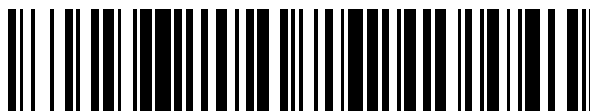


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 659 053**

51 Int. Cl.:

G05B 19/19 (2006.01)

G05B 19/4062 (2006.01)

B25J 9/16 (2006.01)

B62D 57/032 (2006.01)

G05B 13/04 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **03.08.2012 PCT/EP2012/065210**

87 Fecha y número de publicación internacional: **07.02.2013 WO13017676**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **03.08.2012 E 12741354 (0)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **22.11.2017 EP 2740012**

54 Título: **Robot con articulaciones de rigidez variable y procedimiento de cálculo de dicha rigidez optimizada**

30 Prioridad:

04.08.2011 FR 1157171

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

13.03.2018

73 Titular/es:

**SOFTBANK ROBOTICS EUROPE (100.0%)
43 rue du Colonel Pierre Avia
75015 Paris, FR**

72 Inventor/es:

**GOUAILLIER, DAVID y
COLLETTE, CYRILLE**

74 Agente/Representante:

CARPINTERO LÓPEZ, Mario

ES 2 659 053 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

Robot con articulaciones de rigidez variable y procedimiento de cálculo de dicha rigidez optimizada

La presente invención pertenece al ámbito de los robots articulados que pueden desplazarse en una superficie. Más particularmente, se aplica al control de la rigidez de las articulaciones de dicho robot, constituyendo ésta a la vez un factor importante de la ergonomía de interacción con el robot y un factor limitante de la duración y de la fiabilidad de su uso. Un ejemplo de robot articulado es un robot humanoide, es decir, que posee ciertos atributos de la apariencia y de las funcionalidades del ser humano: una cabeza, un tronco, dos brazos, dos manos, dos piernas, dos pies... Más allá de la apariencia, las funciones que un robot humanoide es capaz de realizar dependerán de su capacidad de efectuar movimientos, de hablar y de "razonar". Los robots humanoides son capaces de caminar, de hacer gestos, con los miembros o con la cabeza. La complejidad de los gestos que son capaces de efectuar aumenta sin descanso. Unos robots de este tipo tales como NAO™, desarrollado y comercializado por la solicitante, pueden poseer decenas de articulaciones cuyos movimientos se accionan por motores eléctricos. La lógica de control-mando de dichos motores determina a la vez la rigidez de las articulaciones y el consumo eléctrico (y, por lo tanto, la evolución de la temperatura) del robot. Por lo tanto, es uno de los elementos determinantes para la seguridad del robot (impacto en la estabilidad), la duración posible de su uso (apagado obligatorio a partir de una temperatura límite) y la experiencia percibida por un usuario en su interacción con el robot, demasiada rigidez de las cadenas articulares separando el robot de un ideal de tipo humanoide. Una problemática del mismo tipo también está presente para otros tipos de robots no humanoides, tales como robots animales o, más generalmente, robots que comprenden cadenas articuladas.

La lógica de control-mando puede usar instrucciones de posición de la articulación (generalmente en ángulo), de velocidad de la articulación (derivada del ángulo) y/o de par. Estas lógicas se controlan por sensores y pueden o pueden no comprender bucles de retroalimentación negativa que permiten guiar la convergencia hacia la instrucción. El control-mando que utiliza una instrucción de par o de corriente es el más costoso y el menos común.

En efecto, en este caso es necesario utilizar un sensor preciso del valor de corriente, lo que será costoso, en particular, en el caso en el que el número de articulaciones es muy elevado.

Los robots de cadena articulada pueden tener una base fija, como, por ejemplo, los brazos articulados industriales, en particular, para realizar tareas de montaje. Se trata, entonces, de objetos cuyo precio de coste por unidad puede llegar a decenas o centenas de miles de euros y cuyo número de articulaciones permanece bajo. En ese caso, una lógica de control-mando por el par puede adaptarse en la medida en la que el precio de coste por unidad no es la consideración principal.

En el caso de los robots de cadena articulada con base móvil, es decir, no fijada al suelo, categoría a la que pertenecen los robots humanoides, siendo el número de articulaciones más elevado y la restricción de precio de coste muy importante, se usa generalmente una lógica de control-mando de las articulaciones por la posición y/o la velocidad angular que es mucho menos costosa para un nivel de precisión dado. Sin embargo, esta lógica de control-mando tiene varios inconvenientes importantes, en particular, el hecho de que, si un obstáculo impide que el motor alcance la restricción definida por una posición de destino, el motor seguirá queriendo alcanzar la posición, inalcanzable en realidad y, por lo tanto, para esto consumir electricidad y elevar la temperatura de la articulación y del conjunto hasta provocar la puesta en reposo del robot para evitar su deterioro. Este problema es particularmente preocupante porque es suficiente con un simple defecto de horizontalidad de los pies del robot en una estación vertical para desencadenar el fenómeno de sobrecalentamiento.

Para hacer frente a este tipo de problemas, se conoce a partir de versiones anteriores de NAO™ definir un parámetro de rigidez para cada articulación que permite limitar el par aplicado a ésta a un nivel sustancialmente inferior a los límites físicos definidos por el fabricante, para reducir las ocurrencias de puesta en seguridad. No obstante, esta solución no permite evitar el consumo excesivo de energía, en particular, cuando una de las cadenas del robot encuentra un obstáculo en su trayectoria. En efecto, una limitación uniforme, necesariamente fijada a un nivel relativamente elevado para evitar paradas demasiado frecuentes, no permitirá una interrupción precoz del consumo de las articulaciones afectadas.

Se conoce igualmente, en particular a partir de la solicitud de patente US2008/258670, calcular un valor de par que se aplicará a una articulación y convertirlo en instrucción de velocidad angular. No obstante, se ignoran en esta realización las fuerzas de reacción en los puntos de contactos del robot con su entorno, siendo dichas fuerzas el origen principal de las aplicaciones de pares demasiado elevados que generan sobrecalentamientos.

El documento EP2347868A1 muestra un robot humanoide que calcula compensaciones para las posiciones de las juntas y para el par de las juntas con el fin de estabilizar su marcha. La presente invención resuelve este problema proporcionando medios para hacer variar la rigidez de las articulaciones de las cadenas del robot en función de las fuerzas aplicadas en dicho robot a los puntos de contacto con su entorno.

A tal efecto, la invención desvela un robot según la reivindicación 1. Ventajosamente, dicha desviación varía según la postura del robot.

Ventajosamente, el efecto de la aceleración de la gravedad se calcula a partir de una matriz de coeficientes de inercia que depende de la configuración del robot y se aplica a los ángulos articulares y del vector de gravedad determinado por combinación de mediciones de una unidad inercial del robot.

5 Ventajosamente, para el cálculo del vector de gravedad se opera, además, una eliminación de duda por determinación de la orientación en el espacio de una cadena central del robot por resolución de la posición de efectores solidarios con dicha cadena.

10 Ventajosamente, los puntos de aplicación de las fuerzas de contacto tenidas en cuenta en el modelo de equilibrio dinámico del robot se determinan por generación de una primera lista de efectores que satisfacen un criterio seleccionado en un grupo de criterios que comprende una lista de estados on/off de sensores de contacto colocados en dichos efectores, una lista de umbrales de distancia mínima con respecto al plano virtual del suelo de dichos efectores y cualquier combinación de dichas listas, determinándose dichos criterios sustancialmente por la morfología del robot.

15 Ventajosamente, los efectores de la primera lista se filtran en una segunda lista por comparación de la postura actual del robot con posturas tipo almacenadas en los datos de configuración del robot, dichas posturas tipo determinando una lista tipo de efectores, dicha segunda lista comprendiendo solamente los efectores de la lista que corresponde a la postura tipo retenida como la más cercana de la postura actual del robot según un criterio de similitud, si existe, y solamente esos.

20 Ventajosamente, las fuerzas de contacto con los puntos de aplicación se determinan por búsqueda de una solución sustancialmente óptima a la ecuación de equilibrio entre la suma de dichas fuerzas de contacto y el peso del robot y, del componente vertical de las fuerzas de perturbación.

Ventajosamente, las fuerzas de perturbación se desatienden.

25 La invención divulga igualmente un procedimiento según la reivindicación 10. La invención divulga finalmente un programa de ordenador según la reivindicación 12. La solución de la invención permite reducir de manera muy significativa el consumo excesivo de energía y el sobrecalentamiento. En las realizaciones implementadas, se alcanza casi una división por dos de la elevación de temperatura debido a un funcionamiento de los motores de articulación con un par demasiado elevado. Para articulaciones particularmente solicitadas, tales como el tobillo, la duración de funcionamiento antes de puesta en seguridad puede multiplicarse por cuatro.

El consumo de energía y la vida útil totales del robot por lo tanto se mejoran enormemente.

30 Además, los algoritmos usados, por otro lado, no son exigentes de recursos de cálculo (menos del 3 % en un procesador de tipo Geode™ de la empresa AMD (32 bits, 500 MHz).

Para terminar, la introducción de un ajuste de la rigidez de las articulaciones, que permanece desembragable, permite adaptarse a las preferencias de los usuarios e introducir variantes según los tipos de postura del robot, lo que permite enriquecer las experiencias de interacción de los usuarios con los robots.

35 La invención se comprenderá mejor y sus diferentes características y ventajas resultarán evidentes tras la descripción que sigue de diversos ejemplos de realización y de sus figuras adjuntas de las cuales:

- La figura 1 ilustra un robot simbolizado por cadenas articuladas;
- La figura 2 ilustra el principio general del control-mando de un motor de articulación de un robot según la técnica anterior;
- La figura 3 ilustra un organigrama general de los tratamientos de control-mando de un motor de articulación de un robot según una forma de realización de la invención;
- Las figuras 4a y 4b representan la evolución en el curso del tiempo de las temperaturas de las articulaciones de la pierna derecha de un robot, respectivamente según la técnica anterior y según una forma de realización de la invención;
- Las figuras 5a y 5b representan la evolución en el curso del tiempo de las temperaturas de las articulaciones de la pierna izquierda de un robot, respectivamente según la técnica anterior y según una forma de realización de la invención;
- La figura 6 es un organigrama de ciertas etapas de los tratamientos de control-mando de un motor de articulación de un robot según una forma de realización de la invención;
- La figura 7 es una primera vista detallada de una etapa del organigrama de la figura 6;
- Las figuras 8a a 8f representan un robot en tres posturas, con determinación de los puntos de contacto según una forma de realización de la invención;
- La figura 9 es una segunda vista detallada de una etapa del organigrama de la figura 6;
- La figura 10 es un esquema de una arquitectura física y funcional que permite la implementación de la invención en varias de sus formas de realización.

55 La figura 1 ilustra un robot simbolizado por cadenas articuladas.

El robot 100 del ejemplo ilustrado consta de cinco caderas articuladas, una cadena 110 correspondiendo a la pierna derecha, compuesta de varios segmentos (muslo, pierna, pie). El robot es apto para desplazarse en una superficie 120. Comprende, al menos, una articulación 140, en este ejemplo, el tobillo. Un robot tal como NAO™ ya citado consta de 25 articulaciones, este ejemplo de realización no siendo de ninguna manera limitante.

5 El robot constará por regla general de sensores 130 de contacto del pie con la superficie 120. Estos sensores pueden ser, por ejemplo, FSR (Sensores de presión en el suelo). Estos FSR son particularmente útiles para la implementación de la presente invención. Se destinan en este ámbito a detectar el contacto de cada uno de los pies con el suelo o cualquier otra superficie de progresión del robot. Se puede utilizar para este propósito, por ejemplo, sensores de la marca FlexiForce™ de la empresa Tekscan™ que se constituyen de una cinta con al menos dos
10 capas de material flexible piezo-resistivo. La resistencia eléctrica de la cinta disminuye en función de la fuerza de presión vertical aplicada a la superficie sobre la que se dispone la cinta. La medición de la corriente permite determinar la fuerza de presión después de la calibración. Varios sensores, por ejemplo, cuatro, se prevén ventajosamente sobre la suela de cada pie.

15 La figura 2 ilustra el principio general del control-mando de un motor de articulación de un robot según la técnica anterior.

Un robot tal como NAO™ comprende aproximadamente dos docenas de tarjetas electrónicas de control de sensores y de accionadores que controlan las articulaciones. Una articulación tiene normalmente al menos dos grados de libertad y, por lo tanto, dos motores 210. Cada motor se controla en ángulo por la variable de control q . La articulación consta igualmente de varios sensores 220 de posición, en particular, MRE (Magnetic Rotary Encoder).
20 La tarjeta 230 electrónica de control consta de un microcontrolador comercial. Esto puede ser, por ejemplo, un DSPIC™ de la empresa Microchip. Es un MCU de 16 bits acoplado a un DSP. Este MCU tiene un ciclo de servomecanismo en bucle de un ms.

La tarjeta 240 ejecuta las funciones de alto nivel que permiten al robot realizar las misiones que se le asignan. El procesador de la tarjeta puede ser un procesador x86 comercial. Se seleccionará de manera privilegiada un procesador de bajo consumo tal como el Geode™ de la empresa AMD (32 bits, 500 MHz). La tarjeta consta igualmente de un conjunto de memorias RAM y flash. Esta tarjeta también se encarga de las comunicaciones del robot con el exterior (servidor de comportamientos, otros robots...), normalmente sobre una capa de transmisión WiFi, WiMax, posiblemente en una red pública de comunicaciones móviles de datos con protocolos estándar posiblemente encapsulados en una VPN. El procesador se controla normalmente por un SO estándar, lo que permite
25 utilizar los lenguajes de alto nivel convencionales (C, C++, Python, ...) o los lenguajes específicos de inteligencia artificial como URBI (lenguaje de programación especializado en la robótica) para la programación de las funciones de alto nivel.

Tradicionalmente, un motor eléctrico puede controlarse por una instrucción dada por ángulo o posición, q , por velocidad angular, \dot{q} , y/o en par, τ , el control en par reemplazándose más a menudo por un control de corriente. En efecto, se tiene la relación canónica: $\tau = k_c I$, siendo I la intensidad de alimentación del motor de corriente eléctrica, siendo k_c una constante, al menos en ciertos rangos de funcionamiento. Es mucho más fácil medir una corriente que medir un par, siendo los sensores de par muy sensibles a derivas. No obstante, incluso el control de corriente está poco extendido en los robots que tienen un gran número de motores. En efecto, el control de corriente necesita ciclos de servomecanismo en bucle muy rápido (del orden de diez microsegundos) y un sensor de corriente apto para determinar el sentido de dicha corriente, incompatibles con tarjetas electrónicas de control a bajo coste.
35

Un inconveniente de este enfoque es que una instrucción de posición que no se puede ejecutar a causa de un obstáculo no detectado producirá un par aplicado al motor muy elevado, por lo tanto, una corriente elevada, de donde un calentamiento muy significativo y un consumo excesivo eléctrico, incluso una ruptura del motor y/o de la articulación. Estos inconvenientes reducen de manera importante la duración de funcionamiento posible de un robot.
45 Para superar este inconveniente, se pueden introducir medidas de limitación del par aplicado a la articulación. Estas medidas pueden ser mecánicas (por ejemplo, ruedas con engranajes desembragables) o softwares, introduciendo el circuito de control del motor un coeficiente de rigidez que tiene el papel de un embrague y que puede tomar un valor comprendido entre 0,0 y 1,0. Cuando este coeficiente de rigidez es igual a 1, el motor es capaz de desarrollar el par máximo autorizado. Este puede fijarse ventajosamente en un valor sustancialmente inferior al valor indicado por el proveedor para evitar el sobrecalentamiento. Por ejemplo, en el caso de NAO donde los motores de las articulaciones desarrollan un par máximo del orden de 5 a 6 Nm, el par autorizado con rigidez máxima es de 3,2 Nm. Cuando este coeficiente es igual a cero, el motor está desembragado y la articulación está en desviación libre. En consecuencia, el robot cae... El procedimiento de puesta en seguridad prevé que todos los coeficientes de rigidez o, algunos de entre ellos solamente, pasen de 1 a 0 cuando la temperatura local o total sobrepase un valor umbral. El robot, por lo tanto, ya no es utilizable.
50

La figura 3 ilustra un organigrama general de los tratamientos de control-mando de un motor de articulación de un robot según una forma de realización de la invención.

Según el principio de la invención, se trata de calcular un valor de los pares que se aplicará a cada articulación para hacer entonces variar el coeficiente de rigidez de dichas articulaciones para asegurar un equilibrio del robot.

60 Un módulo, 310, calcula los pares articulares a partir de un modelo descriptivo de la dinámica del robot que se detallará a continuación en la descripción en relación con las figuras 6 y 7. Se alimenta, por una parte, de datos

permanentes de configuración del robot, 330 y, por otra parte, de datos instantáneos provenientes de una unidad inercial, 340, de sensores articulares, 350 y de sensores de contacto o procedimientos de mediciones de distancia al suelo, 360. Los valores de par se proporcionan entonces a un módulo, 320, de cálculo de los coeficientes de rigidez articulares.

5 Los datos de configuraciones del robot, 330, se constituyen esencialmente, para implementar la presente invención, por una matriz M de inercia de todos los cuerpos del robot en su propia referencia. Los cuerpos del robot son sus diferentes constituyentes físicos: la cabeza, el cuello, el torso (cadena central), los brazos, antebrazos y manos (cadenas laterales superiores), los muslos, piernas y pies (cadenas laterales inferiores). Cada uno de los cuerpos
10 tiene una matriz de masa M de dimensión (6,6) en la que se introduce la masa del cuerpo y sus momentos de inercia.

Siendo los momentos de inercia invariantes, la matriz M puede calcularse de antemano, en la inicialización del robot en función de la configuración del robot. Una de las particularidades de NAO es, en efecto, autorizar un cambio de los constituyentes físicos del robot, calculándose los datos de configuración en cada inicialización.

15 De este modo, se tiene un conjunto de matrices M, cada matriz se almacena en un módulo ALMotion (ver a continuación, en la descripción, los comentarios en relación con la figura 10). Una matriz M tiene la siguiente forma:

$$M = \begin{bmatrix} M_{raíz} & 0_{6,6} & \dots & 0_{6,6} \\ 0_{6,6} & M_1 & \dots & \dots \\ \dots & & & 0_{6,6} \\ 0_{6,6} & & 0_{6,6} & M_{ndll} \end{bmatrix} \quad \text{con} \quad M_i = \begin{bmatrix} m_i I_3 & 0_{3,3} \\ 0_{3,3} & \mathfrak{I}_i \end{bmatrix}$$

Se ha propuesto:

- m_i = masa del cuerpo i;
- \mathfrak{I}_i = matriz de inercia del cuerpo i expresada en su centro de masa y en la propia referencia del cuerpo;

$$I_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

- I_3 = matriz de identidad 3x3

En el caso de un brazo de robot que tiene una base fija, el cuerpo raíz se fija generalmente al suelo. En el caso de un robot de base voladora (no fijada al suelo), el cuerpo raíz no está fijo. Es libre y se determina por el sistema.

25 La unidad inercial, 340, normalmente se constituye de un giroscopio y de un acelerómetro. Proporciona sus mediciones al módulo 310.

Los sensores articulares, 350, normalmente son MRE, como se indicó anteriormente. Proporcionan al módulo 310 los valores de ángulos articulares.

30 Los sensores de contacto, 360, permiten determinar las posiciones de puntos característicos, denominados generalmente efectores, en relación con un marco de referencia dado, el marco de referencia terrestre o la superficie de desplazamiento (el suelo, por ejemplo). Los FSR implantados bajo las suelas de los pies son sensores de contacto. Se puede imaginar implantar FSR o sensores de contacto de otro tipo, en otras partes de las cadenas articuladas del robot, por ejemplo, las nalgas, los codos, la espalda... Los sensores físicos de contacto, sin embargo, son de una fiabilidad relativa. Se puede conseguir el mismo resultado (determinar si hay contacto con la superficie del suelo), conociendo todos los valores de ángulos articulares y la posición y la orientación del cuerpo raíz en el espacio. La posición y la orientación del cuerpo raíz en el espacio se determinan por los FSR y la unidad inercial. A
35 partir de los valores de ángulos articulares y de la posición y de la orientación del cuerpo raíz en el espacio, es posible calcular, por geometría directa, la posición de todos los cuerpos del robot en el espacio.

El módulo 320 se configura para calcular los coeficientes de rigidez de cada una de las articulaciones. Los pares de cada una de las articulaciones se proporcionan en la entrada del módulo 320. El módulo efectúa la división del par de cada una de las articulaciones por el par máximo para deducir de ello los valores de los coeficientes de rigidez que se aplicarán a cada una de las articulaciones. Según los efectos que se tienen en cuenta en el modelo de descripción dinámica del robot que determina las salidas del módulo 310, se puede prever en el módulo 320 añadir un desplazamiento al coeficiente de rigidez. Este desplazamiento puede ser una constante, un conjunto de valores que dependen de tipos de posturas o contextos de uso del robot, pudiendo dichos valores tabularse o, una variable
45 para la cual se define una ley de evolución.

Las figuras 4a y 4b representan la evolución en el curso del tiempo de las temperaturas de las articulaciones de la pierna derecha de un robot, respectivamente según la técnica anterior y según una forma de realización de la invención.

5 Los experimentos se realizaron con robots físicamente idénticos, la única diferencia entre los experimentos trazados respectivamente por la figura 4a y por la figura 4b siendo que la configuración del robot no comprende, en el primer caso, los medios de implementación de la invención, mientras que, en el segundo caso, los comprende.

En los dos casos, el robot se ha colocado en una posición de inicialización vertical (Poselnit).

En cada una de las figuras 4a y 4b se representa la evolución de la temperatura de cada uno de los motores articulares de la cadena articular inferior derecha, sin y con implementación de la invención:

- 10
- Las curvas RHipRollTemp representan las evoluciones de la temperatura de la articulación oscilante de la cadera derecha;
 - Las curvas RHipPitchTemp representan las evoluciones de la temperatura de la articulación de cabeceo de la cadera derecha;
 - Las curvas RKneePitchTemp representan las evoluciones de la temperatura de la articulación de cabeceo de la rodilla derecha;
- 15
- Las curvas RAnkleRollTemp representan las evoluciones de la temperatura de la articulación oscilante del tobillo derecho;
 - Las curvas RAnklePitchTemp representan las evoluciones de la temperatura de la articulación de cabeceo del tobillo derecho.

20 Cabe señalar particularmente la diferencia muy significativa de las temperaturas al final del experimento (15 minutos aproximadamente) en la articulación de cabeceo de la cadera derecha, que alcanza los 60 °C en el primer caso y 42 °C en el segundo caso. El aumento global de temperatura de la pierna derecha es de 50 °C en el primer caso y de 28 °C en el segundo caso.

25 Las figuras 5a y 5b representan la evolución en el curso del tiempo de las temperaturas de las articulaciones de la pierna izquierda de un robot, respectivamente según la técnica anterior y según una forma de realización de la invención.

30 Las condiciones del experimento son idénticas al trazado por las figuras 4a y 4b. Los resultados relativos a la pierna izquierda son aún más ventajosos, en particular, en lo que se refiere a la articulación de cabeceo del tobillo, cuya temperatura alcanza los 80 °C en el primer caso y 48 °C en el segundo caso, el aumento global de temperatura de la pierna izquierda siendo de 109 °C en el primer caso y de 42 °C en el segundo caso. Lograr una temperatura de 80 °C, alcanzada en las condiciones del experimento en menos de un cuarto de hora, conllevando normalmente la puesta en seguridad del robot, la duración de funcionamiento del robot está, por lo tanto, muy sustancialmente alargada por la implementación de la invención (en un factor de aproximadamente 4).

35 La figura 6 es un organigrama de ciertas etapas de los tratamientos de control-mando de un motor de articulación de un robot según una forma de realización de la invención.

Para calcular los pares articulares, se aplica la ecuación que describe la evolución dinámica del robot, a la que se aplica, llegado el caso ciertas hipótesis simplificantes, en función de los sensores y de la capacidad de cálculo que está disponible.

40 Aplicando los principios generales de la mecánica de cuerpo rígidamente relacionados entre ellos en interacción con su entorno, un experto en la materia de la robótica puede determinar una ecuación completa del modelo dinámico de un robot refiriéndose, en particular, a la obra clásica: "A Mathematical Introduction to Robotics Manipulation ", MURRAY, Richard M., LI Zexiang et SASTRY, S. Shankar, CRC Press, 1994.

Se escribirá, por ejemplo:

$$\tilde{M}(q)(\dot{T} - G) + N(q, \dot{q})T = L\tau + C'(q)W$$

45 En la continuación de la descripción, q es el vector constituido por los ángulos articulares. \dot{q} designa la velocidad articular (derivada en función del tiempo de los ángulos articulares q). La velocidad cartesiana del cuerpo raíz se anota como *Vraiz* y es de dimensión 6. Los tres primeros componentes son la velocidad de traslación del cuerpo raíz de acuerdo con los 3 ejes (x, y, z). Los tres últimos componentes son las velocidades de rotación de acuerdo con los 3 ejes (x, y, z). Se llama coordenadas generalizadas T al vector constituido por *Vraiz* y \dot{q} .

50 C(q) designa la matriz de transformación entre el espacio de las velocidades articulares y el espacio de las velocidades cartesianas; se denomina comúnmente cinemática Jacobiana.

El primer término del lado izquierdo de la ecuación traduce el efecto de los momentos de inercia de los cuerpos que constituyen las cadenas articuladas.

En este término:

- 55
- \tilde{M} : la matriz simétrica de inercia en coordenadas generalizadas. Se calcula a partir de la matriz M, así como de C(q), $\tilde{M} = C(q)^t M C(q)$. Esta matriz depende de la configuración articular del robot (q); debe actualizarse cada vez

que una o varias articulaciones se desplazan. \tilde{M} es una matriz cuadrada de dimensión $\dim(\tilde{M}) = (6 + 6 \times n_{ddl}, 6 + 6 \times n_{ddl})$ donde n_{ddl} es el número de grados de libertad del robot. En el caso de NAO hay 23 ddl, la dimensión de la matriz \tilde{M} será de $(6 + 6 \times 23)^2$, o sea 20.736 valores.;

- G es la aceleración de la gravedad expresada en coordenadas generalizadas.

5 El segundo término del miembro de la izquierda de la ecuación traduce el efecto de las fuerzas de Coriolis y centrífugas que experimenta el sistema. $N(q, \dot{q})$ es la matriz asociada a estos efectos.

El primer término del miembro de la derecha de la ecuación traduce el efecto de los pares articulares:

- τ es el vector de los pares articulares, de dimensión $\dim(\tau) = (n_{ddl}, 1)$; τ es la suma del par de accionamiento y del par de fricción articular;

10 - L es la matriz que permite expresar τ en coordenadas generalizadas.

- W es la matriz de los pares de fuerzas aplicados en cada uno de los cuerpos que constituyen el robot expresados en sus propias referencias; se descompone generalmente W en $W_{contacto}$ que es el par de fuerzas relacionado a los contactos de los cuerpos con el entorno exterior y $W_{perturbación}$ que es el par de fuerzas relacionado a las perturbaciones exteriores.

15 En un modo de realización, se simplifica el modelo al no calcular en esta etapa las aceleraciones propias (T) y fuerzas de Coriolis y centrífugas ($N(q, \dot{q})$), así como los pares de las fricción articular y de las perturbaciones externas ($W_{perturbación}$). Estos efectos se toman en cuenta, como se explicará más adelante, por un desplazamiento. El modelo dinámico simplificado se escribe, por lo tanto:

$$-\tilde{M}(q)G = L\tau + C^t(q)W_{contacto}$$

20 El organigrama de la figura 6 describe las etapas de cálculo implementadas para resolver esta ecuación, sin que este corte deba considerarse como limitante, siendo otros procedimientos totalmente posibles. Estas etapas de cálculo se reproducen en un tiempo de ciclo de 20 ms.

En una etapa 610, se calcula un plano virtual del suelo a partir de las medidas de la unidad inercial. Dicho plano virtual se determina como siendo el plano normal al vector de gravedad. Según el grado de fiabilidad de las mediciones de la unidad, se pueden cruzar ventajosamente estas mediciones con una determinación de la orientación del torso mediante localización de los cuerpos inferiores en contacto o sin contacto con el suelo.

25 En una etapa 620, se actualiza el vector q gracias al módulo ALMemory donde se actualizan los ángulos de los sensores articulares. Con ayuda de las matrices M se puede calcular así $\tilde{M}(q)$.

En una etapa 630, se calcula la aceleración de la gravedad orientada en relación con el plano virtual del suelo.

30 En una etapa 640, se combinan las salidas de las etapas 620 y 630 para calcular el término $-\tilde{M}(q)G$.

En una etapa 650, se calcula la lista de los puntos de contactos tomados en cuenta para el cálculo de las fuerzas, detallándose dicha etapa más adelante en la descripción en relación con la figura 7 e ilustrada por los ejemplos de las figuras 8a a 8f.

35 En una etapa 660, se calculan las fuerzas de contacto, $W_{contacto}$, detallándose dicha etapa más adelante en la descripción en relación con la figura 9.

En una etapa 670, se calcula $C^t(q)$, transpuesta de la matriz de transformación entre el espacio de las velocidades articulares y el espacio de las velocidades cartesianas.

En una etapa 680, se efectúa el producto de la matriz saliendo de la etapa 670 con el vector saliendo de la etapa 660. Sumando las salidas de las etapas 640 y 680, se obtiene saliendo de la etapa 690 el vector de los pares articulares que se buscaban.

40 A continuación, se puede proporcionar este vector en la entrada al módulo 320 de cálculo de los coeficientes de rigidez, añadiendo dicho módulo posiblemente un desplazamiento teniendo en cuenta, en particular, las simplificaciones del modelo dinámico del robot que se habrán realizado. En particular, si no se tienen en cuenta ni las propias aceleraciones, ni las fuerzas de Coriolis, ni las fuerzas centrífugas ni los pares de fricción articular, se ha podido determinar experimentalmente que un desplazamiento de 0,25 daba buenos resultados para un robot en postura vertical, sin otra interacción con su entorno. Cuando ningún pie del robot descansa sobre el suelo, se puede seleccionar un desplazamiento más pequeño, por ejemplo 0,1, lo que liberará las articulaciones del robot y le dará una actitud más flexible.

La figura 7 es una primera vista detallada de una etapa del organigrama de la figura 6.

50 Detalla las subetapas de la etapa 650 de determinación de los puntos de contacto.

En el archivo de configuración del robot, se define una lista de puntos característicos candidatos a ser puntos de contacto. En el caso de un robot humanoide tal como NAO, se seleccionará, por ejemplo, sin que esta lista sea limitante o que sea necesario recordar todos estos puntos de contacto, los dos pies, las dos nalgas, la espalda, la cabeza y el conjunto mano/antebrazo/codo.

55 Estos datos de configuración determinan la lista de los efectores para los que se va a calcular durante una etapa 710

las distancias verticales al plano virtual del suelo determinado saliendo de la etapa 610.

Se determina entonces durante una etapa 720 el punto de contacto más cercano al suelo.

Se ha definido en el archivo de configuración del robot un umbral de detección y se determina durante una etapa 730 los otros efectores que se sitúan cerca del suelo en el límite del umbral de detección.

- 5 Las figuras 8a a 8f representan un robot en tres posturas, con determinación de los puntos de contacto según una forma de realización de la invención.

Las figuras 8a, 8c y 8e representan tres posturas diferentes del robot:

- En la figura 8a, el robot está en una de las posturas sentado posibles;
 - En la figura 8c, el robot está en una de las posturas vertical posibles;
- 10 - En la figura 8e, el robot está en una postura llamada "gorila".

Los puntos de contacto candidatos que corresponden a estas posturas se representan respectivamente en las figuras 8b, 8d y 8f.

Las anotaciones de los puntos de contacto son los siguientes:

- RElbowRoll Both, articulación oscilante del codo derecho;
- 15 - LElbowRollBoth, articulación oscilante del codo izquierdo;
- RFootFR, pie derecho, sensor delantero derecho;
- RFootFL, pie derecho, sensor delantero izquierdo;
- RFootRR, pie derecho, sensor trasero derecho;
- RFootRL, pie derecho, sensor trasero izquierdo.

- 20 La figura 9 es una segunda vista detallada de una etapa del organigrama de la figura 6.

El objetivo de esta etapa es calcular las fuerzas de contacto que se aplican en NAO.

En esta etapa, el robot se modela por una masa puntual en interacción con su entorno por puntos de contacto. Todos los contactos son coplanarios. Además, para simplificar los cálculos, se coloca en el caso estático.

Se trata de resolver las ecuaciones siguientes:

- 25 - suma de las fuerzas que se aplican en el robot (aquí su centro de masa en el caso estático) se anula, o sea:

$$\sum_i f_i = m \cdot g$$

- suma de los momentos se anula en el centro de masa.

A partir de tres puntos de contacto coplanarios, hay un hiperestatismo de las fuerzas de contacto. En efecto, existe una infinidad de e valores de fuerzas de contacto que son soluciones del problema anterior, en particular, debido al hecho de que: las fuerzas tangenciales de las fuerzas de contacto se pueden compensar respetando las dos ecuaciones..

- 30 Para encontrar una solución preferente, se busca minimizar las fuerzas de contacto calculadas y se considera que las fuerzas de contacto tangenciales son nulas.

Para cada contacto, solo se considera el componente de fuerza normal al plano.

- 35 Se señala $f_c(\vec{i}) = f_c(i)\vec{z}$ el vector de fuerza del contacto i de NAO en su entorno con $f_c(i)$ la norma de la fuerza de contacto de acuerdo con el eje \vec{z} . Sea el sistema que se resolverá:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ (x_1 - x_G) & (x_2 - x_G) & \dots & (x_n - x_G) \\ (y_1 - x_G) & (y_1 - x_G) & \dots & (y_n - x_G) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \dots \\ f_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} mg \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Que se puede escribir en la forma simplificada:

$$AY = B$$

- 40 Expresión en la que:

- B es una suma vectorial de los componentes verticales de las fuerzas exteriores (fuera de contacto);
- Y es el vector buscado de los componentes verticales de las fuerzas aplicadas a los puntos de contacto seleccionados saliendo de la etapa 650;
- A es una matriz cuyos coeficientes son las coordenadas de los puntos de contacto en relación con el centro de

masa.

Las anotaciones son las siguientes:

- (x_i, y_i) son las coordenadas de los puntos de contacto seleccionados;
- (x_G, y_G) son las coordenadas del centro de masa;
- 5 - f_i es la norma de la fuerza normal aplicada al punto de contacto i que se busca.

Durante una etapa 910, se determinan las fuerzas exteriores (fuera de contacto) que el robot debe equilibrar..

Durante una etapa 920, se calculan los coeficientes de la matriz A . Para ello, conviene proyectar el centro de masa del robot en el plano virtual del suelo determinado durante la etapa 610.

Se trata, entonces, de determinar durante una etapa 930 una solución Y de la ecuación $AY = B$.

10 Si el número de contactos n es igual a tres, se trata de invertir la matriz A . A condición de que su determinante sea distinto a cero, existe una única solución.

Cuando n es superior a 3, una infinidad de soluciones es posible. Se trata, entonces, de seleccionar un algoritmo de determinación de una solución óptima bajo la restricción de que la ecuación $AY = B$ se satisfaga.

Se puede utilizar, por ejemplo, un algoritmo de resolución cuadrático que consiste en buscar los valores de Y (y, por

15 lo tanto, de f_i) para los cuales la función
$$\min_y = \frac{1}{2} \|A.Y - B\|_Q + \frac{1}{2} \|Y\|_R$$
 se minimiza bajo la condición de que $Y > 0$.

Q y R representan pesos de optimización. El objetivo de esta operación consiste en minimizar la norma de $AY-B$ con el peso Q y en minimizar la norma Y con el peso R .

La figura 10 es un esquema de una arquitectura física y funcional que permite la implementación de la invención en varios de sus modos de realización.

20 Un robot tal como NAO se dota ventajosamente de softwares de alto nivel que permiten controlar las funciones del robot en un modo de realización de la invención. Una arquitectura de software de este tipo, denominada NAOQI, se divulgó, en particular, en la solicitud de patente WO2009/124955 publicada el 15/10/2009. Consta de las funciones básicas de gestión de las comunicaciones entre un robot y un ordenador personal o, un lugar remoto y de intercambio de softwares que proporcionan la infraestructura de software necesaria para la implementación de la

25 presente invención. NAOQI es un marco optimizado para las aplicaciones robóticas; soporta varios lenguajes, en particular, C++, Python y Urbi.

En el ámbito de la presente invención, son particularmente útiles los siguientes módulos de NAOQI:

- el módulo ALMemory, 1010, gestiona una memoria compartida entre los diferentes módulos de NAOQI y recibe, en particular, los elementos de configuración que se cargan en la inicialización;
- el módulo DCM, 1020, gestiona las comunicaciones con el robot físico (motores, sensores);
- el módulo ALMotion, 1030, gestiona los movimientos del robot; el código que permite la ejecución de los algoritmos para implementar la invención se implanta principalmente en este módulo.

35 Estos tres módulos se codifican ventajosamente en C++. La figura indica igualmente los flujos de datos entre módulos:

- el módulo ALMotion 1030 recupera del módulo ALMemory 1010 los datos sensores (unidad inercial, FSR, ángulos articulares...);
- efectúa las etapas de cálculo de los coeficientes de rigidez de las articulaciones y comunica sus resultados al módulo DCM 1020;
- 40 - este módulo pasa al módulo ALMemory 1010 los valores de restricción de los ángulos articulares que resultan de la aplicación de estos coeficientes. (al mismo tiempo que los valores de los otros sensores)

Los ejemplos descritos anteriormente se dan a título de ilustración de modos de realización de la invención. No limitan de ninguna manera el campo de la invención que se define por las reivindicaciones siguientes.

REIVINDICACIONES

1. Robot (100) dotado de capacidades de desplazamiento en al menos una cadena (110) articulada que comprende, al menos, un sensor (130) de contacto del extremo de dicha cadena con la superficie (120) de desplazamiento, comprendiendo dicha cadena al menos una articulación (140), controlada dicha articulación por un motor (210) eléctrico controlado por una instrucción de posición y/o velocidad y por medios de limitación de la corriente y/o del par aplicado por dicho motor a dicha articulación, **caracterizándose** dicho robot **porque** comprende también:
- 5 a) una primera lógica (310) de cálculo del par articular como siendo solución de una ecuación que modela el equilibrio dinámico del robot entre, por una parte, la suma de la diferencia de las fuerzas inerciales debidas a la aceleración angular de la articulación y de la aceleración de la gravedad y del efecto de las fuerzas de Coriolis y centrífuga y, por otra parte, la suma del par y de las fuerzas de contacto, de fricción y de perturbación, aplicándose dichos par y fuerza a dicha articulación, una parte de los efectos de las fuerzas inerciales debidas a la aceleración angular de la articulación, de las fuerzas de Coriolis y centrífuga y de las fuerzas de fricción modelándose por un desplazamiento,
- 10 b) una segunda lógica (320) de cálculo configurada para definir dicha limitación de la corriente y/o del par aplicado, a partir del par articular calculado por dicha primera lógica de cálculo para dicha articulación.
- 15 2. Robot según la reivindicación 1, **caracterizado porque** dicha desviación varía según la postura del robot.
3. Robot según una de las reivindicaciones 1 a 2, **caracterizado porque** el efecto de la aceleración de la gravedad se calcula a partir de una matriz de coeficientes de inercia que depende de la configuración del robot y se aplica a los ángulos articulares y del vector de gravedad determinado por combinación de mediciones de una unidad inercial del robot.
- 20 4. Robot según la reivindicación 3, **caracterizado porque** para el cálculo del vector de gravedad se opera, además, una eliminación de duda por determinación de la orientación en el espacio de una cadena central del robot por resolución de la posición de efectores solidarios con dicha cadena.
5. Robot según una de las reivindicaciones 3 a 4, **caracterizado porque** los puntos de aplicación de las fuerzas de contacto tenidas en cuenta en el modelo de equilibrio dinámico del robot se determinan por generación de una primera lista de efectores que satisfacen un criterio seleccionado en un grupo de criterios que comprende una lista de estados on/off de sensores de contacto colocados en dichos efectores, una lista de umbrales de distancia mínima con respecto al plano virtual del suelo de dichos efectores y cualquier combinación de dichas listas, determinándose dichos criterios sustancialmente por la morfología del robot.
- 25 6. Robot según la reivindicación 5, **caracterizado porque** los efectores de la primera lista se filtran en una segunda lista por comparación de la postura actual del robot con posturas tipo almacenadas en los datos de configuración del robot, dichas posturas tipo determinando una lista tipo de efectores, dicha segunda lista comprendiendo solamente los efectores de la lista que corresponde a la postura tipo retenida como la más cercana de la postura actual del robot según un criterio de similitud, si existe, y solamente esos.
- 30 7. Robot según una de las reivindicaciones 3 a 6, **caracterizado porque** las fuerzas de contacto con los puntos de aplicación se determinan por la búsqueda de una solución sustancialmente óptima a la ecuación de equilibrio entre la suma de dichas fuerzas de contacto y el peso del robot y del componente vertical de las fuerzas de perturbación.
- 35 8. Robot según la reivindicación 7, **caracterizado porque** las fuerzas de perturbación se desatienden.
9. Robot según una de las reivindicaciones 1 a 8, **caracterizado porque** dicha segunda lógica de cálculo se configura para calcular un coeficiente de rigidez que se aplicará a la articulación a partir de dicho par articular calculado por la primera lógica de cálculo para la articulación, realizando dichos coeficientes de rigidez dichos medios de limitación de la corriente y/par ejercido en dicha articulación.
- 40 10. Procedimiento de limitación del par y/o de la corriente aplicada a un motor eléctrico de control de una articulación de un robot dotado de capacidades de desplazamiento en, al menos, una cadena articulada que comprende, al menos, un sensor de contacto del extremo de dicha cadena con la superficie de desplazamiento, comprendiendo dicha cadena al menos una articulación, controlándose dicho motor eléctrico por una instrucción de posición y/o velocidad, dicho procedimiento **caracterizándose por** las siguientes etapas:
- 45 a) una primera etapa de cálculo de un par articular para dicha articulación, calculándose dicho par como siendo solución de una ecuación que modela el equilibrio dinámico del robot entre, por una parte, la suma de la diferencia de las fuerzas inerciales debidas a la aceleración angular de la articulación y de la aceleración de la gravedad y del efecto de las fuerzas de Coriolis y centrífuga y, por otra parte, la suma del par y de las fuerzas de contacto, de fricción y de perturbación, aplicándose dichos par y fuerza a dicha articulación, una parte de los efectos de las fuerzas inerciales debidas a la aceleración angular de la articulación, de las fuerzas de Coriolis y centrífuga y de las fuerzas de fricción modelándose por un desplazamiento y,
- 50 b) una segunda etapa de definición de dicha limitación de la corriente y/o del par aplicado, a partir del par articular calculado en dicha primera etapa de cálculo para dicha articulación.
- 55

11. Procedimiento según la reivindicación 10, **caracterizado porque** dicha segunda etapa de cálculo es una etapa de cálculo de un coeficiente de rigidez que se aplicará a la articulación, dicho coeficiente de rigidez permitiendo una limitación de la corriente y/o de par ejercido sobre esta articulación, efectuándose el cálculo de este coeficiente a partir del par articular calculado en la etapa anterior para dicha articulación.
- 5 12. Programa de ordenador que comprende instrucciones de código de programa que permite la ejecución del procedimiento según la reivindicación 10 cuando el programa se ejecuta en un ordenador, adaptándose dicho programa para permitir una limitación del par y/o de la corriente aplicada a un motor eléctrico de control de una articulación de un robot, dotándose dicho robot de capacidades de desplazamiento en, al menos, una cadena articulada que comprende, al menos, un sensor de contacto del extremo de dicha cadena con la superficie de desplazamiento, comprendiendo dicha cadena al menos una articulación, dicho motor eléctrico controlado por una instrucción de posición y/o velocidad, dicho programa **caracterizándose porque** comprende:
- 10 a) un primer conjunto de instrucciones de código informático configuradas para calcular un par articular para dicha articulación, calculándose dicho par como siendo solución de una ecuación que modela el equilibrio dinámico del robot entre, por una parte, la suma de la diferencia de las fuerzas inerciales debidas a la aceleración angular de la articulación y de la aceleración de la gravedad y del efecto de las fuerzas de Coriolis y centrífuga y, por otra parte, la suma del par y de las fuerzas de contacto, de fricción y de perturbación, aplicándose dichos par y fuerza a dicha articulación, una parte de los efectos de las fuerzas inerciales debidas a la aceleración angular de la articulación, de las fuerzas de Coriolis y centrífuga y de las fuerzas de fricción pudiendo modelarse por un desplazamiento y:
- 15 b) un segundo conjunto de instrucciones de código informático configuradas para definir dicha limitación de la corriente y/o del par aplicado, a partir del par articular calculado por dicho primer conjunto de instrucciones de código informático.
- 20 13. Programa de ordenador según la reivindicación 12, **caracterizado porque** dicho segundo conjunto de instrucciones de código de ordenador se configura para calcular un coeficiente de rigidez que se aplicará a la articulación, dicho coeficiente de rigidez permitiendo una limitación de la corriente y/o de par ejercido sobre esta articulación, efectuándose el cálculo de este coeficiente a partir del par articular calculado por el primer módulo de cálculo para dicha articulación.
- 25

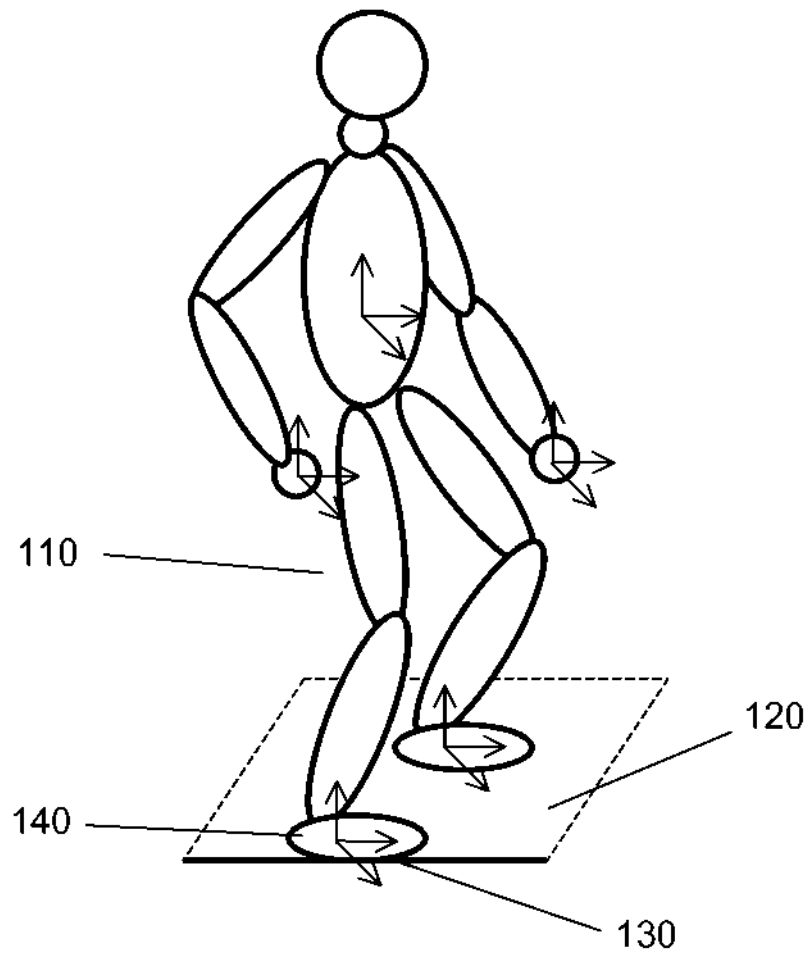


FIG.1

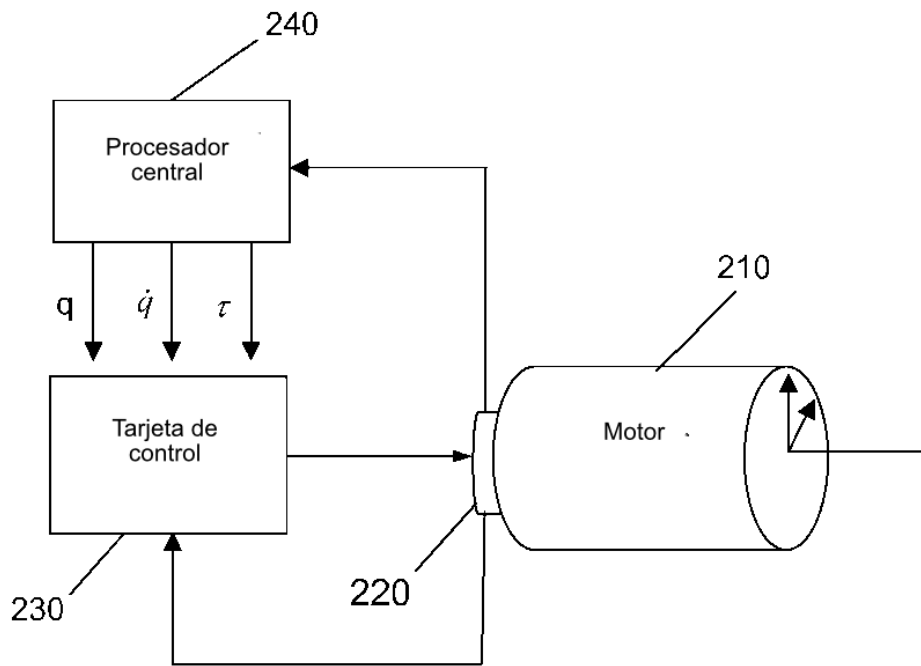


FIG.2

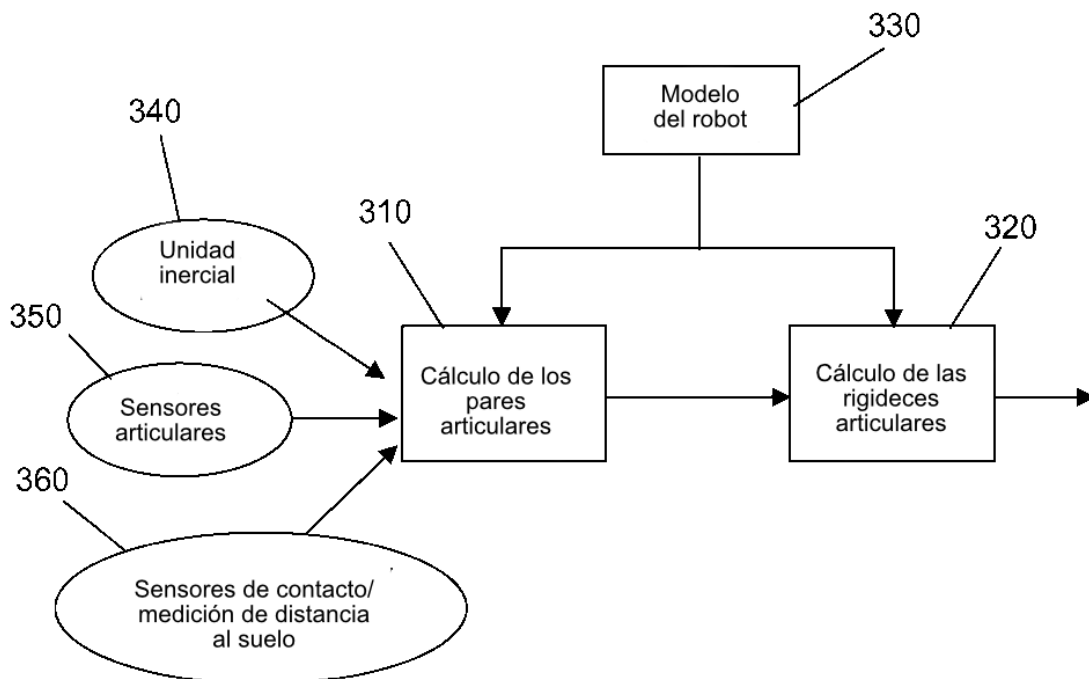
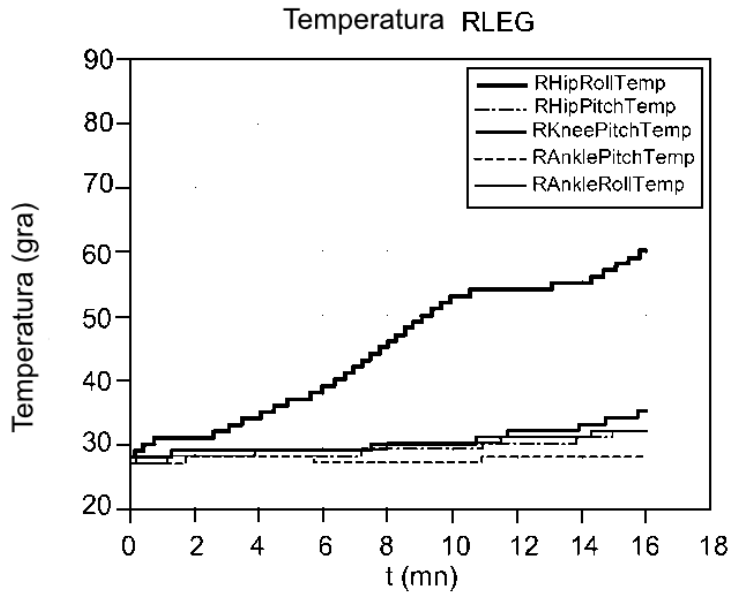
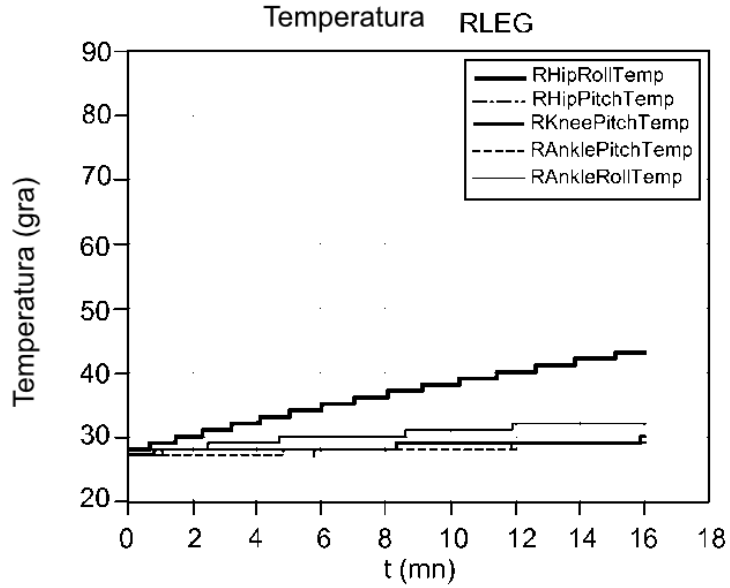


FIG.3



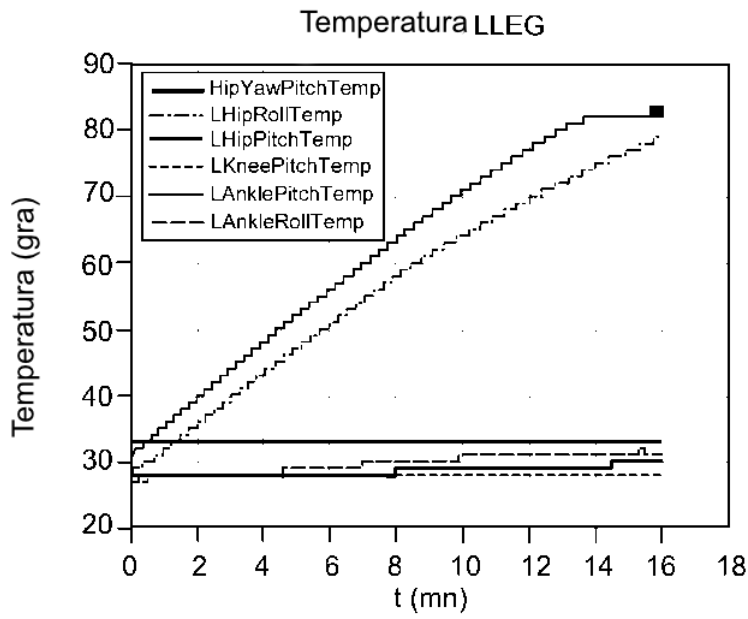
Evolución de la temperatura según el Estado de la técnica

FIG.4a



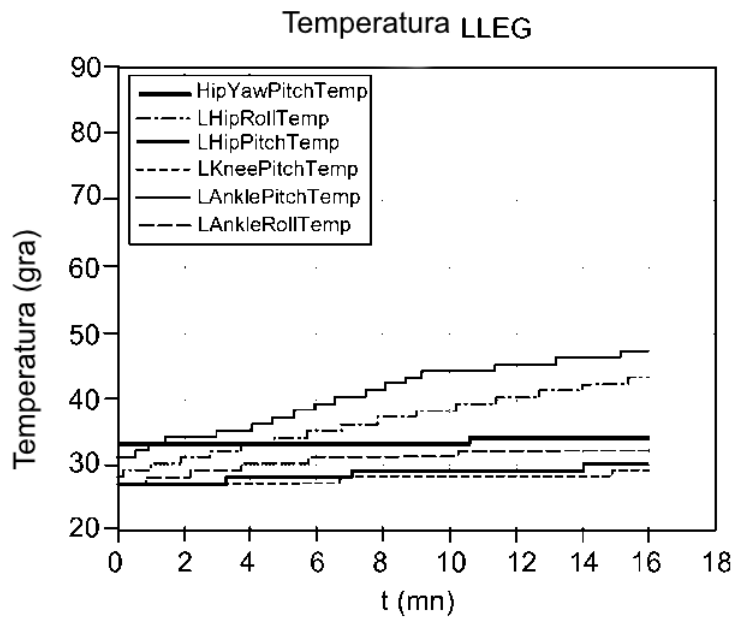
Evolución de la temperatura según un modo de realización de la invención

FIG.4b



Evolución de la temperatura según el Estado de la técnica

FIG.5a



Evolución de la temperatura según un modo de realización de la invención

FIG.5b

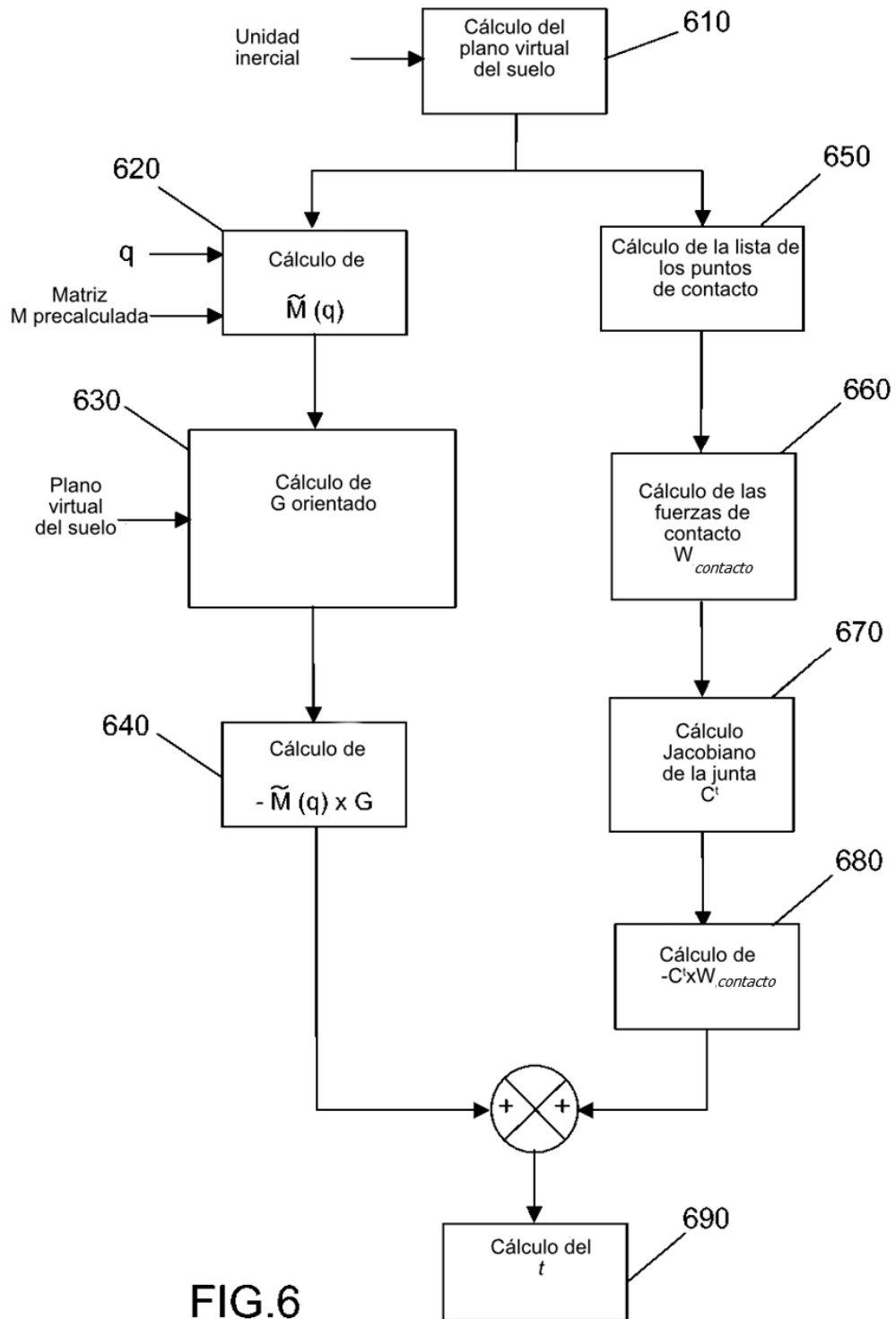


FIG.6

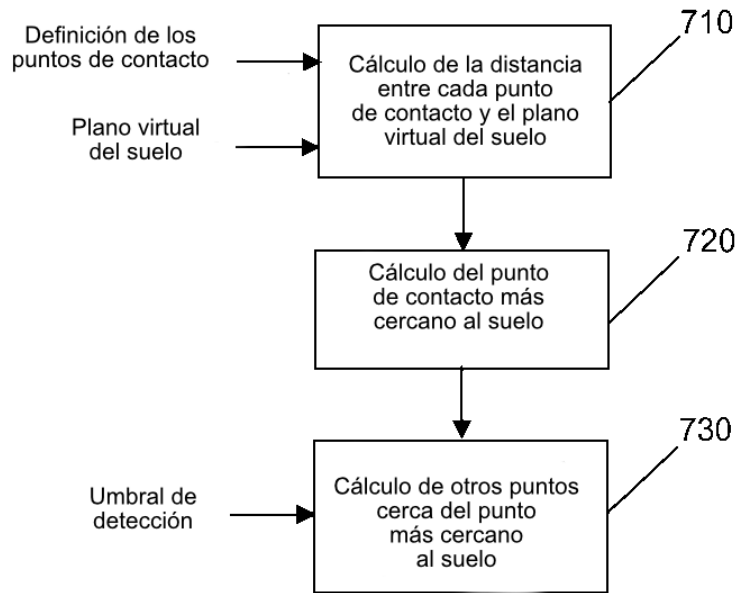


FIG.7

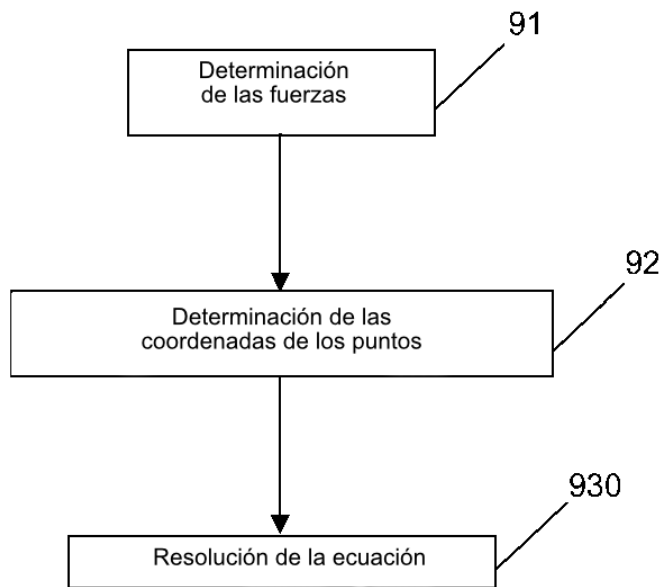


FIG.9

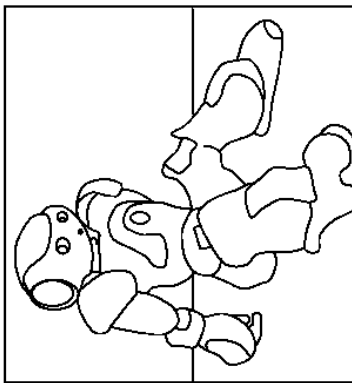


FIG. 8a

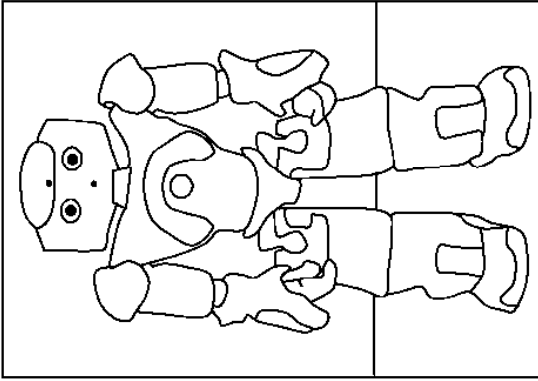
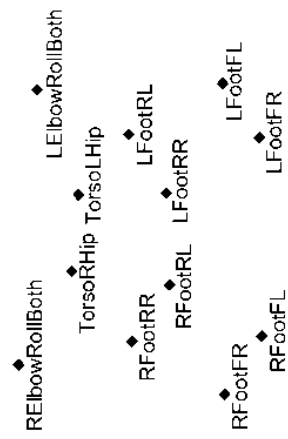


FIG. 8c

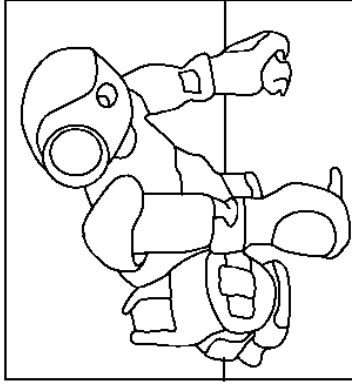
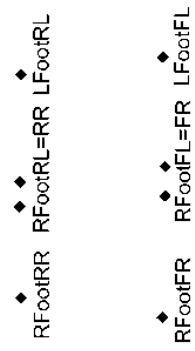


FIG. 8e

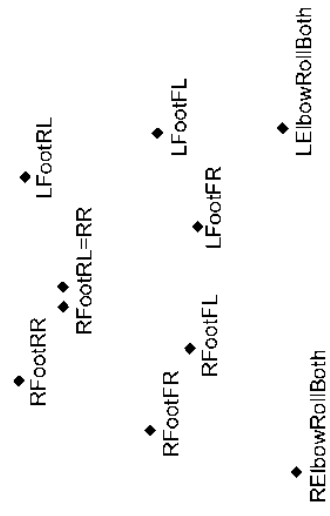


FIG. 8b

FIG. 8d

FIG. 8f

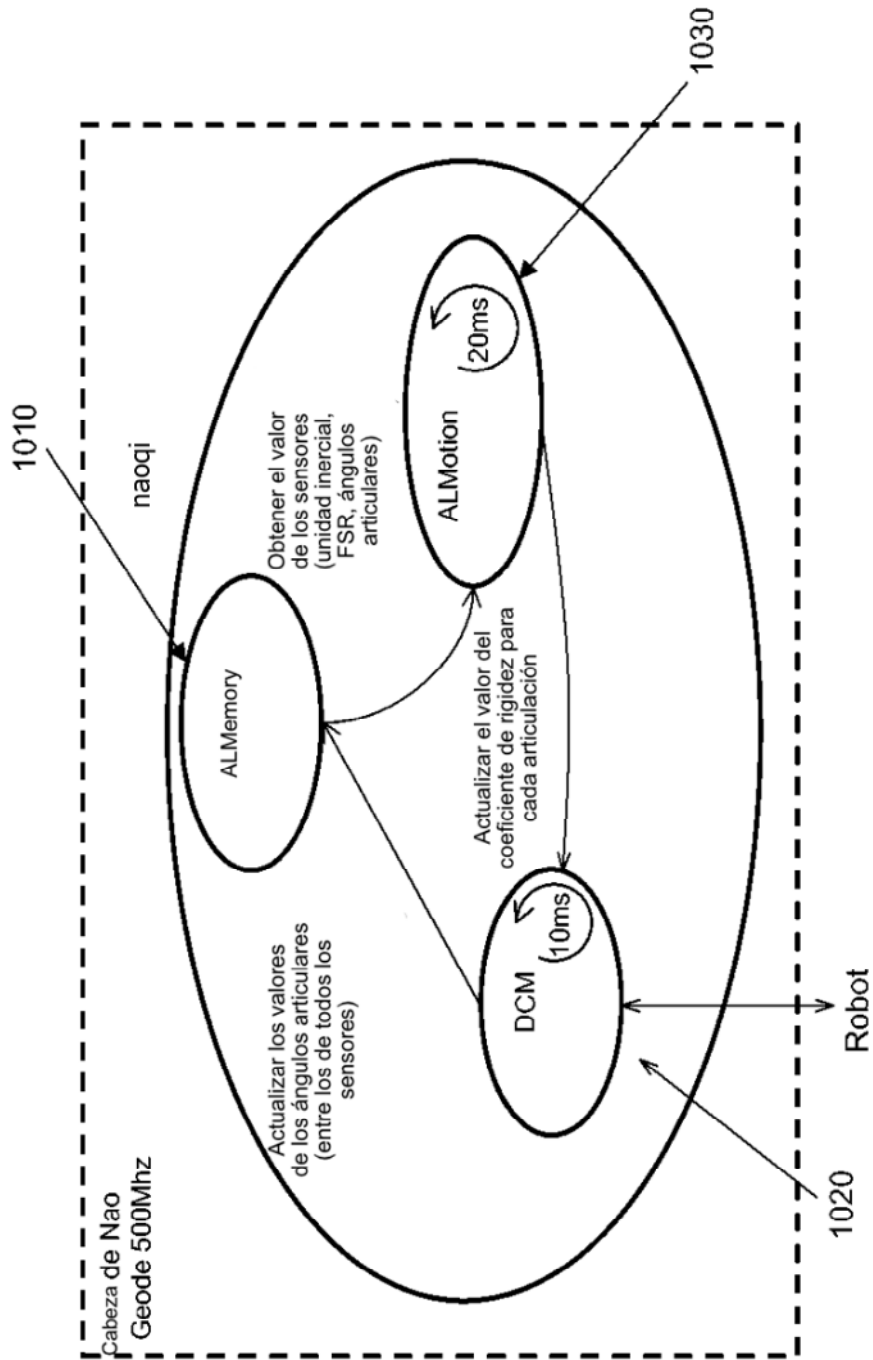


FIG.10