



PATRÓN DE MARCHA 3D DE TIPO CICLOIDAL PARA HUMANOIDES Y SU APLICACION AL ROBOT *BIOLOID*

LINA E. ARIAS^{1,2}, LUIS I. OLVERA¹, J. ALFONSO PÁMANES¹, J. VÍCTOR NUNEZ³

¹División de Estudios de Posgrado e Investigación del Instituto Tecnológico de la Laguna
Blvd. Revolución y Calz. Cuauhtémoc, Torreón, Coah., CP 27000, México

²Escuela de Sistemas de la Universidad Autónoma de Coahuila, Unidad Torreón
³Universidad Politécnica de Sinaloa
Carretera a Higueras, Km. 3, Mazatlán, Sin., CP 82150, México

(Recibido 16 de mayo de 2012, para publicación 23 de agosto de 2012)

Resumen – En este artículo se propone una familia de funciones que definen el patrón de marcha de un robot humanoide con movimientos generales de la pelvis y el pie basculante en el espacio 3D. Las funciones propuestas generan desplazamientos de tipo cicloidal en ambas partes del robot. Los parámetros que intervienen en estas funciones permiten modular fácilmente las oscilaciones de la pelvis y el pie, en posición y orientación, de tal manera que se establezcan marchas con diferentes atributos. El enfoque propuesto se aplica a la especificación de la marcha del robot humanoide *Bioloid*, de 12 gdl en piernas. Esta aplicación se realiza gracias al programa de cómputo *TrayArtBio*, que se desarrolló como herramienta para la aplicación del patrón de marcha, el cual está orientado al cálculo y la programación de las trayectorias articulares del *Bioloid*, así como al análisis y simulación de la marcha utilizando un modelo virtual del robot. Una vez comprobada la factibilidad de la marcha propuesta, ésta será ejecutada por el robot real. Los resultados obtenidos muestran la factibilidad del patrón de marcha de tipo cicloidal y la utilidad del *TrayArtBio*.

Palabras clave – Robots humanoides, patrones de marcha 3D, experimentación, robot *Bioloid*.

1. INTRODUCCIÓN

Las aplicaciones previstas para los robots humanoides implican una amplia interacción con los seres humanos en los ambientes naturales de éstos: en plantas industriales, hospitales, restaurantes, el hogar, escuelas, oficinas, aeropuertos, etc. En consecuencia, el sistema de locomoción de un robot de ese tipo debe facilitar su desplazamiento en dichos entornos, sin necesidad de instalaciones especiales, y sin la asistencia de un ser humano. Bajo este criterio, la locomoción bípeda antropomorfa resulta naturalmente la mejor adaptada al funcionamiento de un humanoide. No obstante, la estructura física de este tipo de robot y las características de sus movimientos hacen que el equilibrio que debe conservar durante su funcionamiento sea precario y que, por lo tanto, esté altamente expuesto a un desplome ante la acción de perturbaciones de baja intensidad. Esta falta de robustez de un humanoide es inherente al carácter antropomorfo de su arquitectura; sin embargo, a diferencia del ser humano cuyos sistemas mecánico y de control se caracterizan por el excelente desempeño que poseen, un humanoide no cuenta con atributos de ese nivel. Un ser humano, en efecto, está dotado una mayor capacidad para sobreponerse a las perturbaciones gracias a la superioridad del funcionamiento que proveen sus músculos y su sistema nervioso en comparación con un sistema robótico. Por lo anterior, es preciso que los patrones de movimientos de un humanoide se establezcan de tal suerte que le dispensen estabilidad al robot en forma intrínseca durante su operación, y comprometan menos el funcionamiento del sub-sistema de control haciendo disminuir así el riesgo de una caída.

En una investigación precursora sobre marcha bípeda, M. Vukobratovic y D. Juricic [1] estudiaron la estabilidad de un ser humano a partir de su comportamiento dinámico al caminar, e introdujeron la trascendental noción del *punto de momento cero* (ZMP por sus iniciales en inglés). Éste es el punto físico de la superficie de sustentación del pie de apoyo del bípedo, en la fase de simple soporte, en el cual actúa la componente vertical de una fuerza concentrada equivalente a la reacción del piso sobre el pie. Esta fuerza

equivalente produce un par sobre el pie de apoyo que equilibra a la componente horizontal del par que ejercen las cargas iniciales y gravitatorias del cuerpo del robot sobre el mismo pie. Por otra parte, teniendo en cuenta que el ZMP cambia de posición continuamente sobre la superficie de apoyo del pie durante la marcha, es indispensable que dicho punto permanezca en la superficie de sustentación a fin de garantizar la presencia física de la fuerza que mantiene en equilibrio dinámico al bípedo.

Después del trabajo de Vukobratovic y Juricic, diversos investigadores han abordado el problema de la síntesis de patrones de marcha de robots bípedos teniendo como referencia el comportamiento del ZMP. Shih y colegas [2], por ejemplo, propusieron minimizar la desviación entre el centro de la región estable y el ZMP, considerando solamente la definición de una trayectoria óptima de la cadera. Esos autores estudiaron un robot de 12 *gdl* en marcha plana y especificaron el movimiento de la cadera mediante funciones sinusoidales; las trayectorias articulares que se sintetizan mediante este procedimiento producen impactos en el pie basculante del robot al hacer contacto con el suelo, lo cual limita el alcance de ese tipo de marcha.

Zhang y otros [3] presentaron un método de síntesis del patrón de marcha en el que se aplican técnicas de lógica difusa a un bípedo de 10 *gdl* para identificar una ruta ideal del ZMP. En los resultados reportados se observa una gran dispersión de las posiciones del punto de momento cero, lo que supone una marcha del robot con una mayor inestabilidad en relación a una marcha que genere una ruta continua del ZMP.

Huang y colegas [4], por su parte, plantearon la maximización del margen de estabilidad de un bípedo a partir de los valores óptimos de dos parámetros. Se trata de las distancias, a lo largo de la dirección de la marcha, entre la cadera y el tobillo del pie de apoyo tanto al iniciar como al finalizar un paso en la fase de soporte simple. Los movimientos de la cadera y del pie basculante se especificaron con base en funciones *splines* de tercer orden. En esa formulación se considera la posibilidad de que la marcha del robot sea sobre una superficie irregular; sin embargo, el patrón de marcha utilizado tampoco impide los impactos del pie basculante al aterrizar.

En otro estudio [5] se proponen funciones polinomiales de sexto orden para caracterizar los movimientos 3D de la cadera y del pie basculante, en éste se consideran restricciones para la prevención de impactos; no obstante, bajo funciones periódicas polinomiales de alto orden se alcanzan aceleraciones relativamente altas, lo cual implica la presencia de elevadas fuerzas de inercia que penalizan la estabilidad.

Otros autores [6-9], con un enfoque distinto del problema, establecieron una trayectoria deseada del ZMP de un bípedo teniendo como referencia la marcha humana, y determinaron los movimientos de la cadera del robot que generan trayectorias del ZMP próximas a la deseada. En la mayoría de los métodos propuestos por estos autores, las leyes de movimiento son expresadas mediante funciones polinomiales, las cuales se restringen para aproximar trayectorias ideales del cuerpo del robot o del ZMP, tratando invariabilmente de mejorar la estabilidad del bípedo. En contraste con esos enfoques, en el presente trabajo se propone el uso de funciones de tipo cicloidal, las cuales han proporcionado un comportamiento dinámico interesante en otros sistemas mecánicos. Se trata de funciones que intrínsecamente impiden la presencia de efectos dinámicos nocivos y que, en consecuencia, favorecen el equilibrio dinámico y ayudan a reducir el desgaste de los elementos mecánicos que componen el robot. Las funciones propuestas especifican movimientos generales de la pelvis y del pie basculante del bípedo en el espacio 3D. Dichas funciones, además, se aplican al robot humanoide *Bioloid*, el cual posee 12 *gdl* en las piernas. En la siguiente sección se describe la arquitectura de este robot. En el tercer apartado se presentan las ecuaciones del patrón de marcha propuesto. En una sección subsecuente se presenta el programa *TrayArtBio* que se utiliza para la especificación de la marcha y para la programación del humanoide. Luego se describe la aplicación que se hace al Bioloid del patrón de marcha generado. Finalmente se analizan los resultados obtenidos y se destaca la eficacia del método propuesto.

2. ROBOT HUMANOIDE BIOLOID

El robot *Bioloid* es un humanoide miniatura de 18 *gdl* (12 *gdl* en piernas y 6 *gdl* en brazos), que ha sido empleado por la comunidad científica para realizar diversos estudios relativos a humanoides; se ha utilizado, por ejemplo, en investigaciones sobre estrategias de control de marcha bípeda basadas en redes

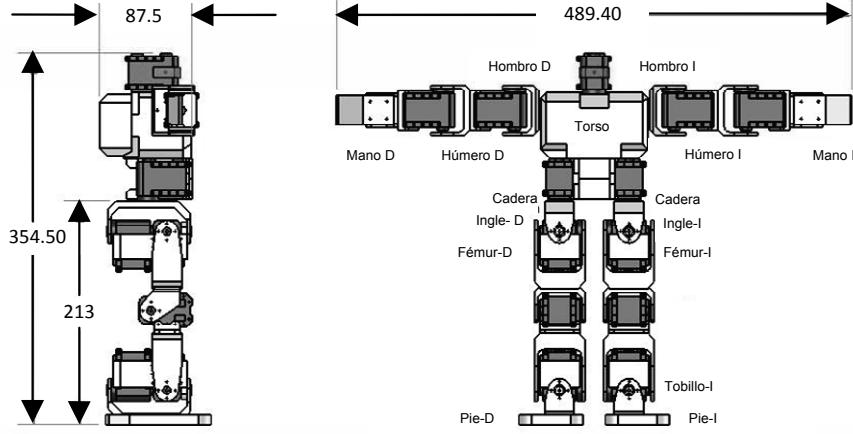


Fig. 1. Vistas lateral y frontal del robot humanoide Bioloid [14]. Dimensiones en mm.

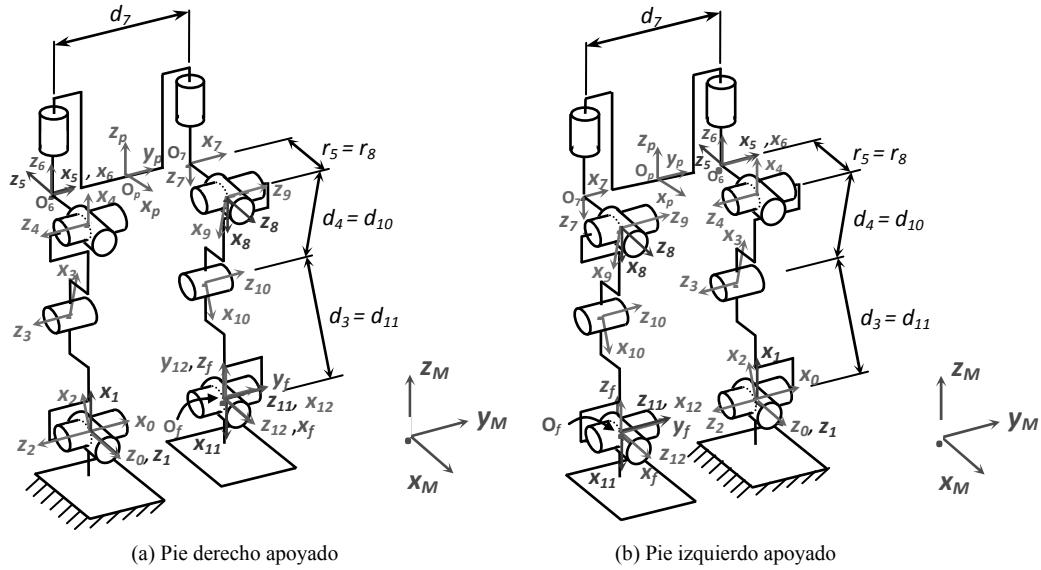


Fig. 2. Marcos de referencia asociados a la cadena cinemática de las piernas del robot Bioloid según la convención modificada de Denavit-Hartenberg [13].

neuronales [10], y en técnicas evolutivas [11]. Así mismo, el *Bioloid* se ha aplicado en el análisis de la locomoción y auto-localización de agentes de equipos de futbol soccer [12]. En la Fig. 1 se indican las principales dimensiones de este robot.

Para la descripción de la cadena cinemática de las piernas del robot, a los eslabones de éstas se les asignan marcos de referencia ortonormales aplicando la convención modificada de Denavit-Hartenberg [13]. Bajo esta convención, los marcos se numeran de manera consecutiva desde el cero, asignado al pie de apoyo (eslabón fijo), hasta el doce, asignado al pie basculante durante la marcha. En consecuencia, se deben establecer dos conjuntos de marcos de referencia en la misma cadena cinemática: el primero se aplicará cuando se tenga el pie derecho apoyado (*pda*), y el segundo cuando se tenga el pie izquierdo apoyado (*pia*). En la Fig. 2 se observan los dos conjuntos de marcos de referencia, y en la Tabla 1 se proporcionan los parámetros de Denavit-Hartenberg modificados (DHM) de la cadena cinemática. Establecidos los marcos de referencia de la manera mostrada en la Fig. 2, y teniendo en cuenta la simetría de la cadena cinemática, se tiene que los parámetros geométricos son los mismos para ambos casos; sólo el parámetro d_7 , se considera positivo para *pda* y negativo para *pia*. Las variables articulares θ_j , que designan los ángulos entre los eslabones $j-1$ y j , se miden del eje x_{j-1} al eje x_j , con respecto al eje z_j ($j=1, \dots, 12$).

Tabla 1. Parámetros de Denavit-Hartenberg modificados de las piernas del robot *Bioloid* (Fig. 2).

	α	d	θ	r
1	0	0	θ_1	0
2	-90°	0	θ_2	0
3	0	d_3	θ_3	0
4	0	d_4	θ_4	0
5	-90°	0	θ_5	r_5
6	90°	0	θ_6	r_6
7	180°	$\varepsilon_7 d_7$	θ_7	r_7
8	-90°	0	θ_8	r_8
9	-90°	0	θ_9	0
10	0	d_{10}	θ_{10}	0
11	0	d_{11}	θ_{11}	0
12	90°	0	θ_{12}	0

$$d_3=d_4=d_{10}=d_{11}=78 \text{ mm}; d_7=66 \text{ mm}; r_5=r_8=17 \text{ mm}; \\ r_6=r_7=73 \text{ mm}; \varepsilon_7=+1 \text{ con } pda; \varepsilon_7=-1 \text{ con } pia$$

Las articulaciones son actuadas por servomotores *Dynamixel AX-12*, los cuales son regulados desde el módulo de control (CM-5), a bordo del robot, basado en un micro-controlador *Atmega128*. En la parte superior del robot se dispone de una unidad sensorial, denominada AX-S1, que dota al humanoide de capacidad de percepción de su entorno. La comunicación entre el ordenador y el robot se efectúa vía puerto serie RS-232.

3. ESPECIFICACIÓN DEL MOVIMIENTO DESEADO DE LA PELVIS Y DEL PIE BASCULANTE

3.1. Fases del ciclo de marcha

El ciclo de un paso de marcha se divide en dos fases: *simple soporte* (*FSS*) y *doble soporte* (*FDS*). En la *FSS*, con un periodo T_s , un solo pie está en contacto con el piso mientras que el otro se desplaza hacia adelante; al llegar este pie al piso inicia la *FDS*, en la cual ambos pies permanecerán en contacto con el piso durante un periodo T_D . En este lapso, las cargas que transmiten las piernas a los pies son equilibradas por las cargas reactivas del piso. Al momento de despegar el pie de atrás concluye la *FDS* y también un ciclo de la marcha. Durante la *FSS* se desplaza la pelvis y el pie basculante del robot, mientras que en la *FDS* sólo se desplaza la pelvis. El periodo total de un paso es $T = T_s + T_D$.

Para definir las ubicaciones deseadas de la pelvis y del pie basculante del robot con respecto al marco del mundo (marco x_M - y_M - z_M , mostrado en la Fig. 2), se utilizan las coordenadas cartesianas de posición de los puntos O_p (de la pelvis) y O_f (del pie basculante); y para la orientación, los ángulos de Bryant λ , μ , ν . Éstos corresponden a las sucesivas rotaciones que se deben aplicar, en el orden x - y - z , a un marco cuya orientación es igual a la del marco del mundo, para obtener la orientación deseada de la pelvis (marco x_p - y_p - z_p) o del pie libre (marco x_f - y_f - z_f). Los movimientos traslacionales y rotacionales deseados de ambos cuerpos se especifican mediante las ecuaciones que definen a las coordenadas mencionadas en función del tiempo.

3.2. Movimiento de la pelvis

Se asume que el robot camina en línea recta en la dirección de x_M . Este proceso de marcha se divide en tres etapas: *etapa 1* o de *arranque*; *etapa 2* o de *velocidad constante* o de *crucero*; y *etapa 3* o de *detención*. Durante la etapa 1, la pelvis acelera desde el reposo siguiendo una ley semi-cicloidal de arranque hasta que la magnitud de su velocidad no alcance la rapidez de crucero (V_{max}); esta etapa ocurre durante el primer paso de la marcha, y su periodo es igual a T_1 ; se asume que en la postura inicial el robot tiene los pies juntos. Un paso en la etapa de velocidad constante se completa en un periodo T_2 . Finalmente, en la etapa 3 la magnitud de la velocidad de la pelvis disminuye con una ley de tipo semi-cicloidal de detención en un tiempo T_3 , correspondiente a un paso, llegando al reposo con los pies juntos.

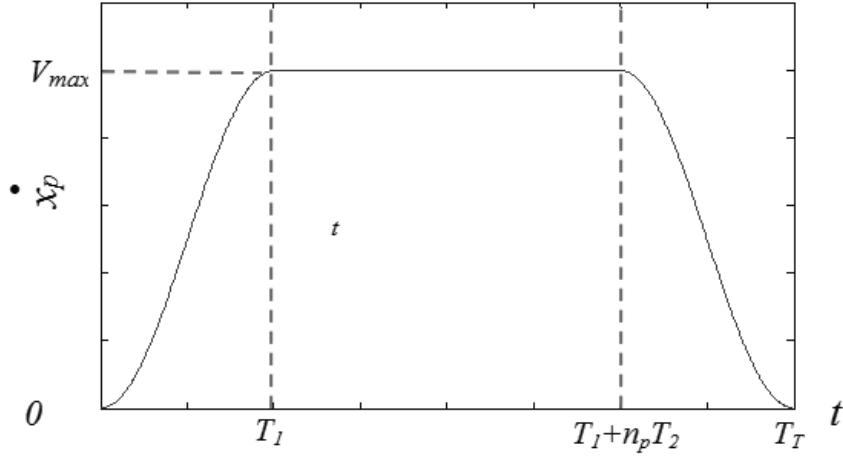


Fig. 3. Comportamiento propuesto para la velocidad de la pelvis en la dirección de x_M . Etapa 1: $0 \leq t \leq T_1$; etapa 2: $T_1 \leq t \leq (T_1 + n_p T_2)$; etapa 3: $(T_1 + n_p T_2) \leq t \leq T_T$.

En la Fig. 3 se muestra una gráfica típica del comportamiento propuesto para la velocidad de la pelvis. En un paso de cada una de las 3 etapas mencionadas se tiene una FDS y una FSS. Por lo tanto:

$$T_i = T_{Si} + T_{Di}, \quad (1)$$

donde T_i es el periodo total en un paso de la etapa i ($i=1, 2, 3$), T_{Si} es el periodo correspondiente a la FSS en la etapa i , y T_{Di} es el periodo de la FDS de la etapa i .

Teniendo en cuenta lo anterior, el robot se encontrará en la etapa 1 si $0 \leq t \leq T_1$; en la etapa 2 si $T_1 < t \leq (T_1 + n_p T_2)$; y en la etapa 3 si $(T_1 + n_p T_2) < t \leq T_T$, siendo n_p el número de pasos a velocidad constante, t el tiempo *actual* (tiempo transcurrido desde el arranque) y T_T el tiempo total de marcha ($T_T = T_1 + n_p T_2 + T_3$). Las leyes de movimiento propuestas para la pelvis están caracterizadas por las ecuaciones (2) a (7).

- Posición de la pelvis con respecto al marco x_M - y_M - z_M :

$$x_p(t) = \begin{cases} \frac{S_x}{2} \left(\frac{t}{T_1} - \frac{1}{\pi} \sin\left(\frac{\pi t}{T_1}\right) \right) & , 0 \leq t \leq T_1 \\ S_x \left(j - \frac{1}{2} + \frac{t'}{T_2} \right) & , j = 1, \dots, n_p & , 0 \leq t' \leq T_2 \\ n_p S_x + \frac{S_x}{2} \left(1 + \frac{t''}{T_3} + \frac{1}{\pi} \sin\left(\frac{\pi t''}{T_3}\right) \right) & , 0 \leq t'' \leq T_3 \end{cases} \quad (2)$$

$$y_p(t) = \begin{cases} y_{p_0} - \delta y_p \left(\frac{t}{T_1} - \frac{1}{2\pi} \sin\left(\frac{2t\pi}{T_1}\right) \right) & , 0 \leq t \leq T_1 \\ y_{c_0} + 2\delta y_p \left(\frac{t'}{T_2} - \frac{1}{4\pi} \sin\left(\frac{4t'\pi}{T_2}\right) \right) & , 0 \leq t' \leq (T_2/2) \\ y_{c_0} + 2\delta y_p \left(1 - \frac{t'}{T_2} + \frac{1}{4\pi} \sin\left(\frac{4t'\pi}{T_2}\right) \right) & , (T_2/2) \leq t' \leq T_2 \\ y_{c_0} + \delta y_p \left(\frac{t''}{T_3} - \frac{1}{2\pi} \sin\left(\frac{2t''\pi}{T_3}\right) \right) & , 0 \leq t'' \leq T_3 \end{cases} \quad (3)$$

$$z_p(t) = \begin{cases} z_{p_0} + \varepsilon_p \delta z_p \left(\frac{t}{T_1} - \frac{1}{2\pi} \sin \left(\frac{2t\pi}{T_1} \right) \right), & 0 \leq t \leq T_1 \\ z_{p_0} + 2\varepsilon_p \delta z_p \left(\frac{t'}{T_2} - \frac{1}{2\pi} \sin \left(\frac{2t'\pi}{T_2} \right) \right), & 0 \leq t' \leq T_2 \\ z_{p_0} + \varepsilon_p \delta z_p \left(\frac{t''}{T_3} - \frac{1}{2\pi} \sin \left(\frac{2t''\pi}{T_3} \right) \right), & 0 \leq t'' \leq T_3 \end{cases} \quad (4)$$

- Orientación con respecto al eje x_M (*balanceo*):

$$\lambda_p(t) = \begin{cases} \lambda_{p0} - \varepsilon_p \delta \lambda_p \left(\frac{t}{T_1} - \frac{1}{2\pi} \sin \left(\frac{2t\pi}{T_1} \right) \right), & 0 \leq t \leq T_1 \\ \lambda_{p0} + \varepsilon_p \delta \lambda_p \left\{ 1 - 2 \left(\frac{t'}{T_2} - \frac{1}{2\pi} \sin \left(\frac{2t'\pi}{T_2} \right) \right) \right\}, & 0 \leq t' \leq T_2 \\ \lambda_{p0} + \varepsilon_p \delta \lambda_p \left\{ 1 - \left(\frac{t''}{T_3} - \frac{1}{2\pi} \sin \left(\frac{2t''\pi}{T_3} \right) \right) \right\}, & 0 \leq t'' \leq T_3 \end{cases} \quad (5)$$

- Orientación con respecto al eje y_M (*cabeceo*):

$$\mu_p(t) = \begin{cases} \mu_{p0} + \varepsilon_p \delta \mu_p \left(\frac{t}{T_1} - \frac{1}{2\pi} \sin \left(\frac{2t\pi}{T_1} \right) \right), & 0 \leq t \leq T_1 \\ \mu_{p0} + \varepsilon_p \delta \mu_p \left\{ 1 + 2 \left(\frac{t'}{T_2} - \frac{1}{4\pi} \sin \left(\frac{4t'\pi}{T_2} \right) \right) \right\}, & 0 \leq t' \leq T_2 \\ \mu_{p0} - \varepsilon_p \delta \mu_p \left(\frac{t''}{T_3} - \frac{1}{2\pi} \sin \left(\frac{2t''\pi}{T_3} \right) \right), & 0 \leq t'' \leq T_3 \end{cases} \quad (6)$$

- Orientación con respecto al eje z_M (*derrape*):

$$v_p(t) = \begin{cases} v_{p0} + \varepsilon_p \delta v_p \left(\frac{t}{T_1} - \frac{1}{4\pi} \sin \left(\frac{4t\pi}{T_1} \right) \right), & 0 \leq t \leq (T_1/2) \\ v_{p0} - \varepsilon_p \left(\frac{\delta v_p}{2} \right) \left\{ 1 - 4 \left(\frac{t}{T_1} - \frac{1}{4\pi} \sin \left(\frac{4t\pi}{T_1} \right) \right) \right\}, & (T_1/2) \leq t \leq T_1 \\ v_{p0} - \varepsilon_p (\delta v_p) \left\{ 2 \left(\frac{t'}{T_2} - \frac{1}{4\pi} \sin \left(\frac{4t'\pi}{T_2} \right) \right) \right\}, & 0 \leq t' \leq (T_2/2) \end{cases} \quad (7-a)$$

$$v_p(t) = \begin{cases} v_{p0} + \varepsilon_p \delta v_p \left\{ 2 \left(1 - \frac{t'}{T_2} - \frac{1}{4\pi} \sin \left(\frac{4t'\pi}{T_2} \right) \right) \right\}, & (T_2/2) \leq t' \leq T_2 \\ v_{p0} + \varepsilon_p \delta v_p \left\{ 2 \left(\frac{t''}{T_2} - \frac{1}{4\pi} \sin \left(\frac{4t''\pi}{T_2} \right) \right) \right\}, & 0 \leq t'' \leq (T_3/2) \\ v_{p0} - \varepsilon_p \delta v_p \left(1 - \frac{t''}{T_3} - \frac{1}{4\pi} \sin \left(\frac{4t''\pi}{T_3} \right) \right), & (T_3/2) \leq t'' \leq T_3 \end{cases} \quad (7-b)$$

Si el robot camina n_p pasos a velocidad constante, entonces el número total de pasos es n_p+2 , con $n_p \in \{0, 1, \dots\}$. Si $n_p=0$, entonces $T_2=0$, y el robot sólo dará un paso para el arranque y uno para la detención.

El tiempo t' de las ecuaciones precedentes, si $n_p > 0$, se calcula a partir de t mediante:

$$t' = t - [T_1 + (j-1)T_2] \quad (8)$$

donde j es el número del paso actual a velocidad constante ($j=1, \dots, n_p$); T_1 y T_2 se definieron en párrafos anteriores.

Por otra parte, t'' está dado por:

$$t'' = t - (T_1 + n_p T_2) \quad (9)$$

En las ecuaciones (4) a (7), se define $\varepsilon_p = 1$ con *pda*, y $\varepsilon_p = -1$ con *pia*. La marcha puede iniciar con cualquiera de los dos pies, y el último paso también puede ser con cualquiera de los dos pies.

Los parámetros que intervienen en las ecuaciones (3) a (7) para definir la posición y orientación de la pelvis son: S_x , el desplazamiento de la pelvis en la dirección x_M en un paso de la etapa de velocidad constante; z_{c0} , la componente inicial de la posición en la dirección z_M ; δz_p , la magnitud del máximo desplazamiento en z_M ; $\lambda_{p0}, \mu_{p0}, v_{p0}$, los valores iniciales de los ángulos de Bryant de la orientación; y $\delta\lambda_p, \delta\mu_p, \delta v_p$, las magnitudes de los desplazamientos angulares máximos. En este trabajo se asume que la posición inicial en la dirección x_M es 0. El máximo valor (z_{p0}) de la componente z_p (4) de la posición de la pelvis está sujeta a la condición $z_{p0} < (l_t + l_f)$, donde l_t es la longitud de la tibia y l_f es la longitud del fémur. Nótese que, en función de los parámetros de Denavit-Hartenberg modificados del robot (Tabla 1), estas longitudes son: $l_t = d_3 = d_{11}$, y $l_f = d_4 = d_{10}$.

En lo que concierne a la orientación, se observa que λ_p, μ_p , y v_p están asociados a los movimientos angulares de *balanceo*, *cabeceo* y *derrape*, respectivamente, de la pelvis.

3.3. Movimiento del pie basculante

Las expresiones (10), (11) y (12) determinan, con respecto al marco $x_M-y_M-z_M$, la posición del origen O_f del marco $x_f-y_f-z_f$ (Fig. 2). Este punto se ubica en el tobillo izquierdo si el pie derecho es el de apoyo, y viceversa. La orientación del pie basculante está determinada con respecto al marco $x_M-y_M-z_M$ por las funciones (13), (14) y (15).

- Posición del pie:

$$x_f(t) = j\delta x_f + \delta x_f \left[\frac{t}{T_{Si}} - \frac{1}{2\pi} \sin\left(\frac{2t\pi}{T_{Si}}\right) \right] \quad (10)$$

$$y_f(t) = \begin{cases} \delta y_f \left(\sin(\pi x_f(t)) \right) & , 0 \leq t \leq T_1 \\ \delta y_f \left(\sin\left(\frac{\pi}{2}\left(I + \frac{x_f(t')}{S_x}\right)\right) \right) & , 0 \leq t' \leq T_2 \\ \delta y_f \left(\sin(\pi x_f(t'')) \right) & , 0 \leq t'' \leq T_3 \end{cases} \quad (11)$$

$$z_f(t) = \begin{cases} \delta z_f \left[\frac{2t}{T_{Si}} - \frac{1}{2\pi} \sin\left(\frac{4t\pi}{T_{Si}}\right) \right] & \text{si } t \leq (T_{Si}/2) \\ \delta z_f - \delta z_f \left[\frac{(2t - T_{Si})}{T_{Si}} - \frac{1}{2\pi} \sin\left(\frac{2\pi(2t - T_{Si})}{T_{Si}}\right) \right] & \text{si } t > (T_{Si}/2) \end{cases} \quad (12)$$

- Ángulo de balanceo del pie:

$$\lambda_f(t) = \begin{cases} \lambda_{f0} + \delta\lambda_f \left[\frac{2t}{T_{Si}} - \frac{1}{2\pi} \sin\left(\frac{4t\pi}{T_{Si}}\right) \right] & \text{si } t \leq (T_{Si}/2) \\ \lambda_{f0} + \delta\lambda_f \left\{ 1 - \left[\frac{(2t - T_{Si})}{T_{Si}} - \frac{1}{2\pi} \sin\left(\frac{2\pi(2t - T_{Si})}{T_{Si}}\right) \right] \right\} & \text{si } t > (T_{Si}/2) \end{cases} \quad (13)$$

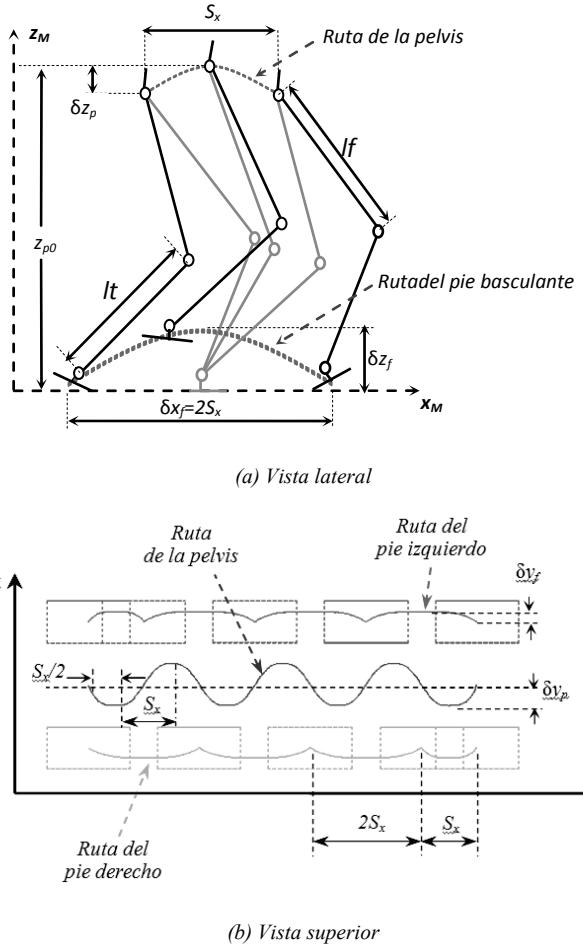


Fig. 4. Rutas y parámetros del movimiento de la pelvis y del pie basculante.

- Ángulo de cabeceo del pie:

$$\mu_f(t) = \begin{cases} \mu_{f0} + \delta\mu_f \left[\frac{2t}{T_{Si}} - \frac{1}{2\pi} \sin\left(\frac{4t\pi}{T_{Si}}\right) \right] & \text{si } t \leq (T_{Si}/2) \\ \mu_{f0} + \delta\mu_f \left\{ 1 - \left[\frac{(2t - T_{Si})}{T_{Si}} - \frac{1}{2\pi} \sin\left(\frac{2\pi(2t - T_{Si})}{T_{Si}}\right) \right] \right\} & \text{si } t > (T_{Si}/2) \end{cases} \quad (14)$$

- Ángulo de derrape del pie:

$$v_f(t) = \begin{cases} v_{f0} + \delta v_f \left[\frac{2t}{T_{Si}} - \frac{1}{2\pi} \sin\left(\frac{4t\pi}{T_{Si}}\right) \right] & \text{si } t \leq (T_{Si}/2) \\ v_{f0} + \delta v_f \left\{ 1 - \left[\frac{(2t - T_{Si})}{T_{Si}} - \frac{1}{2\pi} \sin\left(\frac{2\pi(2t - T_{Si})}{T_{Si}}\right) \right] \right\} & \text{si } t > (T_{Si}/2) \end{cases} \quad (15)$$

En la ecuación (10) δx_f es la longitud de un paso del robot ($\delta x_f = 2S_x$). Los demás términos que inician con el símbolo δ designan la amplitud de la oscilación de la variable correspondiente, de posición o de orientación. El subíndice $f0$ se aplica para designar los valores iniciales de las componentes de posición y orientación del pie basculante. En la Fig. 4 se muestra el significado físico de los parámetros de las ecuaciones de posición de la pelvis y del pie basculante.

Los valores de los parámetros del patrón de marcha definido por las ecuaciones (2) a (7) y (10) a (15), incluidos los períodos T_i ($i=1, 2, 3$) de cada etapa, son propuestos por el usuario; de ellos depende la estabilidad del robot, por lo que deben determinarse de tal manera que se obtenga un margen de estabilidad adecuado.

4. RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA INVERSO DE POSICIÓN

Las ecuaciones del modelo inverso de posición del robot *Bioloid* que se aplican en este trabajo fueron obtenidas en un trabajo previo [15]; el procedimiento completo de resolución se puede consultar en ese reporte. Aquí solamente se presenta un resumen de la formulación efectuada.

Las ecuaciones del modelo inverso de posición de la pierna de apoyo del robot se determinan para una posición y una orientación especificadas del marco de la pelvis con respecto al marco $x_M-y_M-z_M$, a través de la matriz homogénea que se expresa como:

$${}^M_pT^* = \begin{bmatrix} t_{p11} & t_{p12} & t_{p13} & x_p \\ t_{p21} & t_{p22} & t_{p23} & y_p \\ t_{p31} & t_{p32} & t_{p33} & z_p \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

El asterisco del superíndice de ${}^M_pT^*$ denota que esta matriz es conocida. Los elementos de ${}^M_pT^*$ se calculan mediante las coordenadas operacionales definidas en las ecuaciones (2) a (7). En efecto, las primeras tres filas y columnas se determinan mediante la matriz de los ángulos de Bryant, la cual se expresa como:

$${}^M_pR = \begin{bmatrix} c\mu cv & -c\mu sv & s\mu \\ s\lambda s\mu cv + c\lambda sv & -s\lambda s\mu v + c\lambda cv & -s\lambda c\mu \\ -c\lambda s\mu cv + s\lambda sv & c\lambda s\mu v + s\lambda cv & c\lambda c\mu \end{bmatrix}, \quad (17)$$

donde los ángulos λ , μ y v , correspondientes a la pelvis, están definidos por las funciones (5) a (7). A su vez, los tres elementos de la última columna de ${}^M_pT^*$ son las coordenadas cartesianas del origen del marco de la pelvis en el marco $x_M-y_M-z_M$, las cuales se especifican mediante las funciones (2) a (4).

Por otra parte, las ecuaciones del modelo inverso de posición de la pierna basculante se obtienen a partir de la matriz homogénea ${}^P_{12}T^*$ que define la posición y orientación del marco de referencia 12, unido al pie basculante, con respecto al marco de la pelvis. Esta matriz resulta del producto:

$${}^P_{12}T^* = {}^P_T^* {}^M_pT^* {}^f_{12}T^*, \quad (18)$$

donde ${}^P_T^*$ es la inversa de la matriz dada en la ecuación (16) y, como se observa en la Fig. 2, la matriz homogénea ${}^f_{12}T^*$ está dada por:

$${}^f_{12}T^* = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (19)$$

mientras que los elementos de ${}^P_T^*$ se calculan mediante las coordenadas operacionales definidas en las ecuaciones (10) a (15). La parte de orientación de esta matriz, se determina utilizando la matriz (17), con los ángulos de Bryant del pie basculante.

Así, finalmente, los elementos conocidos que resultan en la matriz ${}^P_{12}T^*$ se designan de la siguiente manera:

$${}_{12}^p T^* = \begin{bmatrix} t_{f11} & t_{f12} & t_{f13} & t_{f14} \\ t_{f21} & t_{f22} & t_{f23} & t_{f24} \\ t_{f31} & t_{f32} & t_{f33} & t_{f34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (20)$$

En consecuencia, las ecuaciones del modelo inverso de posición de las dos piernas del *Bioloid* están en función de los elementos de las matrices (16) y (20), y de los parámetros geométricos del robot dados en la Tabla 1. En seguida se listan esas ecuaciones; en ellas se tiene que $\bar{d}_7 = (d_7/2)$:

- Pierna de apoyo:

$$\begin{aligned} s_6 &= (t_{p23}r_6 - y_p)t_{p31} - (t_{p33}r_6 - z_p)t_{p21} - (t_{p21}t_{p32} - t_{p22}t_{p31} + t_{p31})\bar{d}_7 \\ c_6 &= (t_{p23}r_6 - y_p - \bar{d}_7)t_{p32} + z_p - t_{p33}r_6 \\ s_1 &= (t_{p31}c_6 - t_{p32}s_6)r_5 - t_{p32}\bar{d}_7 - t_{p33}r_6 + z_p \\ c_1 &= (t_{p21}c_6 - t_{p22}s_6)r_5 - t_{p22}\bar{d}_7 - t_{p23}r_6 + y_p + \bar{d}_7 \\ s_5 &= (t_{p21}s_1 - t_{p31}c_1)s_6 - (t_{p22}s_1 - t_{p32}c_1)c_6 \\ c_5 &= t_{p33}c_1 - t_{p23}s_1 \\ x_{14} &= (t_{p21}c_1c_6 + t_{p31}s_1c_6 - t_{p22}c_1s_6 - t_{p32}s_1s_6)r_5 - (t_{p22}c_1 + t_{p32}s_1)\bar{d}_7 + (y_p - t_{p23}r_6 + \bar{d}_7)c_1 + (z_p - t_{p33}r_6)s_1 \\ z_{14} &= (t_{p11}c_6 - t_{p12}s_6)r_5 - t_{p12}\bar{d}_7 - t_{p13}r_6 + x_p \\ r_{14} &= \sqrt{(x_{14})^2 + (z_{14})^2} \\ r_{tax} &= \frac{x_{14}}{r_{14}}\sqrt{d_3^2 - 0.25(r_{14})^2} + 0.5z_{14} \\ r_{tay} &= \frac{x_{14}}{2} - \frac{z_{14}}{r_{14}}\sqrt{d_3^2 - 0.25(r_{14})^2} \\ r_{fax} &= z_{14} - r_{tax} \\ r_{fay} &= x_{14} - r_{tay} \\ s_{\overline{234}} &= -(t_{p11}s_6 + t_{p12}c_6)c_5 - t_{p13}s_5 \\ c_{\overline{234}} &= t_{p11}c_6 - t_{p12}s_6 \\ \theta_1 &= atan2(s_1, c_1) \\ \theta_2 &= atan2(r_{tay}, r_{tax}) - 0.5\pi \\ \theta_3 &= atan2(r_{fay}, r_{fax}) - \theta_2 - 0.5\pi \\ \theta_4 &= atan2(s_{\overline{234}}, c_{\overline{234}}) - \theta_2 - \theta_3 \\ \theta_5 &= atan2(s_5, c_5) \\ \theta_6 &= atan2(s_6, c_6) \end{aligned}$$

- Pierna basculante:

$$\begin{aligned} s_7 &= t_{f23}z_f + (\bar{d}_7 + y_f)t_{f33} \\ c_7 &= t_{f33}x_f - t_{f13}z_f \\ s_8 &= z_f \end{aligned}$$

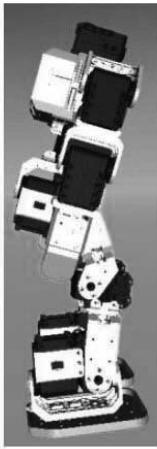
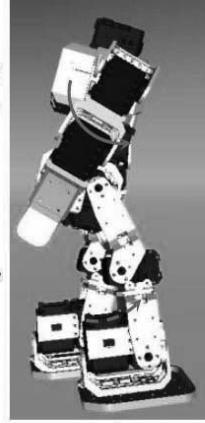
$$\begin{aligned}
c_8 &= x_f s_7 - (\bar{d}_7 - y_f) c_7 \\
x_{812} &= (x_f s_7 + (y_f - \bar{d}_7) c_7) c_8 + z_f s_8 \\
z_{812} &= (\bar{d}_7 - y_f) s_7 + x_f c_7 - r_8 \\
r_{812} &= \sqrt{(x_{812})^2 + (z_{812})^2} \\
r_{fly} &= \frac{x_{812}}{r_{812}} \sqrt{{d_{10}}^2 - 0.25(r_{812})^2} + 0.5 z_{812} \\
r_{fly} &= \frac{x_{812}}{2} - \frac{z_{812}}{r_{812}} \sqrt{{d_{10}}^2 - 0.25(r_{812})^2} \\
r_{fly} &= z_{812} - r_{fly} \\
r_{fly} &= x_{812} - r_{fly} \\
g_{11} &= t_{f13} c_7 - t_{f23} s_7 \\
s_{12} &= t_{f31} c_8 - (t_{f11} s_7 + t_{f21} c_7) s_8 \\
c_{12} &= t_{f32} c_8 - (t_{f12} s_7 + t_{f22} c_7) s_8 \\
\theta_7 &= \text{atan2}(s_7, c_7) \\
\theta_8 &= \text{atan2}(s_8, c_8) \\
\theta_9 &= \text{atan2}(r_{fly}, r_{fly}) - 0.5\pi \\
\theta_{10} &= \text{atan2}(r_{fly}, r_{fly}) - \theta_9 - 0.5\pi \\
c_{910} &= \cos(\theta_9 + \theta_{10}) \\
s_{910} &= \sin(\theta_9 + \theta_{10}) \\
h_{11} &= \sqrt{(s_{910})^2 + (c_{910})^2 - (g_{11})^2} \\
\theta_{11} &= \text{atan2}((-s_{910} g_{11} - c_{910} h_{11}), (c_{910} g_{11} - s_{910} h_{11})) \\
\theta_{12} &= \text{atan2}(s_{12}, c_{12})
\end{aligned}$$

4.1. Variables articulares asociadas al brazo del robot

La determinación del movimiento articular de los brazos no implica a la cinemática inversa, pues las ecuaciones que definen a las variables articulares que generan la oscilación de los húmeros del robot en el plano sagital se especifican directamente. Para tal efecto se utiliza la ley de movimiento de tipo cicloidal dada en la ecuación (21). En la definición de los parámetros de esta función se considera que, cuando las posiciones en x_M de ambos pies coinciden (al principio, al final, o durante el avance), los brazos deberán tener la misma inclinación del torso en el plano sagital, como se aprecia en la Fig. 5. Por otro lado, cuando la pierna derecha avanza, el brazo derecho oscila hacia atrás y el izquierdo hacia adelante; y cuando la pierna izquierda avanza, el brazo derecho gira rota hacia adelante y el izquierdo hacia atrás. Esto se ilustra en la Fig. 6.

$$\beta_j = \beta_{jini} + \varepsilon_b k \delta \beta_j \left[\frac{t^*}{T_s} - \frac{1}{2\pi} \sin \left(\frac{2t^*\pi}{T_s} \right) \right] \quad (21)$$

En la ecuación (21) se tiene que: β_j es el valor del ángulo de la articulación j en el instante t^* ; el tiempo t^* , en las diferentes etapas de la marcha se define como:

Oscilación del
brazo derechoAvance del pie
izquierdo

(a)

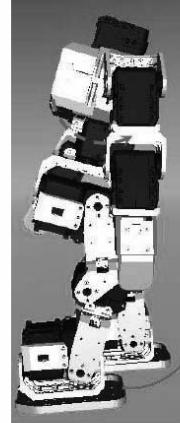
Oscilación del
brazo izquierdoAvance del pie
derecho

Fig. 5. Posición angular intermedia de los brazos.

Fig. 6. Coordinación de la oscilación de brazos y piernas.

$$t^* = \begin{cases} t & \text{en la etapa 1} \\ t' & \text{en la etapa 2} \\ t'' & \text{en la etapa 3} \end{cases}$$

además, j denota el número de articulación ($j=1$ en el húmero derecho, $j=2$ en el húmero izquierdo); β_{jini} es el ángulo inicial de la articulación j ; $\delta\beta_j$ es la amplitud de la oscilación de la articulación j a partir de β_{jini} ; T_s es el periodo de ejecución del desplazamiento angular (nótese que este periodo es igual al de la FSS del robot). $\varepsilon_b=1$ si la oscilación es hacia adelante, y $\varepsilon_b=-1$ si la oscilación es hacia atrás. El parámetro k se hace igual a 1 en el primer paso y en el último paso, durante los cuales los brazos efectúan sólo media oscilación; mientras que k se hace igual a 2 en los pasos intermedios del proceso; en este caso los brazos efectúan oscilaciones completas de amplitud igual a $2\delta\beta_j$.

5. PROGRAMACIÓN DEL ROBOT BIOLOID

5.1. Software del fabricante

En la versión del *Bioloid* estudiada en este artículo, el fabricante incluye tres paquetes de software para su programación: el *Behavior Control Program (BCP)*, el *Motion Editor (ME)* y el *Robot Terminal (RT)* [14]. El *BCP* se basa en la especificación de una serie de reglas cuya verificación depende del entorno del robot (v.g. un ruido, un obstáculo, etc., los cuales son detectados por medio del sensor AX-S1 o presionando el usuario alguno de los botones del módulo CM-5); tales reglas determinan la ejecución de una acción en el robot (caminar, detenerse, mover los brazos, etc.). Se trata de un tipo de programación básico ya que la lógica generalmente usada funciona con declaraciones del tipo *IF acción1 THEN ejecutar1, ELSE ejecutar2*; es decir, si se cumple la condición dada por una acción 1, entonces se ejecuta una operación *ejecutar1*; pero si no, entonces se ejecuta una operación *ejecutar2*. El *BCP* es un método de programación orientado más hacia el entretenimiento que hacia la investigación; no permite establecer patrones de marcha mediante ecuaciones de movimiento. Sin embargo, el *BCP* tiene la ventaja de que hace posible el uso de los sensores del AX-S1 de manera muy sencilla para que el robot tome decisiones basadas en el estado del entorno.

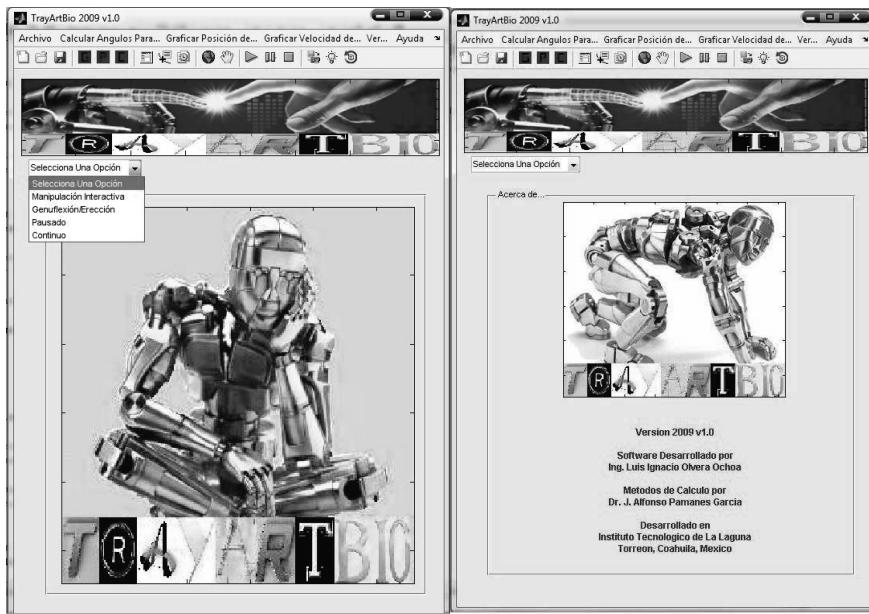


Fig. 7. Ventana principal y sección de ayuda del programa *TrayArtBio*.

El software *Motion Editor* provee una interfaz gráfica que permite al usuario editar y animar un robot *Bioloid* virtual. La edición de una rutina de movimientos del humanoide se efectúa *en línea*; es decir que, estando habilitada la comunicación robot-PC, y a partir del movimiento manual de las articulaciones, se guardan en memoria de manera interactiva una serie de poses del robot en un orden establecido por el usuario; al terminar este proceso de *enseñanza*, el usuario podrá ordenar la reproducción en el robot de los movimientos *enseñados*.

Bajo este tipo de programación, el usuario puede guardar hasta 127 rutinas con un máximo de 7 poses cada una. Estas rutinas se pueden ejecutar en secuencias programadas por el usuario. El *ME* tampoco permite especificar un patrón de marcha mediante funciones matemáticas.

De los tres programas de fábrica, el *Robot Terminal* es el que posee atributos más interesantes para propósitos científicos ya que, además de permitir la programación de los movimientos del robot, facilita el acceso al *Boot system* del micro-controlador ATMega128 para modificar, entre otras cosas, el número asignado a cada servomotor y su estado (*v.g. error, stand by, operando, etc.*); todo esto se logra mediante programación en Lenguaje C. Dada la manera en que trabaja el programa es posible enviar, a través de éste, información de posición, par, velocidad, etc. a los servomotores, incluso si se tiene esta información almacenada en forma de matrices. No obstante las interesantes características del *RT*, para la realización de los estudios reportados en este artículo se decidió desarrollar un programa con atributos más orientados a las necesidades de nuestro proyecto en el paquete *Matlab*® teniendo en cuenta las múltiples funciones que ofrecen sus librerías, y que son interesantes para propósitos de investigación. El programa desarrollado se denomina *TrayArtBio* y se presenta en la siguiente Sección.

5.2. Programa *TrayArtBio*

Se trata de un programa interactivo, cuya comunicación con el usuario se efectúa mediante una interfaz gráfica desarrollada en *Matlab*®. *TrayArtBio* significa *Trayectorias Articulares del Bioloid*, dado que su principal objetivo consiste en generar dichas trayectorias para el movimiento del humanoide. Otros objetivos consisten en establecer la comunicación usuario-robot, facilitar la planificación de los movimientos de éste, y programar su marcha. En la interfaz de usuario (Fig. 7) se despliega un menú principal (cada opción con múltiples sub-opciones), así como una barra de herramientas para el acceso rápido a los diferentes instrumentos gráficos para la especificación de parámetros y el análisis de la marcha del robot.

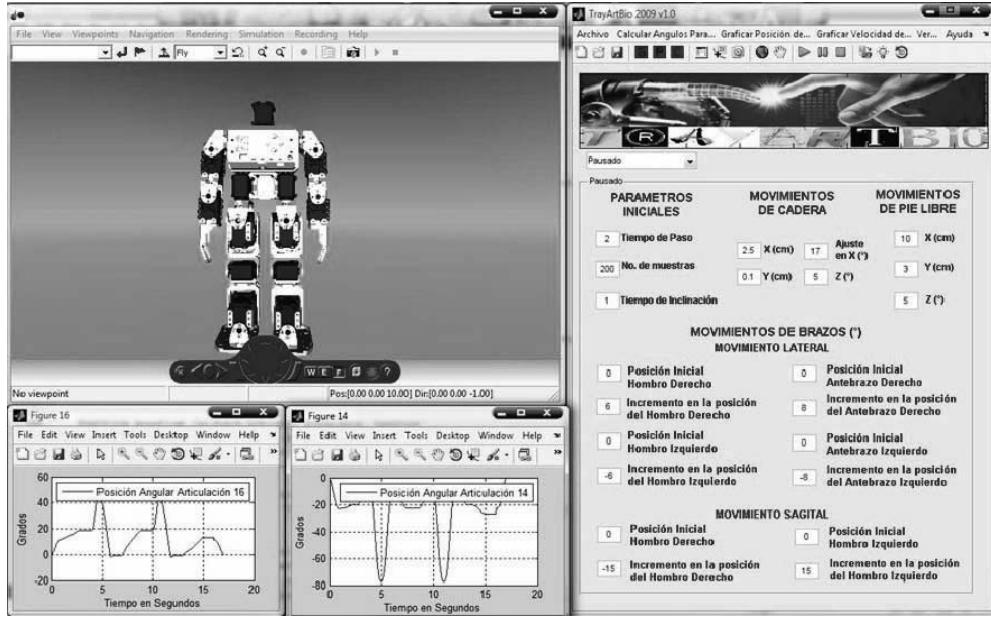


Fig. 8. Ventanas para simulación gráfica, graficación y especificación de parámetros.

Para el estudio de un patrón de marcha deseado para el robot, el usuario puede desplegar las gráficas del comportamiento de las variables articulares y de sus derivadas primera y segunda en ventanas independientes, o bien incluir todas las gráficas en una sola ventana. El programa, además, incorpora funciones para la visualización de los movimientos del robot mediante la animación de un modelo virtual de éste. El módulo que permite efectuar la animación del humanoide utiliza los archivos de datos generados previamente en el mismo programa. En la Fig. 8 se muestran diferentes ventanas que se utilizan en el proceso de programación de un movimiento deseado en el *TrayArtBio*: para la especificación de parámetros, para el despliegue de las trayectorias articulares, y para la animación del modelo virtual del robot. Después de este proceso, el usuario puede ordenar la ejecución de la marcha con el robot real.

Por otra parte, el programa *TrayArtBio* cuenta con una sección llamada *Manipulación Interactiva* desde la cual el usuario puede manejar cada una de las articulaciones del *Bioloid*, tanto del modelo virtual como del robot real (Fig. 9). En la sección de ayuda del programa se detallan las acciones que se pueden realizar desde la sección de *Manipulación Interactiva*. Se consideran dos tipos de acción: *Genuflexión/Erección* y *Marcha*.

Genuflexión/Erección. Estando el robot soportado por las dos piernas, esta opción permite plegar o desplegar las piernas manteniendo los pies en una posición fija. Esta acción está prevista para llevar al robot de la postura con la que se inicia la sesión de programación (*en cuclillas*) a la postura de inicio para la marcha (*erecto*) u otros movimientos con el robot sin caminar.

Marcha. En esta opción es posible generar las trayectorias articulares requeridas para que el robot camine sobre un plano horizontal. Se deben especificar los parámetros de las ecuaciones de movimiento, el número de pasos (n_p) y el número de muestras (n_m) de las trayectorias articulares que se utilizarán como consignas de control del humanoide al realizar el caminado. Es preciso tener presente que la amplitud de las vibraciones que se generan en el robot durante la marcha disminuye en la medida en que se aumente el número de muestras de configuraciones. Existen dos modos de marcha:

- **Modo1.** El humanoide inicia la sesión de marcha con la postura errecta (postura *de inicio*), como se aprecia en la Fig. 10-a. Antes de iniciar la marcha, el robot asume una postura *genuflexa* o *de casa* (Fig. 10-b). Enseguida comienza el proceso de caminado con los valores de los parámetros especificados previamente por el usuario. Al finalizar los n_p pasos el robot adoptará de nuevo la postura de casa, para regresar luego a la *de inicio*.

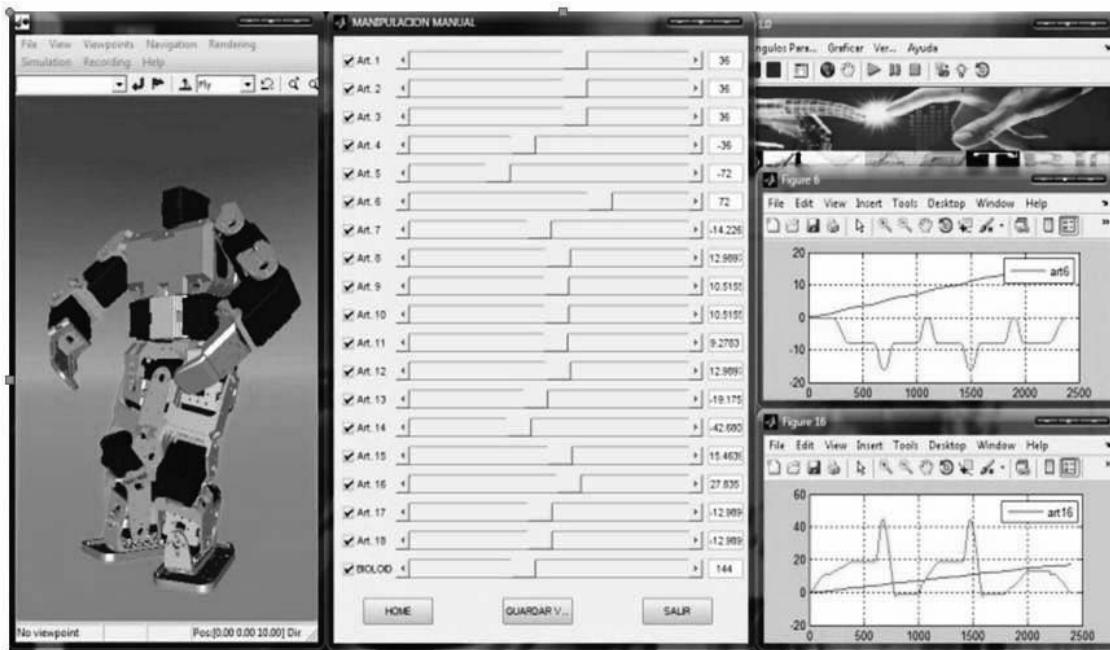


Fig. 9 Ventana para Manipulación Interactiva.

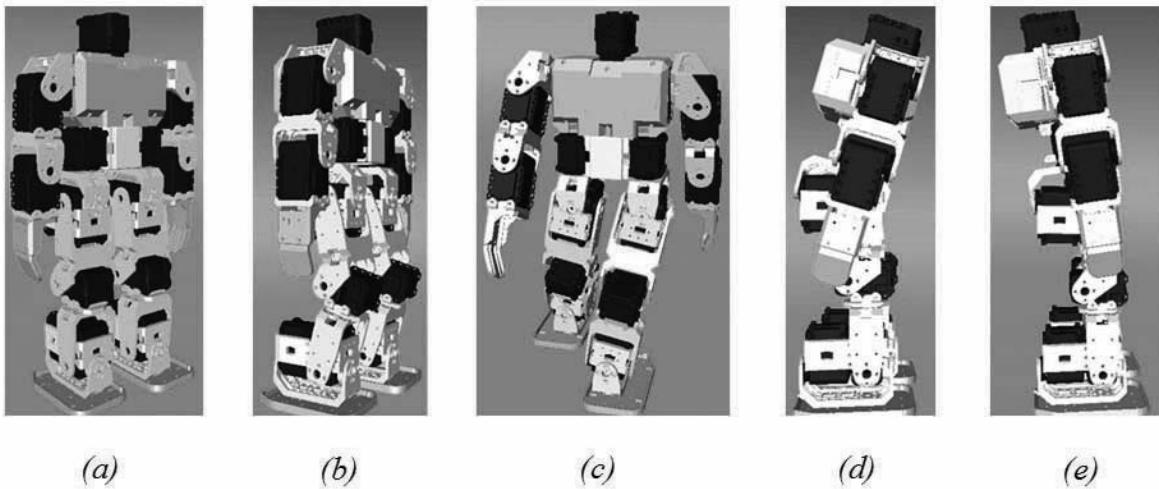


Fig. 10. Muestra de posturas del Bioloid.

- **Modo 2.** En esta opción el robot no pasa por las posturas de las figuras 10 *a* y *b*. Su postura inicial es la mostrada en la Fig. 10-*c*. Este modo de caminado está previsto para el estudio solamente del movimiento durante la marcha, mientras que el *Modo 1* permite analizar los movimientos previos a la marcha.

Para la ejecución de los movimientos en un experimento, al archivo que contiene las trayectorias articulares del robot se le debe designar la extensión *.motion*. Las consignas de movimiento a los motores los envía el ordenador desde este archivo.

6. EXPERIMENTACIÓN

Mediante el programa *TrayArtBio* se planificó una serie de experimentos del *Bioloid* a fin de efectuar un análisis preliminar de la marcha basada en leyes de tipo cicloidal, considerando solamente la cinemática del humanoide. En esta sección se describen los resultados obtenidos en tales experimentos.

Para simplificar el protocolo de comunicación entre el ordenador y el robot se utilizó el módulo de control CM-5 solamente como un *buffer* que retransmite la información del puerto serial del ordenador a los motores AX-12. Esto es posible utilizando el modo *Toss* del CM-5. La velocidad de transmisión en este modo es de 57,600 bps. El seguimiento de las trayectorias articulares en tiempo real se efectúa teniendo en cuenta las velocidades que requieren los motores para que se alcancen las posiciones de referencia en el tiempo especificado en el archivo *.motion*.

El rango de valores admisibles de las variables articulares está acotado entre -2.62 y 2.62 radianes, mientras que las velocidades articulares pueden variar entre 0 y 114 rpm (11.938 rad/seg). Tanto las variables articulares como las velocidades articulares deben ser codificadas con valores entre 0 y 1023, y obtener 2 bytes correspondientes a estos valores. Las consignas de posición y velocidad se envían vía el puerto serial del ordenador, en los instantes correspondientes, controlado desde *Matlab*©. Cada paquete de información enviado al robot contiene entonces 4 bytes con las posiciones y velocidades de los motores, y un byte más con el número de motor. Lo anterior, para los 18 motores, representa 90 bytes, a los que se añaden 8 bytes de protocolo; así, cada paquete de datos contiene 784 bits. En consecuencia, a una velocidad de 57,600 bps es posible actualizar las consignas cada 13.61 ms. Se considera una tasa máxima de transmisión de 1 paquete cada 20 ms con el fin de asegurar un manejo adecuado de los datos. En el caso de que el número de muestras y el tiempo de cada movimiento requieran de una tasa mayor de transmisión, el tiempo real de la ejecución excedería el tiempo planeado, ya que todos los puntos de las trayectorias deben ser procesados.

Después de realizar diversas pruebas preliminares para determinar empíricamente valores adecuados de los parámetros de las ecuaciones de movimiento cicloidal, se realizaron 3 experimentos de marcha de 3 pasos a velocidad constante cada uno, más un paso de arranque y otro de detención. En los dos primeros experimentos se usaron los mismos parámetros, y sólo se modificó el número de puntos-muestra, n_m , de las trayectorias articulares en un paso. En el tercer experimento se cambiaron los valores de otros dos parámetros (TDS y TSS). En todos los casos se asignó al torso una inclinación en el plano sagital (μ_p) de 17°, constante ($\delta\mu_p = 0$). En la Tabla 2 se presentan los valores no nulos de los parámetros usados en cada experimento. En las figuras 11 (vista lateral) y 12 (vista frontal) se aprecia una muestra de 18 configuraciones del robot durante la marcha en el experimento número 3. Adicionalmente se pueden consultar en Internet dos videos de los experimentos realizados; en uno de ellos se aprecia la operación del programa *TrayArtBio* [16], mientras que en el otro [17] se observa al robot caminando durante un experimento.

Tabla 2. Magnitudes no nulas de parámetros usados en los experimentos de marcha.

Parámetro	No. de experimento		
	1	2	3
n_p	5	5	5
n_m	100	200	150
T_{DS} (seg)	1	1	1
T_{SS} (seg)	3	3	2
μ_{p0} (°)	17	17	17
δy_p (cm)	1	1	1
z_{p0} (cm)	16	16	16
S_x (cm)	5	5	5
δx_f (cm)	10	10	20
δz_f (cm)	2	2	3

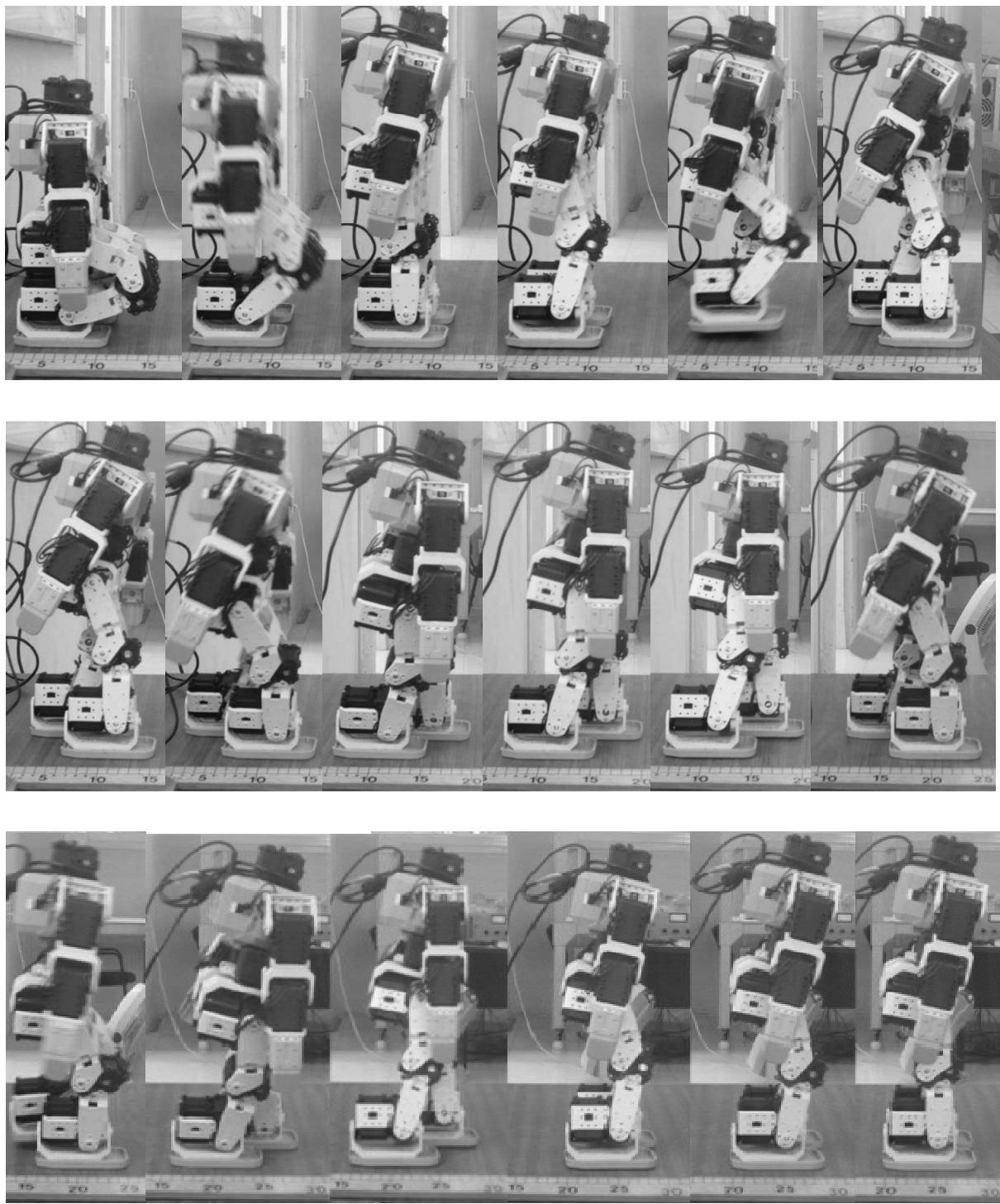


Fig. 11. Secuencia de configuraciones durante el experimento número 3. Vista Lateral.

7. CONCLUSIÓN

En este trabajo se estableció un criterio para la especificación de la marcha de un robot humanoide con movimientos generales de la pelvis y el pie basculante en el espacio 3D; el criterio se basa en desplazamientos descritos por leyes de tipo cicloidal. El patrón de marcha así definido se aplicó para establecer los

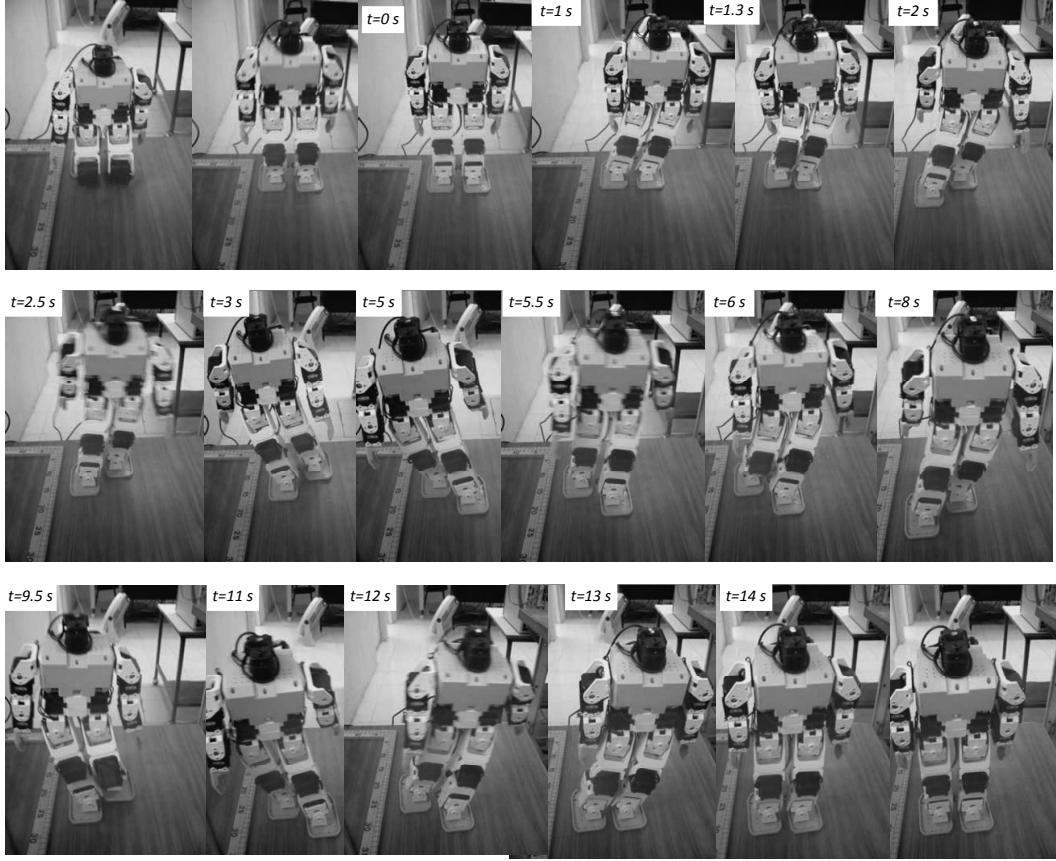


Fig. 12. Secuencia de configuraciones durante el experimento número 3. Vista Frontal.

movimientos deseados, traslacionales y rotacionales, de la pelvis y del pie basculante del robot humanoide *Bioloid*, que posee dos piernas de 6 grados de libertad cada una. Para generar las trayectorias articulares y para la programación fuera de línea de los movimientos del robot se desarrolló el software *TrayArtBio* en Matlab®. Se trata de un paquete de carácter amigable que, entre otras prestaciones, facilita al usuario la especificación de los parámetros del caminado, el análisis de las trayectorias articulares, la verificación de la factibilidad de un patrón de marcha a través de la animación de un modelo virtual, y la comunicación con el robot. En contraste con las limitaciones del software que incluye el fabricante del *Bioloid* para la programación del robot, el *TrayArtBio* permite programar trayectorias articulares específicas.

En la realización de los experimentos con el *Bioloid* se observó una marcha equilibrada del mismo, sin impactos, y con un desempeño cinetostático adecuado (alejado de configuraciones singulares). Los valores utilizados para los parámetros de las funciones cicloídales se determinaron mediante pruebas preliminares con el robot. El criterio considerado para el balanceo durante la marcha es de carácter estático debido a las bajas aceleraciones con que se desplazan los eslabones; bajo este criterio, el patrón de marcha propuesto originalmente se modificó con el fin de facilitar el equilibrio del robot. La modificación consistió básicamente en el desacoplamiento físico de los desplazamientos del robot en los planos frontal y sagital. Bajo esta consideración en cada paso el robot efectúa la trasferencia del centro de masa de un pie al otro, con lo cual se observó un incremento en la estabilidad del robot (en el sentido de la capacidad que posee localmente una configuración para admitir pequeñas perturbaciones sin perder el equilibrio) en comparación con la que se consigue con el patrón de marcha incorporado por el fabricante.

Para la obtención de las trayectorias articulares se resuelve fuera de línea el modelo inverso de posición del robot expresado de manera explícita [15], por lo que el tiempo de cómputo que se consume para este propósito no es significativo. Bajo este método se especifican todas las coordenadas operacionales que definen la posición y orientación de la pelvis y del pie basculante en el espacio.

Para la realización de un primer grupo de experimentos se utilizó el software en un ordenador con un procesador de cuarta generación, y 512 MB de memoria RAM. Aunque el programa proporcionó un desempeño aceptable en lo que se refiere al cálculo de las trayectorias articulares, su comportamiento no fue el adecuado para la animación del modelo virtual y la comunicación con el robot. En el segundo grupo de experimentos se aplicó un ordenador con un procesador *Core 2 Duo*, y 3 GB de memoria RAM; el desempeño del programa mejoró considerablemente en todos los aspectos.

En el futuro próximo se prevé incorporar al *TrayArtBio* un módulo de planificación de movimientos del *Bioloid* bajo un criterio dinámico, basado en el comportamiento del ZMP (*Zero Moment Point*), que incluya la optimización del desempeño del robot.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo fue realizado bajo los auspicios de la Dirección General de Educación Superior Tecnológica (DGEST) y el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) de México.

REFERENCIAS

- [1] Vukobratovic, M., Juricic, D., “Contribution to the Synthesis of Biped Gait”; *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, **16**(1), 1-6 (1969)
- [2] Shih, C., Zhu, Y., Gruver, W., “Optimization of the Biped Robot Trajectory”, *Proceedings of the 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 899-903 (1991)
- [3] Zhang, Y., Wang, Q., Qiang, W., Fu, P., “A New Method of Desired Gait Synthesis in Biped Robot”, *Proceedings of the 3rd World Congress on Intelligent Control and Automation*, 1300-1304 (2000)
- [4] Huang, Q., Yokoi, K., Kajita, S., Kaneko, K., Arai, H., Koyachi, N., Tanie, K., “Planning Walking Patterns for a Biped Robot”, *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, **17**(3), 280-289, (2001)
- [5] Lim, H., Takanishi, A., “Realization of Continuous Biped Walking”, *Paper IEEE 0-7803-7087-2/0*, 1630-1635 (2001)
- [6] Takanishi, A., Ishida, M., Yamazaki, Y., Kato, I., “The Realization of Dynamic Walking Robot WL-10RD”, *Proc. of the International Conference on Advanced Robotics*, 1398-1404 (1985)
- [7] Shi, C., Li, Y., Chung, S., Lee, T., Gruver, W., “Trajectory Synthesis and Physical Admissibility for a Biped Robot During the Single Support Phase”, *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1646-1652 (1990)
- [8] Dasgupta, A., Nakamura, Y., “Making Feasible Walking Motion of Humanoid Robots from Human Motion Capture Data”, *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1044-1049 (1999)
- [9] Zielinska, T., Chew, Ch., Kryczka P., Jargilo T. “Robot gait synthesis using the scheme of human motions skills development”, *Mechanism and Machine Theory*, **44**, 541-558 (2009)
- [10] Hein, D., Hild, M., Berger, R., “Evolution of biped walking using neural oscillators and physical simulation”, *RoboCup 2007: Robot Soccer World Cup XI*, Springer Berlin, Heilderberg (2008)
- [11] Eaton, M., *Evolutionary Humanoid Robotics: Past, Present and Future. 50 Years of Artificial Intelligence*, Springer Berlin, Heilderberg (2007)
- [12] Wolf, J.C., Hall, P., Robinson, P., Culverhouse, P., “Bioloid based Humanoid Soccer Robot Design”, *Proc. of the 2nd IEEE/RAS International Workshop on Humanoid Soccer Robots*, U.S.A. (2007)
- [13] Khalil, W., Kleifinger, M., “A new geometric notation for open and closed-loop robots”, *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1174-1180, San Francisco (1986)
- [14] Robotis Co. LTD; *Educational Robot Kit, Bioloid: User's Guide V1.1*, Republic of Korea (2007)
- [15] Pámanes, J.A., Arias, L.E., “Modelado Cinemático del Robot Humanoide Bioloid”, Reporte Interno de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Coahuila, Torreón, Coah, México, Octubre (2009)
- [16] Olvera, O.L., <http://www.youtube.com/watch?v=kbuFRT6SJHY>
- [17] Olvera, O.L., <http://www.youtube.com/watch?v=z18dHKwIDLc&feature=related>

3D CYCLOIDAL WALKING PATTERN FOR HUMANOIDS AND APPLICATION TO THE BIOLOID ROBOT

Abstract – A family of functions describing a 3D walking pattern for humanoid robots is proposed in this paper. Such functions define cycloidal motions of the hip and the moving foot of the robot, for both linear and rotational displacements. As result, smooth, impactless and stable walking of the robot is achieved. A small number of parameters of the proposed functions allow the user to modify the features and appearance of the walking. This approach is applied for walking of the *Bioloid* humanoid robot, with 12 dof in legs. The software named *TrayArtBio*, developed in Matlab© as a tool for motion planning and programming of the robot by using the proposed cycloidal motions, is also described. The walking of a virtual model of the *Bioloid* with the programmed motions can be observed on a PC in order to analyze the feasibility of walking. Then, a walking of the real robot can be accomplished. Results of this application show the effectiveness of the proposed pattern and the usefulness of *TrayArtBio*.

Keywords – Humanoid robot, 3D robot gait, Biped walking, Experimentation, Bioloid humanoid.