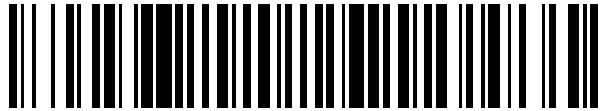


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 425 016**

51 Int. Cl.:

B62D 57/032 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **29.06.2010 E 10726979 (7)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **01.05.2013 EP 2448810**

54 Título: **Procedimiento para controlar la marcha de un robot móvil y robot que implementa el procedimiento**

30 Prioridad:

30.06.2009 FR 0954452

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

10.10.2013

73 Titular/es:

**ALDEBARAN ROBOTICS S.A. (100.0%)
168 bis - 170 rue Raymond Losserand
75014 Paris, FR**

72 Inventor/es:

**MAISONNIER, BRUNO;
LAFOURCADE, PASCAL y
BERTHOZ, ALAIN**

74 Agente/Representante:

CARPINTERO LÓPEZ, Mario

ES 2 425 016 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

Procedimiento para controlar la marcha de un robot móvil y robot que implementa el procedimiento

La presente invención pertenece al dominio de los sistemas de programación de los robots. Más precisamente, se aplica al control de la marcha y de la carrera de robots, particularmente de forma humana o animal, que se desplazan sobre unos miembros articulados o no. Un robot puede ser calificado de humanoide a partir del momento en que posee ciertos atributos de apariencia y funcionalidades del hombre: una cabeza, un tronco, dos brazos, eventualmente dos manos, dos piernas, dos pies... Desde el siglo XVII, la marcha se ha modelizado como la progresión de un compás con las piernas separadas por un paso fijo que se desplazan en una dirección dada (Borelli G., 1685, De motiu animalium, Vol. 1, Leiden, Holanda, Lugduni). Otra imagen frecuentemente empleada es la del doble péndulo inverso en la que los dos pies constituyen unos puntos que se desplazan alrededor de los que oscilan los puntos superiores de la unión de las dos piernas articuladas a dichas caderas, describiendo unos arcos en la dirección general de la marcha.

Más recientemente, unos trabajos teóricos han buscado fusionar los principios de la modelización de la marcha anteriormente recordados con los de la modelización de la carrera en los que el comportamiento de cada pierna se asimila al de un resorte de coeficiente de extensión y de longitud en reposo dados.

Estos conceptos no han podido sin embargo ser aplicados con éxito para controlar el desplazamiento de robots durante un periodo largo. Una de las razones de esta incapacidad es probablemente que el principio del péndulo inverso no ha sido aplicado de modo útil hasta la actualidad más que a los objetos a los que una fuente exterior suministraba la energía cinética suficiente para asegurar la progresión hacia adelante, más allá de algunos pasos. La motorización de las caderas no es suficiente en efecto, salvo excepción tal como la de un robot patinador sobre hielo, para comunicar a un robot una energía suficiente para compensar las pérdidas ligadas a los rozamientos de los pies sobre el suelo.

La mayor parte de los diseñadores de robots articulados sobre unos miembros, particularmente las empresas japonesas tales como Honda y Sony, han hecho uso para el control de la marcha de modos de realización variados de un concepto central bautizado "Zero Moment Point" o ZMP. Según este concepto, se determina inicialmente la trayectoria que debe tener el ZMP en una referencia ligada al suelo para satisfacer las condiciones de equilibrio dinámico a todo lo largo de una trayectoria planificada en función de los objetivos de dirección y de velocidad de la marcha. Después se calculan las posiciones de las terminaciones y articulaciones del robot en la misma referencia ligada al suelo en cada instante mediante transformación inversa de las ecuaciones que determinan las posiciones respectivas del ZMP y de dichas terminaciones y articulaciones. Este enfoque presenta particularmente los inconvenientes siguientes: i) supone un conocimiento de la topografía del suelo que permita colocar en todo momento el ZMP y los puntos útiles del robot en una referencia ligada al suelo; ii) necesita un cálculo completo de planificación de la trayectoria, lo que es muy exigente en potencia de cálculo. Se han propuesto diferentes mejoras del concepto de base al cabo de los años para limitar los inconvenientes de este enfoque, pero, a día de hoy, ninguna mejora ha permitido suprimirlas totalmente.

Es precisamente uno de los objetivos de la presente invención resolver este problema suprimiendo la referencia al ZMP, y combinando un modelo de la marcha controlado por los desplazamientos balísticos de las caderas con un suministro de energía cinética al robot mediante la activación del talón, en un enfoque más eficaz porque éste modeliza mejor la marcha real.

El artículo "Energetic Consequences of Walking Like an Inverted Pendulum: Step-to-Step Transitions" de Arthur D.kuo, J. Maxwell Donelan y Andy Ruina divulga un procedimiento de control de la marcha de un robot de acuerdo con el preámbulo de la reivindicación 1 de la presente invención. Este procedimiento no permite, sin embargo, paliar los inconvenientes citados anteriormente.

Con este fin, la presente invención divulga un procedimiento de control de la marcha de un robot adecuado para desplazarse sobre al menos dos miembros sobre una superficie de progresión, comprendiendo dicho procedimiento, para cada paso, al menos una primera etapa de movimiento de cada una de las caderas sobre una trayectoria sensiblemente esférica centrada sobre la extremidad en apoyo sobre el suelo del miembro unido a dicha cadera y una segunda etapa de movimiento de dicha extremidad hacia un nuevo punto de apoyo, estando caracterizado dicho procedimiento porque comprende además una etapa de cálculo de una posición del nuevo punto de apoyo de dicha extremidad sobre la superficie de progresión en función de la velocidad del centro de masas del robot.

Ventajosamente, el procedimiento de la invención comprende además otra etapa intermedia entre dichas primera y segunda etapa, en el curso de la que el alargamiento entre la extremidad del miembro en apoyo en el suelo y dicha cadera se incrementa en un valor tal que el segmento que une la posición de dicha cadera al final de una trayectoria esférica a la posición de la segunda cadera al comienzo de la trayectoria esférica siguiente es sensiblemente paralelo a la superficie de progresión.

Ventajosamente, el eje del tórax del robot está controlado para permanecer en un ángulo sensiblemente constante con la vertical.

Ventajosamente el eje de las caderas está controlado en función de la dirección de la marcha.

Ventajosamente, el incremento del alargamiento entre la extremidad del miembro en apoyo sobre el suelo y dicha cadera se proporciona mediante un impulso de dicha extremidad sobre el suelo desencadenado mediante un control en inclinación de una articulación del tobillo prevista en dicho miembro.

- 5 Ventajosamente, el incremento del alargamiento entre la extremidad del miembro en apoyo sobre el suelo y dicha cadera se proporciona mediante un impulso de dicha extremidad sobre el suelo desencadenada por un control de la articulación de la rodilla.

- 10 Ventajosamente, el incremento del alargamiento entre la extremidad del miembro en apoyo sobre el suelo y dicha cadera se proporciona mediante un impulso de dicha extremidad sobre el suelo desencadenada por un control de un émbolo en la pierna, paralelo a esta última.

Ventajosamente, los impulsos del talón se desencadenan cuando la dirección de la pierna tiene un ángulo con relación a la vertical superior a un ángulo limitado que depende de la velocidad del COM y de una consigna de velocidad de la marcha.

- 15 Ventajosamente, la articulación motorizada que permite el impulso está controlada por una pendiente de velocidad, función de la aceleración límite del motor y de la relación de la velocidad del centro de masas a la consigna de velocidad de la marcha.

- 20 Ventajosamente, la carrera del pie en la dirección de la marcha depende de variables elegidas en el grupo que comprende la posición del centro de masas en la misma dirección, la longitud del miembro, la longitud del pie y la velocidad del centro de masas en la dirección de marcha. Ventajosamente, la carrera del pie perpendicular a la dirección de la marcha depende de variables elegidas entre el grupo que comprende la posición del centro de masas en la misma dirección, la consigna de dirección de marcha, la longitud de la cadera, la velocidad en la dirección perpendicular a la dirección de la marcha y la consigna de velocidad de marcha.

Ventajosamente, al menos un miembro es adecuado para ser controlado para realizar un movimiento de desaceleración antes de que su extremidad toque la superficie de progresión.

- 25 La invención divulga igualmente un robot adecuado para desplazarse sobre una superficie de progresión sobre al menos dos miembros, comprendiendo dicho robot al menos un módulo adecuado para generar para cada paso un movimiento de cada una de las caderas sobre una trayectoria sensiblemente esférica centrada sobre la extremidad en apoyo sobre el suelo del miembro unido a dicha cadera y un módulo adecuado para generar un movimiento de dicha extremidad hacia un nuevo punto de apoyo, estando caracterizado dicho robot porque comprende además un módulo para calcular una posición del nuevo punto de apoyo de dicha extremidad sobre la superficie de progresión en función de la velocidad del centro de masas del robot.
- 30

Ventajosamente, al menos uno de los miembros comprende un émbolo cuyo eje es paralelo al eje de dicho miembro.

- 35 Ventajosamente, al menos una extremidad de uno de dichos miembros comprende un pie que comprende al menos dos articulaciones que pivotan en ejes sensiblemente paralelos entre sí, y sensiblemente perpendiculares a la dirección del pie, uno próximo a la extremidad delantera del pie y el otro próximo al talón.

Ventajosamente, al menos una extremidad de uno de dichos miembros comprende un pie cuyo extremo delantero comprende un contorno redondeado cuya forma está prevista para desencadenar una elevación del talón cuando la extremidad delantera del pie pivota hacia adelante.

- 40 Ventajosamente, un robot de acuerdo con la invención comprende además un conjunto de sensores inerciales que permiten conservar sensiblemente constante la orientación de una referencia ligada a una parte del robot con relación a una referencia exterior fija.

- 45 Ventajosamente, un robot de acuerdo con la invención comprende además un conjunto de sensores inerciales que permiten medir con precisión las aceleraciones y las velocidades, lineales y angulares, del tórax o de la cabeza, permitiendo deducir la velocidad vectorial del centro de gravedad.

- 50 Para implementar la invención, no es necesario conocer la geometría del suelo que no interviene directamente en la estabilización. Esto no plantea un problema particular en el caso de superficies de progresión planas o regulares (tales como unas escaleras). Esto se convierte muy difícil, incluso imposible en el caso de superficies accidentadas. De acuerdo con la invención, es posible, como se verá más adelante, referenciar el robot en una referencia galileana fija sin conocer la geometría del suelo y controlar los movimientos de marcha en una referencia del robot estabilizada con relación a la referencia exterior.

Además, un robot realizado de acuerdo con uno de los modos de la invención tendrá una velocidad posible de desplazamiento superior a la velocidad de un robot de la técnica anterior cuya marcha esté controlada mediante ZMP. En efecto, en el caso de un robot de la técnica anterior, el robot debe regular su velocidad de desplazamiento

según la capacidad de cálculo de los procesadores de a bordo, ampliamente solicitados por la necesidad de efectuar continuamente unos cálculos predictivos de la trayectoria de desplazamiento que son complejos porque se basan sobre una modelización de la evolución de las fuerzas de aceleración (preview controllers). Este no es el caso para unos robots realizados de acuerdo con la invención que pueden así, a igual potencia de cálculo, desplazarse más rápidamente. Se puede esperar así alcanzar 5 km/h para un robot de 1,3 m de altura que tenga unas piernas de alrededor de 70 cm.

Además, la marcha se puede controlar sin tener que determinar la posición futura del pie que se desplaza de manera precisa, mientras que en el cálculo del ZMP el conocimiento preciso de las posiciones de los pies y de las fuerzas de reacción del suelo en estas posiciones es indispensable.

10 La invención proporciona igualmente la ventaja de replicar la marcha humana verdadera de manera muy cercana. Esto permite a la vez un reflejo más realista de los movimientos del robot y una programación de comportamientos del robot muy próximas a las de un ser humano. Se puede concebir totalmente, de acuerdo con un modo de realización de la invención, programar así un robot para que sea capaz de efectuar unos saltos, eventualmente con piruetas antes o después.

15 La invención se comprenderá mejor y surgirán diferentes características y ventajas a partir de la descripción a continuación de varios ejemplos de realización y de sus figuras adjuntas en las que:

- la figura 1 es una ilustración de los principios de un algoritmo de control de la marcha de un robot de acuerdo con un documento de la técnica anterior.
- La figura 2 es una vista esquematizada en dos dimensiones del modelo de marcha implementado en un modo de realización de la invención de acuerdo con una vista perpendicular al eje de desplazamiento y que comprende las diferentes articulaciones importantes y el centro de masas;
- la figura 3 es una vista esquemática de un robot que muestra los principales puntos característicos utilizados para controlar su marcha en un modo de realización de la invención;
- la figura 4 es una vista esquemática de un robot que muestra los principales puntos, ejes y ángulos utilizados para controlar su marcha en un modo de realización de la invención;
- la figura 5 es una vista detallada de la parte de la figura 4 centrada sobre el pie;
- la figura 6 es una vista esquemática que muestra un primer modo de realización del pie del robot para implementar el procedimiento de la invención y que permite el levantamiento del talón durante la fase de incursión durante la marcha;
- la figura 7 es una vista esquemática que muestra un segundo modo de realización del pie del robot para implementar el procedimiento de la invención con una articulación de pivote situada en la parte delantera del pie;
- la figura 8 muestra mediante una vista lateral las trayectorias de una pierna, de la cadera y del centro de masas del robot de acuerdo con un modo de realización de la invención;
- la figura 9 muestra mediante una vista de tres cuartos delantera las trayectorias de las dos piernas, de las dos cadenas y del centro de masas del robot de acuerdo con un modo de realización de la invención;
- la figura 10 es un organigrama de tratamientos informáticos para implementar la invención de acuerdo con uno de sus modos de realización.

La figura 1 es una ilustración de los principios de un algoritmo de control de la marcha de un robot de acuerdo con un documento de la técnica anterior.

Se trata ahí de un robot humanoide

Esta figura se extrae de la Patente US 5.357.433 expedida el 18/10/1994 a Takenaka et ál. (Honda). La patente trata de la implementación de un algoritmo ZMP. Por los principios fundamentales de la dinámica, la suma del momento de la fuerza de inercia 101 y del momento de la fuerza de la gravedad 102, compuestos en el centro de masas 100, se debe equilibrar por el momento de la fuerza de reacción aplicada sobre la suela del pie en contacto con el suelo. Estas condiciones determinan una serie de posiciones objetivo 104 del ZMP, que se sitúan en la intersección en el suelo del eje inercial que une el centro de masas y el punto de aplicación de la fuerza de reacción. El movimiento real del robot determina un ZMP real. Los movimientos del robot se controlan para restablecer la trayectoria de los ZMP reales sobre la trayectoria de los ZMP objetivo. Para esto es necesario conocer la orientación de las fuerzas de reacción del suelo y por tanto la superficie de éste. La invención permite superar este conocimiento haciendo referencia a otra condición de estabilidad del robot.

La figura 2 es una vista esquematizada en dos dimensiones del modelo de marcha implementado en un modo de realización de la invención de acuerdo con una vista perpendicular al eje de desplazamiento y que comprende las diferentes articulaciones importantes y el centro de masas.

55 Se deduce de la figura el desplazamiento de una de las caderas que recorre 4 posiciones 200, 200', 200'' y 200''' mientras que el pie de esta pierna se desplaza de una primera posición 210 en el suelo a una segunda posición 210' en el suelo. Mientras que el pie está sobre su primer apoyo 210, la cadera describe un primer arco 200, 200' que se inscribe sobre una esfera centrada en 210. En paralelo el segundo pie (no representado en la figura) se desplaza

desde su antiguo punto de apoyo hacia su nuevo punto de apoyo, el punto 210'. Cuando éste se alcanza, la cadera correspondiente describe un segundo arco 200'', 200'''. Concomitantemente, el centro de masas (Centre Of Mass o COM) en donde se concentra, en el modelo simplificado considerado, toda la masa del robot, sigue una trayectoria 230, 230', 230'', 230'''. Esta trayectoria es igualmente una sucesión de arcos de esferas en la que uno de sus centros (el correspondiente a las posiciones 200, 210, 230) se referencia con 240 en la figura. Estos dos movimientos son balísticos, es decir que podrían proseguirse sin aporte de energía exterior si la transición entre los puntos 200' y 200'' no fuera la ocasión para una pérdida de energía ligada a la necesidad de "remontar" sobre la segunda esfera. De acuerdo con la invención, la energía se aporta al sistema para permitir esta remontada. Este aporte de energía permite evitar que la cadera descienda en cada paso por debajo de un cierto nivel con relación a la superficie de progresión. De ese modo, el movimiento se conserva. Hay varias maneras de realizar este aporte de energía. El punto común entre ellas es que, durante este aporte, la distancia entre la cadera y el punto de apoyo en el suelo del miembro correspondiente se alarga, como se observa en la figura: la longitud 210, 200'' es superior a la longitud 210, 200'. Para realizar este alargamiento se puede prever por ejemplo un émbolo en cada miembro que se acciona en el momento deseado para desencadenar el impulso. Se puede realizar igualmente el alargamiento conservando la rodilla del robot plegada durante la fase balística y desplegándola para provocar el impulso. De manera más próxima a la marcha humana, es posible también prever diferentes modos de elevación del talón que procuran un alargamiento entre el punto de apoyo del miembro en el suelo (unos dedos del pie, un extremo delantero redondeado del pie) y la cadera. Estos diferentes modos de realización del alargamiento que proporcionan un aporte de la energía a la marcha, que se producen en la zona 220 de la figura 2, se expondrán a continuación en lo que sigue de la descripción, particularmente en los comentarios relativos a las figuras 6 y 7. Ventajosamente, el descenso sobre el arco de esfera puede haber sido frenado antes, lo que corresponde a la realidad del movimiento de la marcha humana.

La figura 3 es una vista esquemática de un robot que muestra los principales puntos característicos utilizados para controlar su marcha en un modo de realización de la invención.

Esta vista de tres cuartos delantera permite ilustrar las colocaciones relativas de los principales elementos que permiten el control de la marcha. Cada una de las caderas, colocadas en la extremidad de un eje que representa la pelvis, describe en el curso de la marcha una trayectoria que es una sucesión de arcos de esfera. Estos están ligados mediante unas fases en el curso de las que se aporta un impulso a una de las piernas por medio de un impulso dado mediante la articulación pivote del tobillo cuyo eje es paralelo al plano frontal, arrastrando una rotación de la parte del pie que lleva esta articulación, alrededor de una articulación pivote situada en la parte delantera del pie. Visualmente, este movimiento corresponde a la elevación del talón del pie de apoyo. El COM sigue una trayectoria que se determina a la vez mediante los recorridos de las dos cadenas sobre los arcos de las esferas y mediante los movimientos de rotación de la pelvis alrededor del tórax lo que permite controlar la dirección de la marcha, como se explica a continuación en la descripción, particularmente en el comentario a la figura 10.

La figura 4 es una vista esquemática de un robot que muestra los principales puntos, ejes y ángulos utilizados para controlar su marcha en un modo de realización de la invención.

Las referencias en la figura designan los elementos siguientes:

- 400: dirección del pie, es también la dirección de pivote del balanceo del tobillo;
- 402: dirección perpendicular a la superficie de la suela, dirigida hacia arriba (que no es forzosamente vertical);
- 40 - 401: perpendicular a 400 y 402, tal como el sistema de ejes (400, 401, 402) constituye una referencia ortonormal directa;
- 403: dirección del pivote de cabeceo del tobillo;
- 404: dirección de la pierna, dada por la recta que pasa por el centro de la cadera 200 y el punto 408;
- 405: recta que pasa por 408 y el COM, y por extensión, dirección de esta recta;
- 45 - 406: recta que pasa por los centros de las caderas derecha e izquierda (eje de la pelvis), y por extensión, dirección de esta recta;
- 407: dirección ortogonal a 406, dirigida hacia delante;
- 408: centro de la rótula del tobillo situado en la intersección de las rectas 400, 401 y 402;
- 430: recta que simboliza la dirección del tórax;
- 50 - 450: suelo (que no es forzosamente horizontal);
- 451: vertical.

En la posición de reposo, las direcciones 402 y 404 (respectivamente 401 y 403) se confunden.

El sistema pierna-cadera-tórax se modeliza como se representa en la figura: la pierna 404 está unida a la cadera 200; la cadera 200 está unida por una semipelvis al eje del tórax 430 al que es perpendicular la pelvis. El centro de masas COM, 230 se sitúa en el eje 430. Las masas de los sólidos intermedios se consideran como despreciables. El robot se asimila a una masa puntual situada en el centro de masas COM, 230.

En las descripciones siguientes, los movimientos de los diferentes puntos del robot se refieren a la referencia ligada al pie del robot en apoyo sobre el suelo. En esta referencia centrada sobre el tobillo 408, los ejes 400, 401, 402 definen respectivamente la dirección del eje del pie, el eje paralelo a la planta del pie y perpendicular a 400,

pasando por el tobillo 408 y la perpendicular hacia arriba al plano formado por las dos rectas 400, 401. En el curso de la marcha, esas referencias (408, 400, 401, 402) constituyen una sucesión de referencias galileanas. Se determina la velocidad del centro de masas, que es el centro de una referencia no galileana (referencia R_0), en esta referencia galileana que se fija al comienzo de cada una de las fases balísticas. Esto permite calcular la posición siguiente del pie en cada paso de manera independiente de las posiciones anterior y posterior, por lo tanto sin tener que determinar una trayectoria, contrariamente a lo que es necesario en los cálculos ZMP. No es por lo tanto útil resolver las ecuaciones del Principio Fundamental de la Dinámica. Para esto, es necesario solamente disponer por ejemplo de una central de inercia o más generalmente de combinaciones de girómetros y de acelerómetros. Estos sensores se pueden colocar por ejemplo en el tórax o en la cabeza, debiendo éste, sin embargo, permanecer estable dentro de lo posible. Se supera de ese modo la necesidad de conocer el suelo para deducir la vertical. Se define igualmente una dirección 404, colineal con la pierna y la dirección 405 que pasa por el tobillo 408 y el centro de masas COM.

En uno de los modos de realización de la invención, se controla la dirección del eje torácico 430 en un ángulo sensiblemente constante con relación a la vertical, conocida por ejemplo mediante la central inercial, esto de manera que establezca tanto como se pueda conseguir dicha central inercial. Se controlan igualmente los movimientos del eje de las caderas 406 mediante el ángulo 410 que realiza con el eje 400 de referencia del pie. A título puramente ilustrativo, se puede fijar por ejemplo la consigna aplicada a este ángulo 410 de tal manera que sea igual, en el momento de posar el futuro pie de apoyo, a la mitad del ángulo que realiza éste con el pie actual.

La figura 5 es una vista detallada de parte de la figura 4 centrada sobre el pie. Se tienen sobre estas figuras las referencias suplementarias siguientes:

- 500: dirección tal que (400, 403, 500) sea una referencia ortonormal directa. Es por tanto el resultado de la rotación del ángulo 501 alrededor de 400, aplicado a 402.
- 501: ángulo de rotación alrededor de 400; es el ángulo de balanceo del tobillo; la posición en reposo se define tal que la dirección 403 es idéntica a la dirección 401 y 500 idéntica a 402;
- 502: ángulo de rotación alrededor de 403; es el ángulo de cabeceo del tobillo; la posición en reposo se define tal que la dirección 404 es idéntica a la dirección 500.

En un modo de realización, el robot comprende tres articulaciones en el pie:

- Una articulación (situada en el punto 408) que permite controlar los movimientos del pie en inclinación (ángulo 502 de cabeceo en el plano de la marcha);
- Una articulación que permite controlar los movimientos del pie en inclinación lateral (ángulo 501 de balanceo en el plano de las caderas en reposo);
- Un pivote que permite controlar los movimientos de la parte delantera del pie, aun denominados dedos, en inclinación (ángulo de cabeceo en el plano de la marcha) con relación al suelo.

Las dos articulaciones situadas en el punto 408 (articulaciones del tobillo) están motorizadas, la articulación de la parte delantera del pie puede ser pasiva o motorizada. Igualmente, la cadera comprenderá preferentemente una rótula motorizada, por ejemplo mediante tres pivotes o un sistema cinemático paralelo. La motorización de esta cadera debe permitir controlar el eje del tórax 430 en un ángulo sensiblemente constante con relación a la vertical, y el movimiento de las caderas 406. La potencia de estos motores se dimensionará en función de la reactividad deseada de la marcha. Ventajosamente, pueden estar controlados mediante un sistema informático tal como el divulgado por la solicitud FR08/01956000 presentada por el solicitante de la presente solicitud que trata sobre una arquitectura de control que controla tres niveles de un robot móvil utilizando los miembros articulados. Un primer procesador elabora unos controles de alto nivel que se pasan a un segundo procesador que gestiona las comunicaciones con las tarjetas de control de los motores.

En un modo de realización de la invención, para encontrar la solución de la marcha, se resuelve el sistema en dos fases:

- En una primera fase, el talón está en el suelo; el sistema considerado está constituido por la masa del robot aplicada al centro de masas, COM, mediante los segmentos sin masa constituidos por la pierna y por el eje del tórax que unen el centro de masas al eje de las caderas; la fuerza exterior aplicada al sistema es la resultante del peso (gravedad aplicada a la masa del robot en el COM) y de la fuerza resultante del apoyo del plano del pie en el suelo (fuerza de sentido contrario dirigida sensiblemente siguiendo 405);
- En una segunda fase, el sistema está constituido por el sistema anterior al que se añade el pie; el parámetro de control es el ángulo 502; este parámetro de control viene dado por ejemplo por una pendiente de velocidad angular del motor de la articulación de inclinación del tobillo que puede por ejemplo ser función de la aceleración angular límite del motor y de la relación de la velocidad del centro de masas a la consigna de velocidad de marcha. Ventajosamente, esta consigna se da en par. En efecto, se desea transmitir energía al sistema, por lo tanto un esfuerzo a lo largo de un desplazamiento. Con un control por par, se controla más finamente la energía que se aporta al sistema. Además, como es necesario obligar sobre el tobillo para hacer elevarse al talón, independientemente de la posición de dicho tobillo, es complicado un control de posición, porque de entrada se debe medir la posición y la velocidad del tobillo, después realizar una pendiente a partir

de este punto de funcionamiento. Estos cálculos son más complicados y movilizan por lo tanto más potencia de cálculo que la aplicación de un control de par en número de Nm.

5 Para las dos fases, se podrían resolver las ecuaciones del movimiento que se tienen escribiendo el Principio Fundamental de la Dinámica (PFD) aplicado al sistema. Pero estos cálculos no son necesarios: las fases balísticas no tienen necesidad de ser calculadas porque no necesitan la aplicación de controles particulares. Para las fases de controles durante el impulso, que son independientes unos de los otros, no es necesario ningún cálculo de trayectoria, sólo se han de calcular los parámetros de intensidad y del momento de desencadenamiento del impulso. Finalmente, la posición del pie en el paso siguiente debe calcularse también en función de la velocidad del COM tomada en unos momentos elegidos de la fase balística.

10 Los diferentes cálculos que permiten determinar estos elementos se dan a continuación en lo que sigue de la descripción, en el comentario a la figura 10.

La figura 6 es una vista esquemática que muestra un primer modo de realización del pie del robot para realizar el procedimiento de la invención permitiendo la elevación del talón durante la fase de impulso durante la marcha.

15 La figura 7 es una vista esquemática que muestra un segundo modo de realización del pie del robot para realizar el procedimiento de la invención con una articulación de pivote situada en la parte delantera del pie.

Las dos figuras representan unas variantes de implementación.

Se tienen en estas figuras las referencias suplementarias siguientes:

- 600: eje del cilindro delantero 603;
- 600': eje del pivote 700;
- 20 - 601: eje del cilindro posterior 604;
- 603: cilindro delantero que permite la elevación del talón;
- 604: cilindro posterior que permite la elevación de la punta del pie;
- 700: pivote entre pie y dedos del pie.

25 El pie del robot debe configurarse de manera que pueda efectuar unos movimientos de cabeceo alrededor de su parte delantera y alrededor de su parte posterior. Con este fin, cada pie del robot está conformado ventajosamente con un cilindro delantero 603 de eje 600 (o un dedo en pivote 700 de eje 600') y un cilindro posterior 604 de eje 601, siendo los ejes 600 (o 600'), 601 paralelos a la planta del pie, y perpendiculares a la dirección del pie 400.

30 Los movimientos de cabeceo con uno u otro de los ejemplos de pie (Fig. 6 y Fig. 7) son el resultado de la dinámica del sistema sometida a la acción controlada del motor de la articulación en cabeceo del tobillo tal como se ha descrito anteriormente. La velocidad del centro de masas crea una energía cinética que facilita el alargamiento del miembro en apoyo, incluso en ausencia de pivote en los dedos del pie, cuando la extremidad delantera del pie está redondeada (fenómeno "voltereta"). La acción del pivote, prevista en la variante de realización de la figura 7 permite, sin embargo, un mejor control del desencadenamiento del impulso y una mejor estabilidad de los apoyos y por tanto un mejor ajuste de la velocidad de la marcha a una consigna.

35 La figura 8 muestra mediante una vista lateral las trayectorias de la pierna, de la cadera y del centro de masas de un robot de acuerdo con un modo de realización de la invención.

Las referencias en la figura designan los elementos siguientes:

- 801: una fase balística;
- 802: una fase de impulso;
- 40 - 803: la trayectoria de la cadera y de la pierna de apoyo durante la fase balística 801;
- 804: la trayectoria de la cadera y de la pierna de apoyo durante la fase de impulso 802;
- 805: la trayectoria del COM durante la fase balística 801;
- 806: la trayectoria del COM durante la fase de impulso 802;
- 807: el pie durante la fase de impulso (de elevación del talón).

45 Se esquematiza en la figura la marcha de un robot del que no se ve en cada paso más que una única pierna de apoyo:

- el centro de masas COM describe localmente una trayectoria sobre un arco de esfera desfasado con relación a la esfera descrita por la cadera;
- la cadera describe un arco que se inscribe sobre una esfera cuyo centro es el centro del tobillo (anteriormente referenciado 408 en la figura 4);
- 50 - la pierna oscila como un péndulo inverso durante los apoyos en el suelo y progresa paso a paso. Entre cada péndulo inverso se encuentra la fase de impulso del tobillo.

En este ejemplo, la velocidad media de marcha es de alrededor de 1,45 m/s y la duración de un paso de alrededor de 0,25 s.

La figura 9 muestra mediante una vista de tres cuartos delantera las trayectorias de las dos piernas, de las dos caderas y del centro de masas de un robot de acuerdo con un modo de realización de la invención.

Se puede observar mejor así la manera en que progresa la marcha. En particular, el centro de masas sigue una trayectoria en el plano vertical que está suavizada por los impulsos dados por el talón entre los arcos de esfera descritos durante el desplazamiento de un miembro al suelo. La marcha se desarrolla en la dirección de la consigna. La marcha es así “cuasi humana”, lo que es uno de los objetivos de la invención.

En el modo de realización ilustrado, la marcha se descompone funcionalmente en tres fases:

- Una fase “seudolibre”: en esta fase, el tobillo no es el motor del movimiento; es una fase balística, durante la que la cadera sigue una trayectoria balística, determinada por la velocidad y la posición de entrada en esta fase; se controla la trayectoria motorizando el tobillo para disminuir el efecto de los rozamientos secos y viscosos en el cabeceo y frenar más o menos en balanceo; por defecto, la articulación del tobillo puede estar desembragada;
- Una fase de impulso: es la fase durante la que se acarrea la energía en la marcha: durante esta fase, el tobillo en cabeceo (inclinación) está controlado, por ejemplo, mediante una pendiente de velocidad;
- Una fase de posicionamiento reactivo del pie siguiente: es una marcha reactiva; a cada paso, el algoritmo de la marcha determina la posición del pie siguiente. Esta posición se determina teniendo en cuenta la velocidad y la aceleración del centro de gravedad (elegidas en ciertas posiciones clave), la consigna de “alto nivel” de dirección y la consigna de “alto nivel de velocidad”.

La figura 10 es un organigrama de tratamientos informáticos para realizar la invención de acuerdo con uno de sus modos de realización.

El algoritmo de control de la marcha se ilustra mediante la figura que indica, en un modo de realización de la invención, las variables de control global 1001, 1002 y los datos resultantes de la memoria de almacenamiento de datos de sensores 1003, 1004, 1005, 1006, 1007 que se pasan a los módulos de tratamiento para elaborar las variables de estado y las consignas a transmitir a las tarjetas de los motores, estando almacenadas dichas consignas en las pilas tratadas por los procesadores del robot. El significado de las variables es el siguiente:

- 1001: consigna de velocidad de marcha;
- 1003: posición articular de la rodilla;
- 1004: velocidad angular articular de la rodilla;
- 1005: ángulos de orientación del_torso en la referencia Ro (entendiéndose que Ro se estabiliza en “horizontal”);
- 1006: posiciones_articulares_pierna de apoyo;
- 1007: velocidades_articulares_pierna de apoyo;
- 1008: variable de estado de impulso/no impulso;
- 1009: parámetros del impulso (detallados en la explicación de los tratamientos que permiten elaborarlos);
- 1010: variable de estado pierna de apoyo/libre;
- 1012: Consigna_posicion_cartesiana pie siguiente;
- 1013: posición y velocidad del centro del tórax;
- 1014: Consigna_par_inclinacion_tobillo cuando la pierna está en apoyo;
- 1015: Consigna_par_vaiven_tobillo cuando la pierna está en apoyo;
- 1016: Consigna_par_inclinacion_rodilla cuando la pierna está en apoyo;
- 1017: Consigna_posicion_inclinacion_rodilla cuando la pierna está en apoyo;
- 1018: Consigna_posicion_inclinacion_cadera cuando la pierna está en apoyo;
- 1019: Consigna_posicion_vaiven_cadera cuando la pierna está en apoyo;
- 1020: Consigna_posicion_giro_cadera cuando la pierna está en apoyo;
- 1021: Consigna_posicion_inclinacion_cadera, misma variable que 1018 cuando la pierna está libre;
- 1022: Consigna_posicion_vaiven_cadera, misma variable que 1019 cuando la pierna está libre;
- 1023: Consigna_posicion_giro_cadera, misma variable que 1020 cuando la pierna está libre;
- 1024: Consigna_posicion_inclinacion_rodilla, misma variable que 1017 cuando la pierna está libre;
- 1025: Consigna_par_inclinacion_tobillo, misma variable que 1014 cuando la pierna está libre;
- 1026: Consigna_par_vaiven_tobillo, misma variable que 1015 cuando la pierna está en el aire;
- 1027: Datos centrales de inercia;
- 1028: Consigna de dirección del torso;
- 1029: Consigna de dirección de la marcha;
- 1030: datos de los sensores de presiones sobre los pies o del esfuerzo sobre el pie;
- 1031: medidas de corriente de los motores de las piernas.

Cada una de las cajas en la parte central de la figura efectúa una parte de los tratamientos de los tipos siguientes:

- Un primer grupo de módulos permite determinar unas variables de estado (tales como la presencia o la ausencia de un impulso, 1008; o el estado de la pierna en apoyo o libre, 1009); se sitúan arriba a la izquierda de la figura (“Algoritmo de determinación del impulso” y “Determinación pierna de apoyo/libre”), entendiéndose

- que el primer módulo permite igualmente elaborar unos parámetros de consigna;
 - Un segundo grupo de módulos permite efectuar los cálculos de posición de la parte alta del robot (abajo a la izquierda de la figura);
 - Un tercer grupo de módulos permite elaborar los controles del par de las articulaciones del tobillo y de la rodilla (arriba a la derecha de la figura);
 - Un cuarto grupo de módulos permite elaborar los controles de posición de la rodilla y de la cadera cuando la pierna están en posición de apoyo y los controles articulares de posición cuando la pierna está libre (parte baja a la derecha de la figura), entendiéndose que ciertas articulaciones están controladas por posición y otras por par cuando la pierna está libre.
- 10 Los algoritmos de cálculo realizados en los principales módulos se detallan a continuación:
- Módulo "Determinación de la pierna de apoyo/libre":
 - El módulo reenvía dos variables de estado de referencia 1010: *estado_pierna_derecha* y *estado_pierna_izquierda*
 - Cada variable puede tomar 2 valores: *en apoyo* y *libre*.
- 15 La determinación se realiza comparando los valores de las medidas de las corrientes de los motores, y unos sensores de esfuerzo sobre los pies o sensores de presión sobre las plantas.
- Módulo "Algoritmo de determinación del impulso":
 - El módulo toma como entrada la consigna de velocidad de marcha global V_{consigna} (en m/s). Se puede fijar, a título de ejemplo no limitativo, una velocidad de consigna comprendida entre 0,5 y 1,5 m/s.
- 20 El impulso se determina a partir de un cierto número de ángulos característicos (radianes), siendo dados los valores numéricos a título de ilustración de situaciones típicas, sin pueda considerarse que la invención no se aplica más que a unas situaciones medidas por estos valores:
- o Angulo_cono_de_base, tomado por ejemplo 0,262 rd (15°), que corresponde a un paso medio;
 - o Angulo_cono_rozamiento = $\arctan(0,3)$, que corresponde a la adherencia de una superficie normal;
 - o Angulo_cono_corregido = $\text{Angulo_cono_de_base} * (1 - \max(0,3, 0,2 * V_{\text{consigna}} / \text{norm}(V_{\text{com}})))$, fórmula en la que V_{com} es la velocidad del centro de masas; esta corrección permite tener en cuenta la velocidad del robot con relación a la velocidad a esperar; si el robot no marcha suficientemente rápido, es necesario acelerar, y por lo tanto tener una fase de impulso más grande (que se inicie más pronto) y por tanto reducir el ángulo del cono; la corrección es inversa si se va demasiado de prisa; en los dos casos la corrección está acotada;
 - o Angulo_1 = ángulo entre las direcciones 402 y 405;
 - o Angulo_2 = ángulo entre las direcciones 402 y 404.
- Se determina el momento en el que debe iniciarse el impulso mediante la aplicación de las dos reglas siguientes:
- SI (angulo_1 > angulo_cono_rozamiento) => desencadenar el impulso
 - SI (angulo_2 > angulo_cono_corregido) y SI ($V_{\text{Z_com}} < 0$) => desencadenar el impulso (en esta fórmula, $V_{\text{Z_com}}$ designa la velocidad del centro de masas en el eje vertical).
- Se determina continuación la fuerza del impulso. Por ejemplo, se pueden determinar los parámetros de control del tobillo para la fase de impulso, con un control del tipo "trapecio de velocidad"
- Coef_velocidad_impulso = $V_{\text{consigna}} / \text{norm}(V_{\text{com}})$
 - Consigna_acel_cabeceo_tobillo = $-\max(\text{abs}(\text{aceleracion_max_cabeceo}), 0,5 * \text{Coef_velocidad_impulso} * \text{aceleracion_max_cabeceo})$
 - Consigna_vel_cabeceo_tobillo = $-\max(\text{abs}(\text{vel_max_cabeceo}), 0,5 * \text{Coef_velocidad_impulso} * \text{vel_max_cabeceo})$
- Las aceleraciones y velocidades son negativas porque se despliega el tobillo (se baja el pie).
- Módulo "Cálculo de posición siguiente del pie":
 - De la entrada, recibe
 - o el conjunto de variables denominado 1013; posición del centro de masas COM ($X_{\text{com}}, Y_{\text{com}}, Z_{\text{com}}$), y velocidad del COM ($V_{\text{X_com}}, V_{\text{Y_com}}, V_{\text{Z_com}}$);
 - o la variable global de control de la dirección de marcha, *consigna_direccion* (un número real comprendido entre -1 y 1).
- Uno de los elementos importantes que permiten la realización de la invención es por tanto la determinación de la posición y de la velocidad del COM. Estos elementos son suficientes, en combinación con las características físicas del robot y la toma en consideración de las consignas de dirección y velocidad de marcha, para determinar una

nueva posición del miembro en movimiento, compatible con el equilibrio dinámico del robot, sin tener en cuenta el histórico de la trayectoria ni su desarrollo futuro. Se trata por tanto de características instantáneas que no necesitan de cálculos complejos de trayectoria. El equilibrio dinámico del robot es compatible con superficies de progresión normalmente accidentadas, dependiendo la naturaleza de los accidentes manejables en una gran parte de la precisión de las medidas de posición y de velocidad del COM. Dicha precisión se puede asegurar por los medios indicados más adelante en la descripción.

5 Los vectores y otras coordenadas se expresan en la referencia del pie de apoyo: referencia ortonormal del centro 408, de ejes 400, 401 y 402.

En la salida de este módulo se recuperan las variables referenciadas 1012:

10 (X_pie_siguiente, Y_pie_siguiente, Z_pie_siguiente) y la variable direccion_pie_siguiente: Dir_pie_sig

Se definen los parámetros siguientes, cuyos valores numéricos corresponden a unos ejemplos de condiciones de funcionamiento de la invención, sin que estas condiciones se puedan considerar como limitativas:

o l_pie: longitud del pie;

o l_pierna: longitud de la pierna;

15 o Ky = -0,5

o Kx = 0,25

o Kvx = 0,0175*V_X_com

o Kvy = 3*V_Y_com/norm(V_com)

20 o Y_desviacion es la semi longitud con signo de la pelvis: Y_desviacion>0 cuando la pierna de apoyo es la pierna izquierda, Y_desviacion<0 cuando la pierna de apoyo es la pierna derecha

o angulo_pie_max = $\pi/4$

Los cálculos permiten determinar que X_pie_siguiente y Y_pie_siguiente son entonces:

$$X_{pie_siguiente} = X_{com} + l_{pie} + (Kx + Kvx) * l_{pierna}$$

25 $Y_{pie_siguiente} = Y_{com} + \min(Ky * Y_{desviacion} + (Kvy - consigna_direccion) * \text{abs}(Y_{desviacion}), -0,1 * \text{abs}(Y_{desviacion}))$ si se está sobre el pie izquierdo

$Y_{pie_siguiente} = Y_{com} + \min(Ky * Y_{desviacion} + (Kvy - consigna_direccion) * \text{abs}(Y_{desviacion}), 0,1 * \text{abs}(Y_{desviacion}))$ si se está sobre el pie derecho

El objetivo del min / max, siguiente del pie, es evitar colocar el pie del otro lado del centro de la pelvis, con relación a la cadera.

30 Por otro lado se tiene:

$$Z_{pie_siguiente} = 0,0;$$

$$Dir_{pie_sig} = \arcseno(V_Y_vom/norm(V_com)) + consigna_direccion * angulo_pie_max$$

De hecho, como el suelo no es conocido, el contacto tiene lugar en un momento que no está determinado con precisión, por ello no es en X_pie_siguiente y Y_pie_siguiente determinados por los cálculos, sino en la vecindad próxima de éstos (si el suelo está en una configuración no plana, aunque razonable).

35

- Módulo "Cálculo dirección del torso":

el cálculo de la dirección del torso es también el cálculo de la dirección de la pelvis en función de la dirección de marcha.

40 Los vectores y otras coordenadas se expresan en la referencia del pie de apoyo: referencia ortonormal del centro 408, de ejes 400, 401.402.

La función toma a la entrada las variables globales de control de dirección de marcha = consigna_direccion (1 número real comprendido entre -1 y 1)

Sea el ángulo de dir_torax = el ángulo numerado 410, fig. 4.

45 Se puede elegir por ejemplo una consigna de orientación de la pelvis tal que, al final de la fase de apoyo simple, angulo_dir_torax = Dir_pie_sig/2, lo que viene a imponer que, a la salida del paso, la pelvis se gire hacia el pie

siguiente, un semiángulo entre los pies, lo que corresponde a una progresión “natural”.

Para aplicar la consigna, existen diferentes posibilidades, por ejemplo:

$V_{\text{consigna_rot_pelvis}} = \text{consigna_direccion} * V_{\text{rot_max_pelvis}} - V_{\text{consigna}} * \text{coef} * \text{angulo_dir_torax}$ (medido en el momento de comienzo del paso).

5 Con, si $V_{\text{rot_pelvis}}$ diferente de $V_{\text{consigna_rot_pelvis}}$, entonces $\text{Acel_rot_pelvis} = \text{Acel_max_rot_pelvis}$

El resultado puede igualmente alcanzarse fijando una consigna sobre el error del ángulo de la pelvis:

$\text{Error_angulo_pelvis} = \text{Dir_pie_sig} / 2 - \text{angulo_dir_torax}$
 $V_{\text{consigna_rot_pelvis}} = K_p * \text{Error_angulo_pelvis}$
 $\text{Error_vrot_pelvis} = V_{\text{consigna_rot_pelvis}} - V_{\text{rot_pelvis}}$
 $\text{Acel_rot_pelvis} = K_v * \text{Error_vrot_pelvis}$

10 Es necesario igualmente determinar si la aplicación de un control debe realizarse en par o en posición. Por ejemplo, como regla general, el control de una rodilla en posición no se prefiere al control en par más que en la posición de apoyo simple (una pierna en apoyo, la otra libre) de manera que pueda conservar la pierna extendida.

Así, se determinan todos los parámetros de control de las tarjetas de los motores necesarios para la marcha.

15 El sistema de control de la marcha de un robot móvil de la invención se puede implantar en un robot humanoide que tenga dos miembros inferiores articulados, teniendo cada miembro un cierto número de grados de libertad. Ventajosamente, el robot está mandado por una arquitectura en tres niveles, teniendo dos procesadores, uno para elaborar los controles de alto nivel, eventualmente transmitidos mediante un enlace de comunicación con un servidor, y estando el otro dedicado a la traducción y a la transmisión a las tarjetas de control de los motores de las articulaciones, de los controles de alto nivel. El primer procesador puede ser una unidad central del tipo PC. El
 20 segundo procesador puede ser un procesador de conjunto de instrucciones reducido (RISC), por ejemplo de la marca ARM™. La frecuencia de reloj de este segundo procesador se debe elegir de manera que sea compatible con la velocidad de marcha deseada. En particular, para una marcha que simule la de un humano, se elegirá ventajosamente un reloj que permita elaborar unas instrucciones de acuerdo con una periodicidad de algunos milisegundos. El bus y el protocolo de comunicación deben ser compatibles igualmente con este objetivo de
 25 velocidad de marcha. La velocidad de marcha de un robot humanoide en el que se realiza el procedimiento de la invención dependerá igualmente de la altura de sus piernas.

Como ya se ha indicado, el robot debe estar dotado de sensores que permiten controlar la dirección del tórax y el eje de las caderas con la precisión de marcha deseada, determinada a su vez por el carácter más o menos regular de la
 30 superficie de progresión. Esta precisión puede venir dada mediante una central de inercia de buena calidad o un conjunto de sensores cuyas mediciones pueden combinarse.

Los pies del robot deben estar instrumentados de manera que puedan permitir la elevación del talón de manera estable. Podrán ser por ejemplo ventajosamente como se describe en las figuras 6 y 7, es decir permitiendo una rotación del pie sobre su punta sin que esto sea limitativo de la invención... La calidad del control de la marcha
 35 dependerá igualmente del número de grados de libertad de las otras articulaciones inferiores (como mínimo 2 en el tobillo, 2 en cada cadera más un par en la pelvis) (ventajosamente un 3^{er} grado de libertad en cada cadera) y, ventajosamente, de la posibilidad o bien de controlar por par o bien de desembragar durante las fases libres.

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

40

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento de control de la marcha de un robot adecuado para desplazarse sobre al menos dos miembros sobre una superficie de progresión, comprendiendo dicho procedimiento, para cada paso, al menos una primera etapa de movimiento de cada una de las caderas sobre una trayectoria, sensiblemente esférica (200, 200', 200'', 200''') centrada sobre la extremidad en apoyo en el suelo (210; 210'), del miembro unido a dicha cadera y una segunda etapa de movimiento de dicha extremidad hacia un nuevo punto de apoyo, estando dicho procedimiento **caracterizado porque** comprende además una etapa de cálculo de una posición del nuevo punto de apoyo de dicha extremidad sobre la superficie de progresión en función de la velocidad del centro de masas del robot.
2. Procedimiento de control de acuerdo con la reivindicación 1, **caracterizado porque** comprende además otra etapa intermedia entre dichas primera y segunda etapa, en el curso de la cual el alargamiento entre la extremidad del miembro en apoyo en el suelo y dicha cadera (210, 200') se incrementa en un valor tal que el segmento (200', 200'') que une la posición de dicha cadera al final de una trayectoria esférica a la posición de la segunda cadera al comienzo de la trayectoria esférica siguiente, es sensiblemente paralelo a la superficie de progresión.
3. Procedimiento de control de acuerdo con la reivindicación 1, **caracterizado porque** el eje del tórax del robot está controlado para permanecer en un ángulo sensiblemente constante con la vertical.
4. Procedimiento de control de acuerdo con la reivindicación 1, **caracterizado porque** el eje de las caderas está controlado en función de la dirección de la marcha.
5. Procedimiento de control de acuerdo con la reivindicación 1, **caracterizado porque** el incremento del alargamiento entre la extremidad del miembro en apoyo sobre el suelo y dicha cadera (210, 200') es proporcionado mediante un impulso de dicha extremidad sobre el suelo, desencadenado mediante un control en inclinación de una articulación del tobillo prevista en dicho miembro.
6. Procedimiento de control de acuerdo con la reivindicación 1, **caracterizado porque** el incremento del alargamiento entre la extremidad del miembro en apoyo sobre el suelo y dicha cadera (210, 200') es proporcionado mediante un impulso de dicha extremidad sobre el suelo, desencadenado por un control de la articulación de la rodilla.
7. Procedimiento de control de acuerdo con la reivindicación 1, **caracterizado porque** el incremento del alargamiento entre la extremidad del miembro en apoyo sobre el suelo y dicha cadera (210, 200') es proporcionado mediante un impulso de dicha extremidad sobre el suelo, desencadenado por un control de un émbolo en la pierna, paralelo a esta última.
8. Procedimiento de control de acuerdo con una de las reivindicaciones 5, 6 ó 7, **caracterizado porque** los impulsos del talón se desencadenan cuando la dirección de la pierna tiene un ángulo con relación a la vertical superior a un ángulo límite que depende de la velocidad del COM y de una consigna de velocidad de la marcha.
9. Procedimiento de control de acuerdo con una de las reivindicaciones 5, 6 ó 7, **caracterizado porque** la articulación motorizada que permite el impulso está controlada por una pendiente de velocidad función de la aceleración límite del motor y de la relación de la velocidad del centro de masas a la consigna de velocidad de la marcha.
10. Procedimiento de control de acuerdo con la reivindicación 1, **caracterizado porque** la carrera del pie en la dirección de la marcha depende de variables elegidas entre el grupo que comprende la posición del centro de masas en la misma dirección, la longitud del miembro, la longitud del pie y la velocidad del centro de masas en la dirección de marcha.
11. Procedimiento de control de acuerdo con la reivindicación 1, **caracterizado porque** la carrera del pie perpendicular a la dirección de la marcha depende de variables elegidas entre el grupo que comprende la posición del centro de masas en la misma dirección, la consigna de dirección de marcha, la longitud de la cadera, la velocidad en la dirección perpendicular a la dirección de la marcha y la consigna de velocidad de marcha.
12. Procedimiento de control de acuerdo con una de las reivindicaciones 5, 6 ó 7, **caracterizado porque** al menos un miembro está adecuado para ser controlado para realizar un movimiento de desaceleración antes de que su extremidad toque la superficie de progresión.
13. Robot adecuado para desplazarse sobre una superficie de progresión sobre al menos dos miembros, comprendiendo dicho robot al menos un módulo adecuado para generar para cada paso un movimiento de cada una de las caderas sobre una trayectoria sensiblemente esférica (200, 200'; 200'', 200''') centrada sobre la extremidad en apoyo sobre el suelo (210; 210') del miembro unido a dicha cadera y un módulo adecuado para generar un movimiento de dicha extremidad hacia un nuevo punto de apoyo, estando dicho robot **caracterizado porque** comprende además un módulo para calcular una posición del nuevo punto de apoyo de dicha extremidad sobre la superficie de progresión en función de la velocidad del centro de masas del robot.

14. Robot de acuerdo con la reivindicación 13, **caracterizado porque** al menos uno de los miembros comprende un émbolo cuyo eje es paralelo al eje de dicho miembro.
- 5 15. Robot de acuerdo con la reivindicación 13, **caracterizado porque** al menos una extremidad de uno de dichos miembros comprende un pie que comprende al menos dos articulaciones que pivotan en ejes sensiblemente paralelos entre sí, y sensiblemente perpendiculares a la dirección del pie, uno próximo a la extremidad delantera del pie y el otro próximo al talón.
16. Robot de acuerdo con la reivindicación 13, **caracterizado porque** al menos una extremidad de uno de dichos miembros comprende un pie cuyo extremo delantero comprende un contorno redondeado cuya forma está prevista para desencadenar una elevación del talón cuando la extremidad delantera del pie pivota hacia adelante.
- 10 17. Robot de acuerdo con la reivindicación 13, **caracterizado porque** comprende además un conjunto de sensores inerciales que permiten conservar sensiblemente constante la orientación de una referencia ligada a una parte del robot con relación a una referencia exterior fija.
- 15 18. Robot de acuerdo con la reivindicación 13, **caracterizado porque** comprende además un conjunto de sensores inerciales que permiten medir con precisión las aceleraciones y las velocidades, lineales y angulares, del tórax o de la cabeza, permitiendo deducir la velocidad vectorial del centro de gravedad.

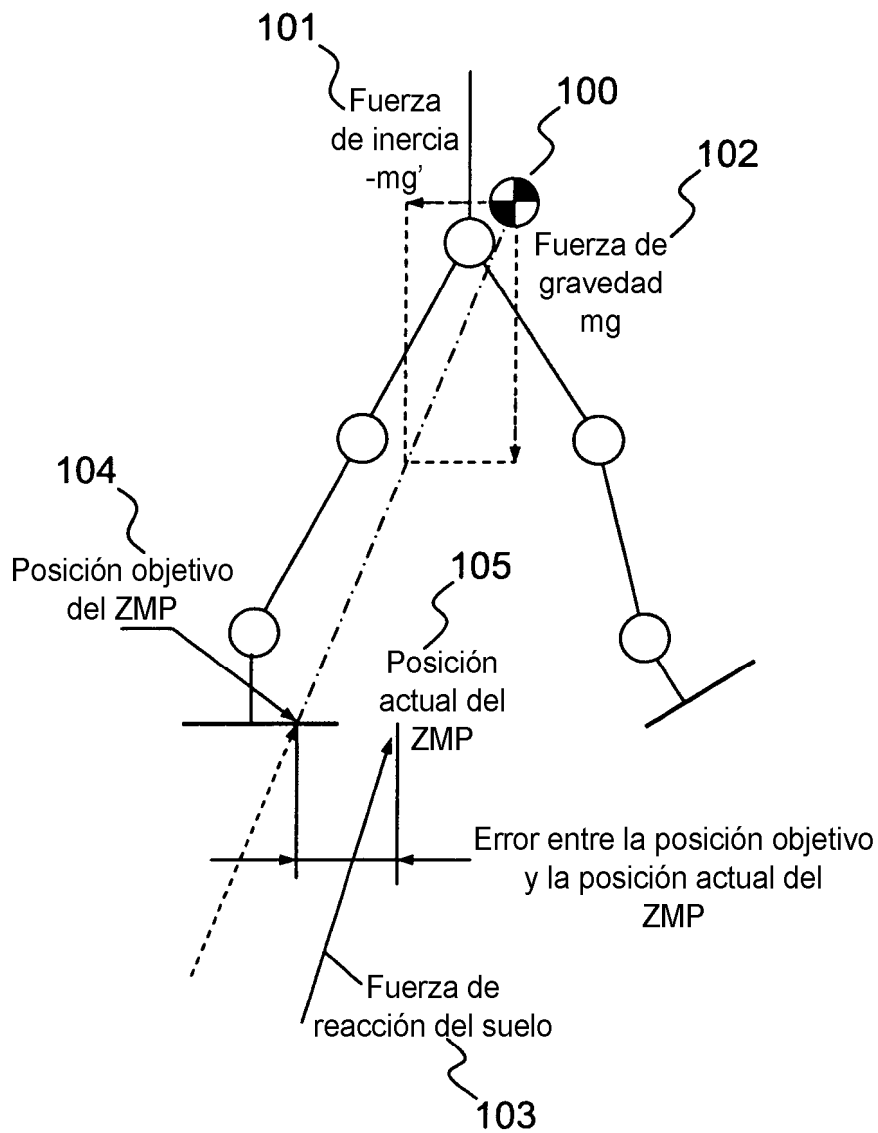


FIG.1

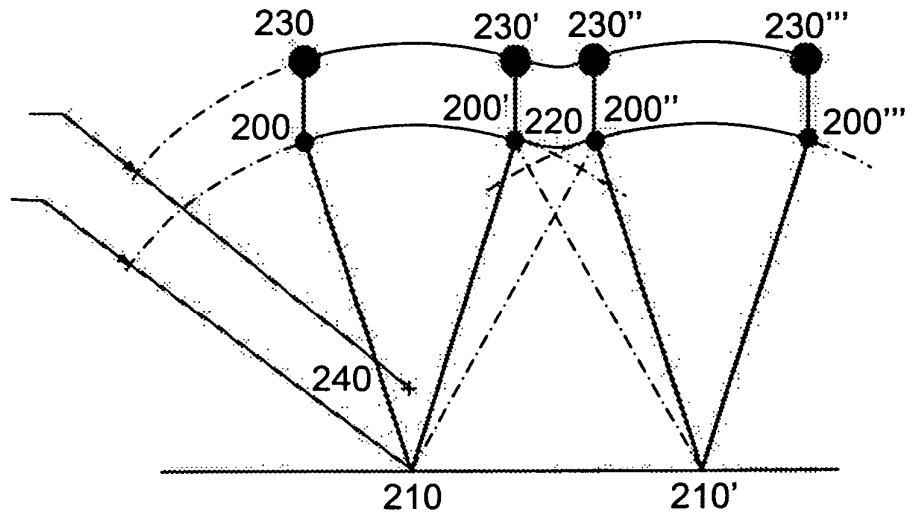


FIG.2

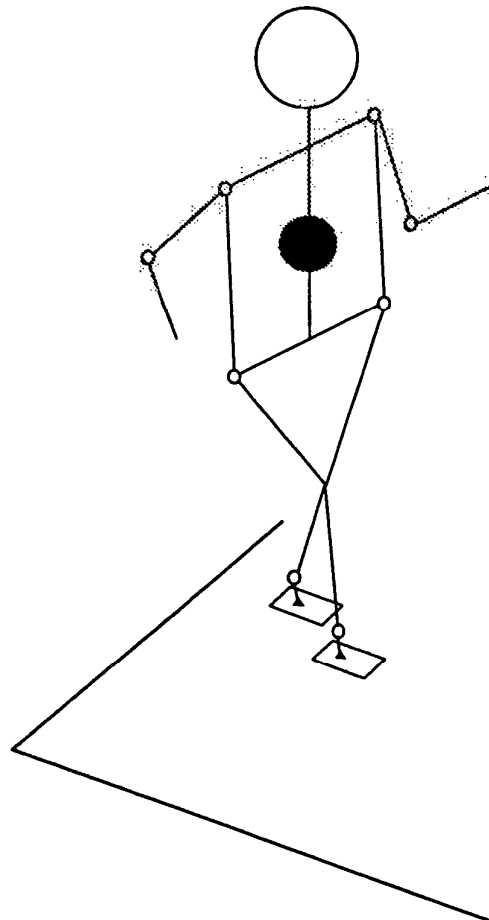


FIG.3

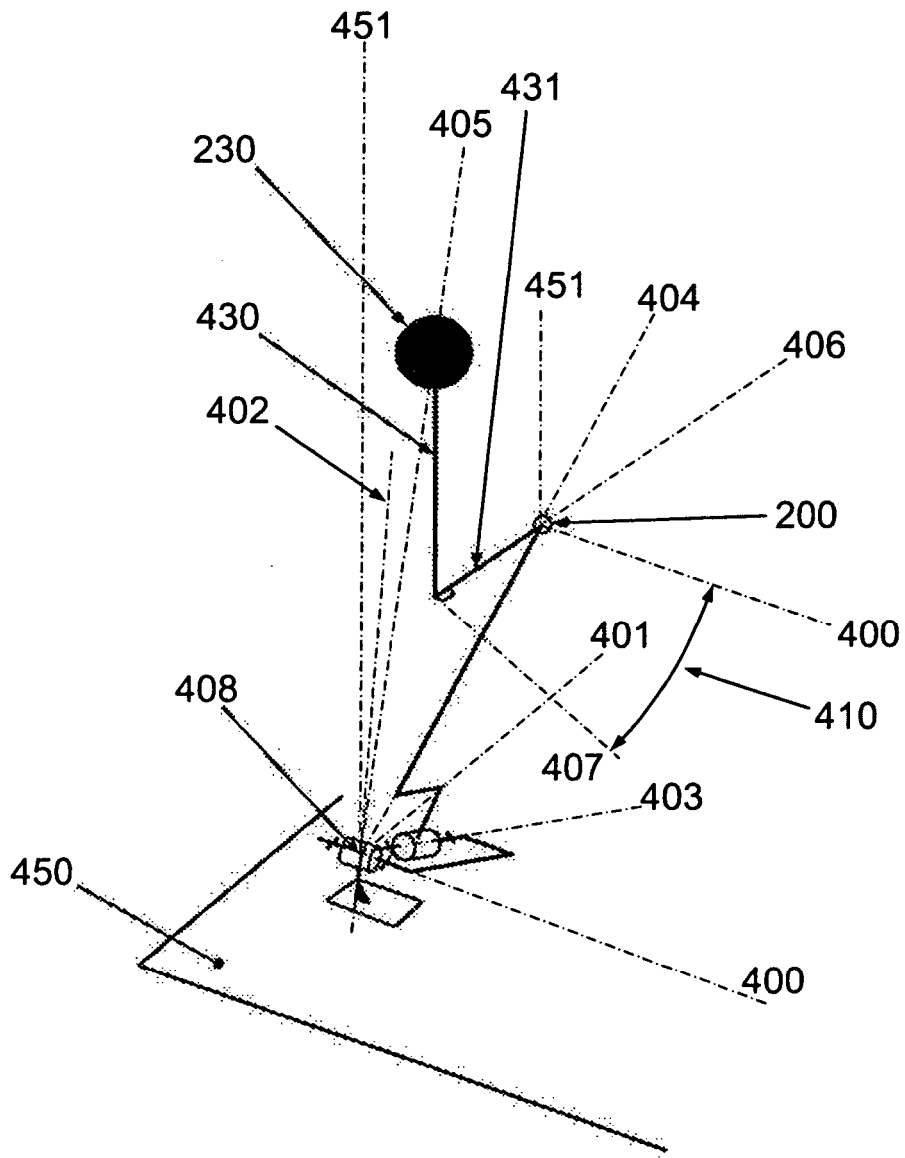


FIG.4

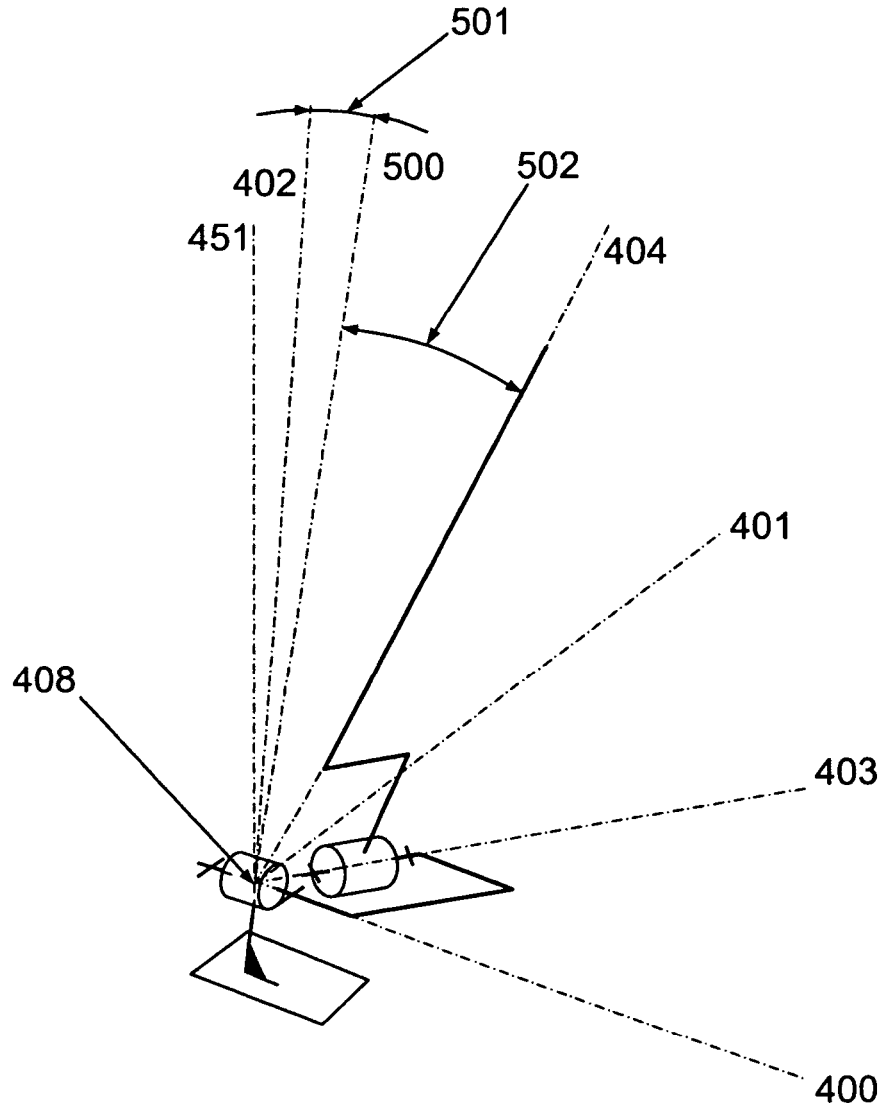


FIG.5

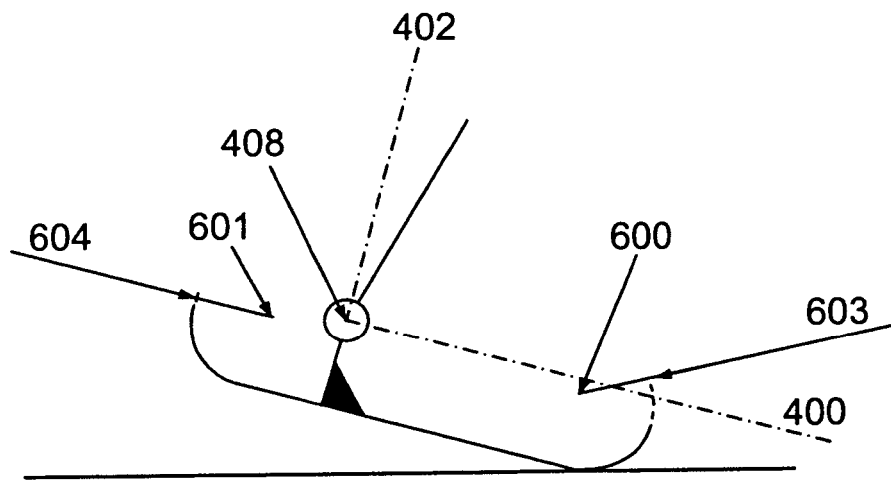


FIG. 6

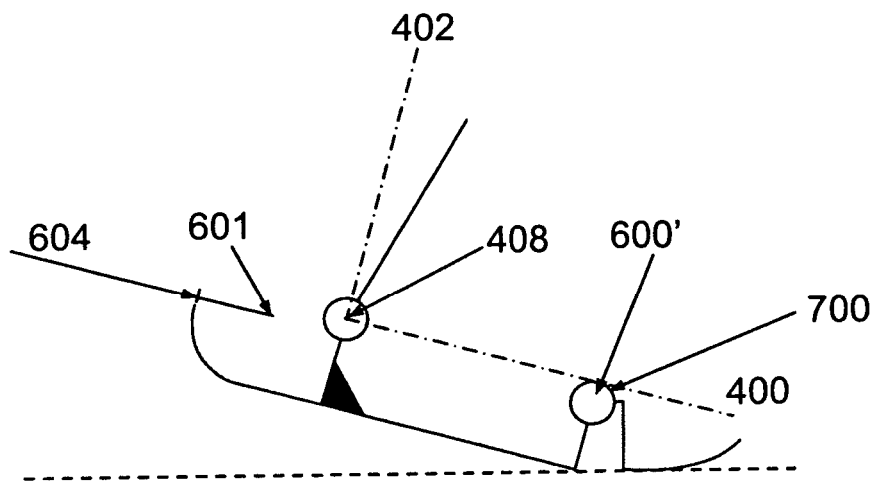


FIG. 7

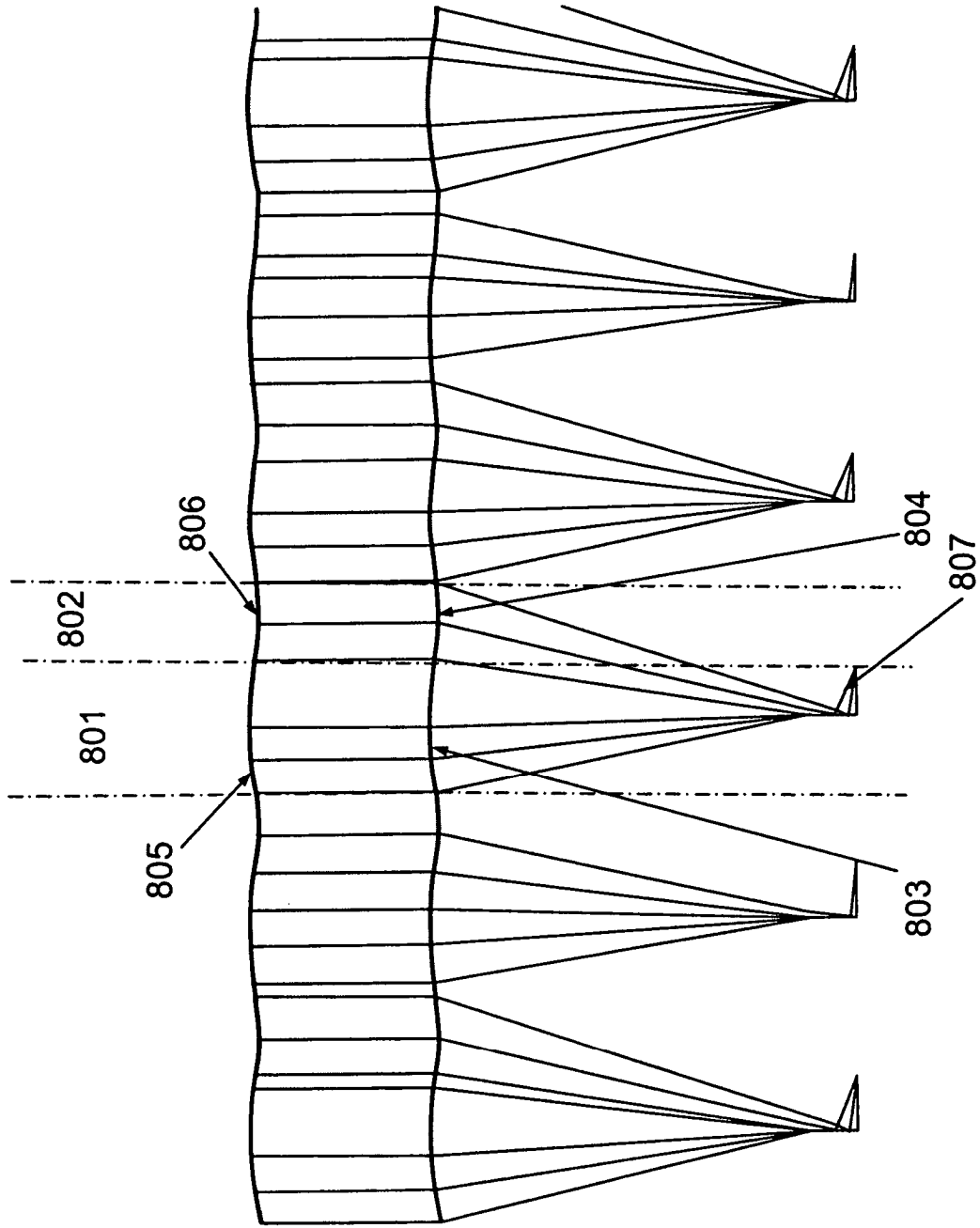


FIG.8

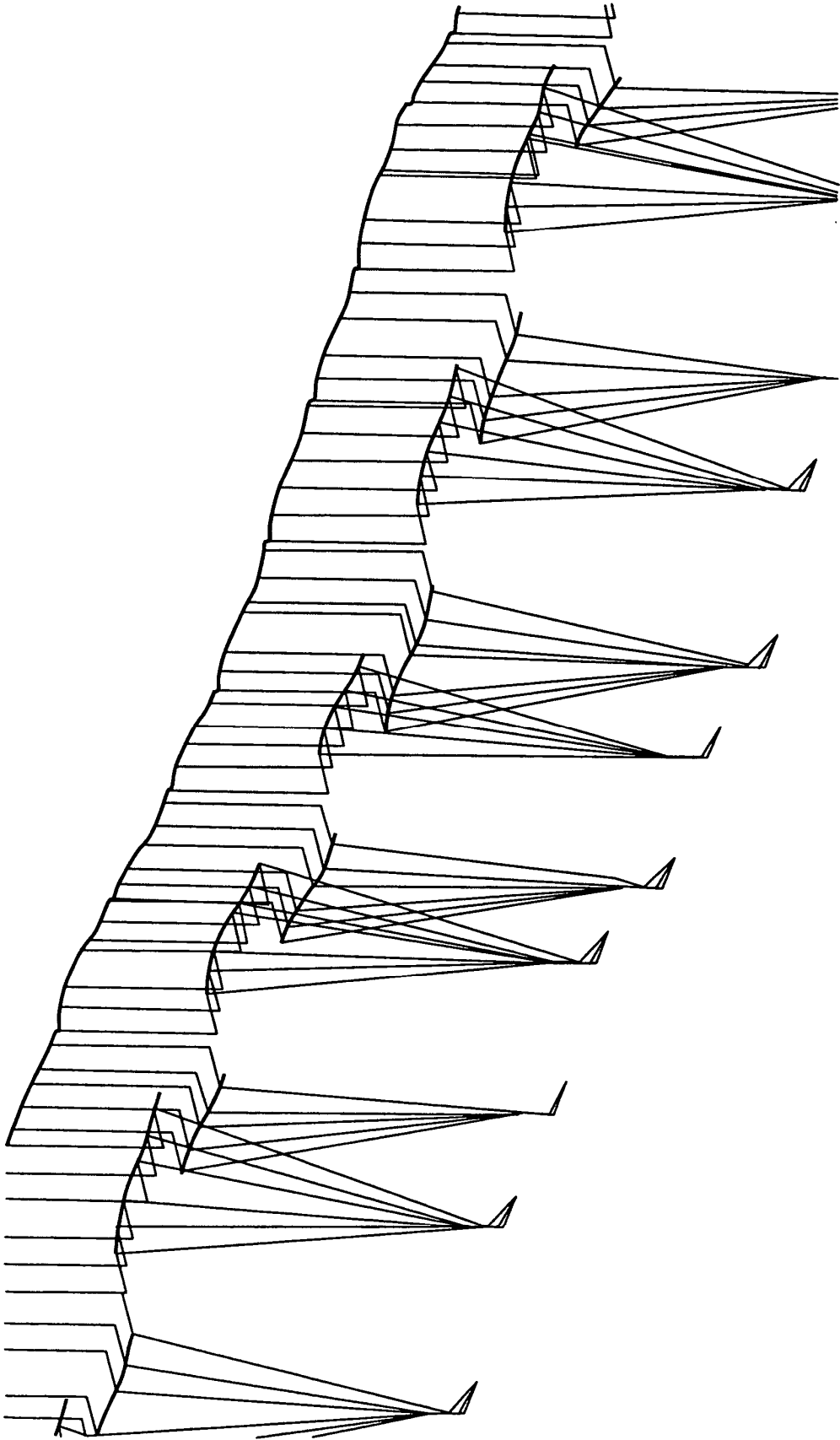


FIG.9

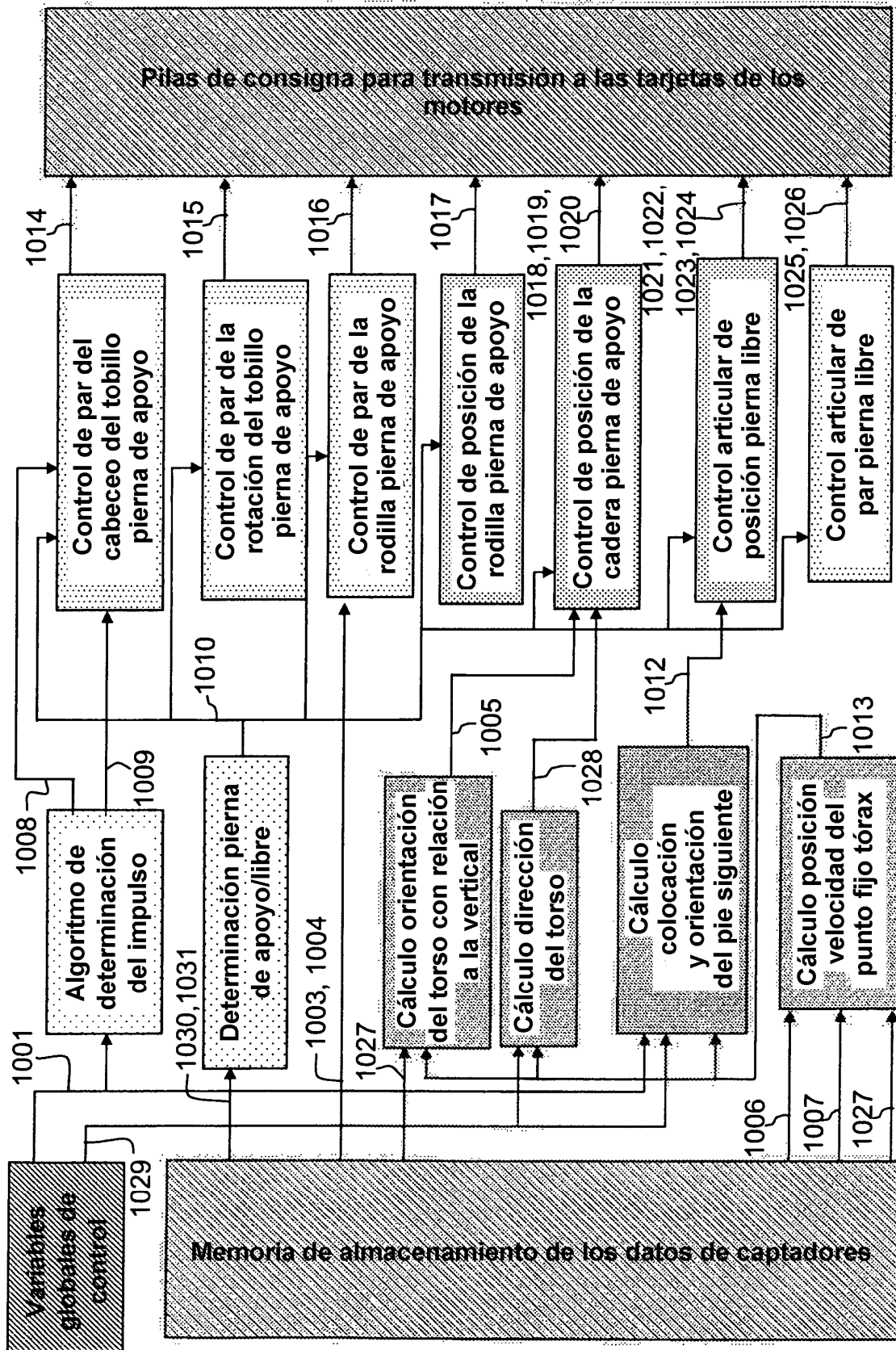


FIG.10