

Experimentos de caminado del robot bípedo del ITLag

Víctor de-León-Gómez, J. Alfonso Pámanes G. y Victor Santibañez

*Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de la Laguna,
Torreón, Coah., C.P. 27000, México*

Resumen: En este artículo se presentan los resultados de las pruebas experimentales de marcha del Robot Bípedo ITLag de 5 g.d.l. construido en el Instituto Tecnológico de la Laguna. Se describe el diseño de un mecanismo de balanceo el cual es indispensable para la realización de la marcha. Además, teniendo en cuenta la capacidad de par de los motores, se propusieron trayectorias operacionales que permiten un caminado factible, minimizando los impactos durante la marcha.

Palabras clave: Robot Bípedo, ZMP.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos 30 años el estudio de la marcha de robots bípedos ha sido de gran interés para numerosos investigadores. El objetivo principal de este tipo de robots es realizar caminatas estables de manera similar a la marcha humana. Debido a esto, la construcción de robots bípedos ha aumentado. En Francia se realizó la construcción de un robot bípedo de 5 barras llamado RABBIT el cual ha servido para probar controladores relacionados con tareas de caminar y correr, análisis de impactos, ciclos límites y sistemas híbridos (Chevallereau et al., 2003; Westervelt et al., 2004). En la universidad de Waseda en el año 2000 se desarrolló el robot WEBIAN el cual es un bípedo tridimensional de 52 g.d.l. capaz de caminar a 0.21 m/s (Hashimoto et al., 2002). Uno de los más famosos bípedos hasta la fecha es el robot ASIMO de la compañía Honda, cuyo desarrollo iniciado a mediados de 1980 ha incluido 10 generaciones de prototipos; actualmente tiene 57 g.d.l. y es capaz de caminar, correr, saltar, girar, subir y bajar escaleras (Honda, 2014). En Japón se ha desarrollado un robot humanoide ligero y delgado (comparado con sus predecesores) llamado HRP-4 de 34 g.d.l. de 39 kg y 1.51 m de altura (Kaneko et al., 2011), además del robot HRP3L-JSK, el cual es un robot bípedo robusto capaz de calcular 170 trayectorias en 1 ms (Urata et al., 2010). Entre los robots bípedos actuales con gran estabilidad dinámica se encuentra PetMan, de Boston Dynamics, un proyecto que inició en 2009 y que a la fecha cuenta con un prototipo de bípedo con torso que presenta un caminado más natural, puede flexionarse y saltar, logrando una excelente marcha incluso ante perturbaciones (Raibert, 2010).

El esquema más importante usado para el desarrollo de controladores de seguimiento de trayectorias se basa en el criterio ZMP (punto de momento cero, por sus siglas en inglés Zero Moment Point); el cual a menudo es usado como prueba de estabilidad en el caminado. Este criterio ha sido usado para asegurar estabilidad del seguimiento

de trayectorias en el robot WABIAN (Lim et al., 2000) y ASIMO (Hirai et al., 1998); también ha sido usado para analizar la estabilidad de algoritmos de control en Kajita et al. (2002); Loffler et al. (2004) y Park and Kim (1998). En cuanto a los desarrollos referidos al prototipo de robot Bípedo ITLag se pueden mencionar los relacionados a la propuesta de marcha basado en trayectorias cicloidales para la cadera y pie libre en el plano sagital (Pámanes and Nuñez, 2001) y en 3D (Arias and Pámanes, 2009); el diseño mecánico y construcción del prototipo bípedo (Alvarez et al., 2007); el modelado cinemático y dinámico (Alvarez et al., 2007; Campos et al., 2011); pruebas experimentales de movimiento (sin apoyar los pies) (Campos et al., 2009). En todos estos trabajos se analizó la marcha del robot con base en estudios de simulación o experimentación con el robot fijo.

En el presente artículo se reportan los resultados de los primeros experimentos de caminado del robot Bípedo ITLag, y se describe el procedimiento necesario para llevar a cabo dicha tarea. Una breve descripción del robot bípedo ITLag es hecha en la sección 2. En la sección 3 se presentan las ecuaciones que determinan los movimientos cicloidales de la cadera y el pie libre del robot. Las ecuaciones de la cinemática directa e inversa son presentadas en la sección 4. La sección 5 muestra el cálculo del ZMP para la trayectoria propuesta. Los resultados de las pruebas experimentales de caminado del robot bípedo ITLag son presentados en la sección 6. Finalmente las conclusiones y el trabajo futuro son descritas en la sección 7.

2. DESCRIPCIÓN DEL ROBOT BÍPEDO

El robot bípedo ITLag cuenta con 5 g.d.l. correspondientes a los fémures y tibias de las 2 piernas, más el mecanismo de balanceo situado en la parte superior del robot, teniendo una altura de 131 cm y un peso de 92 Kg. Para el movimiento de las piernas se cuenta con 4 motores Brushless DC acoplados mediante tornillos sin-fin y tuercas a las estructuras de paralelogramo de las piernas, los cuales transforman las revoluciones del motor en desplazamientos angulares en cada uno de los eslabones de las piernas

* Agradecimientos al CONACyT por su financiamiento mediante una beca de estudios y el proyecto No. 134534, y al proyecto TNM5210.14-P.

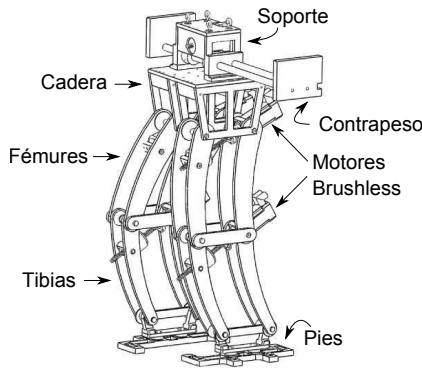


Figura 1. Robot Bípedo ITLag

del bípedo, además este diseño permite amplificar el par proporcionado por los motores. Este tipo de estructuras de paralelogramo permiten mantener la cadera y los pies del robot paralelos entre sí y al plano sobre el que camina el robot en todo momento. Aunque el movimiento del robot es solamente en el plano sagital, es necesario agregar un mecanismo de balanceo para poder realizar el caminado, ya que las piernas se encuentran en dos planos paralelos separadas mediante la cadera. Este mecanismo cuenta con un contrapeso el cual realiza su movimiento en el plano frontal mediante un motor acoplado a un soporte fijo que transmite el movimiento a través de una polea y una banda dentada. Los efectos de este mecanismo de balanceo son dinámicamente equivalentes al cuerpo superior usado por los humanos (ver Fig.1).

2.1 Diseño del mecanismo de balanceo

La utilización de un mecanismo adecuado de balanceo es indispensable para realizar una marcha estable del robot y contrarrestar el peso de la pierna levantada, de forma similar a como actúa el cuerpo superior en los humanos. Este mecanismo consta de un soporte unido a la cadera y un contrapeso el cual realiza un movimiento recíprocante transversal al plano sagital donde se realiza el movimiento de marcha del robot bípedo. Para el diseño de este mecanismo se consideró un contrapeso ligero y largo, de forma que el brazo de palanca que se produzca sea suficiente para contrarrestar el peso del robot y no sobrecargara los motores. La Fig. 2 muestra el diseño del mecanismo de balanceo del robot bípedo realizado en Solid Works. El peso de este mecanismo es de 27.70 (kg), correspondientes a 8.68 (kg) del soporte y 19.02 (kg) del contrapeso, mientras que su longitud es de 36".

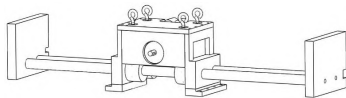


Figura 2. Diseño del mecanismo de balanceo del robot

3. PLANIFICACIÓN DE MOVIMIENTOS

La metodología seguida en nuestro trabajo se basa en trayectorias de referencia para la cadera y el pie libre. La utilización de movimientos cicloiales permite obtener movimientos suaves del robot para el inicio y el fin de

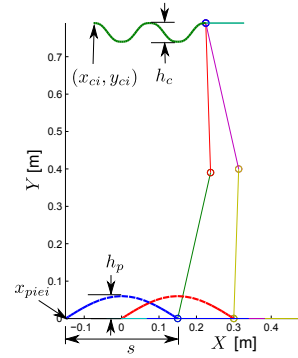


Figura 3. Trayectoria descrita por la cadera y los pies del robot.

Tabla 1. Parámetros para las trayectorias de seguimiento propuestas para el robot bípedo ITLag

Parámetro	Descripción	Valor	Unidad
T	Periodo del paso	6.0	[s]
T_1	Periodo de Simple Soporte	3.0	[s]
s	Tamaño del paso	0.3	[m]
x_{pie_i}	Posición inicial del pie	-0.15	[m]
h_p	Altura máxima del pie	0.03	[m]
x_{ci}	Coordenada en X inicial de la cadera	0.075	[m]
y_{ci}	Altura inicial de la cadera	0.79	[m]
h_c	Altura máxima de la cadera	-0.01	[m]
$v_c = s/T$	Velocidad de la cadera	0.05	[m/s]
r_{ini}	Posición inicial del contrapeso	-0.28	[m]
Δ_{r1}	1er Desplazamiento del contrapeso	0.028	[m]
Δ_{r2}	2do Desplazamiento del contrapeso	0.252	[m]

cada paso (aceleración cero), evitando impactos en todo momento. Estas trayectorias están basadas en las propuestas en Pámanes and Nuñez (2001); Arias and Pámanes (2009). Los parámetros para definir las trayectorias han sido propuestos en este trabajo de tal forma que el robot pueda realizar un caminado eficiente. Dichos parámetros permiten que el robot inicie en una posición casi vertical y que desplace su cadera hacia abajo al momento de dar un paso, ayudando de esta forma a consumir menos par (ver Fig. 3). Los parámetros que caracterizan los movimientos cicloiales propuestos son mostrados en la Tabla 1. Para el Robot bípedo ITLag estas trayectorias están definidos por las siguientes ecuaciones:

Para el pie libre

$$x_{pie} = \begin{cases} x_{pie_i} + s \left[\frac{t}{T_1} - \frac{1}{2\pi} \sin\left(\frac{2\pi t}{T_1}\right) \right] & \text{si } 0 < t \leq T_1 \\ x_{pie_i} + s & \text{si } T_1 < t \leq T \end{cases}$$

$$y_{pie} = h_p \sin\left(\left(\frac{x_{pie}}{s} + \frac{1}{2}\right)\pi\right) \quad \text{si } 0 < t \leq T$$

para la cadera

$$x_c = \begin{cases} x_{ci} + v_c t & \text{si } 0 < t \leq T_1 \\ x_{ci} + \frac{s}{2} & \text{si } T_1 < t \leq T \end{cases}$$

$$y_c = \begin{cases} y_{ci} + h_c \left[\frac{2t}{T_1} - \frac{1}{2\pi} \sin\left(\frac{4\pi t}{T_1}\right) \right] & \text{si } 0 < t \leq \frac{T_1}{2} \\ y_{ci} + h_c \left[1 - \left(\frac{2t - T_1}{T_1} - \frac{1}{2\pi} \sin\left(\frac{4\pi t}{T_1}\right) \right) \right] & \text{si } \frac{T_1}{2} < t \leq T_1 \\ y_{ci} & \text{si } T_1 < t \leq T \end{cases}$$

y para el mecanismo de balanceo

$$r_d = \begin{cases} r_{ini} + \epsilon \Delta_{r1} \left[\frac{t}{T_1} - \frac{1}{2\pi} \sin\left(\frac{2\pi t}{T_1}\right) \right] & \text{si } 0 < t \leq T_1 \\ r_{ini} + \epsilon \Delta_{r1} + \epsilon \Delta_{r2} \left[\frac{t - T_1}{T_2} - \frac{1}{2\pi} \sin\left(\frac{2\pi(t - T_1)}{T_2}\right) \right] & \text{si } T_1 < t \leq T \end{cases}$$

donde $T_2 = T - T_1$ representa el tiempo restante de la trayectoria, y $\epsilon = \pm 1$ es utilizado para cambiar la dirección del movimiento del contrapeso en cada paso.

4. MODELO CINEMÁTICO

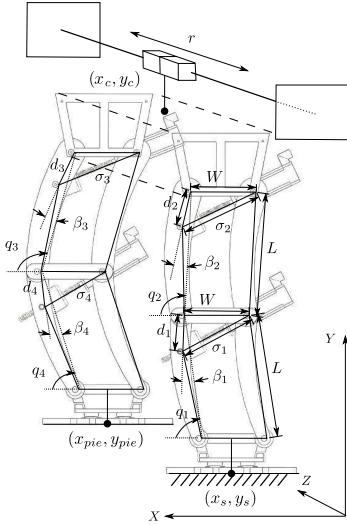


Figura 4. Representación esquemática del Robot Bípido ITLag

Tabla 2. Parámetros cinemáticos del robot bípido ITLag

Parámetro	Descripción	Valor	Unidad
L	Longitud del eslabón	0.40	[m]
W	Ancho del eslabón	0.21	[m]
β_1, β_4	Angulo de curvatura de la tibia	0.1977	[rad]
β_2, β_3	Angulo de curvatura del fémur	0.1791	[rad]
d_1, d_4	Distancia de la unión del tornillo en la tibia a la rodilla	0.09	[m]
d_2, d_3	Distancia de la unión del tornillo en el fémur a la cadera	0.115	[m]

En esta sección se presentan las ecuaciones utilizadas para transformar las trayectorias de movimientos cicloidales propuestas para la cadera y pie libre en la sección anterior a movimientos en el espacio articular. Sean el vector de coordenadas operacionales deseadas $\mathbf{x}_d = [x_c \ y_c \ x_{pie} \ y_{pie}]^T$ donde (x_{pie}, y_{pie}) y (x_c, y_c) representan las coordenadas cartesianas del pie libre y la cadera respectivamente. Ya que el movimiento de las piernas es en el plano sagital (plano X-Y) y uno de los pies se supone fijo en el piso (x_s, y_s) , es posible definir completamente la posición de las piernas del bípido utilizando el vector de coordenadas articulares deseadas $\mathbf{q}_d = [q_{d1} \ q_{d2} \ q_{d3} \ q_{d4}]^T$, donde q_{di} con $i = 1, 4$ representa el ángulo del eslabón i del bípido como se muestra en la Fig 4. La cinemática directa de un robot serial de n g.d.l. es una función que relaciona $\mathbf{q}_d$ y $\mathbf{x}_d$ permitiendo encontrar la relación que existe entre las coordenadas operacionales y las coordenadas articulares del robot

$$\mathbf{x}_d = \mathbf{f}(\mathbf{q}_d), \quad (1)$$

la cual en nuestro caso es

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ x_{pie} \\ y_{pie} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L(\cos(q_{d1}) + \cos(q_{d2})) + x_s \\ L(\sin(q_{d1}) + \sin(q_{d2})) + y_s \\ L(\cos(q_{d1}) + \cos(q_{d2}) - (\cos(q_{d3}) + \cos(q_{d4}))) + x_s \\ L(\sin(q_{d1}) + \sin(q_{d2}) - (\sin(q_{d3}) + \sin(q_{d4}))) + y_s \end{bmatrix}$$

La cinemática inversa está dada por $\mathbf{q}_d = \mathbf{f}^{-1}(\mathbf{x}_d)$ y usando algunas identidades trigonométricas es posible encontrar la relación inversa

$$\begin{aligned} q_{d1} &= \text{atan} \left(\frac{y_c - y_s}{x_c - x_s} \right) - \frac{1}{2} \text{acos} \left(\frac{(x_c - x_s)^2 + (y_c - y_s)^2 - 2L^2}{2L^2} \right) \\ q_{d2} &= \text{atan} \left(\frac{y_c - y_s}{x_c - x_s} \right) + \frac{1}{2} \text{acos} \left(\frac{(x_c - x_s)^2 + (y_c - y_s)^2 - 2L^2}{2L^2} \right) \\ q_{d3} &= \text{atan} \left(\frac{y_c - y_{pie}}{x_c - x_{pie}} \right) + \frac{1}{2} \text{acos} \left(\frac{(x_c - x_{pie})^2 + (y_c - y_{pie})^2 - 2L^2}{2L^2} \right) \\ q_{d4} &= \text{atan} \left(\frac{y_c - y_{pie}}{x_c - x_{pie}} \right) - \frac{1}{2} \text{acos} \left(\frac{(x_c - x_{pie})^2 + (y_c - y_{pie})^2 - 2L^2}{2L^2} \right) \end{aligned}$$

las cuales representan las posiciones articulares deseadas. Ahora, para obtener las velocidades deseadas se utiliza la derivada temporal de la ecuación (1) definida como

$$\dot{\mathbf{x}}_d = \mathbf{J}(\mathbf{q}_d) \dot{\mathbf{q}}_d \quad (2)$$

donde $\mathbf{J}(\mathbf{q}_d) = \frac{\partial \mathbf{f}(\mathbf{q}_d)}{\partial \mathbf{q}_d}$ es llamada matriz jacobiana. Luego, despejando $\dot{\mathbf{q}}_d$ de (2) es posible obtener las velocidades operacionales deseadas

$$\dot{\mathbf{q}}_d = \mathbf{J}^{-1}(\mathbf{q}_d) \dot{\mathbf{x}}_d. \quad (3)$$

Como se apreció en la sección anterior, para el caso del contrapeso las posiciones y velocidades son directamente asignadas por los movimientos cicloidales propuestos.

5. CRITERIO DE BALANCEO DE LA MARCHA

El caminado de un robot puede ser dividido en dos fases: fase de simple soporte (FSS) y fase de doble soporte (FDS). En este trabajo se toma en cuenta para el caminado solamente la FSS, pues aunque evidentemente existe FDS, durante esta fase no se realiza ningún movimiento de las piernas, pues solamente es usada para cambiar de posición el contrapeso, además, debido a las trayectorias propuestas se evita el impacto entre fase y fase.

Los movimientos descritos en la sección anterior provocan fuerzas y pares en las articulaciones del bípido que serán reflejadas en el pie de apoyo, donde para mantener al robot estable es necesario que la fuerza de reacción del suelo pueda contrarrestarlos. Para ello se recurre al cálculo del ZMP como criterio que permita asegurar la estabilidad del caminado. El ZMP es definido como un punto en el suelo donde la resultante de fuerza de reacción del suelo actúa y es, consecuentemente, siempre contenida dentro del polígono de soporte (Vukobratović and Borovac, 2004). Este criterio establece que cuando el ZMP es contenido dentro del interior del polígono de soporte (la huella del pie en FSS o el área convexa entre las huellas de los dos pies en FDS), el robot es estable, es decir, no se volcará.

Debido a que el Robot Bípido ITLag aún no cuenta con sensores que permitan una realimentación del medio ambiente (sensores de fuerza, visión, etc.), es necesario asegurar que el robot ha completado un paso, es por ello, que el mecanismo de balanceo se mantiene cargado hacia el pie de apoyo mientras el robot se encuentra en la FSS permitiendo que el ZMP se mantenga siempre dentro del polígono de soporte definido por este pie.

Utilizando el modelo dinámico del robot y el análisis presentado en Pámanes et al. (2010), las leyes de movimiento

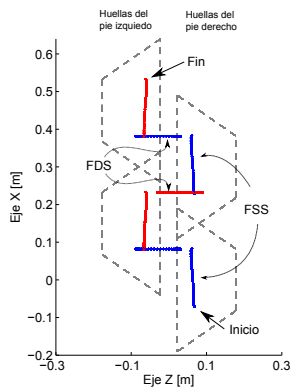


Figura 5. Trayectoria del ZMP debida a las leyes de movimiento propuestas y parámetros del robot.

arriba descritas y los parámetros del robot (masas, inercias, distancias a centros de masa, etc.) se calculó mediante simulación la trayectoria del ZMP producida durante el caminado. Se observa en la Fig. 5 que el ZMP se encuentra siempre dentro del área de soporte, lo cual significa que esta trayectoria mantendrá un caminado estable.

6. PRUEBAS EXPERIMENTALES

Las pruebas experimentales realizadas en el robot Bípodo ITLag, fueron llevadas a cabo en tiempo real utilizando el toolbox Real-time Windows Target de Simulink, Matlab. Dos tarjetas adquisitoras Sensoray 626 fueron empleadas para la comunicación y aplicación de las señales de control. Cinco drivers Kollmorgen modelo S603 fueron utilizados para el control en modo par de los 5 motores brushless AKM32D de la misma marca, correspondientes a cada grado de libertad del robot, los cuales tienen un límite máximo de ± 2 (Nm). El tiempo de muestreo utilizado fue de 3 ms.

Debido a que los motores de las piernas están localizados en el plano sagital, es necesario transformar los desplazamientos angulares a lo largo de los tornillos a desplazamientos angulares que representen la inclinación de los eslabones del robot q_i con $i = 1 \dots 4$, los cuales son obtenidos mediante el siguiente procedimiento: Las revoluciones realiza por los motores son obtenidas a partir de las lecturas de los encoders mediante la siguiente relación

$$\text{rev} = \frac{\text{enc}_{\text{pulsos}}}{4(4069)} \quad (4)$$

donde la resolución de los encoders es de 4069 pulsos/rev y son configurados en modo cuadratura, luego, las revoluciones del motor son convertidas a desplazamientos lineales del tornillo mediante

$$\sigma_i = \sigma_{ini} + k_{\text{rev}}$$

donde $k_s = 0,00508[\text{m/rev}]$ es el paso del tornillo de bolas y $\sigma_{inij} = 0,26\text{m}$ para $j = 2, 3$ y $\sigma_{inij} = 0,242\text{m}$ para $j = 1, 4$ es la distancia del motor a la corredera unida al fémur o a la tibia respectivamente cuando la pierna está a 90 grados. Después se obtienen las posiciones q_i con $i = 1 \dots 4$ correspondientes a las posiciones de las tibias y los fémures mediante

$$q_i = \frac{180}{\pi} \left(\arccos \left(\frac{\sigma_i^2 - W^2 - d_i^2}{-2Wd_i} \right) - \beta_i \right) \quad (5)$$

utilizando los parámetros descritos en la Tabla 2.

Para el mecanismo de contrapeso, es necesario obtener la posición lineal respecto a su marco de referencia. El desplazamiento del contrapeso en el plano frontal (en dirección del eje Z) es representado por r , donde $r = 0$ cuando se encuentra en el centro; es negativo cuando el contrapeso está desplazado a la derecha y positivo cuando está desplazado a la izquierda. Usando la ecuación (4) para obtener la posición en revoluciones del motor, la posición lineal del contrapeso es obtenida mediante

$$r = k_t \text{rev} + r_i$$

donde r_i es la posición inicial del contrapeso, $k_t = 2\pi r_p$ es una constante de conversión [m/rev] y $r_p = 0,02244$ [m] representa el radio de la polea acoplada al motor. Por otro lado, debido a que las coordenadas utilizadas por

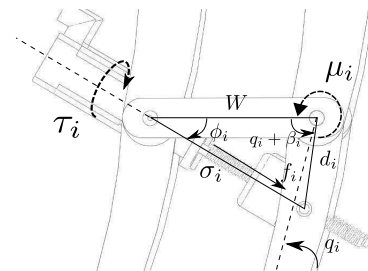


Figura 6. Esquema de la transmisión de pares

el controlador son la inclinación de las piernas, como los mostrados en la Fig. 4, el par aplicado por el controlador es en el eje de rotación de cada articulación, sin embargo como se puede observar en la Fig. 6, para obtener los pares reales aplicados por el motor es necesario utilizar la siguiente relación

$$\tau_i = k_s k_e f_i$$

para $i = 1 \dots 4$, donde $k_s = 0,00508$ [m/rev] es el paso del tornillo de bolas y $k_e = 0,117$ su eficiencia, f_i representa la fuerza aplicada en dirección del tornillo y está dada por

$$f_i = \frac{\mu_i}{W \sin(\phi_i)}$$

donde μ_i con $i = 1 \dots 4$, es el par aplicado por el controlador en el eje de rotación y ϕ puede ser calculado según la Fig. 6 mediante la siguiente relación trigonométrica

$$\phi_i = \tan^{-1} \left(\frac{d_i \sin(q_i + \beta_i)}{W - d_i \cos(q_i + \beta_i)} \right)$$

notando que el cateto opuesto es formado por $d_i \sin(q_i + \beta_i)$ y el cateto adyacente por $W - d_i \cos(q_i + \beta_i)$.

De igual forma, el controlador proporcional la fuerza lineal f_{cp} aplicada por la banda dentada en dirección del eje Z, para mover al contrapeso, sin embargo para obtener el par aplicado por el motor es necesario multiplicar la fuerza por el radio de la polea, es decir

$$\tau_5 = r_p f_{cp}.$$

Caminado del Robot Bípido ITL en modo par.

De acuerdo a las trayectorias propuestas, se encontró que las posiciones articulares iniciales (en grados) para el inicio del caminado son: $q_{1di} = 88.1313$, $q_{2di} = 102.7007$,

$q_{3di} = 91,8436$, $q_{4di} = 77,2956$, y para mantener la estabilidad del mecanismo de acuerdo al criterio del ZMP, la posición inicial (en metros) del mecanismo de balanceo es $r_{di} = -0,28$.

El controlador empleado para realizar la tarea de seguimiento es un controlador tipo PID saturado, cuya ley de control está dada por

$$\mathbf{u} = K_p \tanh(\alpha \tilde{\mathbf{q}}) + K_d \dot{\tilde{\mathbf{q}}} + \mathbf{Sat} \left(K_i \int \tilde{\mathbf{q}} dt, \gamma \right) \quad (6)$$

donde $\mathbf{u} = [\mu_1 \ \mu_2 \ \mu_3 \ \mu_4 \ f_{cp}]^T$ es el vector de pares en los ejes de rotación y fuerza aplicada al contrapeso, $K_p = \text{diag}[k_{pi}]$, $K_d = \text{diag}[k_{di}]$, $K_i = \text{diag}[k_{ii}]$, $\tanh(\boldsymbol{\vartheta}) = [\tanh(\vartheta_1) \ \tanh(\vartheta_2) \ \dots \ \tanh(\vartheta_n)]$ y además $\mathbf{Sat}(\boldsymbol{\nu}) = [\text{sat}(\nu_1) \ \text{sat}(\nu_2) \ \dots \ \text{sat}(\nu_n)]$, donde $\text{sat}_i(\nu_i) = \text{sign}(\nu_i) \min(|\nu_i|, \gamma_i)$.

El ajuste de ganancias utilizado para las pruebas experimentales es mostrado en la Tabla 3.

Tabla 3. Ganancias del controlador

Controlador	α	k_p	k_d	k_i	γ
μ_1 Tibia 1	1	110	2	35	100
μ_2 Fémur 1	1	100	2	20	90
μ_3 Fémur 2	1	100	2	20	90
μ_4 Tibia 2	1	100	2	30	90
f_{cp} Contrapeso	300	40	25	1	30

Los parámetros de las trayectorias utilizadas para realizar el caminado en forma experimental son los mismos que los utilizados para la simulación y el cálculo del ZMP (ver tabla 1). Se puede observar que bajo estos parámetros el movimiento de las piernas del robot para realizar el caminado es de 3 segundos (la mitad del periodo), mientras que la mayor parte del movimiento del contrapeso es realizado durante los 3 segundos restantes, esto es realizado para permitir mejor estabilidad del caminado.

Las Figuras 7, 8, 9, muestran las posiciones de las piernas y el contrapeso durante la realización del patrón de marcha propuesto. Utilizando la norma cuadrática del error, para

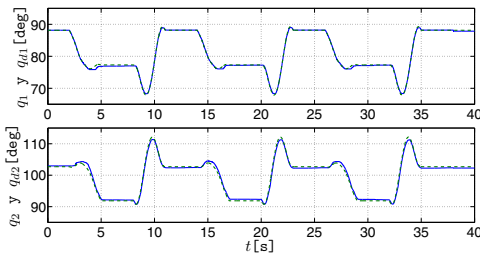


Figura 7. Posiciones articulares de la pierna derecha durante la realización de la tarea de seguimiento

cada articulación, definida por $\mathcal{L}_2[\tilde{q}_i] = \sqrt{\frac{1}{T-t_0} \int_{t_0}^T \tilde{q}_i^2 dt}$ con $i = 1, \dots, 4$ y para el contrapeso, se encontró que para la tarea de caminado propuesta de $t_0 = 0$ (s), y $T = 40$ (s), la norma del error obtenida es: $\mathcal{L}_2[\tilde{q}_1] = 0,2489^\circ$, $\mathcal{L}_2[\tilde{q}_2] = 0,5524^\circ$, $\mathcal{L}_2[\tilde{q}_3] = 0,5480^\circ$, $\mathcal{L}_2[\tilde{q}_4] = 0,2362^\circ$ y $\mathcal{L}_2[\tilde{r}] = 0,0026$ (m), lo cual como se observa en las gráficas, permite la realización de una tarea de caminado aceptable. Además las Figs. 10, 11 y 12 muestran que las modificaciones realizadas han permitido que el par utilizado por cada motor para realizar esta tarea se mantenga dentro

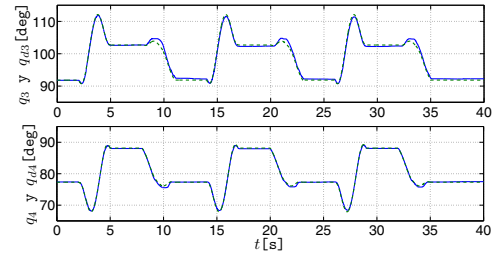


Figura 8. Posiciones articulares de la pierna izquierda durante la realización de la tarea de seguimiento

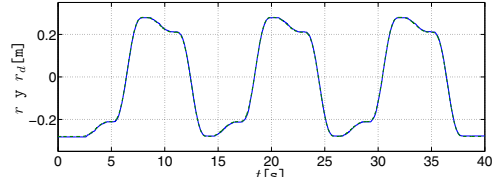


Figura 9. Posición del contrapeso durante la realización de la tarea de seguimiento

de los límites establecidos, a diferencia de la simulación reportada en Campos et al. (2011).

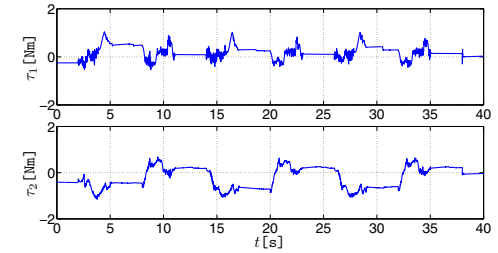


Figura 10. Señal de control de par aplicada a los motores de la tibia y fémur de la pierna derecha para la realización de la tarea de seguimiento

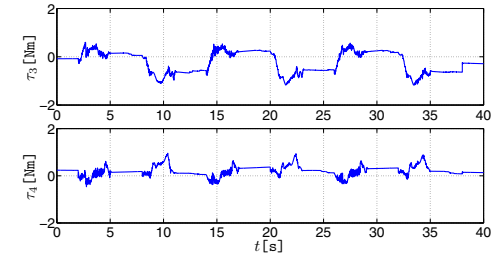


Figura 11. Señal de control de par aplicada a los motores de la tibia y fémur de la pierna izquierda para la realización de la tarea de seguimiento

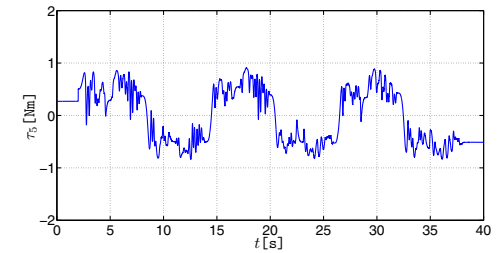


Figura 12. Señal de control de par aplicada al motor del mecanismo de balanceo para la realización de la tarea de seguimiento

La Fig. 13 muestra el robot Bípedo ITLag en la actualidad.



Figura 13. Robot Bípedo ITLag de 5.g.d.f

7. CONCLUSIONES

Se presentaron los resultados obtenidos en los experimentos de caminado en tiempo real del robot Bípedo ITLag aplicando un controlador tipo PID saturado. Los experimentos mostraron un desempeño eficaz de la ley de control y un caminado estable del robot, el cual se basa en el seguimiento de trayectorias cicloidales, que tienen como principal ventaja ser trayectorias suaves que demandan aceleraciones cero al inicio y fin de cada paso y de esta forma evitar impactos durante el caminado que puedan dañar la estructura debido a su rigidez. El cálculo del ZMP permitió verificar la estabilidad de la marcha del robot fuera de línea, sin embargo al no contar con sensores que permitan la realimentación del entorno, se tiene como desventaja no poder modificar o calcular nuevas trayectorias basadas en un ZMP real, y por tanto no es posible llevar a cabo un caminado más demandante. Esto se propone como trabajo futuro además de la posibilidad de probar la eficiencia de nuevos controladores.

REFERENCIAS

- Alvarez, E., Pámanes, J.A., and Arias, L.E. (2007). Balancing of a 4 dof biped robot for a walking pattern based in cycloidal motions. In *Memorias del IX Congreso Mexicano de Robótica*. Monterrey, México.
- Arias, L.E. and Pámanes, J.A. (2009). Especificación de movimientos generales de la pelvis y el pie libre de robots bípedos para marcha sin impacto. In *IX Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica*. Las Palmas de Gran Canaria, España.
- Campos, C., Campa, R., Llama, M., and Pámanes, A. (2011). Modelling, simulation and analysis of a 5-dof planar parallelogram-link biped mechanism. *International Review on Modelling and Simulations (I.R.E.M.O.S.)*, 4, 3337–3352.
- Campos, C., Campa, R., and Llama, M. (2009). Modeling and real-time motion control of a 4-dof planar parallelogram-link biped mechanism. In *Proceedings of the European Control Conference*, 3341–3346. Budapest, Hungary.
- Chevallereau, C., Abba, G., Aoustin, Y., F. Plestan, E.R.W., Canudas, C., and Grizzle, J. (2003). Rabbit: a testbed for advanced control theory. *IEEE Control Systems Magazine*, 23(5), 57–79.
- Hashimoto, S., Narita, S., Kasahara, H., Shirai, K., Kobayashi, T., Takanishi, A., Sugano, S., and et al. (2002). Humanoid robots in waseda university-hadaly-2 and wabian. *Advanced Robotics*, 12(1), 25–38.
- Hirai, K., Hirose, M., Haikawa, Y., and Takenake, T. (1998). The development of honda humanoid robot. In *the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1321–1326. Leuven, Belgium.
- Honda (2014). Asimo the world's most advanced humanoid robot. URL <http://asimo.honda.com/asimo-specs/>.
- Kajita, S., Kanehiro, F., Kaneko, K., Fujiwara, K., Yokoi, K., and Hirukawa, H. (2002). A realtime pattern generator for biped walking. In *the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 31–37. Washington, D.C.
- Kaneko, K., Kanehiro, F., Morisawa, M., Akachi, K., Miyamori, G., Hayashi, A., and Kanehira, N. (2011). Humanoid robot hrp-4 - humanoid robotics platform with lightweight and slim body. In *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2011 IEEE/RSJ International Conference on*, 4400–4407.
- Lim, H., Yamamoto, Y., and Takanishi, A. (2000). Control to realize human-like walking of a biped humanoid robot. In *the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Computational Cybernetics and Simulations*, 3271–3276. Nashville, TN.
- Löffler, K., Gienger, M., Pfeiffer, F., and Ulbrich, H. (2004). Sensors and control concept of a biped robot. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 51(5), 972–980.
- Park, J.H. and Kim, K.D. (1998). Biped robot walking using gravity-compensated inverted pendulum mode and computed torque control. In *the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 3528–3533. Leuven, Belgium.
- Pámanes, J.A., Campos, C., and Llama, M. (2010). Análisis del zmp del robot bípedo del itlag con contrapesos recíprocos. In *Memorias del XII Congreso mexicano de robótica (COMRob2010) de la AMRob, artículo A40*. Mazatlán, México.
- Pámanes, J. and Nuñez, J. (2001). Análisis del caminado de un robot bípedo para un patrón de marcha basado en movimientos cicloidales. In *Memorias del III Congreso Mexicano de Robótica (COMRob2001) de la AMRob*, 62–67. Querétaro, México.
- Raibert, M. (2010). Dynamic legged robots for rough terrain. In *10th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)*, 1. Nashville, TN.
- Urata, J., Nakanishi, Y., Okada, K., and Inaba, M. (2010). Design of high torque and high speed leg module for high power humanoid. In *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2010 IEEE/RSJ International Conference on*, 4497–4502.
- Vukobratović, M. and Borovac, B. (2004). Zero-moment point - thirty five years of its life. *International Journal of Humanoid Robotics*, 1(1), 157–173.
- Westervelt, E.R., Buche, G., and Grizzle, J.W. (2004). Experimental validation of a framework for the design of controllers that induce stable walking in planar bipeds. *International Journal of Robotics Research*, 23(6), 559–582.