la máquina mediante la utilización de procedimientos matemáticos apropiados.

20 En particular, es posible definir un modelo de entrada - salida de la máquina que es más o menos complejo, de acuerdo con el tipo de máquina o con la mayor o menor incidencia de determinados componentes del error, siendo las entradas (que pueden ser medidas) las corrientes de suministro de los motores, y siendo las salidas las cantidades medibles (en particular, las suministradas por el sensor láser) y las cantidades no medibles (los errores de medición). Es, en consecuencia, posible definir un filtro estimador, el cual suministra, en respuesta a las cantidades de entrada y a las cantidades medibles de salida, los valores estimados de las cantidades no medibles.

25 Finalmente, es obvio que pueden llevarse a cabo modificaciones y variantes en las máquinas y en el procedimiento descrito, sin por ello apartarse del alcance de la protección definido por las reivindicaciones.

30

35

## REIVINDICACIONES

- 1.- Una máquina de medición que comprende una unidad móvil (7) para desplazar un sensor de medición (3) dentro de un volumen de medición, comprendiendo la unidad móvil (7) al menos un miembro (8; 12; 42; 56) que se mueve a lo largo de un eje bajo el empuje de un medio de accionamiento (13) y que está sometida a unas deformaciones dinámicas, comprendiendo dicha máquina un sensor láser (16) provisto de un emisor láser (22) fijado a una primera porción del miembro móvil y una diana (28) fijada sobre una segunda porción de dicho miembro móvil (8; 12; 42; 56) y diseñada para recibir un haz (26) de rayos láser generado por dicho emisor (22), estando dichas primera y segunda porciones sometidas a un desplazamiento relativo como consecuencia de dichas deformaciones dinámicas, y un medio (14) para compensar los errores de medición de dicha máquina (1) como consecuencia de dichas deformaciones dinámicas de dicha unidad móvil (7) en respuesta al desplazamiento de un punto de incidencia del haz (26) de rayos láser sobre la diana (28) con respecto a una posición de referencia en estados no deformados.
- 2.- La máquina de acuerdo con la reivindicación 1, en la que dicha diana (28) es un Dispositivo de Detección de Posición.
- 3.- La máquina de acuerdo con las reivindicaciones 1 o 2, en la que dicho miembro móvil comprende un elemento en forma miembro móvil (10, 12, 56), estando dicho emisor (22) y dicha diana (28) fijados en los extremos opuestos de dicho elemento en forma de miembro móvil (10).
- 4.- La máquina de acuerdo con las reivindicaciones 1 o 2, en la que dicho miembro móvil (8) comprende al menos un primer elemento (8a) que presenta un primer extremo y un segundo extremo, y un segundo elemento (8c) que presenta un primer extremo y un segundo extremo, estando dichos primero y segundo elementos (8a, 8c) conectados entre sí en un área correspondiente al respectivo primer extremo, siendo dichos primero y segundo elementos huecos, estando dicho emisor (22) dispuesto en dichos primeros extremos de dicho segundo elemento (8c) y estando fijado a un soporte rígido (20), el cual es fijo con respecto a un segundo extremo (9) de dicho primer elemento (8a), estando dicha diana (28) fijada a dicho segundo extremo de dicho segundo elemento (8c).
- 5.- La máquina de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en la que dicho sensor láser (16) está alojado dentro de dicho miembro móvil (8c; 56), extendiéndose dicho haz (26) de rayos láser a través de una cavidad (24) de dicho miembro móvil.
- 6.- La máquina de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en la que dicho miembro móvil (8) es un carro, que se mueve sobre una plataforma (5) y presenta una estructura de puente provista de dos montantes (8a, 8b) y un miembro transversal (8c), comprendiendo un primer montante (8a) de dicho carro una corredera (9) accionada por motor, la cual puede deslizarse sobre dicha plataforma (5).
- 7.- La máquina de acuerdo con la Reivindicación 6 cuando dependa de la Reivindicación 4, en la que dicho primer elemento está constituido por dicho primer montante (8a) y en la que el segundo elemento está constituido por dicho miembro transversal (8c); estando dicho soporte rígido constituido por una barra (20) que se extiende por dentro del primer montante (8a) que presenta un primer extremo inferior (20a) fijado a dicha corredera (9) de dicho primer montante (8a) y un extremo superior que se extiende por dentro de dicho miembro transversal (8c) en un primero de sus extremos, estando dicho emisor (22) fijado sobre dicho extremo superior de dicha barra (20), estando dicho receptor fijado dentro de dicho miembro transversal (24), en su extremo opuesto.
- 8.- La máquina de acuerdo con la Reivindicación 6 cuando dependa de la Reivindicación 4, en la que dicho primer elemento es dicho miembro transversal (8c) y dicho segundo elemento es dicho segundo montante (8b), estando dicho soporte rígido constituido por una barra (31) que se extiende por dentro de una cavidad longitudinal (24) del miembro transversal (8c) y que presenta un extremo fijo sobre dicho primer montante (8a), estando dicho emisor (22) fijado sobre un extremo opuesto de dicha barra (31), y estando dicha diana (28) alojada en un pie de dicho segundo montante (8b).
- 9.- Un procedimiento para la compensación de los errores de medición debidos a las deformaciones mecánicas en una máquina de medición (1) provista de una unidad móvil (7) para desplazar un sensor de medición (3) dentro de un volumen de medición, comprendiendo la unidad móvil (7) al menos un primer miembro (8; 12; 42; 56) móvil a lo largo de un eje bajo el empuje de un medio de accionamiento (13) y estando sometido a unas deformaciones dinámicas, comprendiendo el procedimiento las etapas de:
- la generación de un haz (26) de rayos láser por medio de un emisor (22) fijado a una primera porción de un miembro móvil (8; 12; 42; 56) de dicha unidad móvil (7);
- la detección del desplazamiento de un punto de incidencia del haz (26) de rayos láser sobre una diana (28) fijada sobre una segunda porción de dicho miembro móvil (8; 12; 42; 56) con respecto a una posición de referencia correspondiente a un estado no deformado de dicha unidad móvil (7); y
- la compensación de los errores de medición de la máquina de medición (1) como una función de al menos dicho desplazamiento.

10.- El procedimiento de acuerdo con la Reivindicación 9, en el que dicha etapa de detección del desplazamiento del punto de incidencia del haz de rayos láser se lleva a cabo por medio de un PSD (28) que define dicha diana.

5 11.- El procedimiento de acuerdo con las Reivindicaciones 9 o 10, en el que dicha etapa de compensación de los errores de medición se obtiene por medio de un filtro estimador ( $\hat{M}$ ), el cual suministra una estimación del error de medición en respuesta a los valores medidos de las cantidades de entrada (u) y de los valores medidos de un subconjunto de unidades de salida (y) que comprende dicho desplazamiento del punto de incidencia de dicho haz de rayos láser.

10

FIG. 1

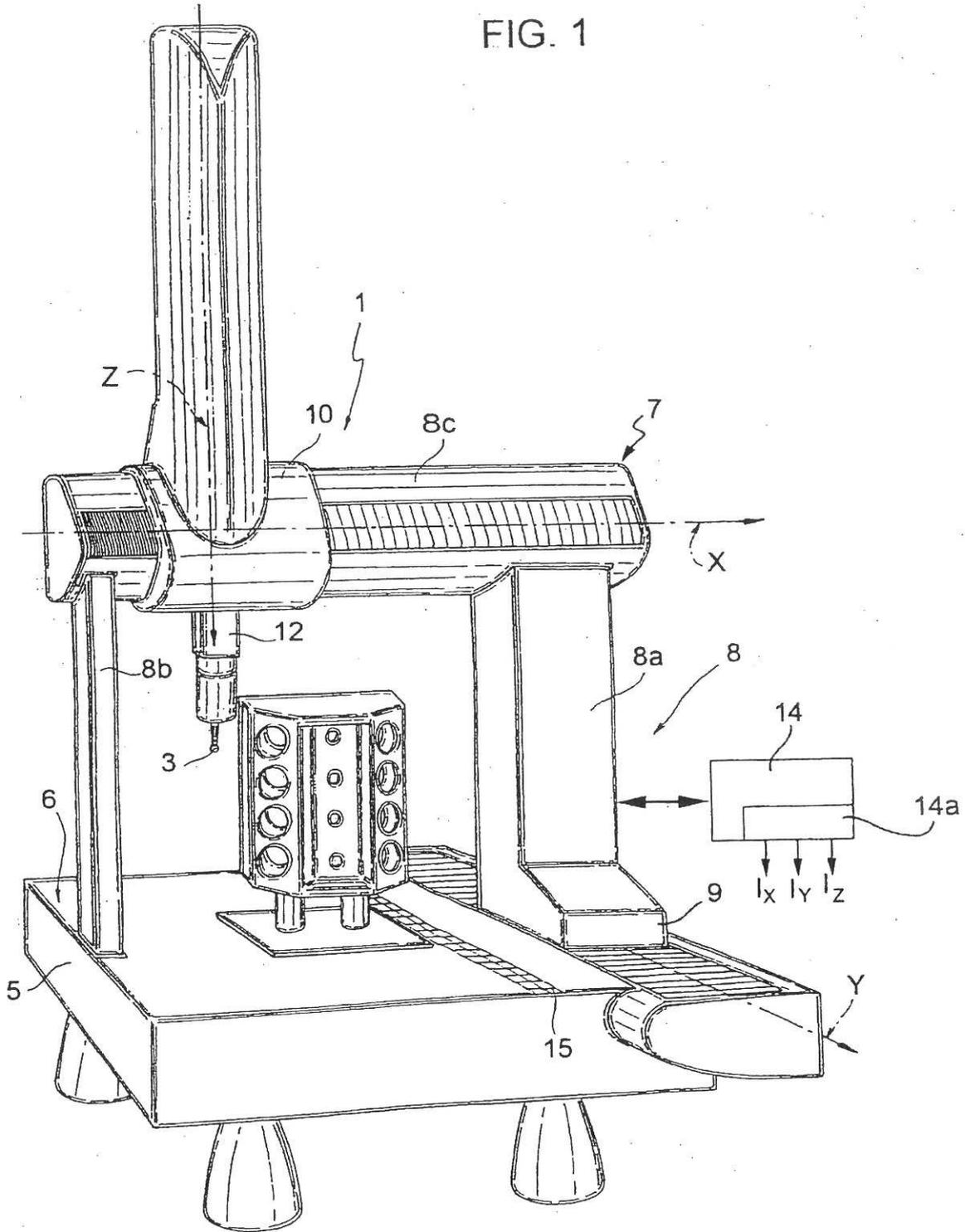


FIG. 2

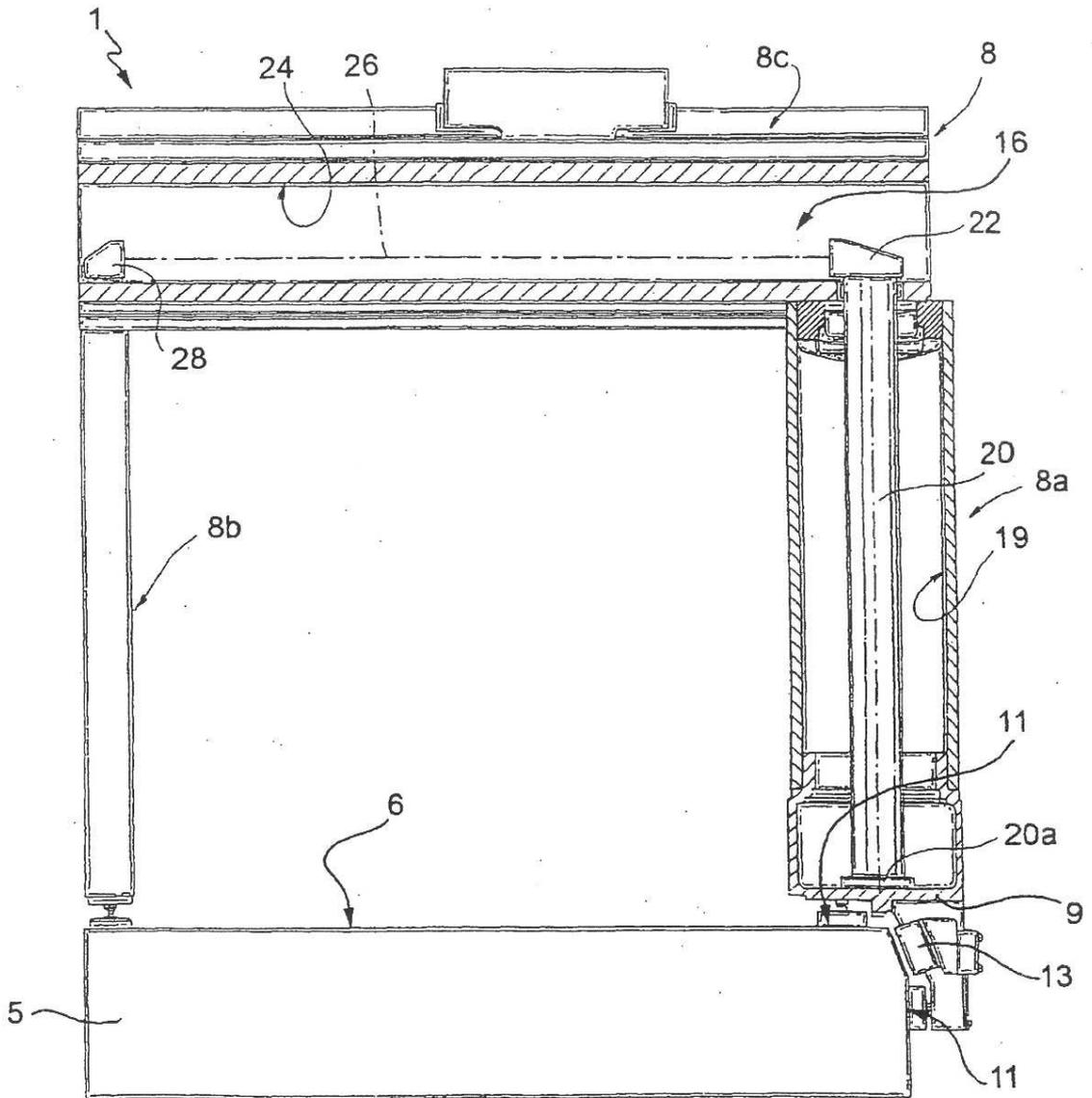


FIG. 3

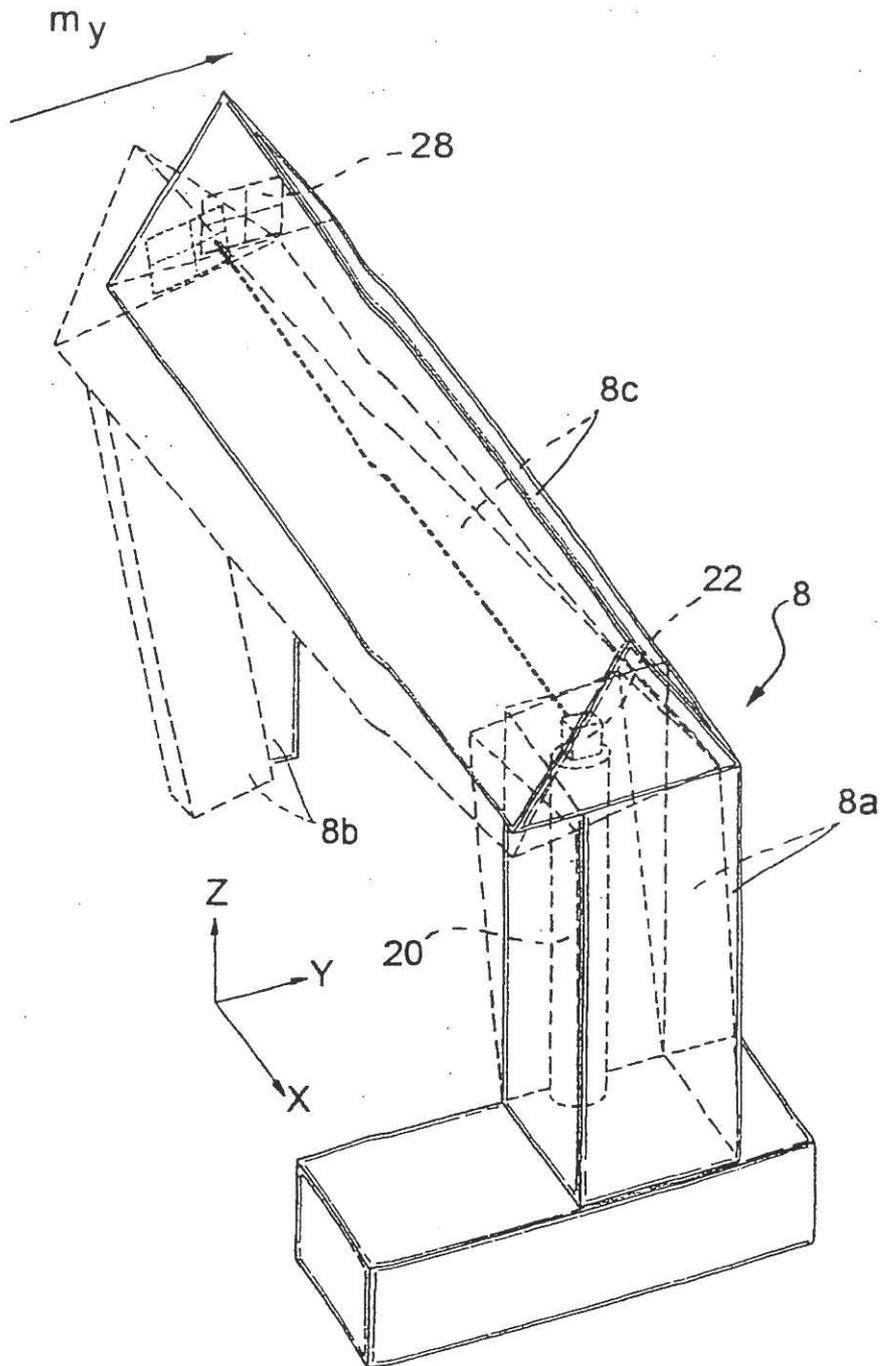


FIG. 4

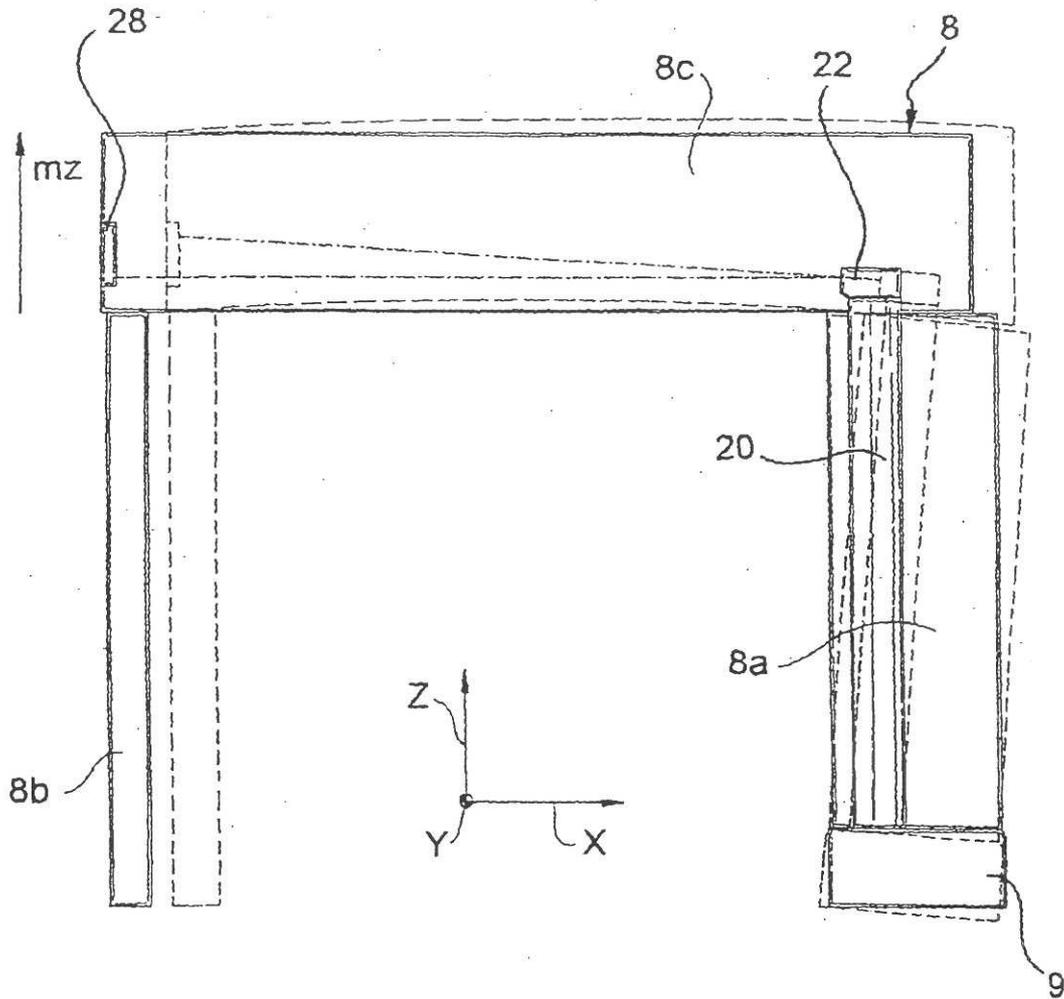


FIG. 7

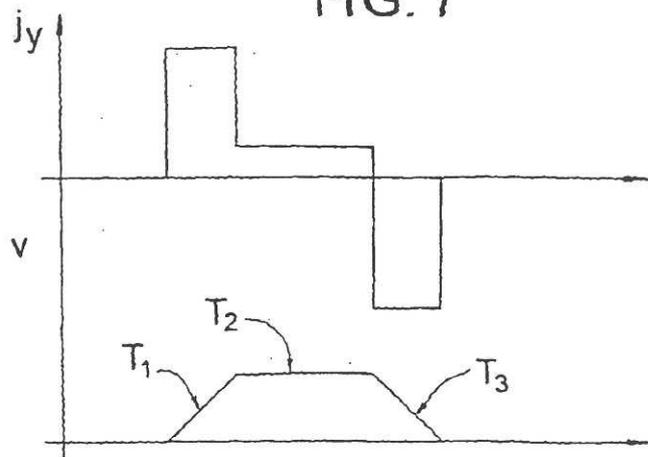


FIG. 5

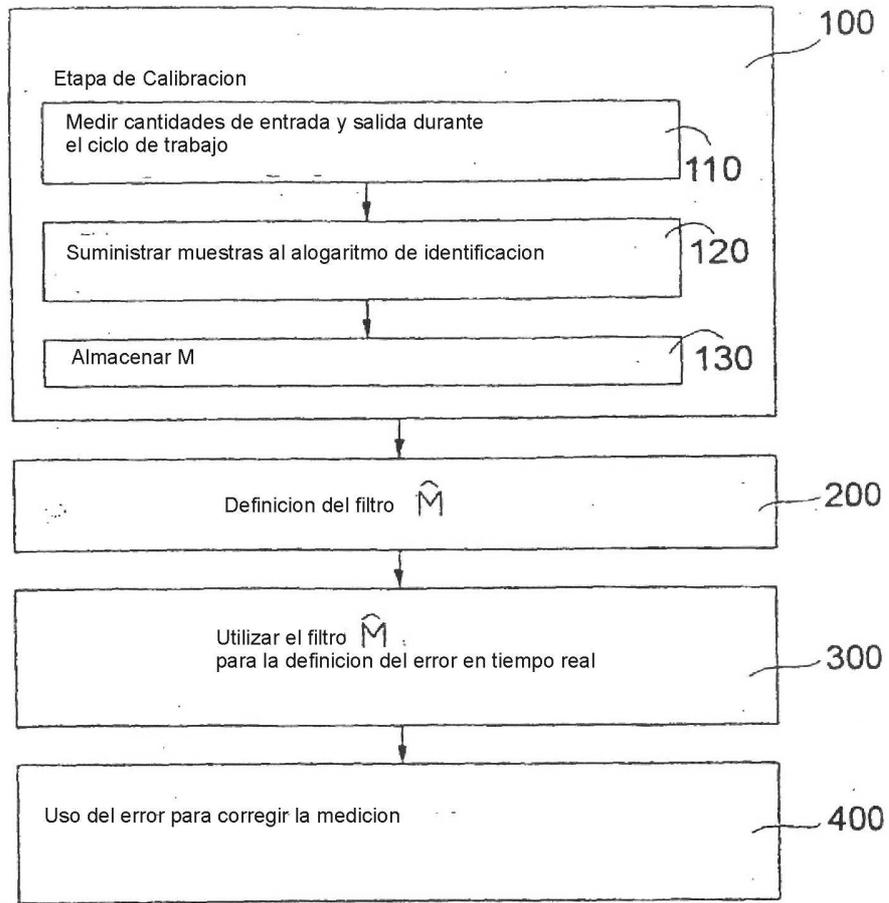


FIG. 6

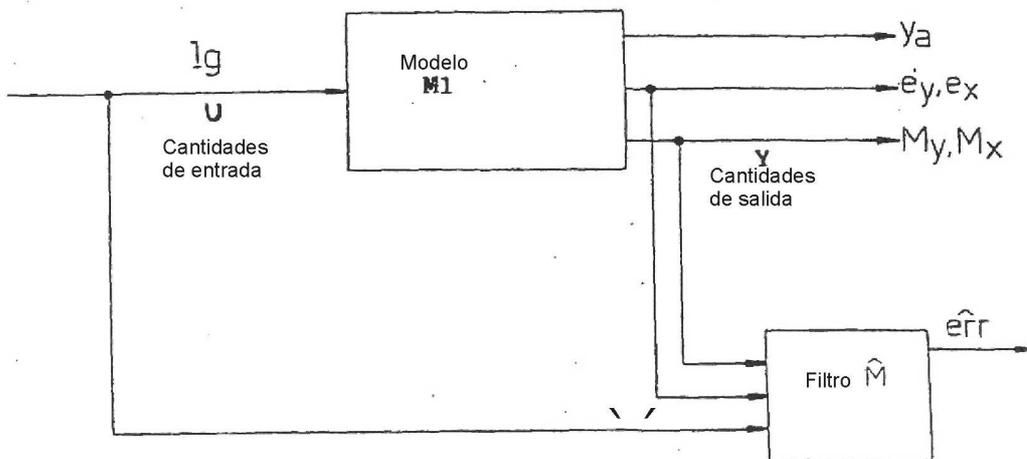


FIG. 8

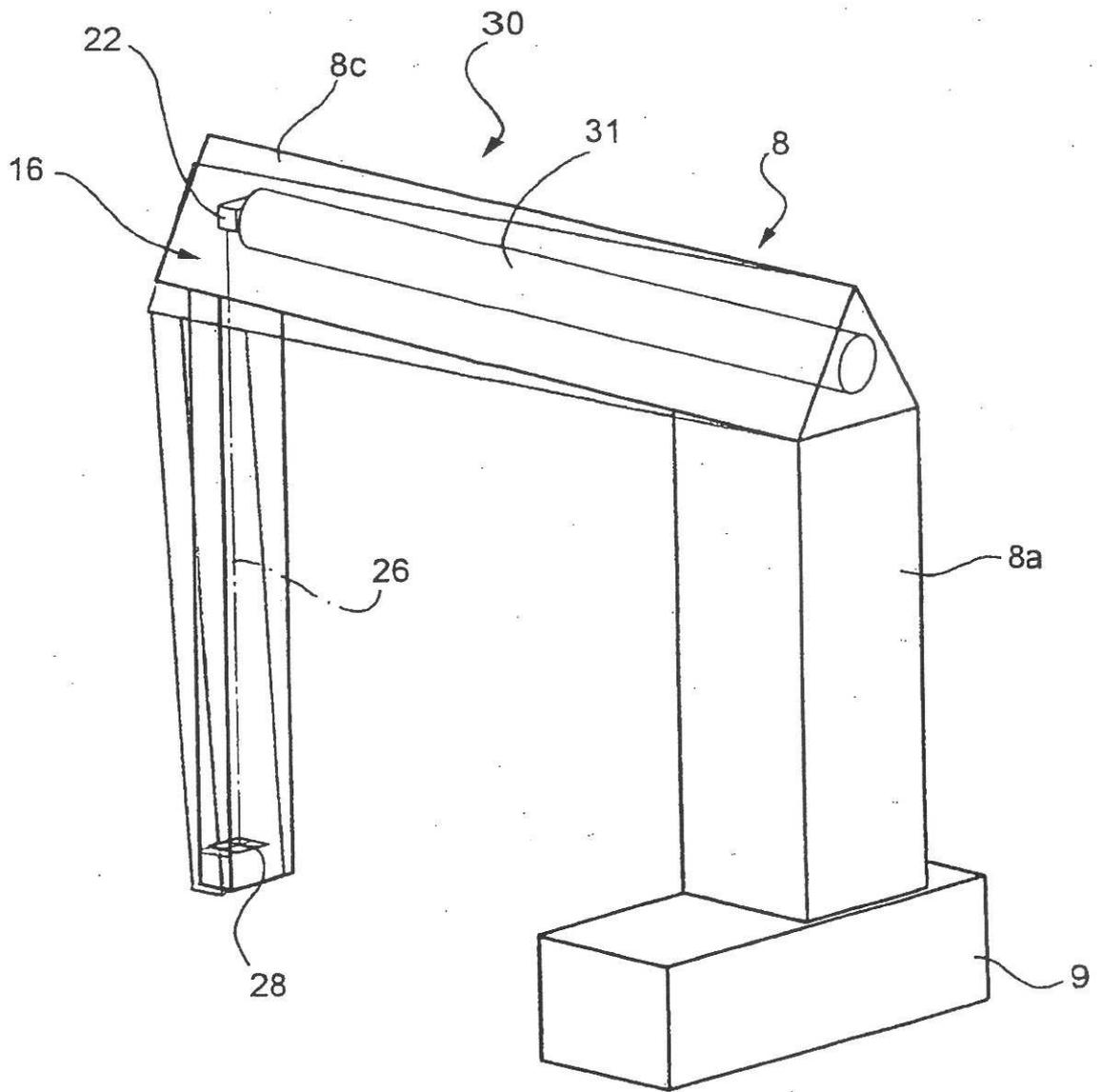


FIG. 9

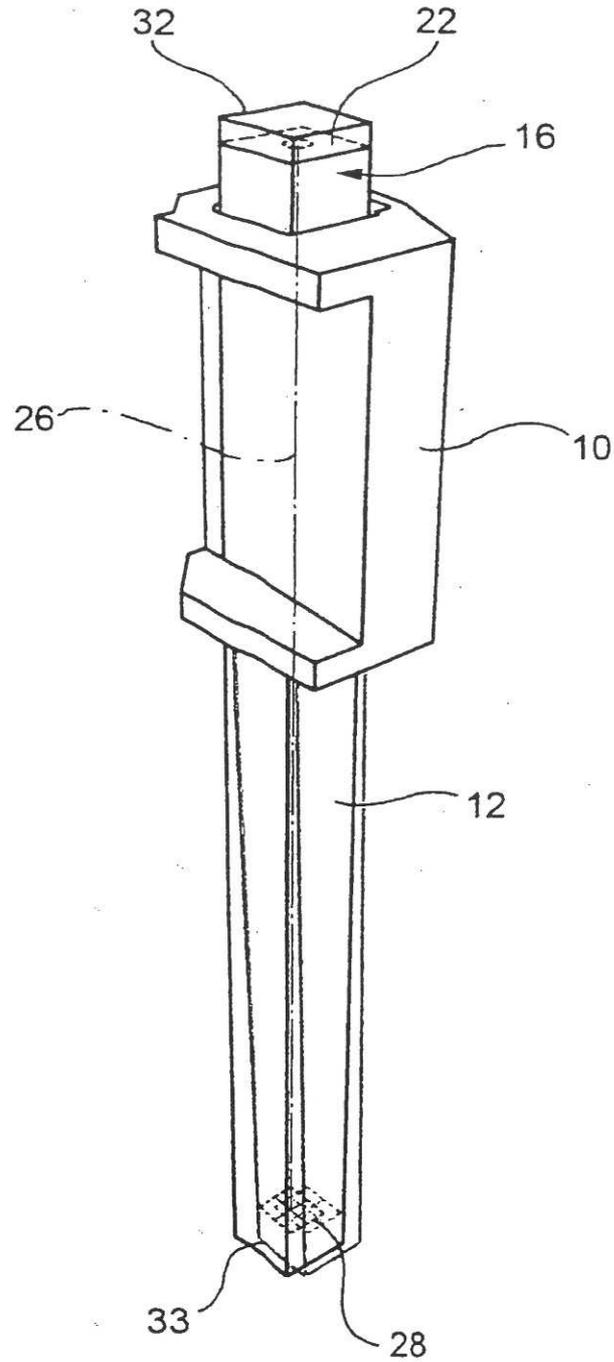


FIG. 10

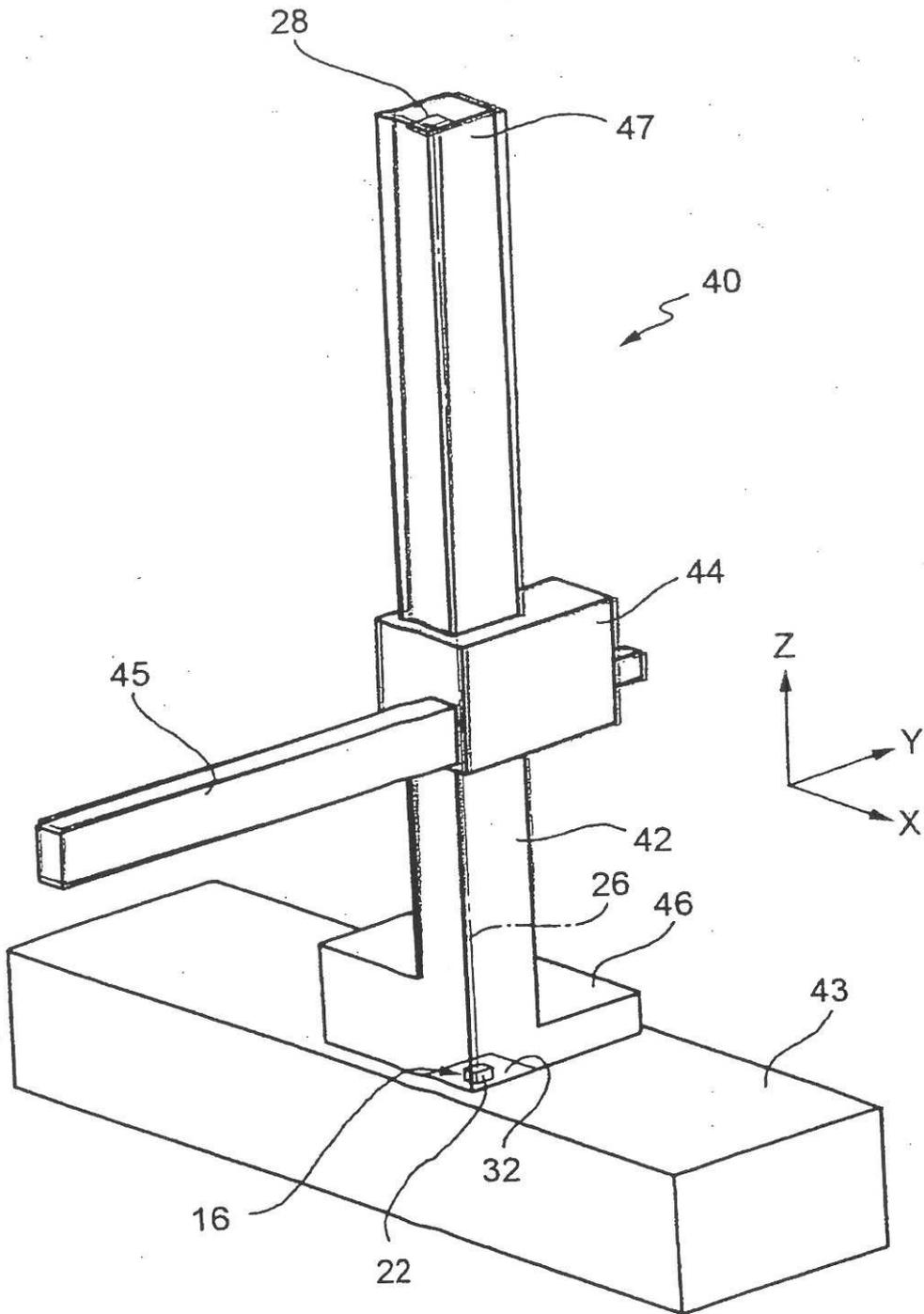


FIG. 11

