

Diseño e integración de un robot bípedo

D. A. Vite-Téllez, C. A. Cruz-Villar y A. Rodríguez-Ángeles

Sección de Mecatrónica - Departamento de Ingeniería Eléctrica - CINVESTAV

Av. Instituto Politécnico Nacional 2508 Col. San Pedro Zacatenco C.P. 07360 México, D.F.

dvite@cinvestav.mx

Teléfono: (55) 57 47 38 00 ext. 3844

Resumen—A fin de acrecentar el estudio de los robots con extremidades inferiores dadas sus implícitas ventajas, este artículo se dedica al diseño e integración de un robot bípedo empleando un control distribuido para la implementación de trayectorias, con el objeto de lograr un desplazamiento inspirado en la marcha del ser humano. La estructura física del robot tiene 10 grados de libertad (gdl) en el cual se implementa una ley control PI para el seguimiento de trayectoria deseado en cada articulación. El proceso del ciclo de la marcha se aborda en dos planos; el primero es el plano sagital, donde se inyectan trayectorias tomadas del estudio de la biomecánica del paso, mientras que en el plano frontal se proponen trayectorias a ser verificadas por el criterio del punto de momento cero (ZMP)¹. Finalmente se presentan los resultados obtenidos en la plataforma experimental.

Palabras clave: Cinemática, control distribuido, robótica, seguimiento de trayectorias.

I. INTRODUCCIÓN

Generalmente el hablar de robots bípedos origina una idea acerca de uno de los movimientos más complejos e interesantes que el hombre realiza diariamente, la marcha. El análisis de la marcha bípeda ha tenido un incremento considerable en los últimos años debido a la mejor movilidad que presenta con respecto a los robots con ruedas convencionales, es por ello que en institutos de investigación, universidades y algunas compañías privadas se ha invertido una enorme cantidad de tiempo y recursos para el desarrollo de sofisticados prototipos de robots bípedos (Woo et al, 2005), (Zonfrilli et al, 2005) , (Kaneko et al, 2004). Para conseguir una marcha dinámicamente balanceada

¹ZMP por sus siglas en ingles Zero Moment Point

Shing et al. emplean como indicador el ZMP (Shing et al, 2008). Numerosas investigaciones emplean el ZMP por lo que es uno de los términos técnicos más famosos surgido en la comunidad robótica (Kajita et al, 2006). El ZMP es el punto dentro del área de soporte (excluyendo los bordes) para el cual se mantiene $\sum M_x = 0$ y $\sum M_y = 0$ (Vukobratović y Borovac, 2008).

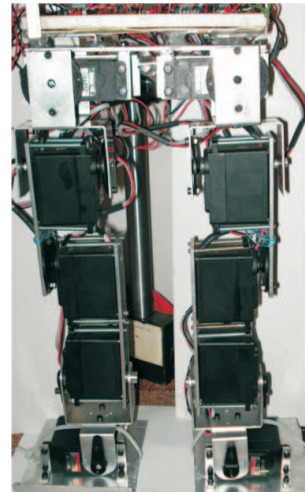


Figura 1. Robot Bípedo de 10 gdl.

Este artículo presenta el diseño e integración de un robot bípedo para banco de pruebas, además se propone implementar trayectorias sobre el plano sagital similares a las estudiadas en la biomecánica del paso, empleando un control distribuido para no solo conseguir un desplazamiento en el robot, sino observar un movimiento natural en la plataforma

experimental. En este artículo se presenta un robot bípedo que posee 10 gdl, de los cuales se utilizan 3 para obtener un movimiento en el plano sagital y 2 para el plano frontal en cada pierna, la apariencia del Robot Bípedo se ilustra en la figura 1. Las articulaciones son actuadas por motores de corriente continua (CD) con el fin de emular la marcha humana.

La cinemática directa del mecanismo se introduce en la sección II. En la sección III presenta un breve análisis de la marcha y las trayectorias deseadas para el robot. El apartado IV describe la plataforma experimental implementación de un control PI con el fin de lograr un seguimiento de trayectoria en cada articulación. En la última sección se muestran los resultados experimentales obtenidos sobre la plataforma experimental y los alcances a los que se pretende llegar con la plataforma bípeda.

II. MODELO CINEMÁTICO

La cinemática directa del robot bípedo se desarrolla por medio de la convención de Denavit-Hartenberg (Craig, 1989). La colocación de los ejes de coordenadas y las longitudes para la pierna derecha se muestra en la figura 2, es importante mencionar que tanto la estructura física del robot, las dimensiones y la localización de los ejes son las mismas para ambas extremidades, por lo que el desarrollo matemático es similar. Los parámetros de Denavit-Hartenberg y las dimensiones son listados en la tabla 1 y 2 respectivamente.

TABLA I

PARÁMETROS DE DENAVIT-HARTENBERG

i	α_{i-1}	a_{i-1}	d_i	θ_i
1	0°	l_1	0	θ_1
2	-90°	l_2	0	θ_2
3	0°	l_3	0	θ_3
4	0°	l_4	0	θ_4
5	90°	l_5	0	θ_5
6	90°	l_6	l_7	0°

El modelo cinemático que especifica la posición y la orientación del eje $\{6\}$ con respecto a $\{0\}$ es

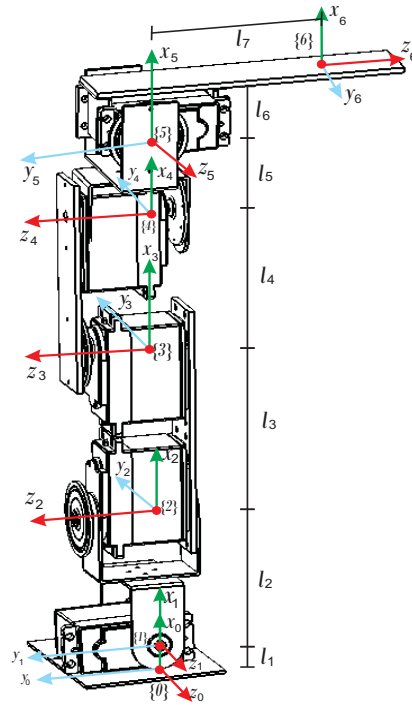


Figura 2. Ejes y dimensiones del Robot Bípedo.

TABLA II

TABLA DE DIMENSIONES

l_i	Longitud (cm)
l_1	1.65
l_2	6.2
l_3	10.5
l_4	8.3
l_5	6.4
l_6	2.8
l_7	6.45

$${}^0T_6 = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

donde

$$r_{11} = c_1 c_{234} c_5 - s_1 s_5,$$

$$r_{12} = c_1 s_{234},$$

$$r_{13} = c_1 c_{234} s_5 + s_1 c_5,$$

$$r_{21} = s_1 c_{234} c_5 + c_1 s_5,$$

$$r_{22} = s_1 s_{234},$$

$$r_{23} = s_1 c_{234} s_5 - c_1 c_5,$$

$$r_{31} = -s_{234} c_5,$$

$$r_{32} = c_{234},$$

$$r_{33} = -s_{234} s_5,$$

$$p_x = c_1 c_{234} (c_5 l_6 + s_5 l_7 + l_5) - s_1 (s_5 l_6 - c_5 l_7) + c_1 c_{234} l_4 + c_1 c_2 l_3 + c_1 l_2 + l_1,$$

$$p_y = s_1 c_{234} (c_5 l_6 + s_5 l_7 + l_5) + c_1 (s_5 l_6 - c_5 l_7) + s_1 (c_{234} l_4 + c_2 l_3 + l_2),$$

$$p_z = -s_{2+3+4} (c_5 l_6 + s_5 l_7 + l_5) - s_{2+3} l_4 - s_2 l_3$$

entiéndase $\sin(\theta_i + \theta_j + \theta_k) = s_{ijk}$ y $\cos(\theta_i) = c_i$.

III. ANÁLISIS DEL CICLO DE LA MARCHA

El desplazamiento bípedo es un fenómeno periódico. El ciclo de la marcha comienza cuando un pie toca el suelo y termina cuando el mismo pie toca el suelo otra vez, se suele expresar como un porcentaje y está compuesto por la Fase de Soporte Doble (FSD) y la Fase de Soporte Simple (FSS).

- FSD: Fase donde ambos pies están en contacto con el suelo.
- FSS: Es el estado en el cual una pierna se balancea y la otra permanece en contacto con el suelo.

En este artículo, se hace énfasis en la combinación del plano sagital con el plano frontal, el cual nos proporciona un movimiento en tres dimensiones (3D), la figura 3 expresa esta idea.

III-A. Planeación de trayectorias en el plano sagital

Con el fin de imitar la locomoción bípeda del hombre, se implementan trayectorias similares a las del paso normal del ser humano proyectadas sobre el plano sagital en los vínculos del muslo, rodilla y tobillo (Perry, 1992). Se obtienen los coeficientes de los polinomios que proporcionarían las trayectorias deseadas para cada articulación (muslo, rodilla, tobillo), es importante resaltar, que en el caso de

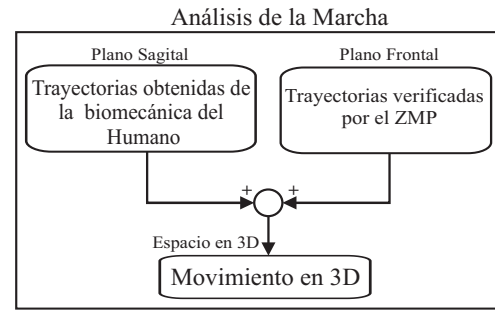


Figura 3. Análisis de la Marcha.

la trayectoria correspondiente al tobillo, está compuesta de tres polinomios debido a la particularidad de la trayectoria. El polinomio $p_{1-tobillo}$ va del 0% al 13%, $p_{2-tobillo}$ del 13% al 56% y $p_{3-tobillo}$ va del 56% al 100% del ciclo del paso.

$$p_{muslo} = 1,9815 \times 10^{-15} x^{10} - 1,083 \times 10^{-12} x^9 + 2,5137 \times 10^{-10} x^8 - 3,214 \times 10^{-8} x^7 + 0,2461 \times 10^{-5} x^6 - 0,115 \times 10^{-3} x^5 + 0,32016 \times 10^{-2} x^4 - 0,4833 \times 10^{-1} x^3 + 0,2825 x^2 - 0,34417 x + 23,38$$

$$p_{rodilla} = -0,866 \times 10^{-13} x^9 + 0,3667 \times 10^{-10} x^8 - 0,631 \times 10^{-8} x^7 + 0,5768 \times 10^{-6} x^6 - 0,3091 \times 10^{-4} x^5 + 0,9923 \times 10^{-3} x^4 - 0,1653 \times 10^{-1} x^3 + 0,3435 \times 10^{-1} x^2 + 2,0139 x + 4,334$$

$$p_{1-tobillo} = 0,17858 x^2 - 2,2832 x - 0,5$$

$$p_{2-tobillo} = -0,4643 \times 10^{-4} x^4 + 0,5636 \times 10^2 + 5,17188 x - 35,888$$

$$p_{3-tobillo} = 1,246226 \times 10^{-8} x^6 - 0,7856 \times 10^{-5} x^5 + 0,2059 \times 10^{-2} x^4 - 0,2837 x^3 + 21,5476 x^2 - 851,07 x + 13616,79$$

(2)

Las gráficas dadas por los polinomios se muestran en la figura 4, siendo estas las trayectorias deseadas del análisis de la marcha para el plano sagital.

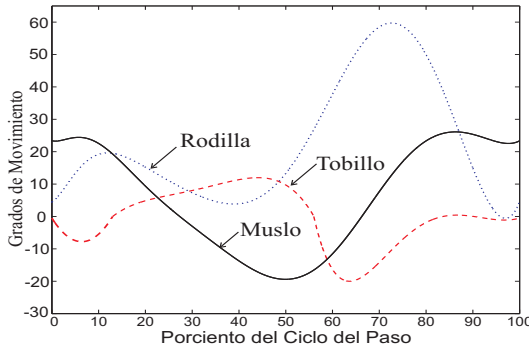


Figura 4. Trayectorias deseadas.

III-B. Planeación de trayectorias en el plano frontal

El movimiento sobre el plano frontal se utiliza para la dinámica de balanceo, de modo que la cooperación del movimiento en el plano frontal con las trayectorias del plano sagital nos generaran una marcha natural y estable. Para la verificación de la dinámica de balanceo y prevenir que el mecanismo caiga se desea emplear el criterio del ZMP como indicador.

Asumiendo que el robot tiene $N = 7$ eslabones rígidos en 3D, la posición (p_x, p_y) del ZMP puede ser calculado de acuerdo a (2) y (3)

$$p_x = \frac{\mathcal{M}g_x + p_z \dot{\mathcal{P}}_x - \dot{\mathcal{L}}_y}{\mathcal{M}g + \dot{\mathcal{P}}_z}, \quad (3)$$

$$p_y = \frac{\mathcal{M}g_y + p_z \dot{\mathcal{P}}_y - \dot{\mathcal{L}}_x}{\mathcal{M}g + \dot{\mathcal{P}}_z}, \quad (4)$$

en donde, $g = [0 \ 0 \ -g]^T$ es el vector de aceleración gravitacional, (x, y, z) son las coordenadas del centro de masa equivalente, \mathcal{M} es la masa total de los N eslabones rígidos, $\mathcal{P} = [\mathcal{P}_x \ \mathcal{P}_y \ \mathcal{P}_z]^T$ es el componente del momento lineal total y $\mathcal{L} = [\mathcal{L}_x \ \mathcal{L}_y \ \mathcal{L}_z]^T$ es el momento angular total con respecto al origen (Brunoy y Oussama, 2008). El punto p_z es la altura con respecto al piso.

Para conservar el balanceo, proponemos una trayectoria sobre el plano frontal, la cual será verifi-

cada por el cálculo de la posición del ZMP (2, 3) para poder observar en el robot un desplazamiento natural y dinámicamente balanceado.

IV. PLATAFORMA EXPERIMENTAL

IV-A. Diseño Mecánico

La concepción de la estructura mecánica bípeda se realizó empleando un software de diseño asistido por computadora. Para la definición de las dimensiones de los eslabones se tomó en cuenta las proporciones de las extremidades inferiores humanas. Los 7 eslabones están contruidos de aluminio 6063-T5, lo que lo hace ser ligero. El diseño del robot bípodo cuenta con 10 gdl. Cada pierna tiene 3 gdl que brindan movimientos angulares en el plano sagital (muslo, rodilla y tobillo) y 2 gdl que ofrecen movimiento angular sobre el plano frontal (cadera, tobillo). En la figura 1 y 2 se puede observar lo anterior.

IV-B. Controlador PI

Las articulaciones del robot son actuadas por motores de CD los cuales se alimentan a 6.0 volts proporcionando un par máximo $\tau = 13,2$ [kg.cm] con reductor de velocidad. Como se menciona en la sección anterior, el proceso de locomoción requiere del seguimiento de trayectorias en las articulaciones de la estructura mecánica, por lo que se emplea un controlador PI para este fin. La implementación de esta ley de control sobre una plataforma digital (microcontrolador) hace tener una respuesta en tiempo discreto, sin embargo, se asume que el tiempo en el que se calculan los valores es lo suficientemente más rápido que la frecuencia natural del sistema que se está controlando, por lo que el controlador se supone válido. El controlador PI en función de transferencia es:

$$\frac{Y(s)}{E(s)} = K_P + \frac{K_I}{s}, \quad (5)$$

dentro del microcontrolador se emplea una aproximación rectangular de integración, de manera que el controlador PI en tiempo discreto esta dado por

$$\frac{Y(z)}{E(z)} = \frac{\alpha + \beta z^{-1}}{1 - z^{-1}} \quad (6)$$

donde

$$\alpha = K_{pd} + \frac{K_{Id}T}{2}$$

$$\beta = \frac{K_{Id}T}{2} - K_{pd}$$

aquí K_{Pd} y K_{Id} son las ganancias proporcional e integral en tiempo discreto y T es el periodo igual a 125μ segundos.

La trayectoria deseada en cada articulación esta definida en el análisis de la marcha, por lo que en cada instante de tiempo discreto se conoce la posición deseada θ_d y se obtiene la señal real θ para realizar el cálculo del error $e = \theta_d - \theta$. La posición real se consigue por medio de un potenciómetro acoplado al reductor de velocidad. El controlador PI define la señal de compensación. Una modulación por ancho de pulso (PWM) proporcional a la señal del controlador es enviada al motor de CD. El eje del motor se encuentra acoplado a un reductor de velocidad, el cual nos proporciona un torque mayor en la articulación del robot. El lazo de control se muestra en la figura (5).

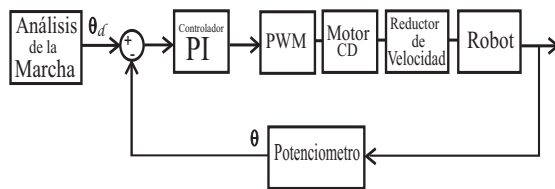


Figura 5. Diagrama de bloques

IV-C. Control distribuido

Para la implementación de la ley de control en cada vínculo se emplean 4 microcontroladores dsPIC30F4011. El microcontrolador A (μ C-A) se dedica a gobernar los movimientos en el plano sagital de la extremidad derecha del robot, es decir, las articulaciones correspondientes a el tobillo, rodilla y muslo de la pierna derecha que proyectadas producen un movimiento en el plano sagital. Al igual que el μ C-A, el μ C-B controla las articulaciones que generan movimiento en el plano sagital pero en la pierna izquierda. En los

dos microcontroladores restantes se controlan las articulaciones de cadera y tobillo que producen movimiento en el plano frontal. El μ C-C controla los motores del lado derecho mientras que el μ C-D controla los del lado izquierdo. Debido a la diferencia en el tiempo de cálculo en cada microcontrolador, existe un desfaseamiento al termino del ciclo de aproximadamente 40 [ms], lo cual se resuelve programando una señal de entrada y salida para cada principio y fin del ciclo en cada microcontrolador. Estas señales son procesadas por una compuerta lógica AND la cual regresa un bit de inicio que comparten los 4 microcontroladores obteniendo de esta manera una sincronización en cada ciclo.

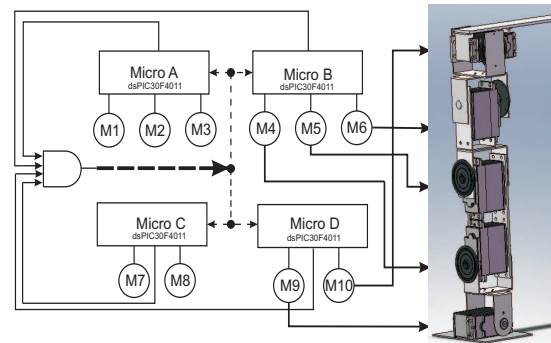


Figura 6. Control distribuido

V. RESULTADOS EXPERIMENTALES

En el robot bípodo descrito anteriormente se implementan las trayectorias deseadas en el plano sagital. La figura 7 muestra la señal del tobillo controlada por medio del controlador PI.

En las figuras 8 y 9 se muestran las gráficas de la rodilla y muslo respectivamente. Cabe mencionar que las figuras 7, 8 y 9 son adquiridas directamente del osciloscopio.

VI. CONCLUSIONES

A fin de lograr un movimiento natural en robots bípodos, en este artículo se desarrollo el diseño e integración de una plataforma experimental en la que se propone la implementación de trayectorias

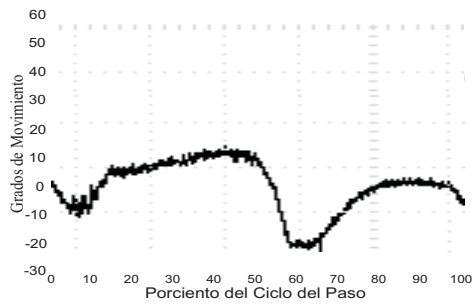


Figura 7. Señal controlada del Tobillo

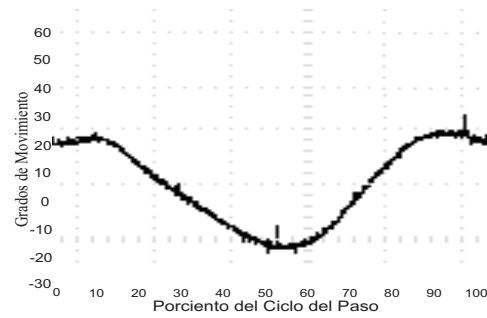


Figura 9. Señal controlada del Muslo

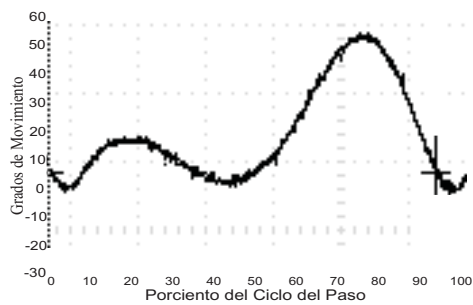


Figura 8. Señal controlada de la Rodilla

obtenidas de la biomecánica del humano. El desplazamiento como resultado del trabajo presentado solo es valido para superficies planas debido a que no se tiene retroalimentación alguna de las fuerzas de reacción que actúan en la planta del pie, por lo que añadir un cálculo del ZMP en línea, junto con una correcta planeación de trayectorias para una compensación de balanceo permitiría obtener un desplazamiento en superficies irregulares. Se debe considerar que el diseño y las dimensiones de las extremidades del robot deben ser cercanas a las medidas antropométricas para tomar en cuenta este enfoque. Finalmente los resultados obtenidos luego de la cooperación de las trayectorias del plano sagital con en el frontal, nos genera un movimiento natural en el Robot Bípodo.

VII. AGRADECIMIENTOS

En el desarrollo del proyecto de investigación se recibió apoyo de la sección de Mecatrónica

del Departamento de Ingeniería Eléctrica del CINVESTAV. Agradezco el apoyo económico por parte del CONACyT por otorgar la beca de maestría con número de registro 210160 y a través de los proyectos de investigación 61838 y 084060.

REFERENCIAS

- John J. Craig. *Introduction to robotics : mechanics and control*. Addison-Wesley Longman
- Jacqueline Perry. *Gait Analysis - Normal and Pathological Fuction*. SLACK. USA
- S. Brunoy y K. Oussama (Eds.). *Springer Handbook of Robotics*. Springer. Verlag Berlin Heidelberg.
- M. Vukobratović y B. Borovac (2008). Dynamic Balance Concept and the Maintenance of the Dynamic balance in Humanoid Robotics. *Intelligent Systems and Informatics, 2008.1* - 11.
- K. Kaneko, F. Kanehiro, S. Kajita, H. Hirukawa, T. Kawasaki, M. Hirata, K. Akachi y T. Isozumi. (2004). Humanoid Robot HRP-2. *International Conference on Robotics & Automation* 1083-1090.
- S. Kajita, M. Morisawa, K. Harada, K. Kaneko, F. Kanehiro, K. Fujiwara y H. Hirukawa. (2006). Biped Walking Pattern Generator allowing Auxiliary ZMP Control. *International Conference on Intelligent Robots and Systems* 2993-2999.
- F. Zonfrilli, D. Wollherr, Y. Nakamura. (2005). Walking control of the humanoid UT-Theta. *Advanced Robotics, 2005. ICAR '05. Proceedings., 12th International Conference* 698 - 704.
- T. Shing, F. Chen, S. Ping, J. Ruei. (2008). Investigation on gait pattern planning and dynamic balancing for biped robot. *Advanced robotics and Its Social Impacts* 1 - 6 .
- N. Phuong, D. Won, H. Kyeong, S. Bong. (2008). An optimal control method for biped robot with stable walking gait. *Humanoid Robots, 2008.* 211 - 218.
- I. Woo, J. Yup, J. Lee y J. Ho .(2005). Mechanical design of humanoid robot platform KHR-3 (KAIST Humanoid Robot 3: HUBO). *Humanoid Robots, 2005.* 321 - 326 .
- I. Woo, J. Yup, J. Lee y J. Ho .(2005). Biped Walking Pattern Generator allowing Auxiliary ZMP Control *Humanoid Robots, 2005.* 321 - 326.