

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 623 549**

51 Int. Cl.:

B25J 9/16 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **08.08.2012 PCT/FR2012/051871**

87 Fecha y número de publicación internacional: **21.02.2013 WO13024227**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **08.08.2012 E 12758556 (0)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **01.02.2017 EP 2741893**

54 Título: **Método de control de una máquina con actuación redundante paralela, dispositivo de control asociado y máquina**

30 Prioridad:

12.08.2011 FR 1102509

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

11.07.2017

73 Titular/es:

**CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE (C.N.R.S.) (50.0%)
3, rue Michel-Ange
75794 Paris Cedex 16, FR y
TECNALIA FRANCE (50.0%)**

72 Inventor/es:

**PIERROT, FRANÇOIS;
CHEMORI, AHMED y
MICHELIN, MICAËL**

74 Agente/Representante:

IZQUIERDO BLANCO, María Alicia

ES 2 623 549 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).

Método de control de una máquina con actuación redundante paralela, dispositivo de control asociado y máquina

Descripción

- 5
- [0001]** La invención se refiere a un método y un dispositivo para controlar un controlador de accionamiento paralelo redundante, y un controlador controlado por un dispositivo de este tipo y/o de acuerdo con un método de este tipo. La invención se extiende a una máquina, especialmente un robot de manipulación, de accionamiento paralelo redundante para aplicaciones a altas velocidades y aceleraciones elevadas.
- 10 **[0002]** En las tareas robóticas realizadas a frecuencias muy altas, se conoce el uso de robots - especialmente robots de manipulación - llamados "paralelos", es decir que tiene un marco y un móvil impulsado simultáneamente por varias transmisiones mecánicas de accionamiento paralelo. Esta multiplicación de la transmisión de accionamiento mecánica proporciona una potencia del motor mayor en comparación con la inercia del móvil (herramientas, objetos a ser movidos, etc.). Velocidades de desplazamiento y altas aceleraciones pueden ser alcanzadas por tales dispositivos cuyo funcionamiento se conoce como "redundante" si tienen más transmisiones mecánicas motoras que
- 15 presenta grados móviles de libertad en el espacio. Por ejemplo, el manipulador paralelo "R4" descrito por Corbel et al. en "Towards 100g with PKM. Is actuation redundancy a good solution for pick and place?" in Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 4675-4682, 2010, comprende un móvil accionado por cuatro actuadores a través de cuatro transmisiones mecánicas. El móvil comprende un dispositivo de agarre y la herramienta es móvil en el espacio a lo largo de tres grados de libertad.
- 20 **[0003]** Por lo tanto, se sabe que los procesos de control de controlador de operación paralela redundante, en la que un camino de conjunto móvil se convierte en trayectorias de consignas de los accionadores de las transmisiones mecánicas motoras. Estas trayectorias de consignas de actuadores se comparan con una medición de la posición del accionador, antes de procesarse por un módulo electrónico de procesamiento, por ejemplo, de tipo derivado proporcional (PD) o proporcional-integral-derivada (PID) . Por tanto, este módulo de procesamiento produce un control de actuadores.
- 25 **[0004]** En algunos de estos métodos conocidos un término de regulación por acción anticipatoria (a veces llamado "feed-forward" en inglés) de cada accionador se añade al control de actuadores.
- [0005]** Sin embargo, muchos inconvenientes permanecen en estos procedimientos conocidos que limitan el rendimiento de los controladores de funcionamiento en paralelo redundante.
- 30 **[0006]** De hecho, en un controlador de accionador redundante en paralelo, al menos un grado de libertad del móvil depende de las posiciones de al menos dos actuadores. Sin embargo, la regulación y el control de los actuadores se hacen de medidas de posición de los propios actuadores y no del móvil. De modo que errores geométricos inevitables (calefacción térmica, tolerancia de fabricación, elasticidad, etc.) pueden dar lugar a dos actuadores que
- 35 tienen comportamientos contradictorios para colocarse cada uno en su posición deseada (que corresponde a una posición de referencia del movimiento) y por lo tanto conducir al desarrollo de tensiones internas importantes.
- [0007]** Estas tensiones internas son incluso más grandes que el módulo de procesamiento (o controlador) teniendo un término integral que acumula con el tiempo los errores entre consigna y medición de las posiciones de actuadores y, por tanto, aumenta las fuerzas mecánicas ejercidas por dos actuadores que ejercen esfuerzos
- 40 antagónicos. En la práctica, las capacidades de aceleración máxima de una máquina de este tipo conocido se tienen que fijar para evitar un fallo mecánico.
- [0008]** Además, otros inconvenientes continúan, como el posicionamiento incorrecto del móvil. De hecho, los actuadores raramente alcanzan su posición deseada, permaneciendo activos y causando pequeños movimientos (del orden de magnitud de imperfecciones geométricas) del móvil incluso cuando se requiera una posición de
- 45 consigna estática del móvil por el programa de control del controlador.
- [0009]** Además, el procesamiento de varias señales de error de posición de los accionadores paralelos requiere recursos y tiempos de cálculo importantes en el caso de procesamientos complejos. De hecho, el tiempo de realización de cada bucle control-comando es incluso más largo que el procesamiento de señales de error es en sí mismo largo.
- 50 **[0010]** Por tanto, la invención tiene por objeto superar estos inconvenientes.
- [0011]** La invención pretende, en particular, proporcionar un método de control de un controlador de accionamiento paralelo redundante que es eficaz en la puntualidad y, en particular que logra altas aceleraciones.
- [0012]** La invención también tiene como objetivo proporcionar un procedimiento de este tipo para la obtención de una alta precisión de posicionamiento de los móviles.
- 55 **[0013]** La invención también tiene por objeto proporcionar un método tal para el control de un único controlador de accionador redundante paralelo y tiempo de cálculo corto y puede implementarse con recursos informáticos convencionales.
- [0014]** La invención pretende especialmente proporcionar un método de este tipo compatible con los errores geométricos inevitables de un controlador de este tipo.
- 60 **[0015]** La invención pretende además proporcionar un método de este tipo cuya puesta en práctica es de bajo costo, en particular, que sólo requiere software o cambios electrónicos en un dispositivo de control.
- [0016]** En todo el texto, el término "móvil" significa cualquier combinación de herramienta y/o un objeto que ha de moverse, y/o una placa, etc. situándose en el extremo de una cadena mecánica y cinemática del robot, y cuyos movimientos son el objeto de la utilización del controlador.
- 65 **[0017]** La invención se refiere por tanto a un método de control de un robot que comprende:

- un marco,
- una impulsión con respecto móvil al marco por una pluralidad de transmisiones mecánicas de un número estrictamente mayor que el número de grados de libertad del móvil, engranajes paralelos entre sí y cada uno accionado por al menos un accionador que comprende:

- 5
- un cuerpo fijo al marco,
 - un miembro de accionamiento de una transmisión mecánica,
 - un sensor de posición adaptado para producir una señal, siendo dicha señal de posición medida representativa de una posición del elemento de accionamiento, en el que, para cada uno de los accionadores, una señal, dicha señal de error de accionamiento se produce mediante la comparación de la señal de posición medida de dicho dispositivo de accionamiento y una señal de consigna de posición de dicho accionador, caracterizado porque:
- 10
- las señales de error de accionamiento se convierten en una señal, dicha señal de error móvil, de error de posición del móvil mediante la aplicación de datos que representan la cinemática de transmisiones mecánicas,
 - la señal de error móvil es procesada por un módulo de procesamiento adaptado para generar una fuerza a ser aplicada a la señal inalámbrica,
 - dicha señal de fuerza se convierte en señales de control para los actuadores mediante la aplicación de datos que representan las transmisiones mecánicas cinemáticas.
- 15
- 20

[0018] Los actuadores de acuerdo con la invención pueden seleccionarse de cualquier tipo de accionador, tales como motores rotativos, cilindros, etc. El cuerpo de cada accionador se fija preferentemente estacionario en el marco de la máquina, de modo que el elemento de accionamiento móvil de cada accionador es móvil con respecto al marco.

[0019] El miembro operativo móvil de un accionador es la parte móvil para comunicar una potencia mecánica: por ejemplo, el rotor de un motor rotativo, la varilla móvil de un accionador, etc.

[0020] Las transmisiones mecánicas están conectadas cada una a al menos un elemento de accionamiento de un accionador y son accionados por los actuadores. Cada transmisión mecánica también está conectada al móvil, a fin de transmitir un movimiento (o esfuerzo). El número de transmisiones mecánicas accionadas conectadas al móvil es mayor que el número de grados de libertad del móvil, se trata de un controlador de accionamiento en paralelo redundante, es decir un controlador cuyas transmisiones mecánicas están en paralelo. Así, el controlador tiene una cinemática paralela, y un accionador redundante que incluye un accionamiento de cada una de las transmisiones en paralelo. El controlador es en particular diferente de un controlador de accionamiento en serie redundante cuyas transmisiones están en serie las unas tras las otras, accionándose cada una por accionamiento redundante, pero conectándose el móvil directamente mecánicamente a un número de transmisiones inferior a su número de grados de libertad.

[0021] Las señales (posición de consigna, de control, ...) son ventajosamente señales electrónicas, en particular señales digitales. Para que el módulo de procesamiento sea ventajosamente un circuito electrónico, o una función de software equivalente a un circuito electrónico.

[0022] Cada señal de error actuadora es generada por la comparación - en particular por sustracción - de la señal de comando de posición del accionador a la posición medida de dicho elemento de accionamiento. Una señal de error actuadora es específico a un accionador particular, de manera que cada uno de los actuadores se asocia a una señal de error actuadora que le es particular.

[0023] La invención consiste en tratar (módulo de procesamiento) la señal de error móvil y no una pluralidad de señales de error de actuadores (en relación con las posiciones de los actuadores). La señal de error móvil se obtiene mediante la conversión de todos los accionadores señales de error por un modelo cinemático de las transmisiones mecánicas.

[0024] A pesar de que la señal de error móvil es equivalente a una posición del error móvil, que no se corresponde con el error de posición real del móvil entre una posición de conjunto del móvil y la posición real del móvil. De hecho, debido a las imperfecciones geométricas de las transmisiones mecánicas, el error real de posicionamiento del móvil no es cero cuando la señal de error de movimiento representa un valor de cero.

[0025] Sin embargo, los inventores han determinado que este método elimina cualquier conflicto entre el accionamiento de una pluralidad de actuadores.

[0026] La invención permite además mejorar el tiempo de procesamiento de un proceso según la invención, especialmente cuando el procesamiento realizado por el módulo de procesamiento es complejo. De hecho, el módulo procesa sólo la señal de error móvil de procesamiento en lugar de una pluralidad de señales de error actuadoras.

[0027] La invención también permite enviar señales de control a los actuadores, que no son contradictorias, ya que se derivan de la misma señal de error móvil, y por lo tanto la misma señal de esfuerzo (obtenida mediante el procesamiento de la señal de error por la unidad de procesamiento móvil), homogénea a una fuerza que debe aplicarse al móvil.

[0028] Así, en un método de acuerdo con la invención, los errores de posición del accionador no están corregidos individualmente, pero la suma del error de posición del accionador (ponderada por un modelo cinemático de las transmisiones mecánicas con el móvil) es corregida. Por lo que los inventores han logrado eliminar los actuadores

de control de venta libre, a pesar de posibles defectos geométricos del controlador.

[0029] Por lo tanto, la invención proporciona, por primera vez, un accionamiento autómatas paralelo utilizable a sus capacidades mecánicas de accionamiento, y por lo tanto a velocidades y aceleraciones muy altas.

[0030] Además, de forma inesperada, las mediciones realizadas por los sensores de posición (miembros de accionamiento) de los actuadores cuando el controlador alcanza una posición detenida de una posición de consigna dada, para determinar los defectos geométricos de controlador en este momento.

[0031] En un método de control de acuerdo con la invención, los defectos geométricos de la máquina (en particular debido a las transmisiones mecánicas) se transfieren al móvil cuya posición final es ligeramente diferente de la posición establecida impuesta.

[0032] Sin embargo, este movimiento del error de posicionamiento no tiene ningún impacto significativo ya que ninguna medición se realiza en la posición del móvil, y se trata generalmente de defectos geométricos mínimos. Estos errores geométricos en el posicionamiento del móvil son incluso más bajos que los errores geométricos del controlador y son generalmente no acumulativos. Además, constantes imperfecciones geométricas en el tiempo, tales como las tolerancias de fabricación, o variables en el largo plazo, como piezas de desgaste, inducen un error estático de posicionamiento de los móviles, de modo que posiciones sucesivas relativas del movimiento son fiables.

[0033] Además, los accionadores en realidad se detienen cuando se alcanza una posición deseada (cerca de los defectos geométricos) de tal manera que el móvil se encuentra perfectamente inmóvil.

[0034] Ventajosamente y de acuerdo con la invención, la señal de comando de posición para el accionador de cada accionador se obtiene mediante la aplicación de los datos representativos de la geometría de las transmisiones mecánicas a una señal representativa de una posición de consigna del móvil.

[0035] Una señal de consigna de posición móvil es típicamente un dato suministrado por un programa de control de un controlador de acuerdo con los movimientos que un operador desea dar al móvil desde el controlador. En un método de acuerdo con la invención, un modelo geométrico de las transmisiones mecánicas que conectan los actuadores móviles para convertir esta señal de consigna de posición del móvil en señales de consigna de posición de los actuadores.

[0036] Ventajosamente y según la invención, el módulo de procesamiento comprende un regulador de tipo PID (proporcional-integral-derivado). Un tal controlador PID puede implementarse, en particular, por un circuito electrónico físico o por una función de software.

[0037] La invención es particularmente ventajosa en el caso de un módulo de procesamiento que tiene un término integral. De hecho, en un método de acuerdo con la invención, la señal de error móvil obtenido a través de la transformación del conjunto de las señales de error y actuadoras de un modelo cinemático de las transmisiones mecánicas siempre se restablece mediante desplazamientos actuadores no antagonistas. De este modo no hay un efecto acumulativo en el tiempo por un módulo de procesamiento que incluye un período completo. Por lo tanto, cuando se alcanza una posición de equilibrio, todos los actuadores se detienen y no se aplica ninguna tensión mecánica.

[0038] Además, ventajosamente y según la invención, se añade una señal representativa de una aceleración deseada del movimiento multiplicado por un coeficiente de inercia representativo de la inercia del móvil a la señal de esfuerzo.

[0039] Los inventores han determinado que, con una señal de esfuerzo homogénea a una fuerza que se aplica al móvil después de su procesamiento por el módulo de procesamiento, es posible añadir a la misma una señal de la instrucción de posición del móvil derivada dos veces y multiplicada por un coeficiente que representa la inercia del móvil. Por lo tanto, un bucle de control por la acción anticipatoria ("feed-forward"). Por primera vez, por un método de acuerdo con la invención, es posible inyectar directamente en el comando un término de regulador por acción anticipatoria relativa en una aceleración deseada del móvil.

[0040] Este bucle de control por la aceleración deseada del móvil puede mejorar el rendimiento del controlador, en particular para obtener una ejecución más rápida y más precisa.

[0041] Ventajosamente y según la invención, se añade una señal representativa de una aceleración de consigna de cada accionador a la señal de control de dicho accionador.

[0042] En un método según la invención, dos bucles de regulación por acción anticipatoria se pueden prever:

- un primer bucle se suma a la señal de esfuerzo de un término de aceleración de consigna del móvil multiplicado por la inercia del móvil, justo después del procesamiento de la señal de error por el módulo de procesamiento,
- un segundo bucle añade términos de aceleración de consigna de los accionadores multiplicados cada uno por al menos la inercia del accionador correspondiente, a las señales de control de los actuadores justo después de la conversión de la señal de esfuerzo en señales de control de los actuadores.

[0043] Además, ventajosamente y según la invención, la posición del móvil se representa por un vector cuya dimensión es el número de grados de libertad del móvil.

[0044] Un repositorio puede seleccionarse en el que estará representada la posición (y la velocidad y aceleración) del móvil por un vector, por ejemplo una referencia cartesiana de manera convencional. Puede ser un vector unidimensional (escalar) en el caso de un móvil de acuerdo con un solo grado de libertad (por ejemplo una dirección de traslación).

[0045] Además, ventajosamente y según la invención, todos los miembros de accionamiento que tienen el mismo número de grados de libertad, el conjunto de las posiciones de los actuadores está representado por una matriz cuyas dimensiones son el número de actuadores y el número de grados de libertad de los actuadores.

[0046] Sin embargo, los accionadores que son generalmente actuadores a un solo grado de libertad (motor de cilindro en funcionamiento, ...), el número de grado de libertad de los miembros operativos del accionador se reduce a uno.

[0047] Por lo tanto, ventajosamente y según la invención, cada accionador que tiene un solo grado de libertad, el conjunto de las posiciones de los actuadores está representado por un vector cuya dimensión es el número de actuadores.

[0048] La representación y el registro de las posiciones del móvil y los órganos de accionamiento bajo una forma vectorial o de matriz permiten accionar un procesamiento de señales numérico.

[0049] Por lo tanto, ventajosamente y según la invención, los datos representativos de la geometría y la cinemática de transmisiones mecánicas están representadas y se almacenan en forma de matrices.

[0050] Por lo tanto, la preparación del vector de las posiciones deseadas de los elementos de funcionamiento del accionador se lleva a cabo mediante la aplicación de un representante de la matriz de la geometría de las transmisiones mecánicas, al vector de posición de destino del móvil.

[0051] De manera similar, las señales de error actuadoras se muestran y se registran en forma de un vector que contiene los diversos valores de error de posición de cada elemento de accionamiento. Este vector, mediante la aplicación de una matriz jacobiana (representativa de un modelo cinemático del controlador) se convierte en un vector de error móvil para ser procesado por el módulo de procesamiento.

[0052] Por el contrario, el vector de fuerza que debe aplicarse al móvil obtenido después del procesamiento del vector de error móvil por el módulo de procesamiento se convierte en un vector de control de los accionadores por la transpuesta de la matriz jacobiana utilizada anteriormente.

[0053] Hay que señalar que la geometría de matriz y cinemática (jacobiana y transpuesta de la jacobiana) no son, por definición, cuadradas en un robot paralelo redundante, y su reversión ha de lograrse por reglas de pseudo-inversión de la matriz.

[0054] Más particularmente, un método según la invención se puede aplicar a al menos dos tipos principales de autómatas de accionamiento paralelo redundante cuyos actuadores son motores rotativos.

[0055] En un primer tipo, los motores accionan cada uno una articulación giratoria. Las transmisiones mecánicas son entonces generalmente brazos paralelos articulados.

[0056] En un segundo tipo, cada uno de los motores acciona una transmisión mecánica flexible, tal como un cable que varía la longitud del móvil por el bobinado-desbobinado del cable. Las variaciones coordenadas de las longitudes de los cables entre los diferentes actuadores redundantes para manipular un móvil en el espacio, especialmente con seis grados de libertad, y mantenerlo en posición mediante cables de tensión.

[0057] La invención se extiende a un control de un dispositivo controlador del accionamiento redundante paralelo adaptado para implementar un método de control de acuerdo con la invención. En particular, la invención se extiende a un dispositivo de control de un autómata que comprende:

- un marco,
- un móvil impulsado con respecto al marco por una pluralidad de transmisiones mecánicas en un número estrictamente mayor al número de grados de libertad del móvil, estando dichas transmisiones mecánicas paralelas entre sí y cada una accionada por al menos un accionador que comprende:

- un cuerpo fijo al marco,
- al menos un miembro de por lo menos una transmisión mecánica de accionamiento,
- un sensor de posición adaptado para producir una señal, estando dicha señal de posición medida y representativa de una posición del elemento de accionamiento,

comprendiendo dicho dispositivo de control de controlador del autómata:

- al menos una memoria que contiene datos representativos de la geometría de las transmisiones mecánicas,
- al menos una memoria que contiene datos representativos de la cinemática de las transmisiones mecánicas,
- un módulo comparador adaptado para producir para cada uno de los accionadores de una señal, dicho accionador señal de error, mediante la comparación de la posición medida de dicho dispositivo de accionamiento y una señal de consigna de posición de dicho accionador,

caracterizado porque comprende además:

- un primer módulo de convertidor adaptado para producir una señal de potencia, siendo una señal de error móvil, de error de posición del móvil mediante la aplicación de datos que representan la cinemática de transmisiones mecánicas,
- un módulo de procesamiento electrónico de dicha señal de error móvil adaptado para ser capaz de producir una señal de fuerza para aplicarse al móvil,
- un segundo módulo de convertidor adaptado para ser capaz de producir señales de control del accionador mediante la aplicación de datos que representan la cinemática de transmisiones mecánicas a la señal de fuerza.

[0058] Un dispositivo de control según la invención puede comprender varias memorias o una única memoria en la que se registran todos los datos, especialmente los datos representativos de la geometría y la cinemática de transmisiones mecánicas.

[0059] Un dispositivo de control según la invención comprende además, preferiblemente, un tercer módulo convertidor adaptado para ser capaz de producir señales de comando de posición de los actuadores de cada accionador mediante la aplicación de datos representativos de la geometría de transmisiones con una señal representativa de una posición deseada del móvil.

5 **[0060]** Además, ventajosamente y según la invención, dicho dispositivo de control comprende además:

- datos representativos de la inercia del móvil almacenado en la memoria,
- un módulo de control adaptado de antemano para procesar una señal representativa de una posición deseada del móvil y que comprende:

10

- dos funciones de derivación con respecto al tiempo en serie, a fin de obtener una señal representativa de una aceleración deseada del móvil,
- una función de multiplicación de la señal representativa de una aceleración del representante de datos móviles de la inercia del móvil con el fin de obtener una señal de fuerza que debe aplicarse a la móvil,

15

- un módulo sumador que añade la señal de ensuerzo y la señal de fuerza que debe aplicarse a la móvil, para generar una señal de esfuerzo corregida.

20 **[0061]** La invención es ventajosamente sencilla de implementar en los controladores existentes como parte de una mejora en estos controladores. De hecho, basta con sustituir un circuito electrónico existente por un dispositivo de la invención, o simplemente añadir el dispositivo según la invención del circuito de control automático, o simplemente cambiar el software de control de controlador cuando está completamente controlado por ordenador.

25 **[0062]** La invención se extiende además a un controlador del accionamiento paralelo redundante que el control se efectúa de acuerdo con un proceso de control de acuerdo con la invención, y un controlador que comprende un dispositivo de control de acuerdo con la invención.

[0063] La invención también se refiere a un método y un dispositivo de control, y un controlador caracterizado en combinación por la totalidad o parte de las características mencionadas anteriormente o a continuación.

30 **[0064]** La invención se extiende a un programa de ordenador que comprende instrucciones de código de programa de ordenador para ejecutar las etapas de un método según la invención cuando dicho programa informático se ejecuta en un sistema informático; así como un producto de programa de ordenador que comprende el programa de ordenador; en particular a un medio de grabación legible por un sistema informático, en el que se graba un programa de ordenador que comprende instrucciones de código de programa de ordenador para ejecutar las etapas de un método según la invención cuando dicho programa informático se ejecuta en un sistema informático.

35 **[0065]** Otros objetos, características y ventajas de la invención aparecerán con la lectura de la siguiente descripción dada a modo de ejemplo no limitante y que se refiere a las figuras adjuntas en las que:

- La Figura 1 es un diagrama de un primer controlador para el perfecto funcionamiento en paralelo redundante individual,
- La Figura 2 es un diagrama del primer controlador para el funcionamiento en paralelo redundante individual que
- 40 tiene defectos geométricos,
- La Figura 3 es un diagrama de bloques funcional de un método de control de un controlador de accionamiento paralelo redundante, en una primera realización de acuerdo con la invención,
- La Figura 4 es un diagrama de bloques funcional de un método de control de un controlador de accionamiento paralelo redundante de acuerdo con un segundo modo de realización de acuerdo con la invención,
- 45 - La figura 5 es un diagrama tridimensional de un segundo controlador en el accionador paralelo redundante.

[0066] El método de la invención (Figuras 3 y 4) puede ser implementado por un sistema informático de procesamiento de datos digitales, en particular mediante un software informático tal como Matlab®. De este modo un dispositivo de control de acuerdo con la invención puede ser un sistema de ordenador (en particular, que comprende

50 al menos una unidad central de procesamiento), conectado a los sensores de posición 3 de los actuadores 2 para la recepción de señales, y a los actuadores (o convertidores de potencia conectados a los accionadores) para controlarlos, estando dicho sistema de ordenador adaptado para implementar un método según la invención, en particular mediante la programación de software.

[0067] Esto no excluye que estos procesos se implementen con circuitos electrónicos físicos adaptados a estos efectos.

[0068] Por lo tanto, en las figuras 3 y 4, los valores X_d , Q_d , Q_m , ΔQ , ΔX , F , Γ , Q_d , X_d , Γ_a , F_a , son vectores (o, en su caso, matrices). X_d y Q_d , en particular son, respectivamente, los vectores de aceleración del conjunto de actuadores, y del móvil; que se obtienen mediante la diferenciación de dos veces con respecto al tiempo los vectores de posición del móvil X_d y de los actuadores Q_d .

60 **[0069]** Una señal de consigna X_d de posición de un móvil 5 se convierte por un convertidor a matriz geométrica representativa de la geometría (y por tanto el efecto de cada uno de los actuadores en la posición del móvil) de las transmisiones 4 mecánicas en señales de consignas Q_d de posiciones de actuadores.

[0070] Además, los sensores 3 miden la posición del accionamiento de los órganos de accionamiento de los actuadores 2, administrando cada uno una señal, midiéndose dicha señal de posición representativa de la medición electrónica. Todas estas señales se agrupan en un vector Q_m .

65 **[0071]** Los vectores Q_d y Q_m se comparan (Q_m se resta a Q_d) para obtener señales de error de actuadores

agrupados en un vector ΔQ .

[0072] Un controlador de perfecto accionamiento redundante en paralelo como se muestra en la Figura 1, comprendiendo dos actuadores 2 lineales montados en traslación en la misma dirección con respecto a un marco 1, y permitiendo un movimiento de traslación de un móvil 5 montado en una corredera integral con el marco 1 en una dirección paralela a la dirección de desplazamiento de los actuadores 2. El móvil 5 está conectado por una transmisión 4 mecánica rígida, tal como una varilla rígida a cada uno de los dos accionadores 2. Por lo tanto, el móvil está móvil a lo largo de un solo grado de libertad y es accionado por dos actuadores - a través de dos transmisiones mecánicas separadas - paralelas, por lo que se trata de un controlador de accionador paralelo redundante.

[0073] Por otra parte, los sensores 3, no mostrados, miden las respectivas posiciones $q1m$ y $q2m$ de los actuadores. Sin embargo, la posición x del móvil no se mide y por lo tanto es desconocido.

[0074] El autómata que se muestra en la Fig 1 es perfecto. De hecho, cuando cada uno de los dos accionadores está en la posición inicial ($q1m = 0$ y $q2m = 0$ o $Qm = (0, 0)$), el móvil es también a su posición original ($x = 0$). Por lo tanto el controlador está en equilibrio ($\Delta Q = (0, 0)$) si la posición de consigna Xd es la posición original ($Xd = 0$). Los actuadores no están en conflicto.

[0075] Sin embargo, en un controlador real, las imperfecciones geométricas son inevitables. Por lo tanto, en la figura 2, un controlador accionador redundante paralelo real se muestra en el que las transmisiones mecánicas presentan un defecto de longitud: son más cortos, respectivamente, de 0,1 y 0,2 con respecto al modelo perfecto en la figura 1. Por lo tanto, con un método de control de la técnica anterior, cuando una posición de consigna $Xd = 0$ del móvil se da, cada uno de los dos actuadores recibe un comando para alcanzar su posición de origen ($q1m = 0$ y $q2m = 0$), que se hace imposible por los defectos geométricos ($\Delta q1 = 0$ y $\Delta q2 = 0$).

[0076] Siempre de acuerdo con un método de la técnica anterior, y con un controlador imperfecto tal como se muestra en la Figura 2, la señal de error actuadora ΔQ es $\Delta Q = (-0,1, 0,2)$ y una posición de equilibrio ($\Delta Q = (0, 0)$) es imposible de alcanzar. En efecto, las señales de control generadas por el módulo de procesamiento están en contradicción y los actuadores se opondrán activamente el uno al otro para alcanzar su posición de ajuste ($q1m = 0$ y $q2m = 0$) a una posible rotura de una transmisión 4 mecánica o de un accionador 2.

[0077] Este efecto se acentúa aún más cuando el módulo de procesamiento 9 comprende un término integral, por ejemplo, un PID. De hecho, el error ΔQ se incrementa en el tiempo en cada bucle de procesamiento por el término integral del PID.

[0078] En el método de acuerdo con la invención como se muestra en la Figura 3, el vector representativo de la señal de error accionadora ΔQ en el espacio de representación de las posiciones de los actuadores se convierte en un vector ΔX representativo de una señal de error móvil, en el espacio de representación de las posiciones del móvil.

[0079] Las siguientes ecuaciones expresan la conversión de ΔQ en ΔX en donde H es una matriz pseudo-inversa (minimizando la norma euclidiana) de la matriz jacobiana Jm :

$$\dot{Q} = Jm \dot{X} \quad (1)$$

$$\dot{X} = H \dot{Q} \quad (2)$$

donde X y Q son los vectores de velocidad respectivamente del móvil 5 y del conjunto de los actuadores 2.

[0080] La ecuación (1) depende de la geometría de la transmisión mecánica 4 y su posición, y por lo tanto corresponde a un modelo cinemático del controlador.

[0081] La validez de estas relaciones se extiende al caso de pequeños incrementos ΔQ , ΔX , y Δt (Δt es un intervalo de tiempo corto, del orden de magnitud de tiempo de procesamiento de un bucle de control de acuerdo con la invención). Así:

$$\Delta Q = Jm \Delta X \quad (3)$$

$$\Delta X = H \Delta Q \quad (4)$$

[0082] ΔX se trata entonces con un módulo 9 de procesamiento que da salida a un vector F representativo de una fuerza o un momento a aplicarse al móvil.

[0083] En un método de control de acuerdo con la invención, ΔX se reduce al mínimo, y no ΔQ . Ahora, si no siempre

existe una configuración del controlador en el que $\Delta Q = 0$, siempre existe al menos una tal configuración $\Delta X = 0$.

[0084] Cuando $\Delta X = 0$, la señal de controlador F del procesamiento de vector ΔX por cualquier módulo de procesamiento es $F = 0$. Por lo tanto, las señales de control enviadas a los accionadores corresponden a los comandos para que los actuadores permanezcan inmóviles. Por lo tanto, no reciben órdenes contradictorias, lo que anula cualquier riesgo de ruptura

[0085] La señal de salida del módulo F de procesamiento 9 puede considerarse como representativa de una fuerza (o de un momento) aplicado al móvil. Esta fuerza F se convierte en fuerzas φ (o momentos) correspondientes utilizados como comandos de actuadores. Por lo tanto, el vector F es convertido por la transpuesta H^T de la matriz H del espacio del móvil al espacio de los actuadores:

$$\Gamma = H^T F \quad (5)$$

[0086] De manera que, cuando $F = 0$, $\Gamma = 0$.

[0087] Las señales de control Γ se utilizan para el control de los actuadores 2 y se convierten ventajosamente en potencia de alimentación de los actuadores.

[0088] Así, en el ejemplo de un autómatas a las defectos geométricos mostrados en la figura 2, una posición de consigna $X = (0)$ del móvil corresponde, por el convertidor 6 (o matriz geométrica), a posiciones de consigna de los actuadores $Q_d = (0, 0)$. Por lo tanto, la medición realizada por los sensores 3 de la posición de los actuadores cuando $X = (0)$ es: $Q = m(0, 1, -0, 2)$. Ningún sensor de posición mide la posición del móvil 5.

[0089] Por lo tanto, se obtiene, a través del primer comparador 7, que resta Q_m a Q_d , el vector $\Delta Q = (-0, 1, 0, 2)$.

[0090] Por lo tanto, el controlador mostrado en la Figura 2 es un controlador simple, de modo que $J_m = (1, 1)$ y de modo que $H = (0, 5, 0, 5)$.

[0091] Por lo tanto, por la ecuación (4) se obtiene: $\Delta X = (0, 0, 5)$.

[0092] ΔX no está relacionada con la realidad de la posición del movimiento: de hecho, en la figura 2, se establecido para consigna $X = (0)$, y mientras que el móvil está en la posición real $X = (0)$, el error ΔX no es cero. Esto resulta del hecho de que los sensores de posición miden solamente la posición de los actuadores 2, y los defectos geométricos de transmisiones mecánicas son inicialmente desconocidos.

[0093] Sin embargo, este error es estático en el tiempo, al menos en cuanto a los defectos geométricos de largo plazo (por ejemplo, tolerancias de fabricación), de manera que los desplazamientos relativos del móvil entre dos posiciones sucesivas son exactos. Además, los defectos geométricos considerados, si pueden conducir a un deterioro del autómatas, son insignificantes en términos de posicionamiento del móvil.

[0094] Dependiendo del módulo de procesamiento 9, una señal F se obtiene para este valor de $\Delta X = (0, 0, 5)$. Esta señal se convierte en el espacio de los accionadores por la relación (5) en la que $H^T = (0, 5, 0, 5)^T$, de modo que $\Gamma = (0, 5F, 0, 5F)$.

[0095] Las señales de control, y por lo tanto los esfuerzos desarrollados por los accionadores son de la misma dirección (la misma señal) y de la misma intensidad, de modo que su movimiento es consistente. Los actuadores se mueven hacia la derecha en la figura 2 hasta que: $Q_m = (0, 15, -0, 15)$, donde $\Delta Q = (-0, 15, 0, 15)$ y por lo tanto después la relación (4) con $H = (0, 5, 0, 5)$: $\Delta X = (0)$.

[0096] Por lo que $\Delta X = (0)$, $F = (0)$ y $\Gamma = (0, 0)$.

[0097] Por lo tanto, aunque un error estático persiste entre la posición de consigna ($Q_d = (0, 0)$) de los actuadores y de su posición real medida ($Q_m = (0, 15, -0, 15)$), y entre la posición de consigna ($X_d = (0)$) del móvil y su posición real ($X = (0, 0, 5)$), el controlador alcanza una posición de equilibrio en la que los actuadores no intentan unir conjuntamente sus posiciones de consigna. El riesgo de ruptura del autómatas se elimina.

[0098] Hay que señalar que la posición X final del móvil no es igual a la posición de consigna X_d , pero difiere ligeramente ($X = (0, 0, 5)$) para obtener $\Gamma = 0$.

[0099] La obtención de $\Delta X = (0)$ y la inyección de este valor en el módulo de procesamiento 9 son particularmente ventajosas cuando comprenden un término integral. De hecho, un pequeño error en la entrada persistente de un regulador 9 de tipo PID por ejemplo, puede conducir rápidamente a los comandos de actuadores altamente antagónicos. La invención permite así obtener una posición del móvil muy cerca de una posición de consigna (cerca de los defectos geométricos), pero permitiendo la inyección de un valor cero en el módulo de procesamiento.

[0100] Además, también es posible, sin la medición de la posición del móvil 5, y simplemente mediante la medición de las posiciones de los actuadores cuando el controlador se detiene en una posición, obtener información sobre los defectos geométricos del autómatas. Así, en el ejemplo presentado anteriormente, se puede deducir a partir de $(q_{2m} - q_{1m}) = 0, 15 - (-0, 15) = 0, 3$ que el conjunto de dos varillas de transmisión mecánica es sustancialmente más corto que 0,3 que lo que se espera. Nada impide integrar esta información en el procedimiento para mejorar aún más el control de los actuadores.

[0101] Ventajosamente, la eficacia de un método de control de un robot de acuerdo con la invención se puede mejorar mediante la adición de un bucle de regulación por acción anticipatoria en el espacio del móvil.

[0102] Por lo tanto, como se muestra en la Figura 4, la posición de consigna X_d del móvil puede derivarse dos veces por dos desviadores 13 en serie, de modo que se obtenga una aceleración deseada de la X_d móvil. Esta aceleración deseada se multiplica por una matriz de inercia I_x representativa de la inercia del móvil en cada grado de libertad del

móvil, a fin de obtener un término homogéneo a una fuerza F_a que se añade por un sumador adicional 10 al vector comparador de esfuerzo que debe aplicarse al móvil obtenido a la salida del módulo de procesamiento 9, y antes de la conversión en el espacio de los accionadores por la matriz H^T .

[0103] Tal bucle de acción anticipatoria por la regulación en el espacio móvil mejora aún más el rendimiento del controlador, especialmente su velocidad para alcanzar una posición, y por tanto su velocidad de ejecución.

[0104] Además, alternativamente o en combinación, se puede prever un bucle de regulación por acción anticipatoria en el espacio de los actuadores. Las posiciones de consigna Q_d de los actuadores obtenidos a partir de las posiciones de consigna X_d del móvil, se derivan dos veces por dos desviadores 14 en serie, a fin de obtener aceleraciones de consigna Q_d de los actuadores. Estas aceleraciones de consigna se multiplican a continuación por una matriz inercial I_q representativa de la inercia de cada uno de los actuadores, de manera que se obtenga un término homogéneo a una fuerza Γ_a , que se añade por un comparador sumador 12 a la señal obtenida a la salida de la matriz H^T , y para formar la señal de control enviada a los actuadores 2.

[0105] Este bucle también mejora el rendimiento de un procedimiento de control de un autómatas de acuerdo con la invención.

[0106] El método de la invención puede ser implementado por la programación informática, por ejemplo utilizando un entorno de desarrollo en tiempo real.

[0107] Un método de la invención permite el control de un autómatas, por ejemplo como se muestra en la Figura 5.

[0108] En este autómatas, cuatro actuadores 2 son motores giratorios orientados de modo que su eje de rotor es ortogonal a los de sus dos vecinos. Los estatores de los cuatro actuadores 2 están unidos a un marco 1.

[0109] El autómatas comprende una placa 5 móvil en el espacio de acuerdo con tres grados de libertad: altura, profundidad y anchura; así se puede por ejemplo elegir un sistema de coordenadas cartesianas para representar su posición en el espacio.

[0110] La placa 5 está conectada por cuatro brazos 4 de transmisión mecánica con cuatro actuadores 2. Los cuatro actuadores, por tanto, actúan en paralelo con el desplazamiento de la placa 5 de acuerdo con tres grados de libertad a través de la cuatro transmisiones mecánicas, de modo que se trata de un ejemplo de un controlador de accionador paralelo redundante.

[0111] Los actuadores forman articulaciones giratorias de las ruedas de los brazos 4 de las transmisiones, por lo que a veces se refiere a "espacio de la articulación" para describir el espacio de actuadores en el que se muestra el conjunto de las posiciones de los actuadores.

[0112] Los cuatro brazos de transmisión 4 están ventajosamente formados cada uno por un brazo 15 integral con el rotor de un accionador 2 por uno de sus extremos y conectado por una junta esférica 16 con su segundo extremo a un antebrazo 17. Cada antebrazo 17 se extiende desde una articulación esférica 16 con un brazo 15 a una articulación esférica 18 con la placa 5. De este modo cada conjunto formado por un brazo 15 y un brazo inferior 17 forma una transmisión de tipo manivela-varilla.

[0113] Ventajosamente, los antebrazos 17 se forman de dos varillas paralelas elásticamente interconectadas. Estas varillas tienen preferentemente extremos cóncavos mantenidos elásticamente en posición sobre las rótulas respectivamente de los brazos 15 y de la placa 5.

[0114] En un autómatas de este tipo, para simplificar el modelado de las matrices de inercia I_x y I_q , se añade la inercia del brazo 15 y de una mitad del antebrazo 17 a la inercia del rotor del accionador correspondiente, y se añade la otra mitad de la inercia del antebrazo 17 a la inercia de la placa 5 móvil.

[0115] Un autómatas de este tipo se utiliza generalmente con una herramienta montada en la placa 5, por ejemplo una herramienta de agarre para la realización de operaciones de muestreo, el desarrollo y posicionamiento de objetos.

[0116] La invención puede referirse a muchas otras variantes no representadas.

[0117] En particular, la invención se aplica a todos los tipos de autómatas de accionador paralelo redundante. Por ejemplo, también se aplica a máquinas en las que un móvil está conectado a los actuadores por medio de cables de tensión, estando cada accionador adaptado para cambiar la longitud del cable mediante su separación del móvil. Un autómatas de este tipo, por ejemplo, tiene ocho cables, accionándose cada uno por un accionador, por lo que se permite desplazar un móvil de acuerdo con seis grados de libertad en el espacio.

[0118] Un método de la invención también se aplica en particular a las máquinas que tienen un número diferente de actuadores de los ejemplos presentados, ya que este número de accionador es mayor que el número de grados de libertad del móvil.

[0119] Por otra parte, nada impide la aplicación de un método de acuerdo con la invención mediante un dispositivo físico del tipo circuito electrónico.

[0120] Muchas de las funciones ventajosamente se pueden añadir en un método de control de acuerdo con la invención. De hecho, otros bucles anticipatorios o de retroalimentación pueden considerarse, pueden insertarse módulos de procesamiento, etc.

[0121] Por otra parte, nada impide que una (o más) transmisión(es) mecánica(s) presenta(n) actuadores adicionales a fin de formar una cadena de transmisión-accionador redundante en serie.

Reivindicaciones

1. Un método para controlar una máquina que comprende:

- 5 - un marco (1),
 - un elemento móvil (5) accionado en relación con dicho marco (1) a lo largo de un cierto número de grados de libertad por una pluralidad de transmisiones mecánicas (4), cuyo número es estrictamente mayor que el número de grados de libertad de dicho elemento móvil, estando dichas transmisiones mecánicas (4) paralelas entre sí y accionadas cada una por al menos un accionador (2) que comprende:
- 10
- un cuerpo fijado a dicho marco,
 - un miembro para accionar una transmisión mecánica (4),
 - un sensor de posición (3) diseñado para producir una señal, llamada señal de posición medida, que representa una posición de dicho elemento de accionamiento,
- 15 De acuerdo con dicho método, para cada uno de dichos actuadores (2), se produce una señal, denominada señal de error del accionador, comparando dicha señal de posición medida de dicho accionador con una señal de consigna de posición de dicho accionador, **caracterizado porque:**
- dichas señales de error del accionador se convierten en una señal de error de posición del elemento móvil, denominado elemento móvil, mediante la aplicación de datos que representan la cinemática de dichas transmisiones mecánicas;
 - dicha señal de error de elemento móvil es procesada por un módulo de procesamiento (9) diseñado para producir una señal de esfuerzo a aplicarse a dicho elemento móvil;
 - dicha señal de esfuerzo se convierte en señales para controlar dichos actuadores (2) aplicando datos que representan la cinemática de dichas transmisiones mecánicas (4).
- 20
- 25

2. El método de acuerdo con la reivindicación 1, **caracterizado porque** dicha señal de consigna de posición de dicho miembro de actuación de cada accionador (2) se obtiene aplicando datos que representan la geometría de dichas transmisiones mecánicas (4) a una señal que representa una posición de punto de referencia de dicho elemento móvil (5).

30

3. El método según la reivindicación 1 ó 2, **caracterizado porque** dicho módulo de procesamiento (9) comprende un controlador del tipo PID.

35

4. El método de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, **caracterizado porque** a dicha señal de esfuerzo se añade una señal que representa una aceleración de consigna de dicho elemento móvil (5) multiplicado por un coeficiente de inercia que representa la inercia de dicho elemento móvil.

40

5. El método de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, **caracterizado porque** una señal que representa una aceleración de consigna de cada accionador (2) se añade a la señal para controlar dicho accionador.

45

6. El método de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, **caracterizado porque** la posición de dicho elemento móvil (5) está representada por un vector cuya dimensión es el número de grados de libertad de dicho elemento móvil.

50

7. El método de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6, **caracterizado porque** con todos los elementos de accionamiento que tienen el mismo número de grados de libertad, todas las posiciones de dichos miembros de accionamiento están representadas por una matriz, cuyas dimensiones son el número de actuadores (2) y el número de grados de libertad de dichos actuadores.

55

8. El método de acuerdo con las reivindicaciones 6 y 7, **caracterizado porque** los datos que representan la geometría y la cinemática de dichas transmisiones mecánicas (4) están representados en forma de matrices.

60

9. Un dispositivo para controlar una máquina que comprende:

- 55 - un marco (1),
 - un elemento móvil (5) accionado en relación con dicho marco por una pluralidad de transmisiones mecánicas (4), cuyo número es estrictamente mayor que el número de grados de libertad de dicho elemento móvil, estando dichas transmisiones mecánicas paralelas y accionándose cada una por al menos un accionador (2) que comprende:
- 60
- un cuerpo fijado a dicho marco,
 - al menos un miembro para accionar al menos una transmisión mecánica,
 - un sensor de posición (3) diseñado para producir una señal, llamada señal de posición medida, que representa una posición de dicho elemento de accionamiento,
- 65

comprendiendo dicho dispositivo para el control de dicha máquina:

- al menos una memoria que contiene datos que representan la geometría de dichas transmisiones mecánicas (4);
- al menos una memoria que contiene datos que representan la cinemática de dichas transmisiones mecánicas (4);
- un módulo comparador (7) diseñado para poder producir una señal, denominada señal de error del accionador, para cada uno de dichos actuadores (2) comparando la señal de posición medida de dicho accionador con una señal de consigna de posición de dicho accionador,

caracterizado porque comprende además:

- un primer módulo convertidor diseñado para ser capaz de producir una señal de error de posición de elemento móvil, denominado señal de error de elemento móvil, aplicando datos que representan la cinemática de dichas transmisiones mecánicas;
- un módulo (9) para procesar electrónicamente dicha señal de error de elemento móvil diseñada para poder producir una señal de esfuerzo a aplicarse a dicho elemento móvil (5);
- un segundo módulo convertidor diseñado para ser capaz de producir señales para controlar dichos actuadores aplicando datos que representan la cinemática de dichas transmisiones mecánicas a dicha señal de esfuerzo.

10. Una máquina con accionamiento paralelo redundante controlada por un dispositivo de la reivindicación 9, que implementa un método de una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 8.

11. Un programa informático que comprende códigos de instrucción de programas informáticos para ejecutar los pasos de un método de una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 8 cuando dicho programa de ordenador se ejecuta en un sistema informático.

12. Un medio de grabación que puede ser leído por un sistema de ordenador, cuyo medio de grabación almacena un programa de ordenador que comprende códigos de instrucción de programa de ordenador para ejecutar los pasos de un método de una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 8 cuando dicho programa de ordenador se ejecuta en un sistema informático.

Fig 1

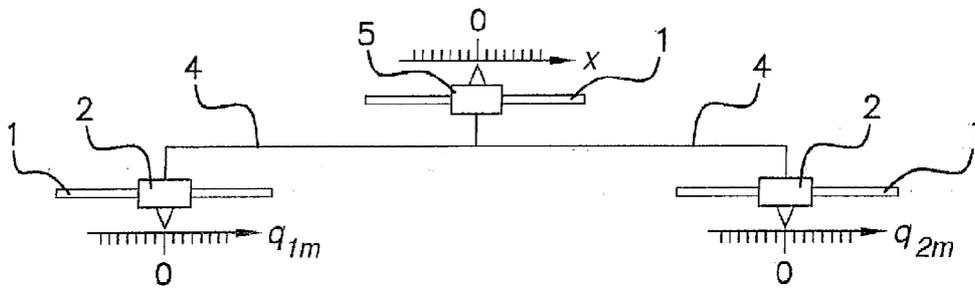


Fig 2

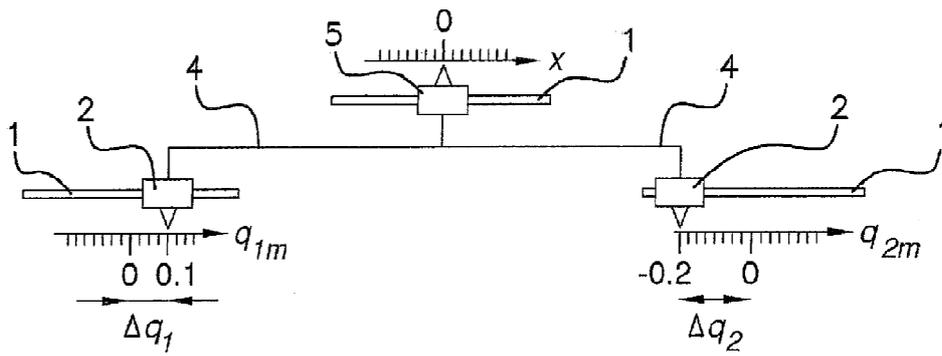


Fig 3

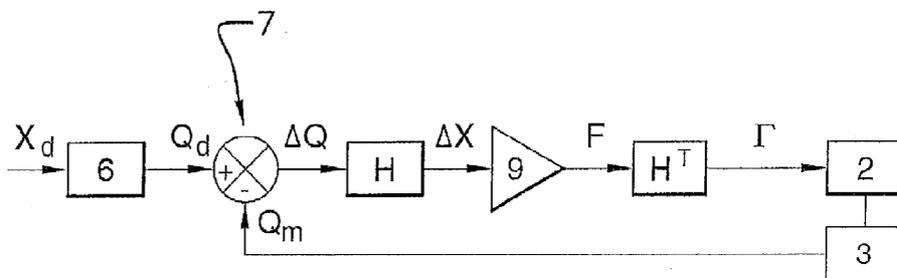


Fig 4

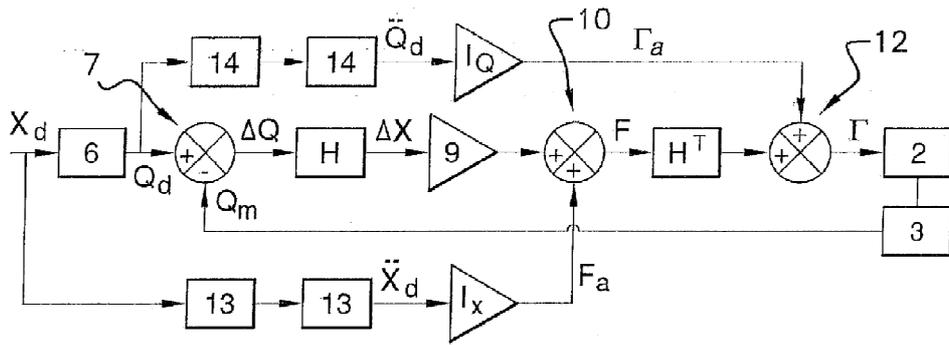


Fig 5

