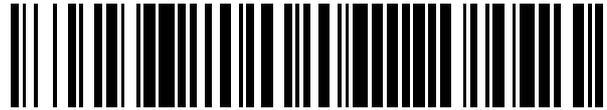


19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 559 187**

51 Int. Cl.:

**G01B 5/008** (2006.01)

**G01B 7/008** (2006.01)

**G01B 21/04** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **06.07.2011 E 11425179 (6)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **14.10.2015 EP 2543955**

54 Título: **Método de calibración de un modelo matemático para una máquina de medición de coordenadas para la compensación de errores dinámicos debidos a la deformación**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**10.02.2016**

73 Titular/es:

**HEXAGON METROLOGY S.P.A. (100.0%)  
Via Vittime di Piazza Della Loggia, 6  
10024 Moncalieri, IT**

72 Inventor/es:

**GUASCO, GIAMPIERO**

74 Agente/Representante:

**CARVAJAL Y URQUIJO, Isabel**

ES 2 559 187 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 calibración de un modelo matemático para una máquina de medición de coordenadas para la compensación de errores dinámicos debidos a la deformación.

Campo técnico

- 5 La presente invención se relaciona con un método de calibración de un modelo matemático de una máquina para medición de coordenadas para la compensación de errores dinámicos debidos a la deformación.

Estado del arte anterior

- 10 Como es sabido, las máquinas para medición de coordenadas comprenden en general tres carros movibles a lo largo del eje de coordenadas de un sistema de referencia cartesiano y capaces de mover un sensor de medición dentro de un volumen de medición. La máquina es capaz de suministrar como resultado las coordenadas de una pieza detectadas por el sensor de medición, calculadas como una función de la posición de los carros a lo largo de los ejes respectivos.

- 15 Más específicamente, las máquinas de medición de coordenadas comprenden una estructura base equipada con una guía que corre a lo largo de un primer eje, por ejemplo, un lecho en granito u otro material o una estructura en columna, un primer carro móvil sobre la estructura base a lo largo del primer eje, un segundo carro transportado por el primer carro y móvil a lo largo de un segundo eje ortogonal al primer eje y un tercer carro transportado por el segundo carro y móvil con respecto a este último a lo largo de un tercer eje ortogonal a los dos primeros ejes. El sensor de medición es transportado por el tercer carro.

- 20 Como regla, el primer eje es horizontal; dependiendo del tipo de máquina, el segundo eje puede ser horizontal y el tercer eje vertical, o viceversa.

Por ejemplo, en máquinas tipo puente o grúa, el primer carro comprende un miembro en cruz horizontal que define el segundo eje sobre el cual el segundo carro se mueve y el tercer carro está constituido por una columna móvil verticalmente portada sobre el segundo carro.

- 25 En vez de esto, en máquinas de tipo brazo horizontal, el primer carro comprende una columna vertical que define el segundo eje a lo largo del cual el segundo carro se mueve y el tercer carro está constituido por un brazo horizontal móvil horizontalmente portado por el segundo carro.

El movimiento de los carros es llevado a cabo mediante el uso de motores eléctricos que transmiten la fuerza de impulsión a los carros a través de mecanismos cinemáticos adecuados o, alternativamente, motores eléctricos lineales integrales con los carros mismos.

- 30 Las aceleraciones necesarias para llevar a cabo los ciclos de medición en tiempos crecientemente más cortos requieren altas fuerzas de impulsión, de tal manera que induzcan la deformación elástica de las partes móviles de las máquinas debido a un efecto dinámico (inercial). Esta deformación, también debido a la estructura aligerada de las partes móviles, puede ser significativa para la precisión de la medición.

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

Un dispositivo de entrada a un ordenador que provee información espacial acerca de un objeto tridimensional es conocido de la US-A- 6 015 473. Un método para calibrar una sonda de toque es conocido de la US-A-2002/0138999.

- 40 La US2005/0102118 ilustra el uso de un láser para determinar y compensar errores derivados de la deformación elástica en máquinas para medición de coordenadas. Un emisor y un sensor de láser están dispuestos sobre un elemento móvil de la máquina de medición de coordenadas, con un reflector sobre un plano de referencia. La determinación y la compensación del error se llevan a cabo sobre el movimiento relativo entre el reflector por un lado y el emisor y el sensor por el otro.

- 45 Las EP-A- 2160565 y EP-A- 2167912 ilustran una máquina de medición en la cual un sensor de láser está asociado con un miembro móvil de la máquina y provee valores correlacionados con la deformación dinámica de la unidad móvil. Estos valores son procesados por medio de un modelo matemático para calcular y compensar los errores de medición de la máquina debido a la deformación dinámica.

En la etapa de calibración, el error de posición a lo largo de los ejes Y y X se miden directamente por montaje, sobre el plano de referencia, de un transductor de posición bidimensional, inmune a la deformación de las partes móviles de la máquina y midiendo la diferencia entre la posición de la cabeza del sensor de medición detectada por el transductor de posición bidimensional y la posición tal como es detectada por la máquina.

- 5 El error de posición a lo largo del eje es Z, al menos en una máquina de puente, se considera despreciable.

#### Objeto de la invención

El objeto de la presente invención es el de proveer un método más simple y menos costoso de calibración, el cual, en particular, permite evitar el uso de un instrumento adicional, tal como un sensor bidimensional, y que puede ser llevado a cabo con la máquina en su configuración de medición.

- 10 El objetivo anterior es alcanzado por un método de calibración de acuerdo con la reivindicación 1.

#### Breve descripción de los dibujos

Para un mejor entendimiento de la invención, se describirán algunas realizaciones preferidas a continuación, a manera de ejemplo no limitativos y con referencia a los dibujos anexos, en donde:

La figura 1 muestra una máquina de medición de puente de acuerdo con la presente invención;

- 15 la figura 2 es una vista frontal y parcialmente en sección transversal de la máquina de la figura 1;

la figura 3 es una vista en perspectiva y esquemática de un carro de la máquina de la figura 1, en su primera forma de deformación dinámica;

la figura 4 es una vista frontal y esquemática del carro de la figura 3, en una segunda forma de deformación dinámica;

- 20 la figura 5 es un diagrama de bloques de un método de compensación de la deformación dinámica empleando el método de calibración de acuerdo con la presente invención;

la figura 6 es un diagrama de bloques de un modelo para implementar el método de compensación;

la figura 7 muestra esquemáticamente un palpador de una máquina de medición y una herramienta; y

- 25 las figuras 8 y 9 muestran las tendencias de las cantidades físicas correlacionadas con un ciclo de movimiento del carro de la figura 3.

#### Realización preferida de la invención

La figura 1 muestra una máquina 1 de medición tipo puente, que comprende un lecho 5 equipado con una superficie 6 superior horizontal plana o un plano de referencia y una unidad 7 móvil.

- 30 La unidad 7 móvil comprende un carro 8 impulsado por motor que se mueve sobre el lecho 5 a lo largo de un primer eje horizontal (eje Y) de un sistema de referencia cartesiano X-Y-Z del volumen de medición.

El carro 8 tiene una estructura de puente y comprende dos montantes 8a y 8b verticales y un miembro 8c en cruz horizontal superior que se extiende entre los extremos superiores de los montantes 8a y 8b verticales.

En el fondo, el montante 8a comprende una platina 9 impulsada por motor que se desliza sobre las vías 11 paralelas al eje Y y se obtiene, de manera conocida, en proximidad a un borde longitudinal del lecho 5.

- 35 El miembro 8c en cruz lleva una platina 10 que se desliza sobre guías (no mostradas) a lo largo de un eje paralelo al segundo eje (eje X) del sistema de referencia.

- 40 Una columna 12 vertical, móvil a lo largo de un tercer eje (eje Z) del sistema de referencia está montada sobre la platina 10. En el fondo, la columna 12 vertical porta un sensor 3 de medición (de tipo conocido), que comprende una aleta 30 constreñida a la columna 12 y un palpador 31 que se proyecta desde la aleta 30 y se constriñe elásticamente al mismo, de manera conocida, con una posibilidad limitada de traslación relativa a lo largo de su propio eje y a lo largo de los dos ejes de la aleta perpendicular una a otra y al eje del palpador. El palpador 31

termina en una punta 32 esférica, capaz de interactuar con la pieza que va a ser medida.

Si la aleta 30 está fijada rígidamente a la columna 12, el eje del palpador 31 es paralelo al eje Z, cuando está en reposo, y los tres grados de libertad del palpador con respecto a la aleta 30 permiten movimientos de la punta 32 sustancialmente a lo largo de los ejes X, Y y Z.

- 5 Alternativamente, la aleta 30 puede ser montada sobre la columna 12 por medio de un dispositivo articulado con dos ejes de rotación, o muñeca, de tipo conocido y no mostrado.

El carro 8, la platina 10 y la columna 12 están equipados con motores 13 respectivos, por ejemplo, motores lineales (de los cuales solamente uno es visible en la figura 2, los cuales controlan el movimiento a lo largo de los ejes de coordenadas respectivos.

- 10 La máquina 1 de medición es controlada por una unidad 14 de control equipada con una sección 14a de potencia la cual provee las corrientes de suministro IY, IX e IZ a los respectivos motores eléctricos del carro 8, platina 10 y columna 12 para el movimiento del sensor 3 de medición a lo largo de los ejes Y, X y Z y consecuentemente su posicionamiento dentro del volumen de medición.

- 15 La máquina 1 de medición provee como resultado –por medio del software basado en algoritmos de tipo conocido- la posición  $x_a$ ,  $y_a$ ,  $z_a$  del sensor 3 de medición en el volumen de medición detectando la posición de las platinas a lo largo de los ejes X, Y y Z respectivos.

- 20 En las condiciones de operación arriba descritas, la posición del sensor 3 de medición es afectada por un error de posición dinámico  $e_x$ ,  $e_y$ ,  $e_z$  con respecto a los valores medidos  $x_a$ ,  $y_a$ ,  $z_a$ , debido al hecho de que la estructura mecánica de la unidad 7 móvil que soporta el sensor 3 de medición (principalmente el montante 8a vertical, el miembro 8c en cruz y el área de conexión entre el extremo superior del montante 8a y el miembro 8c en cruz) experimenta deformación elástica como resultado de las fuerzas ejercidas por los motores eléctricos que mueven las platinas 8 y 10.

La deformación de la unidad 7 móvil de la máquina 1 de medición está ejemplificada en las figuras 3 y 4.

- 25 La figura 3 muestra la deformación causada por el movimiento del carro 8 a lo largo del eje Y. Esta deformación comprende principalmente:

- doblar el montante 8a;
- doblar el miembro 8c en cruz;
- entorchar el montante 8a alrededor del eje Z; y
- entorchar el miembro 8c en cruz alrededor del eje X.

- 30 La figura 4 muestra en cambio la deformación causada por el movimiento de la platina 10 a lo largo del eje X.

Esta deformación comprende principalmente:

- 35
- deformación de la articulación entre el montante 8a y el miembro 8c en cruz;
  - doblar el miembro 8c en cruz;
  - rotación del montante 8a alrededor del eje Y; y
  - traslación del miembro 8c en cruz a lo largo del eje X.

Un sensor 16 de láser también está instalado en la máquina 1 de medición para proveer información sobre la deformación dinámica a la cual la unidad 7 móvil está sometida durante los movimientos del carro 8 y la platina 10 (con respecto a la deformación, véase lo que se dice con referencia a las figuras 3 y 4).

- 40 Con referencia particular a la figura 2, el sensor 16 de láser está alojado en una cavidad 24 longitudinal del miembro 8c en cruz y comprende un emisor 22 de láser dispuesto en un extremo de la cavidad 24 y un objetivo 28 dispuesto en el extremo opuesto de la cavidad 24. El emisor 22 emite un haz 26 de láser que viaja a través de la cavidad 24 en paralelo al eje X e impacta el objetivo 28.

- 45 El emisor 22 está soportado independientemente por una barra 20 vertical, tan rígida como sea posible, que se extiende dentro de una cavidad 19 vertical del montante 8a y tiene un primer extremo 20a inferior fijado rígidamente a la platina 9 (y por lo tanto inmune a la deformación del montante 8a vertical), y un segundo extremo superior que se proyecta desde el montante 8a hacia la cavidad 24 del miembro 8c, en el cual el dispositivo emisor 22 de láser está fijado.

El objetivo 28 consiste de un PSD (Dispositivo Sensible a la Posición, de tipo conocido) el cual detecta desplazamientos en el punto de incidencia del haz 26 de 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 una condición no deformada.

5 Los desplazamientos  $m_y$ ,  $m_z$  del haz de láser detectados sobre el objetivo 28 a lo largo de los ejes Y y Z, junto con otra información permiten trazar hacia atrás (por ejemplo, por medio de técnicas descritas en lo que sigue) la deformación dinámica a la cual la estructura mecánica fue sometida como resultado del movimiento de los ejes Y y X.

10 En una etapa de calibración inicial (bloque 100, figura 2), un modelo M de entrada-salida está definido de manera que describe el comportamiento dinámico de la máquina 1 de medición (esta etapa también se define como identificación de modelo).

15 El modelo M de entrada-salida (figura 6) es multivariable y tiene como entrada ( $u$ ) las corrientes de suministro de los motores para controlar movimientos a lo largo de los respectivos ejes X y Y y como salida ( $y$ ) una pluralidad de cantidades que incluyen la posición  $x_a$ ,  $y_a$  del sensor 3 de medición obtenidas de los ejes de la máquina, los posibles errores  $e_x$ ,  $e_y$  introducidos por la elasticidad de la máquina 1 a lo largo de los ejes X y Y y la deformación  $m_y$ ,  $m_z$  de la máquina medida por el sensor 16 de láser. Los errores  $e_z$  en una máquina de puente pueden ser considerados despreciables.

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

20 un primer modelo M1, el cual recibe como entrada la corriente  $i_y$  del motor del eje Y y provee como salida la posición  $y_a$  a lo largo del eje Y, así como los errores de posición  $e_y$ ,  $e_x$  y las mediciones de deformación  $m_y$ ,  $m_z$  a lo largo de los ejes Y y Z; y

un segundo modelo M2, completamente equivalente al modelo M1, el cual recibe como entrada la corriente  $i_x$  del motor del eje X y provee como salida la posición  $x_a$  a lo largo del eje X, así como los errores de posición  $e_y$ ,  $e_x$  y las mediciones de deformación  $m_y$ ,  $m_z$  a lo largo de los ejes Y y Z.

25 En efecto, cuando se ejerce tensión a lo largo de uno de los ejes, hay una contribución de error principal correspondiente a lo largo del mismo eje y una segunda contribución (debida a los acoplamientos mecánicos) a lo largo del eje ortogonal. El error global de la máquina se da aplicando el principio de superposición a las contribuciones de error provistas por los dos modelos (esta parte será explicada posteriormente).

30 Si se quisieran tener en cuenta también los errores a lo largo del eje Z, los modelos M1 y M2 también tendrían que proveer el error  $e_z$  como resultado y sería necesario proveer un tercer modelo M3 equivalente a los modelos M1 y M2, los cuales reciben como entrada la corriente  $i_z$  del motor del eje Z y provee como salida la posición  $z_a$  a lo largo del eje Z, así como los errores de posición  $e_y$ ,  $e_x$ ,  $e_z$  y las mediciones de deformación  $m_y$ ,  $m_z$  a lo largo de los ejes Y y Z.

35 La definición del primer modelo M1 con respecto a uno de los ejes (el eje Y) se describirá más adelante, en tanto el método de definición del segundo modelo M2 con respecto al otro eje (eje X) se da completamente equivalente.

Como se ha dicho, el modelo M1 tiene la corriente  $i_y$  como cantidad de entrada  $u$ . Las cantidades  $y$  de salida son:

- posición  $y_a$  a lo largo del eje Y provista por la máquina 1;
- deformación  $m_y$ ,  $m_z$  a lo largo de los ejes Y y Z, medida por el sensor 16 de láser; y
- error de posición  $e_y$ ,  $e_x$  a lo largo de los ejes Y y X medidos por el transductor 15 de posición bidimensional.

40 Las ecuaciones diferenciales que caracterizan el modelo M1 son:

$$\dot{x} = Ax + Bu + K\varepsilon$$

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

en donde

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

En particular,

$$u = [Iy]$$

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

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

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} \\ b_{21} \\ b_{31} \\ b_{41} \\ b_{51} \\ b_{61} \end{bmatrix}$$

5

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

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} \\ d_{21} \\ d_{31} \\ d_{41} \\ d_{51} \end{bmatrix}$$

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

5 Con respecto a la definición del proceso de innovación, se hace referencia al libro de Lennart Ljung titulado "System Identification - Theory for the user", editor Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J. 1999.

En la etapa de calibración, la máquina está sometida a una serie de ciclos de trabajo que inducen a errores dinámicos  $e_x$ ,  $e_y$  (asumiendo errores  $e_z$  despreciables), los cuales pueden ser medidos convenientemente como se describe más adelante.

10 Una herramienta 15 (figura 7) está fijada sobre el plano 6 de referencia y equipada con una cavidad 35 superior, preferiblemente cónica, configurada para aceptar la punta 32 del sensor 3 sustancialmente sin ningún juego lateral, de tal manera que la punta 32 está bloqueada en la cavidad 35 en cada una de las direcciones de los ejes de coordenadas X y Y.

15 Si se quisiera tener en cuenta los errores  $e_z$  también, la punta 32 también debería estar bloqueada en la dirección Z, por ejemplo por atracción magnética. Para este propósito es suficiente que la punta 32 del palpador 31 sea magnética y que la herramienta 15 este hecha de un material ferromagnético.

Como es sabido, la medición de un punto llevada a cabo por una máquina de medición está definida por la suma de las lecturas de los ejes de máquina  $x_a$ ,  $y_a$ ,  $z_a$  y los componentes de deflexión del palpador 31 a lo largo de los tres ejes (esto es, del vector centro de aleta-centro de punta)  $x_d$ ,  $y_d$ ,  $z_d$ .  $x = x_a + x_d$ ;  $y = y_a + y_d$ ;  $z = z_a + z_d$ .

20 Si la punta 32 del sensor 3 está bloqueada, dejando fuera la deformación elástica dinámica, la suma de las lecturas de los ejes de maquina ( $x_a$ ,  $y_a$ ,  $z_a$ ) y las deflexiones del palpador 31 ( $x_d$ ,  $y_d$ ,  $z_d$ ) a lo largo de cada uno de los tres ejes es constante, definida por la coordenada de la punta 32 a lo largo del eje en cuestión.

Si el sistema de referencia es escogido con el origen en el centro de la punta, entonces

$$x_a + x_d = 0; y_a + y_d = 0; z_a + z_d = 0$$

25 Debido a la deformación elástica de la estructura de la máquina, en realidad las lecturas de los ejes de la máquina son afectadas por los errores de posición  $e_x$ ,  $e_y$ ,  $e_z$  y por lo tanto las expresiones previas se convierten en:

$$x_a + e_x + x_d = 0; y_a + e_y + y_d = 0; z_a + e_z + z_d = 0$$

de la cual es fácil calcular los errores como una función de las lecturas de los ejes de máquina y las deflexiones de

la sonda:

$$ex = - (xa + xd); ey = - (ya + yd); ez = - (za + zd)$$

5 Para llevar a cabo la calibración del modelo M1, el sensor 3 es sometido a un ciclo de movimiento por la unidad móvil de la máquina que comprende oscilaciones de pequeña amplitud a lo largo de la dirección Y, por ejemplo de acuerdo con la ley del movimiento sinusoidal.

Con el fin de describir el comportamiento dinámico de la máquina a medida que cambia la frecuencia de excitación, el ciclo de movimiento se lleva a cabo con frecuencias variables entre un valor mínimo definitivamente por debajo de 5 Hz, por ejemplo 1 Hz y un valor máximo definitivamente mayor que 50 Hz, por ejemplo 120 Hz (figura 8).

10 Preferiblemente, el ciclo de movimiento comienza en a frecuencia mínima (por ejemplo 1 Hz); la frecuencia se incrementa progresivamente de manera continua hasta que se alcanza el valor máximo (por ejemplo 120 Hz-figura 9).

A frecuencias bajas (por ejemplo hasta 40-50 Hz) la amplitud del movimiento está condicionada principalmente por los límites del movimiento relativo del palpador 31 con respecto a la aleta 30, puesto que la punta 32 del palpador está bloqueada.

15 A frecuencias más altas, la amplitud del movimiento debe ser reducida para trabajar en el rango de linealidad del control del motor (figura 9).

Durante la etapa de calibración, las cantidades de entrada u y las cantidades de salida y son muestreadas, por ejemplo, con una frecuencia de muestreo de 500 microsegundos, y almacenadas.

20 Las muestras de las cantidades de entrada y salida son suministradas a un algoritmo de identificación que, con una metodología de probabilidad de máximos aplicada a un modelo de innovación lineal caracterizado por un quintuple de matrices A, B, C, D y K identifica el modelo M1 de entrada-salida tal como está descrito por el sistema indicado anteriormente de ecuaciones diferenciales (para la definición del algoritmo de probabilidad máxima puede hacerse referencia al libro de Lennart Ljung titulado "System Identification - Theory for the user", editor Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J. 1999).

25 Hablando estrictamente, el modelo no es constante a lo largo del volumen de medición de la máquina, por lo cual se llevan a cabo varias etapas de calibración similares a las descritas para cubrir el volumen de medición completo.

30 La variabilidad del modelo con respecto a los ejes X y Z, que es la razón por la cual el volumen de medición está necesariamente dividido en una pluralidad de secciones (por ejemplo, en nueve secciones: inferior-izquierda, fondo-centro, fondo-derecha, centro-izquierda,...) en los cuales se han definido los modelos M1a, M1b, M1c,...M1n han sido definidos.

Un modelo M1compl exhaustivo puede ser definido de manera que se aproxime a los diversos modelos M1a, M1b, M1c,...M1n en el volumen de medición.

35 En particular, se ha encontrado que las matrices A, B, C, D y K de los diversos modelos son sustancialmente constantes en el volumen de medición, mientras que solamente una parte de la matriz C cambia en el volumen de medición.

El modelo M1compl exhaustivo comprende por lo tanto las matrices A, B, D y K que no varían en el volumen de medición y una matriz C que tiene una porción (las filas corresponden a las señales de error ex, ey) con parámetros variables, con base en las coordenadas de los ejes X y Z y por lo tanto variables en el volumen de medición:

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

40 Esta función  $C=C(xa, za)$  es una función no lineal con respecto a los ejes X y Z y se obtiene interpolando las matrices C de los diversos modelos M1a, M1b, M1c,...M1n, en las diversas secciones del volumen de trabajo con funciones b-acanaladura (con respecto a la definición de las funciones acanaladura, hágase referencia al libro de M. Broen, C Harris titulado "Neurofuzzy Adaptive Modelling and Control", editor Prentice Hall International (UK) Limited 1994).

45 Siguiendo la definición del modelo exhaustivo M1compl que representa la "firma" de la máquina particular que está siendo calibrada, la etapa 100 es seguida entonces por una etapa 200 en la cual un filtro 1 de estimación está diseñado partiendo del modelo exhaustivo M1compl.

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

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

$$y = C1x + D1u$$

$$z = C2x + D2u$$

5

donde:

$$u = [Iy]$$

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

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

10

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

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} \\ b_{21} \\ b_{31} \\ b_{41} \\ b_{51} \\ b_{61} \end{bmatrix}$$

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

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

$$D1 = \begin{bmatrix} d_{11} \\ d_{21} \\ d_{31} \end{bmatrix}$$

$$D2 = \begin{bmatrix} d_{41} \\ d_{51} \end{bmatrix}$$

5

Dentro de los resultados, se hace distinción entre los medidos (indicados por el símbolo y en el sistema antes listado) y los no medidos, excepto el objetivo de estimación (indicado por el símbolo z en el sistema antes listado).

10

La matriz C1 contiene las primeras tres filas de la matriz C y la matriz C2 contiene las dos últimas filas de la matriz C. De manera similar, la matriz D1 contiene las primeras tres filas de la matriz D y la matriz D2 contiene las dos últimas filas de la matriz D.

Con respecto a la variabilidad del volumen de medición, de acuerdo con esta nueva representación del modelo, solamente las matrices C2 son funciones efectivamente de las posiciones de los ejes X y Z, mientras que todas las matrices son constantes:

$$C2 = C2(x_i, z_i)$$

15

El filtro 1 de estimación está diseñado con técnicas analíticas de filtración robusta (en este aspecto, hágase referencia al libro de P. Colaneri, A. Locatelli and J. C. Jeromel titulado "Control theory and design, a RH2-RH-inf viewpoint", editor Academic Press, 1997) sobre la base del modelo M1 compl exhaustivo identificado previamente.

Una técnica efectiva que permite que la precisión de la estimación se mejore consiste en la aceptación de que dicho filtro suministra un estimativo retardado en el tiempo (interpolación). Esta técnica está descrita, por ejemplo, en el artículo de P. Bolzerem, P. Colaneri and G. De Nicolao titulado "Discrete-Time H-Infinity fixed lag smoothing" IEEE Trans. On Signal Processing, Vol. 52, No. 1, pp. 132-141, 2004.

- 5 En otras palabras, en el tiempo (t) la estimación provee un estimado de la deformación dinámica con respecto al tiempo (t-Delta). Delta es un retardo en el tiempo que es suficientemente pequeño para no poner en riesgo la eficiencia de la máquina al hacer las mediciones tomadas fácilmente disponible, pero es suficientemente grande para mejorar la precisión del estimativo. En la práctica, se ha encontrado que un valor de delta igual a unos pocos cientos de segundo es adecuado.
- 10 En respuesta a los valores u de entrada y a las cantidades y de salida medidos (las mediciones y a lo largo del eje Y y los valores de deformación my, mz), el filtro de estimación M1 provee un estimativo del error.

El filtro M1 de estimación es representado por las ecuaciones:

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

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

- 15 en donde y es el vector de los resultados medido por la máquina y u es el vector de las entradas, y donde las matrices A, K son los resultados del diseño de la estimación partiendo las matrices A, B, K, C1, D1, de acuerdo con las técnicas de filtración robustas antes mencionadas.

De esta manera, el filtro M1 de estimación provee como resultado un estimativo dinámico del error.

- 20 Siguiendo su definición, las matrices del filtro M1 de estimación de un tipo lineal, son almacenadas e integradas en el software de medición de la máquina para estimación del error desconocido (bloque 400).

Las operaciones descritas más arriba son repetidas, *mutatis mutandis*, con respecto a los errores ex (y si es necesario ez), para la definición de un modelo M2 (y si es necesario M3) y un filtro M2 de estimación (y si es necesario M3).

- 25 En particular, para la definición del modelo M2, el sensor 3 es sometido a oscilaciones de amplitud pequeña mediante la unidad móvil de la máquina a lo largo de la dirección X, utilizando la ley de movimiento sinusoidal y frecuencia variable tal como se describe con referencia al modelo M1.

Los resultados que provienen de los filtros M1 y M2 (y si es necesario M3) se agregan entre sí de acuerdo con el principio de superposición.

- 30 El método antes descrito es un ejemplo no limitativo de cómo las mediciones my, mz pueden ser utilizadas analíticamente para estimar el comportamiento dinámico de la máquina. Naturalmente, es posible utilizar cualquier otro método analítico adecuado para el propósito.

El método antes descrito puede ser aplicado a la calibración del modelo de máquinas de puente equipadas con sensores de láser usados para detectar otros tipos de deformación, u otros tipos de máquinas de medición (por ejemplo, brazo horizontal, grua, etc.), tal como se ilustra en la solicitud de Patente EP-A-2167912.

- 35 Las ventajas que pueden ser alcanzadas con la presente invención son evidentes a partir del examen de sus características.

- 40 En particular, la calibración del modelo para la corrección de errores dinámicos sobre la máquina se lleva a cabo de una manera simple y rápida, con la máquina en su configuración de medición y sin restauración a instrumentos de medición tales como el sensor bidimensional tal como se describe en los documentos de la técnica anterior mencionados.

Finalmente, se entiende que pueden hacerse cambios y modificaciones al método descrito sin salir del alcance de la protección definida por las reivindicaciones.

En particular, el ciclo de movimiento no necesariamente requiere consistir de un barrido de frecuencia continuo. Es posible adoptar otras técnicas de excitación, utilizando leyes de movimiento diferentes y no periódicas, en tanto el

espectro de frecuencia sea representativo de las condiciones dinámicas de uso. Por ejemplo, los desplazamientos podrían basarse en pulsos pseudoaleatorios, con un espectro de frecuencia similar al del ruido blanco.

Además, el palpador podría ser del tipo pivotante, esto es, que tienen dos grados de libertad rotacional con respecto a la aleta alrededor de dos ejes perpendiculares a su propio eje, en vez de cartesiano (como se muestra en la figura 7).

5

**REIVINDICACIONES**

1. Un método de calibración de un modelo matemático de una máquina de medición para la compensación de errores debidos a deformación dinámica, que comprende:
  - 5 una unidad (7) móvil para mover una sonda (3) de palpador en un volumen de medición, comprendiendo la unidad (7) móvil al menos un miembro (8; 12; 42; 56) móvil a lo largo de un eje bajo la fuerza de impulsión de medios (13) de impulsión, comprendiendo la sonda un palpador (31) equipado con una punta (32) y
    - 10 un sensor configurado para detectar en tiempo real al menos una cantidad (mx, my) correlacionada con la deformación dinámica de dicha unidad (7) móvil, en donde el modelo provee, en respuesta a al menos una cantidad de entrada correlacionada con una señal de control de dichos medios (13) de impulsión, una pluralidad de cantidades de salida que comprenden al menos un componente del error de medición introducido por dicha deformación y al menos dicha cantidad detectada por dicho sensor,
      - comprendiendo el método de calibración las etapas de:
        - controlar dicha unidad (7) móvil para llevar a cabo un ciclo de movimiento capaz de generar deformación dinámica;
        - 15 recolectar una pluralidad de muestras de la cantidad de entrada y de las cantidades de salida durante el ciclo de movimiento;
        - almacenar dichas muestras; y
        - suministrar dichas muestras a un algoritmo de identificación para definir dicho modelo,
        - 20 caracterizado porque dicho ciclo de movimiento comprende oscilaciones de frecuencias variables y se llevo a cabo manteniendo una punta (32) del palpador (31) de la sonda (3) fija, con una ley de amplitud menor que el rango de desplazamiento de la punta del palpador con respecto a la aleta de retención de dicha sonda (3) y un espectro de frecuencia representativo de las condiciones dinámicas de uso de la máquina.
  2. El método de acuerdo con la reivindicación 1, caracterizado porque dicho ciclo de movimiento comprende una serie de oscilaciones a lo largo de al menos un eje.
  - 25 3. El método de acuerdo con la reivindicación 2, caracterizado porque dichas oscilaciones son de frecuencia variable.
  4. El método de acuerdo con la reivindicación 3, caracterizado porque comprende la etapa de variar la frecuencia de dichas oscilaciones de una manera continua a partir de un valor mínimo hasta un valor máximo.
  5. El método de acuerdo con la reivindicación 4, caracterizado porque dicho valor mínimo está por debajo de 5 Hz.
  6. El método de acuerdo con la reivindicación 4 o 5, caracterizado porque dicho valor máximo es mayor de 50 Hz.
  - 30 7. El método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 3 a 6 caracterizado porque la amplitud de la oscilación se reduce a medida que se incrementa la frecuencia, de tal manera que mantiene el control de dicha unidad móvil a lo largo de dicho eje en condiciones de linealidad.
  8. El método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones precedentes, caracterizado porque dicho sensor es un sensor de láser que comprende un emisor (22) fijado a una primera porción de un miembro (8) móvil de dicha unidad (7) móvil y un objetivo (28) fijado a una segunda porción de dicho miembro (8) móvil, y que dicha cantidad detectada por dicho sensor es el desplazamiento de un punto de incidencia del haz (26) de láser sobre el objetivo (28) con respecto a una posición de referencia correspondiente a una condición no deformada de dicha unidad (7) móvil.
  - 35 9. El método de acuerdo con la reivindicación 8, caracterizado porque dicha etapa de detección del desplazamiento del punto de incidencia de dicho haz de láser se lleva a cabo por medio de un Dispositivo Sensible a la Posición (PSD) (28) que define dicho objetivo.
  - 40

FIG. 1

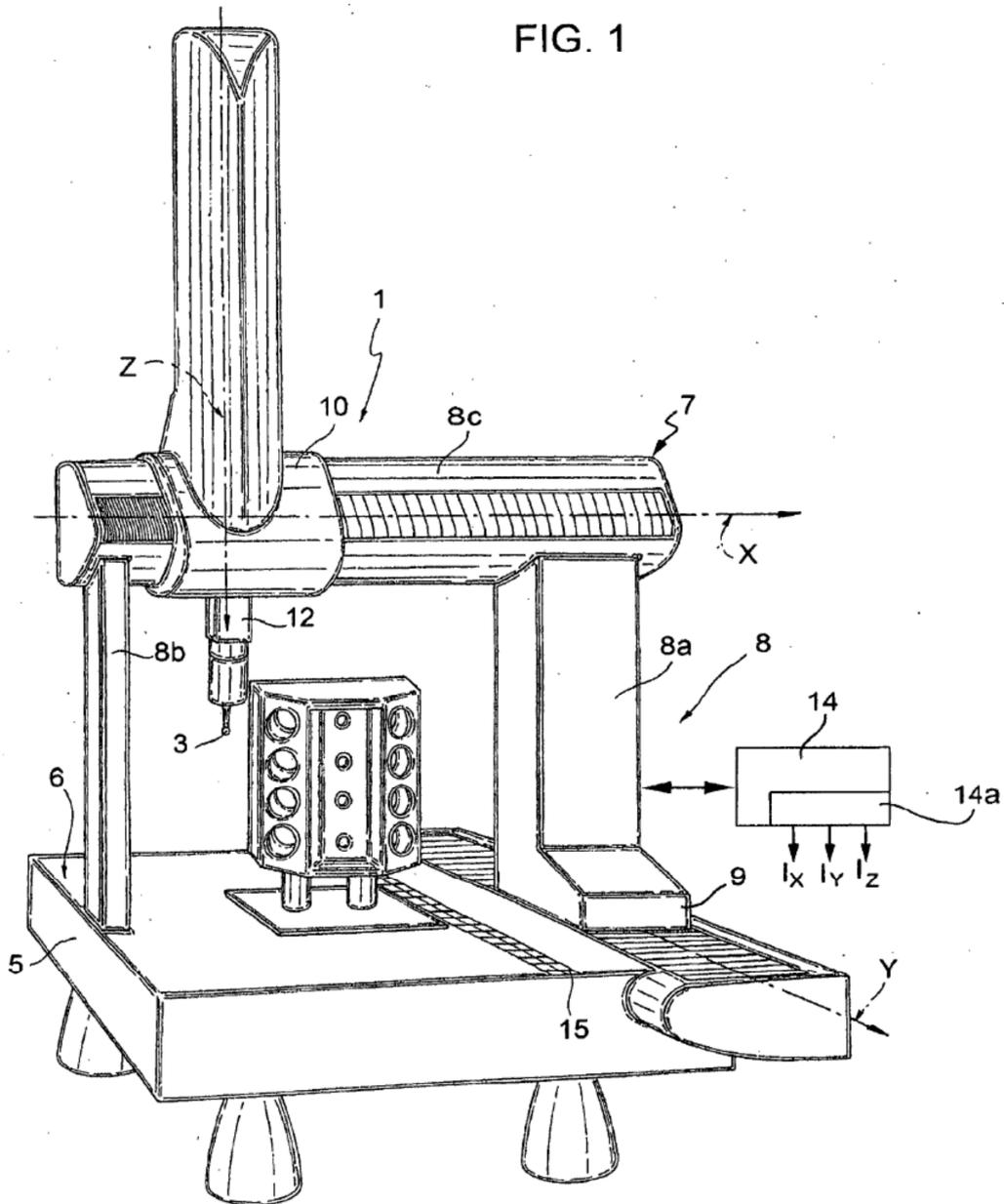




FIG. 3

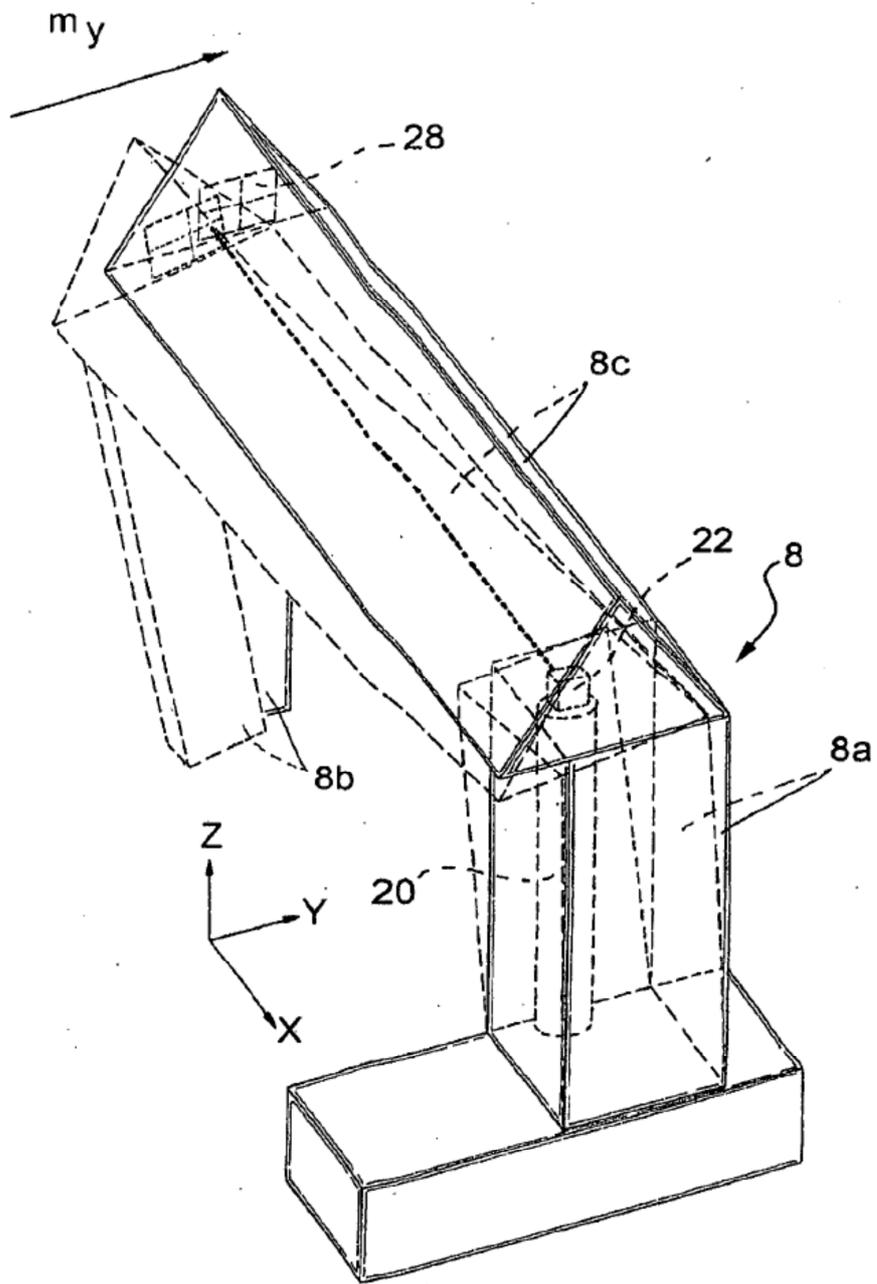


FIG. 4

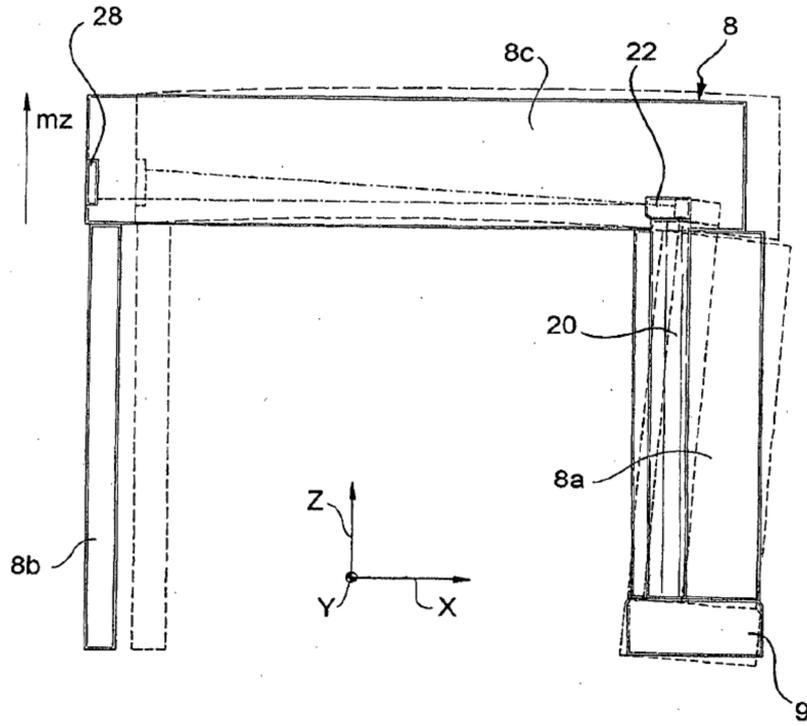


FIG. 5

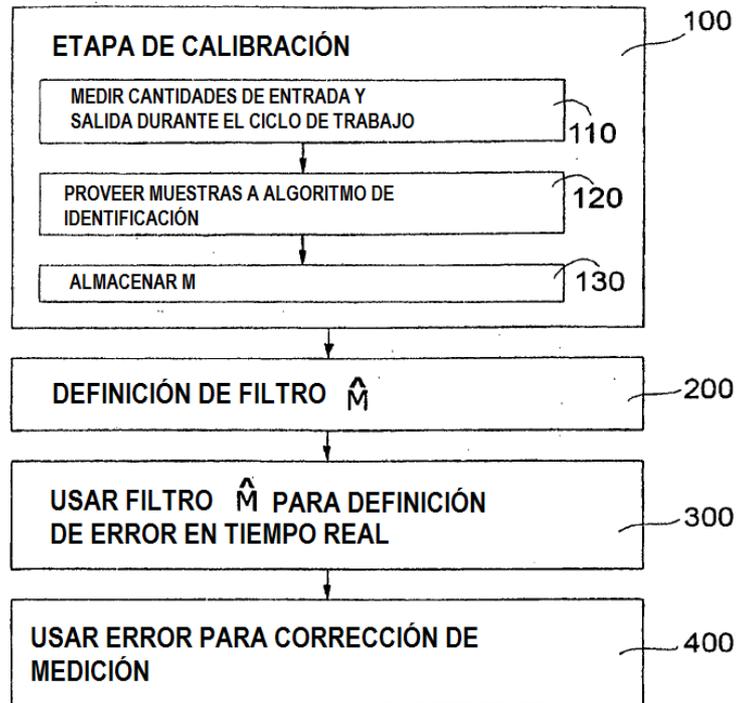
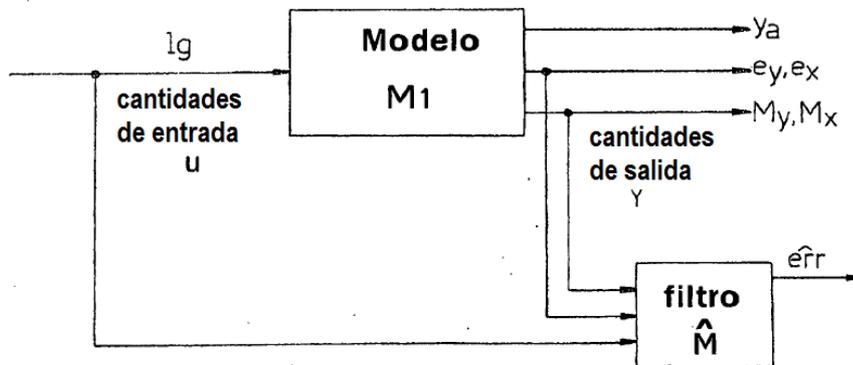


FIG. 6



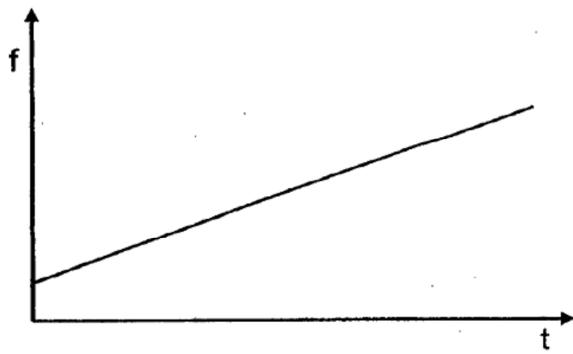
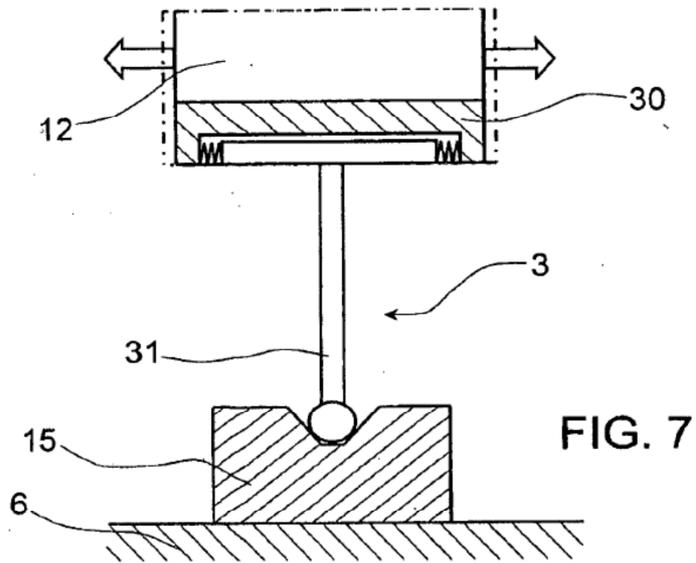


FIG. 8

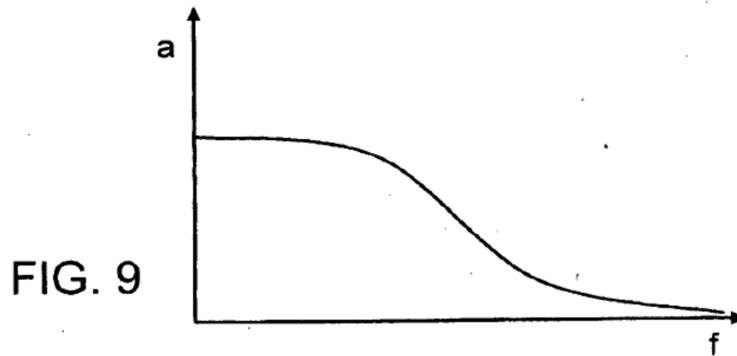


FIG. 9