

Investigación

Acerca del modelado, control y generación de marcha en robots bípedos^o

About of Modelling, Control and Walking Generation on Biped Robots

Recibido: 7 de junio de 2017 - Aceptado: 20 de octubre de 2017

Para citar este artículo: J. Tacué y C. Rengifo, «Acerca del modelado, control y generación de marcha en robots bípedos», *Ingenium*, vol. 19, no. 37, pp. 9-21, ene. - jun. 2018.



Jeison Javier Tacué*
Carlos Felipe Rengifo**

Resumen

La investigación de la locomoción humana implementada en robots bípedos no es una novedad en nuestros días, esta se viene realizando desde hace más de 40 años; sin embargo, ha sido y seguirá siendo el foco central de desarrollo para la investigación en robots humanoides por varias décadas más. Lo anterior indica que aún no existe un adecuado modelamiento matemático de la locomoción bípeda humana con suficiente semejanza y que, además, incorpore características de robustez y flexibilidad en los movimientos de marcha del robot, pero al mismo tiempo que utilice algoritmos de control de baja complejidad de cálculo. En este orden, el propósito central de este artículo es presentar una descripción del estado del arte de la robótica de humanoides, los enfoques de generación de trayectorias y control de locomoción basados en modelos simplificados, en técnicas de ZMP (*Zero Moment Point*) o algoritmos bio-inspirados. El documento también contiene una breve terminología introductoria a la locomoción bípeda.

^o Proyecto del grupo I+D en Automática Industrial, Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia.

* M.Sc. en Automática, Universidad del Cauca. Profesor del departamento de electrónica, instrumentación y control (DEIC), Universidad del Cauca. E-mail: jttacue@unicauca.edu.co.

** Ph.D. en Automática, Ecole Centrale de Nantes. Profesor, Universidad del Cauca. E-mail: caferen@unicauca.edu.co.

Palabras clave

Robot humanoide, locomoción bípeda, ZMP, polígono de soporte, modelo de péndulo invertido, trayectorias de marcha bípeda.

Abstract

The research of human locomotion implemented in bipedal robots is not new in our days, this has been done for more than 40 years, however it has been and will continue to be the central focus of development for research on humanoid robots for several decades plus. This indicates that there is still no adequate mathematical modelling of human bipedal locomotion, with sufficient similarity, and that also incorporates characteristics of robustness and flexibility in the walking robot's movements, but at the same time that it uses low complexity control algorithms of calculation. In this order, the central purpose of this article is to present a descriptive of the state of the art of humanoid robotics, locomotion trajectory and control approaches, based on simplified models, Zero Moment Point techniques, or Bio-inspired algorithms. The document also contains a brief terminology introducing bipedal locomotion.

Keywords

Humanoid robot, Bipedal locomotion, ZMP, Support polygons, Inverted pendulum model, Bipedal trajectories.

1. Introducción

La robótica es la rama de la tecnología que permite el diseño, construcción y operación de todo tipo de sistemas autónomos, lo cual ha permitido llevar a cabo la automatización de gran variedad de procesos del sector industrial. En la actualidad, la línea de investigación en robótica que posee mayor auge es la de humanoides, intentando que estos robots realicen movimientos robustos y flexibles, similares a los del ser humano [1]. Sin embargo, hay algunas funciones, como la locomoción humana, que han sido difíciles de transferir a los sistemas de control de estos robots [2].

La marcha humana es un proceso fascinante pero inconsciente, ya que al realizarlo los sujetos no perciben todo lo que esto implica para el organismo, que debe coordinar la motricidad de las piernas con un perfecto control neuronal y así mantener el cuerpo en equilibrio, mientras este se mueve por diferentes terrenos y con bajo consumo de energía [3]. La mayoría de investigaciones y desarrollos de las últimas décadas acerca de robots bípedos se han enfocado en aumentar el repertorio de movimientos y prestaciones de las diferentes extremidades, lo cual demuestra la impresionante versatilidad de estas máquinas. Los mejores robots de nuestros días, por ejemplo, pueden caminar, girar, subir y bajar escaleras: ASIMO [4], HRP [5] [6] [7], Nao [8], HUBO [9], ATLAS [10] [11]. Como resultado, la mayoría de estos robots han solucionado en gran proporción el problema de la versatilidad de movimientos, pero de igual forma han aumentado el consumo energético, que a su vez se traduce en reducción del tiempo de operación y la

baja capacidad para transportar cargas, así mismo, su independencia se ve afectada. En otras palabras, el consumo energético se contrapone a la versatilidad del robot [12]; esto se ilustra partiendo de la siguiente clasificación general. Existen robots que utilizan técnicas de marcha basadas en la dinámica pasiva de su estructura y un terreno inclinado para desplazarse, lo cual indica que sus articulaciones no poseen ningún tipo de dispositivo que consuma energía, y únicamente son impulsadas por la acción de la gravedad ejercida sobre el propio centro de masa del robot. Así pues, su gasto energético es cero y su versatilidad de movimientos es baja [13]. Por otra parte, existen robots con dinámica activa que poseen articulaciones motorizadas que aumentan la versatilidad de movimientos, pero su problema se encuentra en el altísimo consumo energético que implica mover varias articulaciones al mismo tiempo [14].

En cuanto a modelado matemático y el control de marcha para robots bípedos existen dos enfoques generalizados. El primero, requiere del conocimiento preciso de la dinámica multicuerpos del robot, incluyendo masas, centros de masa e inercias de los actuadores; en consecuencia, su principal desventaja es la inexactitud de los modelos. En cuanto al segundo enfoque, este no requiere conocer los modelos dinámicos del bípedo, y en su lugar hace uso en gran parte de los conocimientos geométricos y cinemáticos del robot, lo que hace necesario un algoritmo de control robusto [15]. Por su parte, la generación de trayectorias de marcha, que a su vez hace parte de un problema más general (el control conjunto de los n actuadores que intervienen en el desplazamiento del robot), posee tres enfoques generales de abordaje, un enfoque clásico, las tablas de control y el enfoque bioinspirado. En la generación de marcha se busca definir las funciones matemáticas que establecen la posición de cada articulación durante el desplazamiento del robot bípedo [16].

De acuerdo con la visión anterior, la intención de este documento consiste en presentar una revisión general de la investigación de robots humanoides en los siguientes temas: técnicas de modelado y control de robots bípedos, incluyendo la generación de trayectorias de marcha.

2. Antecedentes

En esta sección se presentan algunas nociones básicas para abordar la robótica de humanoides; nos referimos al modelado, el control y la generación de trayectorias de marcha bípeda.

¿Por qué investigar acerca de robots humanoides?

Es vital saber cuál es la importancia de las investigaciones en robots bípedos. Según [2] la motivación se debe a tres aspectos: científicos, tecnológicos y económicos.

En el campo científico siempre es necesario realizar estudios que permitan entender el cuerpo humano y su gran capacidad de movimientos, de lo cual se pueden obtener modelos e hipótesis que generen conocimientos aplicables en la rehabilitación de personas con discapacidad al caminar; también se piensa en diseñar y mejorar cada día al robot

humanoide hasta que posea la misma robustez de movimientos del cuerpo humano [2] [17].

A nivel tecnológico es posible construir nuevas y mejoradas prótesis, aunque por ahora no hay un vínculo directo entre la investigación de prótesis con la robótica de bípedos, sin embargo, se cree en que el futuro deberán aunar esfuerzos para dar un gran paso en esta área [18]. También es posible desarrollar nuevas técnicas de inteligencia artificial asociadas a la visión de máquina, el tacto y otros sensores, puesto que esta clase de robots servirá como banco de pruebas. De igual manera, estos robots pueden ser utilizados en la educación, ya que existe gran interés de los jóvenes por la *RoboCup* [19] y la *FIRA Robot Soccer competitions* [20], la cual tiene como objetivo competir contra los campeones de la Copa Mundial de la FIFA del año 2050. A nivel económico es frecuente pensar que podrán venderse para el servicio doméstico, la seguridad, el acompañamiento de niños y ancianos, para muchas tareas del sector industrial, en el campo militar, la exploración, la búsqueda y el rescate [2] [17] [21].

Ciclo de marcha bípeda

De acuerdo con [22], [23] y [24], básicamente existen dos clasificaciones para la marcha bípeda, el caminado con equilibrio estático y el caminado con equilibrio dinámico. En el primero, la proyección vertical del CoM siempre se encuentra dentro del polígono de soporte del robot y generalmente estos robots utilizan pies grandes y algoritmos de control sencillos; mientras que en el segundo, en el caminado con equilibrio dinámico existen momentos en los que el CoM abandona el polígono de soporte, esta es precisamente la forma de caminar de los humanos, que poseen pies pequeños, flexibles y un CoM ubicado lejos del suelo comparado con su estatura, esto muestra que los algoritmos de control de estos robots deben ser altamente eficientes y sofisticados. Es aquí donde nacen los retos para la investigación de la marcha humana implementada en robot bípedos.

En general, la marcha es un método particular de locomoción bípeda, que se realiza con la repetición de movimientos alternantes entre los miembros inferiores del sistema bípedo, denominados ciclos de marcha, cuyo objetivo es realizar el desplazamiento del individuo. Durante cada ciclo de marcha el cuerpo se desplaza una longitud equivalente a la distancia entre los talones del pie. Específicamente la marcha humana se caracteriza por poseer cuatro fases [17]:

- Fase de doble soporte: donde ambos pies se encuentran completamente apoyados sobre el suelo.
- Fase previa de oscilación: en esta fase el talón del pie de arranque se encuentra elevado del suelo, mientras que sus dedos están apoyados sobre el suelo.
- Fase de simple soporte: en esta fase uno de los pies se encuentra completamente apoyado sobre el suelo mientras que el otro oscila libremente hacia adelante.

- Fase posterior al simple soporte: en esta fase el bípedo se encuentra en doble soporte y sucede cuando el pie oscilante de avance toca el suelo con el talón.

Centro de masa CoM y centro de presiones CoP

El CoM o centro de masa del robot es el punto geométrico que dinámicamente se comporta como si en él estuviera aplicada la fuerza resultante de todas las fuerzas que inciden en el cuerpo del robot [25] [26]. El centro de presiones CoP es un punto de la superficie de contacto del pie del robot con el suelo, en donde se considera actúa la fuerza neta de la reacción contra el piso del robot [22] [26].

Polígono de soporte

El polígono soporte es la delimitación geométrica generada por el contacto de los puntos de apoyo del robot con el suelo, formando un polígono por uno o por ambos pies del bípedo, de acuerdo con la fase de marcha en que este se encuentre. Según [22], la importancia de esta área radica en el siguiente criterio: «si el CoM del robot se refleja sobre el suelo y este reflejo a su vez se encuentra dentro del polígono formado por los pies del bípedo, se puede afirmar que la postura del robot en ese instante es estable, en caso contrario la postura será inestable y el robot perderá equilibrio fácilmente».

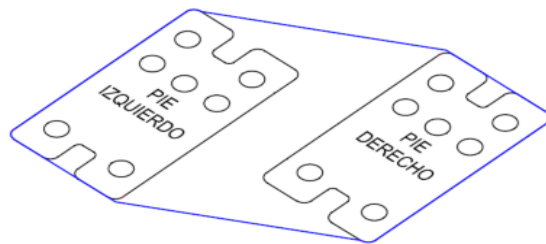


Fig. 1. Polígono de soporte del robot.

ZMP (Zero Moment Point)

En la locomoción bípeda el ZMP es uno de los términos más famosos y usados; originalmente fue propuesto por M. Vukobratovic en 1972 [27]. Existe un punto P específico donde el momento que genera la fuerza de reacción del piso en los pies compensa al momento total que genera el cuerpo del bípedo en su caminata, se le conoce como Punto de Momento Cero (ZMP). Este existe solo dentro del polígono de soporte e indica qué tan estable se encuentra el robot en un determinado instante de la caminata. Este parámetro es de suma importancia a la hora de diseñar estrategias de control y generación de patrones de marcha para robots bípedos, debido a que sirve como indicador de estabilidad [17] [27].

3. Modelado de locomoción bípeda

Para efectuar el control del equilibrio del robot es indispensable contar con la representación matemática de los diversos movimientos que el robot pueda efectuar al caminar, y posteriormente conseguir las posiciones articulares de las piernas en cada

instante de tiempo para alcanzar un objetivo de referencia de marcha, bien sea el set point del CoM del robot o de sus pies [23] [28] [29].

En realidad el modelo dinámico de un robot bípedo contiene elementos continuos y discretos que conmutan entre las diferentes fases de marcha. Por su parte, los elementos continuos están asociados a la cadena cinemática del robot, mientras que los elementos discretos están relacionados con las fuerzas de contacto y despegue del pie [23] [30].

En el modelado matemático y el control de marcha para robots bípedos existen dos enfoques generalizados. El primero requiere del conocimiento preciso de la dinámica multicuerpos del robot, incluyendo masas, centros de masa e inercias de los actuadores; normalmente es llamado enfoque basado en dinámica o enfoque de dinámica inversa ID. El segundo es conocido como enfoque basado en modelos y cinemática inversa IK; a diferencia del anterior, este no requiere conocimiento de los modelos dinámicos del bípedo, en su lugar hace uso en gran parte de las propiedades geométricas y cinemáticas del robot para crear un modelo dinámico aproximado, y se conocen como modelos simplificados [15]. Sin embargo, existen proyectos como en [10] donde se ha implementado un controlador para el robot ATLAS basado en ID, pero al mismo tiempo se adicionó un algoritmo previo fundamentado en IK para compensar los errores en la obtención del riguroso modelo dinámico.

En la actualidad hay muchos y variados estudios de modelos de locomoción bípeda que se han realizado, sin embargo, este documento presenta algunos de los más representativos en orden de complejidad [2] [31].

Modelos simples de locomoción, aproximación dinámica

Esta clase de modelos, a pesar de su sencillez, permiten entender las fases del ciclo de marcha, especialmente el movimiento del centro de masa y los pies del robot. Su representación dinámica se realiza a partir del planteamiento de ecuaciones Newton-Euler para sistemas físicos conocidos, y su principal característica es el uso de masas puntuales para representar el CoM y el CoP del robot, despreciando las masas de las piernas y otros cuerpos.

Modelo de péndulo invertido. Quizás es la representación más sencilla de la pierna. Fue introducida por Kajita y Tani en 1991 [32] mediante un péndulo invertido que desprecia la masa de los eslabones que componen las piernas, donde una masa puntual en el extremo superior del péndulo es el CoM del robot y el pivote CoP es el centro de presión de las fuerzas que actúan sobre la planta del pie. Este modelo posee tres fases fundamentales: una es la desaceleración que se da cuando el CoM se encuentra por detrás del CoP; sigue el cenit producido cuando el CoM y CoP están frente a frente listos para iniciar el empuje para dar el paso siguiente, y, finalmente, está la fase de aceleración producida cuando el CoM está delante del CoP que, además, permite establecer la longitud de la zancada. La ventaja de este modelo es su simplicidad, pero presenta la desventaja de incorporar la dinámica no lineal, debido a la inclusión de la función trigonométrica seno, lo que restringe algunas técnicas de control [28] [18].

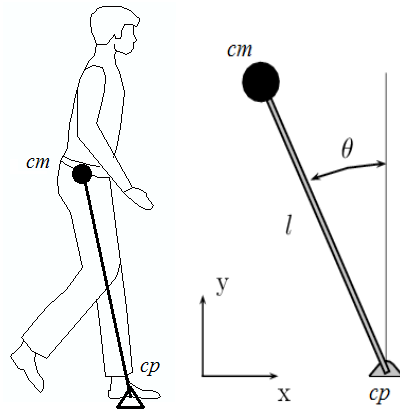


Fig. 2. Modelo de péndulo invertido.

Linear Inverted Pendulum Mode (LIPM). Esta representación fue introducida por primera vez por Kajita y Tani en 1996 [33], y también se basa en el péndulo invertido. Sin embargo, para modelar la elasticidad de la pierna y eliminar la no linealidad del péndulo anterior se aumenta un actuador prismático que permite al péndulo estirarse o encogerse, de tal forma que el centro de masa se restringe a un plano horizontal Z_c constante [34].

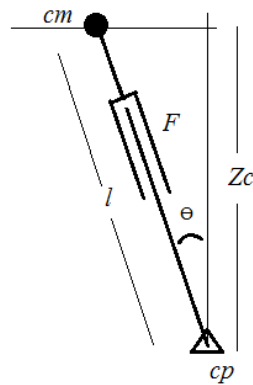


Fig. 3. Péndulo lineal invertido con actuador prismático y CoM constante.

Otros métodos basados en identificación de sistemas dinámicos intentan mejorar la exactitud de los modelos simples comparados con los modelos dinámicos multicuerpos. Por ejemplo, en [35] los autores proponen utilizar una representación de segundo orden en espacio de estados para mejorar el modelo de péndulo invertido; además, permite utilizar algoritmos de control *online* y *offline* para la generación de patrones de marcha.

3D Linear Inverted Pendulum Mode. Si la dinámica del péndulo con actuador se analiza en el espacio tridimensional, se obtiene el sistema «Péndulo invertido lineal 3D» [36]. Este posee muchas posibilidades de movimiento, sin embargo, es necesario restringir el CoM a un plano Z_c que elimine las no linealidades del modelo. Enseguida la representación de movimientos de marcha se obtiene a partir de las relaciones en los planos (x,z) y (y,z) . Además, este modelo permite calcular la fuerza necesaria para equilibrar el peso del CoM del robot y de esta forma corregir los momentos que conllevan a perder el equilibrio.

Finalmente, se puede crear una estrategia de control que calcula el punto en donde las fuerzas de reacción del pie contra el suelo sean cero, esto es hallar el indicador ZMP de estabilidad, de manera que el robot no tendrá aceleraciones que conlleven a su caída [14] [37].

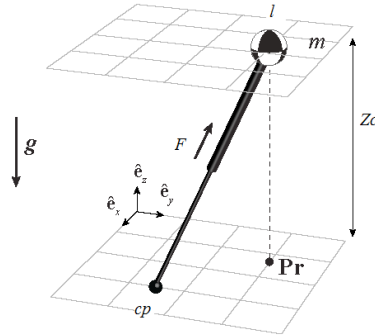


Fig. 4. Modelo del 3D LIPM.

Modelo Cart-Table. En este modelo el centro de masa CoM del robot se representa mediante un bloque móvil (carro) que se desplaza sobre una mesa, y la base de esta mesa representa el pie del robot. El propósito de este modelo consiste en calcular el punto p sobre el suelo en cual el momento total debe ser cero o calcular el indicador de estabilidad (conocido como ZMP) en el que la sumatoria de torques, debido a las fuerzas de reacción del suelo contra el pie, sea nula [38]. Este modelo da un acercamiento sencillo e intuitivo a las técnicas de generación de marcha bípeda mediante control de ZMP, al darle movimiento al carro como si fuese la trayectoria deseada del CoM del robot y luego al hallar el punto ZMP para cada pareja (P_x, P_y) , donde P_x y P_y son las coordenadas que ubican el ZMP sobre el suelo, lo que no permitirá que el robot se inestabilice [26] [39]. Se necesitan dos modelos *Cart-Table* para cada pierna; uno para el plano sagital (x,z) y otro para el plano frontal (y,z) .

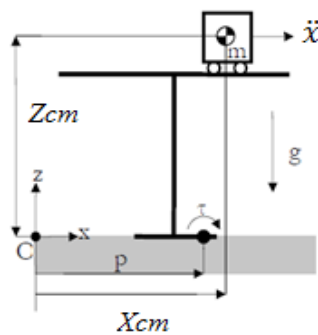


Fig. 5. Modelo Cart-Table.

Modelos dinámicos de n eslabones

En esta técnica de modelado, los elementos que componen las piernas del robot y otras cadenas articulares se representan como cuerpos rígidos (eslabones) distribuidos, con un centro de gravedad y un momento de inercia. La complejidad del modelo depende de la cantidad de eslabones que el diseñador considere necesarios para representar al robot.

Modelo de doble eslabón. En este modelo cada eslabón representa independientemente el muslo y la pierna; el tobillo se considera fijo. El modelo permite apreciar el movimiento de flexión y extensión de la rodilla y la cadera durante la fase de apoyo de la marcha humana. El modelo hace uso de información antropométrica del robot tal como: longitud, centro de gravedad, momentos inerciales de cada eslabón y de datos cinemáticos [28].

Modelado dinámico multicuerpos

Es bien conocido por investigadores de robots humanoides que la marcha bípeda robusta y ágil no se puede obtener por medio de modelos simplificados. Por lo tanto, obtener el modelo dinámico preciso del robot se convierte en todo un desafío, así mismo, se convierte en una herramienta fundamental para entender la naturaleza del robot y poder mejorar las habilidades de locomoción. Por ejemplo, en [40] se calcula el modelo dinámico preciso del robot Thomas-K de 16 grados de libertad y, además, se diseña un modelo de impacto del pie contra el suelo. Con la obtención del modelo dinámico del robot se diseña un lazo de control realimentado tradicional. Otras investigaciones usan la optimización del consumo de energía mecánica y el modelo dinámico del robot en conjunto para calcular trayectorias de marcha bípeda [31] [41].

4. Control de marcha bípeda

Actualmente, en proyectos de investigación se usa la medición de la inclinación de postura y la desviación del centro de masa como realimentación de las estrategias de control. Estas estrategias utilizan diferentes tipos de indicadores y algoritmos [22].

ZMP Control

Esta técnica de control fue introducida por primera vez hace más de 35 años; actualmente, es la más popular y con mejores resultados en investigaciones de robótica de bípedos. El control mediante ZMP establece un criterio de estabilidad dinámica para robots bípedos que permite generar patrones de locomoción [27]. El contacto plano entre el suelo y el pie es estable cuando el ZMP se encuentra dentro del polígono de soporte; cuanto más cercano esté al centro de la superficie de soporte mayor robustez conseguirá el robot al caminar. Que el ZMP exista dentro del polígono de soporte es condición necesaria y suficiente para garantizar el equilibrio dinámico del robot [27] [8]. En [38] Kajita propone un control previo de ZMP para la generación de patrones de marcha bípeda, este utiliza un servo controlador seguidor de ZMP que utiliza ubicaciones futuras del ZMP y así calcular la trayectoria del CoM del robot con antelación al paso.

Redes neuronales

Gran variedad de algoritmos neuronales son utilizados en el control y síntesis de marcha bípeda, como en perceptrones multicapa, redes CMAC, función de base radial (RBF) o redes de Hopfield. Por ejemplo, en [41] los autores presentan la comparación de tres estrategias de control de marcha bípeda basadas en redes neuronales artificiales, estas son: red neuronal en cascada con realimentación hacia adelante, red neuronal *feed-forward* y una red neuronal de base radial. La investigación demostró que la red neural

de base radial entrega mejores resultados para el control y la síntesis de marcha bípeda. Recientemente, en [11] se presentó un modelo de control de aprendizaje basado en redes neuronales artificiales, cuyo objetivo consiste en aprender la dinámica no lineal del robot; las no linealidades aprendidas se utilizan junto con la señal de error filtrada para calcular los torques de las articulaciones.

Control fuzzy

En [42] se propone una nueva técnica de control mediante reglas de lógica difusa, en el que se propone un ZMP variable en lugar de un ZMP fijo. Esta técnica posee la ventaja de eliminar las perturbaciones en el tronco del robot, y de esta forma mejorar significativamente la estabilidad del robot bípedo [17]. En [43] se propone un nuevo método para modular la trayectoria del ZMP en los planos sagital y lateral, y así lograr una trayectoria de ZMP más flexible y por tanto robusta. Esto se logró utilizando un control dinámico de balance que incluye un filtro de Kalman y controlador de movimiento difuso (*fuzzy*).

Enfoque híbrido

Otro enfoque, como en [44], utiliza las ventajas de las redes neuronales y la lógica difusa (denominado ANFS) para modelar los datos medidos del ZMP desde un robot bípedo real. Este método demostró excelente desempeño porque puede ser usado para modelar los movimientos del robot y extenderse fácilmente al control del robot bípedo.

5. Generación de trayectorias

La generación de trayectorias de marcha, a su vez, hace parte de un problema más general: el control conjunto de los n actuadores que intervienen en el desplazamiento del robot. La actualidad de la generación de trayectorias de marcha bípeda indica que existen tres enfoques para abordar este tema: el clásico, las tablas de control y el bioinspirado [16].

Enfoque clásico. Este propone establecer funciones de trayectoria espacial para los pies o el CoM del robot, de tal forma que generen una marcha estable; a continuación, mediante cinemática inversa, se realiza la transformación de la ubicación espacial del pie o del CoM en posiciones articulares, es decir, generar trayectorias de marcha a nivel articular. Para esto es necesario realizar transformaciones cinemáticas directas e inversas con el método Denavit–Hartenberg, que suele resultar complicado [3]. En [14] se utiliza este método en combinación con el modelo 3D LIPM, lo que permite generar de forma sencilla patrones de marcha en tiempo real, junto con cambio de dirección durante el desplazamiento.

Tablas de control. En [45] y [16] se presenta un enfoque que consiste en crear tablas que almacenan datos en forma de vectores de posición para cada articulación del robot. El controlador recorre la tabla conformada por los vectores de posición y envía durante cada instante las referencias de posición a los actuadores. El algoritmo de control es sencillo y puede embeberse en microcontroladores de gama baja. No obstante, esta técnica es poco flexible, puesto que al cambiar los movimientos es necesario recalcularse toda la tabla de control.

Enfoque bioinspirado o CPGs. En [46] Ijspeert afirma que las funciones de posición se pueden obtener de modelos procedentes de la naturaleza mediante generadores centrales de patrones (CPGs), los cuales buscan precisar una función matemática que defina las posiciones articulares durante cada instante de un ciclo de marcha [16]. La mayoría de estudios de CPGs consisten en osciladores capaces de generar señales de control, incluso en ausencia de realimentación [17].

Otros autores como en [47] proponen unificar dos enfoques de generación de trayectorias, utilizando el enfoque de CPGs en régimen permanente como un oscilador de frecuencia fija, mediante la técnica de ondas sinusoidales acopladas y el enfoque de tablas de control para almacenar y enviar los datos de las trayectorias al controlador del robot; este enfoque carece de realimentación.

6. Conclusiones

Los modelos sencillos de locomoción bípeda mostrados en este artículo son una aproximación matemática para el estudio y análisis de la marcha humana implementada en robots; además, proporcionan un mejor entendimiento de los puntos críticos del robot durante la marcha. Con una baja complejidad matemática ayudan a concretar aspectos clave de la marcha.

El estado actual de las investigaciones en robots bípedos muestra que la locomoción bípeda estable no está totalmente resuelta y que en el mercado no existe un gran número de robots con el tamaño de un humano, debido a que el problema de locomoción bípeda aumenta con la altura y el peso del robot.

El modelado de robots basado en la dinámica multicuerpos posee mayor exactitud comparado con los modelos aproximados, sin embargo, los estudios recientes demuestran que la combinación de técnicas simplificadas y/o enfoques bioinspirados pueden mejorar enormemente el equilibrio y las características de movimientos al caminar, siendo a la vez más sencillos de calcular.

Los modelos dinámicos multicuerpos poseen gran dificultad de obtención y cálculo, sin contar el tiempo de desarrollo, por lo que es necesario que el robot disponga de una computadora a bordo; sin embargo, la robustez es mejorada. De otra parte, los modelos simplificados son una buena alternativa en términos de tiempo de desarrollo y funcionalidad de marcha.

Habrá que esperar a que nuevas investigaciones surjan en términos de energía y combinaciones híbridas que, a la vez, permitan establecer claramente el mejor camino de abordaje del modelado, el control y la generación de marcha para robots bípedos.

Referencias Bibliográficas

- [1] F. Pfeiffer and H. Inoue, «Walking: Technology And Biology,» *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 365, no. 1850, pp. 3-9, Nov 2006.
- [2] C. M. Chew, E. Choong, A. N. Poo and G. S. Hong, «From Science Fiction To Reality - Humanoid Robots,» in *First Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control Environment and Management, International Conference*, Manila, Filipinas, Mar 27-30 2003.
- [3] Z. Falomir Llansola, *Robots Humanoides, Informe Técnico*, Castellon: Universitat Jaume I, 2006.
- [4] Y. Sakagami et al., «The Intelligent ASIMO: System Overview and Integration,» in *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Lausanne, 2002, pp. 2478-2483.
- [5] K. Kaneko et al., «Humanoid Robot HRP-2,» in *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, New Orleans, pp. 1083-1090, 2004.
- [6] K. Kaneko, F. Kanehiro, K. Harada, G. Miyamori and K. Akachi, «Humanoid Robot HRP-3,» in *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Nice, 2008, pp. 2471-2478.
- [7] K. Kaneko et al., «Humanoid Robot Hrp-4 - Humanoid Robotics Platform With Lightweight and Slim Body,» in *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, San Francisco, 2011, pp. 4400-4407.
- [8] S. Fernandez, *Locomocion Bípeda del Robot Humanoide Nao*, Barcelona: Escola Tecnica Superior de Enginyeria Industrial de Barcelona, Final de Carrera, 2009.
- [9] I. Woo Park, J. Yup Kim, J. Ho Oh and J. Lee, «Mechanical Design of the Humanoid Robot Platform, HUBO,» *Advanced Robotics*, vol. 21, no. 11, pp. 1305-1322, Abr 2007.
- [10] S. Feng, E. Whitman, X. Xinjilefu and Christopher Atkeson, «Optimization Based Full Body Control for the Atlas Robot,» in *International Conference on Humanoid Robots IEEE-RAS*, Madrid, 2014, pp. 120-127.
- [11] G. Atmeh et al., «Implementation of an Adaptive, Model Free, Learning Controller on the Atlas Robot,» in *American Control Conference (ACC)*, Portland, 2014, pp. 2887-2892.
- [12] A. D. Kuo, «Choosing Your Steps Carefully: Trade-Offs Between Economy and Versatility in Dynamic Walking Bipedal Robots,» *IEEE Robotics and Automation Magazine*, vol. 14, no. 2, pp. 18-29, Jun 2007.
- [13] M. A. Roa, C. Villegas y D. A. Garzón, «Modelamiento, estabilidad e implicaciones biomecánicas de la caminata bípeda pasiva con tres grados de libertad,» en *Ingeniería e Investigación*, vol. 27, no. 2, pp. 77-84, ago. 2007.
- [14] S. Kajita et al., «A Realtime Pattern Generator for Biped Walking,» in *IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2002. Proceedings. ICRA '02*, vol. 1, Whashington, 2002, pp. 31-37.
- [15] D. Hein and M. Hild, «Simloid. Research on Biped Robots Controller, Using Physical Simulation and Machine Learning Algorithms,» in *Concurrency Specification and Programming*, Wandlitz, Alemania, 2006, pp. 143-151.
- [16] F. Rivas, J. Cañas y J. González, «Aprendizaje automatico de modos de caminar para un robot humanoide,» en *Proceedings of the 6th international conference on Human robot interaction*, Lausanne, 2011, pp. 120-127.
- [17] R. Munk, *Advanced Control of Biped Robot Motion*, Zagreb: Universidad de Zagreb, artículo en revisión, 2015.
- [18] L. E. Contreras y M. A. Roa, «Modelamiento de la marcha humana por medio de gráficos de unión,» *Revista Tecnura*, vol. 8, no. 16, pp. 26-42, jun. 2005.
- [19] M. Veloso and P. Stone, «Video: RoboCup Robot Soccer History,» in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Vilamoura, 2012, pp. 5452-5453.
- [20] Y. Fang Ho, P. Huan Kuo, P. Chun Huang and T. Hseng Li, «Design and Implementation of a Series of Small-Size Humanoid Robots for Fira and Robocup,» in *International Conference on Advanced Robotics and Intelligent Systems (ARIS)*, Tainan, 2013, pp. 92-97.
- [21] F. Pfeiffer and H. Inoue, «Walking: Technology And Biology,» *The Royal Society*, vol. 365, pp. 3-9, Nov 2006.
- [22] S. González, J. Ramírez y E. J. Avella, «Técnicas de control para el balance de un robot bípedo un estado del arte,» *Tecnura: Tecnología y cultura afirmando el conocimiento*, vol. 19, no. 43, pp. 139-162, mar. 2015.
- [23] S. M. Orozco y J. M. Ibarra, «Sobre la Generación de Patrones de Caminado de Robots Humanoides,» en *Congreso Mexicano de Robotica, Los Cabos*, México, 2015, pp. 297-304.
- [24] D. Aguilar y A. Vivas, «Modelado y Control de un Robot Bípedo de Nueve Grados de Libertad,» en *VIII Congreso de la Asociación Colombiana de Automática, Cartagena de Indias*, Colombia, 2009.
- [25] D. Luo, Y. Wang and X. Wu, «Online Learning of COM Trajectory for Humanoid Robot Locomotion,» in *International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, Chengdu, 2012, pp. 1996-2001.
- [26] D. Orin, A. Goswami and S. Hee, «Centroidal Dynamics of Humanoid Robot,» *Springer Autonomous Robots*, vol. 35, no. 2, pp. 161-176, Oct 2013.
- [27] M. Vukobratovic and B. Borovac, «Zero Moment Point - Thirty Five Years of Its Life,» *International Journal of Humanoid Robotics*, vol. 1, no. 1, pp. 157-173, Ene 2004.
- [28] L. Contreras y L. Vargas, «Generación de modelos de caminata bípeda a través de diversas técnicas de modelamiento,» *Revista Científica Y Tecnológica De La Facultad De Ingeniería*, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, vol. 2, no. 11, pp. 4-13, ago. 2007.
- [29] R. Luo, P. Hsi Chang, J. Sheng, S. Cheng and C. Hung Chen, «Arbitrary Biped Robot Foot Gaiting Based on Variate COM Height,» in *IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, Atlanta, 2013, pp. 534-539.
- [30] J. Grizzle, C. Chevallereau, R. Sinnet and A. Ames, «Models, Feedback Control, and Open Problems of 3D Bipedal Robotic Walking,» *Automatica*, vol. 50, no. 8, pp. 1955-1988, Ago 2014.

- [31] Y. Aoustin, C. Chevallereau and V. Arakalian, *Study And Optimisation Of A Biped Equipped With Wearable Assist Device*, Nantes: Université de Nantes, 2014.
- [32] S. Kajita and T. Kazuo, «Study of Dynamic Biped Locomotion on Rugged Terrain Theory and Basic Experiment,» in *Advanced Robotics*, Pisa, 1991, pp. 741-746.
- [33] S. Kajita and K. Tani, «Experimental Study of Biped Dynamic Walking,» *Control Systems, IEEE*, vol. 16, no. 1, pp. 13-19, Feb 1996.
- [34] A. Villalobos, «Estudio de Modelos Simplificados para Máquinas Bípedas Planares,» *Telematique*, vol. 6, no. 1, pp. 1-15, 2007.
- [35] W. Suleiman, F. Kanehiro, K. Miura and E. Yoshida, «Enhancing Zero Moment Point-Based Control Model: System Identification Approach,» *Advanced Robotics*, vol. 1, no. 25, pp. 427-446, 2011.
- [36] Shuuji, F. Kanehiro, K. Kaneko, K. Yok and H. Hirukawa, «The 3D Linear Inverted Pendulum Mode: A Simple Modeling for a Biped Walking Pattern Generation,» in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Maui, 2001, pp. 239-246.
- [37] C. Chevallereau and Y. Aoustin, «Self-Stabilization Of 3D Walking Via Vertical Oscillations Of The Hip,» in *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Seattle, 2015, pp. 26-30.
- [38] F. Kanehiro, K. Kaneko, K. Fujiwara, K. Harada, K. Yokoi and H. Hirukawa S. Kajita, «Biped Walking Pattern Generation by using Preview Control of Zero-Moment Point,» in *IEEE International Conference on Robotics and Automation ICRA'03*, Taipei, 2003, pp. 1620-1626.
- [39] F. Kanehiro, K. Miura and E. Wael, «Enhancing Zero Moment Point-Based Control Model: System Identification Approach,» *Advanced Robotics*, vol. 25, no. 3, pp. 427-446, Ene 2011.
- [40] E. Sariyildiz and H. Temeltas, «An Exact Dynamic Model for the Thomas-K Biped Robot: New Simulator Design,» in *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, Tianjin, 2014, pp. 2066-2071.
- [41] D. Tlalolini, Y. Aoustin and C. Chevallereau, «Design of a Walking Cyclic Gait with Single Support Phases and Impacts for the Locomotor System of a Thirteen-Link 3D Biped Using the Parametric Optimization,» *Multibody System Dynamics, Springer Verlag*, vol. 23, no. 1, pp. 33-56, 2010.
- [42] J. K. Rai, V. P. Singh, R. P. Tewari and D. Chandra, «Artificial neural network controllers for biped robot,» in *International Conference on Power, Control and Embedded Systems (ICPCES)*, Allahabad, 2012, pp. 625-630.
- [43] J. Park and Y. Rhee, «ZMP Trajectory Generation for Reduced Trunk Motions of Biped Robots,» in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Victoria, 1998, pp. 90-95.
- [44] T. Hseng, Y. Te Su, S. Hsien Liu, J. Jia Hu and C. Chang Chen, «Dynamic Balance Control for Biped Robot Walking Using Sensor Fusion, Kalman Filter, and Fuzzy Logic,» *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, vol. 59, no. 11, pp. 4394-4408, Nov 2012.
- [45] D. Kim, S. Seo and G. T. Park, «Zero-Moment Point Trajectory Modelling Of A Biped Walking Robot Using An Adaptive Neuro-Fuzzy System,» *Control Theory and Applications*, vol. 152, no. 4, pp. 411-426, Jul 2005.
- [46] M. Yim, *Locomotion With A Unit-Modular Reconfigurable Robot*, Stanford, USA: Stanford University, tesis doctoral, 1994.
- [47] A. Ijspeert, *Design of Artificial Neural Oscillatory Circuits for the Control of Lamprey and Salamander-Like Locomotion Using Evolutionary Algorithms*, Edimburgo: University of Edinburgh, tesis doctoral, 1998.
- [48] J. J. Tacue, H. F. Naranjo y C. F. Rengifo, «Simulación del Ciclo de Marcha del Robot Bípedo Bioloid en el Entorno Virtual V-REP,» en *Congreso Mexicano de Robotica*, Los Cabos, Mexico, 2015, pp. 319-326.
- [49] D. Luo, Y. Wang and X. Wu, «Online Learning of COM Trajectory for Humanoid Robot Locomotion,» in *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, Chengdu, ago 2012, pp. 1996-2001.
- [50] D. Orin, A. Goswami and S. Hee Lee, «Centroidal Dynamics Of Humanoid Robot,» *Autonomous Robots*, vol. 35, no. 2, pp. 161-176, Oct 2013.
- [51] G. Atmeh et al., «Implementation of an Adaptive, Model Free, Learning Controller on the Atlas Robot,» in *American Control Conference*, Portland, 2014, pp. 2887-2892.
- [52] S. Feng, E. Whitman, X. Xinjilefu and C. Atkeson, «Optimization Based Full Body Control for the Atlas Robot,» in *IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, Madrid, 2014, pp. 120-127.
- [53] W. Suleiman, F. Kanehiro, K. Miura and E. Yoshida, «Enhancing Zero Moment Point-Based Control Model: System Identification Approach,» *Advanced Robotics*, vol. 25, no. 3, pp. 427-446, Feb 2011.
- [54] S. Kajita et al., «Realtime Pattern Generator for Biped Walking,» in *International Conference on Robotics and Automation*, vol. 1, Washington, 2002, pp. 31-37.