

Planificación y optimación de ciclos de marcha para un robot bípedo

R. López-García E. Rocha-Cózatl[†], O. Narváez-Aroche

[†] Facultad de Ingeniería, Depto. de Mecatrónica, UNAM. Lab. de Ing. Mecánica "Ing. Alberto Camacho Sánchez".
Cd. Universitaria, CP 04510. México, D.F., México. Tel. 56 22 80 50 y 51, ext. 118. Fax 56 22 80 50 y 51, ext. 128
e.rocha.cozatl@comunidad.unam.mx

RESUMEN

En este trabajo se presenta la planificación de la caminata estable de un robot bípedo de 12 gdl internos mediante la formulación de las trayectorias angulares que definen los movimientos de sus efectores finales durante un ciclo de marcha. Dos efectores fungen como pies y uno como cadera.

Asimismo, se describe un algoritmo genético que, basado en el criterio del ZMP, se encarga de optimizar la marcha del robot bípedo fuera de línea. Dadas las configuraciones espaciales deseadas para los pies durante la marcha, el algoritmo determina la trayectoria óptima de la cadera.

I. INTRODUCCIÓN

El propio progreso en la robótica clásica, así como la inquietud por construir mecanismos semejantes a los sistemas biológicos y los beneficios que éstos implican, han motivado la investigación en robots biológicamente inspirados. Los investigadores, persuadidos por la idea de que en un futuro los robots convivirán con humanos y, por lo tanto, deberán ser capaces de desenvolverse en los mismos entornos, han mantenido gran interés por el desarrollo de robots bípedos.

Al carecer de un eslabón fijo a tierra se espera que los robots bípedos puedan moverse de un lado a otro, subir y bajar escaleras, caminar entre obstáculos y desplazarse a través de zonas de difícil acceso, tales como terracería, arroyos, superficies agrietadas o terrenos fangosos. Si bien sus características mecánicas juegan un papel importante en su desempeño, la estabilidad de un robot bípedo durante la marcha depende de la eficiencia en el cómputo de las funciones en el tiempo que definen las posiciones angulares de sus juntas rotacionales, también conocidas como trayectorias angulares.

El ZMP (Vukobratovic & Borovac, 2005), por sus siglas en inglés *Zero Moment Point*, es un punto de referencia sobre la superficie por la cual se desplaza el bípedo. Dado que es posible asegurar la estabilidad de un robot bípedo manteniendo al ZMP dentro del polígono de soporte, este concepto es empleado en la generación y evaluación de ciclos de marcha. Cabe señalar que en el marco de los robots bípedos, el concepto de estabilidad se refiere a la capacidad del robot de mantenerse de pie, sin caerse, ya sea estática o dinámicamente. Tradicionalmente, para la

generación de ciclos de marcha dinámicamente estables, se suele trazar una trayectoria para el ZMP y definir el movimiento del robot que permite su seguimiento (Kagami & Nishiwaki, 2002). Sin embargo, existen otras alternativas. Una consiste en dividir al problema en dos etapas; en la primera etapa, síntesis de la marcha, se formulan las trayectorias angulares que definen el desplazamiento del robot durante la marcha; en la segunda, optimación de la marcha, se adaptan los parámetros que definen estas funciones para conseguir que la trayectoria del ZMP se encuentre siempre dentro del polígono de soporte del robot. Para la síntesis de la marcha es común emplear el método de planificación con parámetros (Huang *et al.*, 2001; France *et al.*, 1999), que consiste en generar trayectorias para los efectores finales del robot a partir de la definición de la longitud de paso, altura e inclinación de la cadera deseadas en un ciclo de marcha. Para la optimación de la marcha se suelen emplear técnicas de inteligencia artificial, en su mayoría, algoritmos evolutivos (Goswami, 2009). Otra técnica empleada para la generación de ciclos de marcha es el aprendizaje mediante imitación (Chalodhorn *et al.*, 2007), donde los movimientos de una persona realizados durante la marcha se adaptan y ajustan a un robot. Además, recientemente, se han popularizado los métodos biológicamente inspirados, donde se emplean redes neuronales y modelos matemáticos para simular la sincronización entre las actividades rítmicas del sistema nervioso y los movimientos rítmicos del aparato locomotor que dan origen a la marcha (Righetti & Ijspeert, 2006).

En este trabajo se optó por emplear la planificación mediante parámetros y un algoritmo genético para la síntesis y optimización de los ciclos de marcha de un robot bípedo Scout, empleando al ZMP como criterio de estabilidad dinámica.

II. EL ROBOT BÍPEDO SCOUT

Scout es un robot bípedo de 12 gdl internos desarrollado por LynxmotionTM; su altura es de 23[cm] y su peso, de 0,9[kg]. Su arquitectura le permite caminar con patrones de marcha similares a los de la locomoción humana. Está constituido por dos cadenas de seis eslabones unidas entre sí mediante un eslabón central al que, equiparando la arquitectura del robot con la anatomía del ser humano, se le denomina cadera. Sus trece eslabones se conectan en serie a través de juntas rotacionales actuadas por servomotores.

Para identificar a cada eslabón de manera inequívoca se establece la siguiente nomenclatura: La cadera se identifica con la letra B y los eslabones de las piernas con las etiquetas L_{ni} ; donde $1 \leq n \leq 6$ se encuentra determinada por su distribución en relación a la cadera, correspondiendo $n = 1$ a los eslabones unidos a ésta y $n = 6$ a los que cumplen el papel de pies. Se asigna $i = 1$ a los eslabones de la pierna izquierda e $i = 2$ a los eslabones de la pierna derecha. La rotación de los ejes de los servomotores se describe por medio de los ángulos θ_{ni} , siendo ni el subíndice del eslabón sujeto a su eje y la de su barra correspondiente en el modelo simplificado que se muestra en la figura 1.

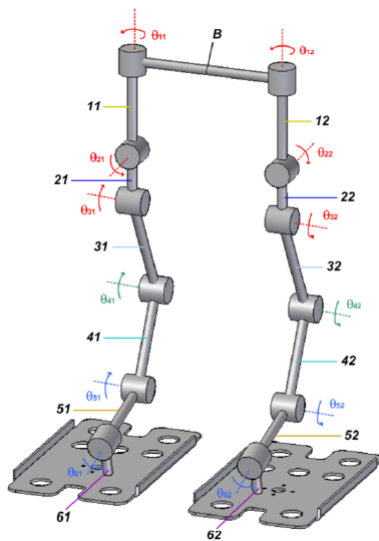


Figura 1. Modelo simplificado del robot bípodo Scout.

De este robot se han desarrollado ya los modelos de cinemática (Narváez-Aroche *et al.*(a), 2011) y dinámica espacial (Narváez-Aroche *et al.*(b), 2011). Además, se realizaron programas para el cálculo de la cinemática inversa y la simulación de ciclos de marcha. También se desarrolló una interfaz gráfica de usuario (López-García *et al.*, 2011) cuyo fin es facilitar la interacción con el robot bípodo Scout.

III. PLANIFICACIÓN DE LA CAMINATA

La marcha es el resultado de la repetición de un ciclo común en el que las extremidades inferiores ejecutan una secuencia de movimientos elementales y alternan su función entre los periodos de apoyo y oscilación. Este ciclo común consta de dos fases: la fase de soporte simple —en la que mientras un pie está en contacto con el piso (pie de soporte), el otro (pie flotante) oscila en el aire— y la fase de soporte doble, donde ambos pies están en contacto con el piso.

Desde la perspectiva de la planificación mediante parámetros, el robot bípodo Scout cuenta con tres efectores finales: los eslabones L_{61} (pie izquierdo), L_{62} (pie derecho) y L_B (cadera). Debido a que las secuencias de movimiento de los pies izquierdo y derecho son idénticas, aunque

desfasadas en el tiempo —mientras uno tiene la función de pie de apoyo, el otro funge como pie flotante— y que los parámetros que definen a sus trayectorias son constantes (longitud del paso, altura e inclinación de la cadera), se emplean las mismas funciones para definir a sus trayectorias; entonces, solamente se consideran funciones para definir el movimiento del eslabón que funge como cadera, L_B , y para el eslabón en movimiento cuya función es de pie flotante, al que se le nombra L_{pf} . En total, se emplean tres funciones escalares para definir la posición de cada eslabón, L_B y L_{pf} ; además, con el fin de incrementar la capacidad de amplitud y elevación del paso, se emplean dos funciones adicionales para cambiar la orientación de la cadera. Para simplificar el problema de la marcha, se considera que los eslabones que funcionan como pie flotante no cambian de dirección. Por lo tanto, se requieren de 8 funciones para determinar los movimientos del robot bípodo durante un ciclo de marcha: 3 para definir la posición espacial de L_B , 3 para la de L_{pf} y 2 para definir la orientación de L_B . En todos los casos, se emplea la interpolación segmentaria cúbica para definir las funciones, cuya ecuación general es

$$q(t) = q_i + \dot{q}_i t + \frac{3(q_f - q_i) - (2\dot{q}_i + \dot{q}_f)T}{T^2} t^2 + \frac{2(q_i - q_f) + (\dot{q}_i + \dot{q}_f)T}{T^3} t^3$$

Parámetros para la planificación de la caminata

Debido a que la función cúbica que define las trayectorias de los efectores finales requiere de un período, éste se propone en relación al tiempo transcurrido en un paso y a las duraciones del soporte simple y soporte doble:

T es la duración del paso, T_{ss} denota la duración del soporte simple, T_{sd} , la duración del soporte doble, y finalmente Δt es el intervalo de muestreo.

Mientras que la posición de ambos pies permanece constante durante el soporte doble, la cadera siempre está en movimiento; por lo cual, en las funciones de las trayectorias del pie flotante se emplea el período del soporte simple (T_{ss}); en cambio, las splines cúbicas que definen el movimiento de la cadera emplean el período completo de un paso (T). El término $\frac{T}{\Delta t}$ indica el número de muestras en T segundos. Para un valor pequeño del número de muestras se producen cambios bruscos en el desplazamiento del bípodo; mientras que un valor grande de $\frac{T}{\Delta t}$ produce trayectorias suaves pero que implican un mayor costo computacional.

Para definir la trayectoria del pie flotante y cadera en el plano sagital se emplean los parámetros de posición mostrados en la figura 2. Además, para la cadera se emplean parámetros de velocidad.

Como se observa en la figura 2, la descripción del movimiento del bípodo se realiza de acuerdo al sistema inercial definido por los vectores unitarios x, y, z . El vector y apunta en la dirección de avance de la caminata, los vectores yz pertenecen al plano sagital del bípodo y el vector x permite describir sus movimientos laterales.

Ecuaciones para definir las trayectorias de la cadera y del pie flotante

Para definir las configuraciones espaciales del pie flotante del bípodo con respecto al tiempo (trayectoria), se

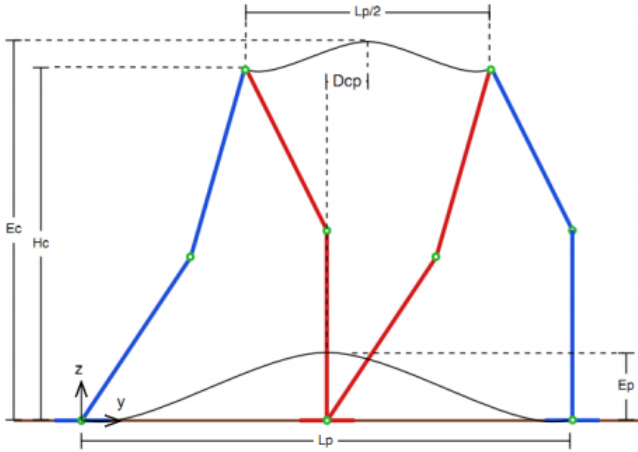


Figura 2. Parámetros para la planificación de la caminata. Vista sagital.

consideró que tanto su elevación máxima como su desplazamiento lateral distal ocurren a la mitad del periodo de soporte simple T_{ss} . Para el caso de la cadera se toma en cuenta que el inicio de su movimiento presenta un retraso correspondiente al periodo T_{sd} con respecto al del pie flotante pero que alcanza su elevación máxima en el mismo instante en que lo hace el pie flotante ($T_{ss}/2$). De acuerdo a los parámetros: F_p (desplazamiento lateral del pie flotante), P_p (posición lateral del pie), L_p (longitud del paso), E_p (elevación del paso), F_c (desplazamiento frontal de la cadera), V_{fco} (velocidad inicial y final en el desplazamiento frontal de la cadera), V_{fcm} (velocidad intermedia en el desplazamiento frontal de la cadera), D_{cp} (desplazamiento de la cadera con respecto al pie de apoyo), V_{ico} (velocidad inicial y final en el avance sagital de la cadera), V_{icm} (velocidad intermedia en el avance sagital de la cadera), H_c (altura de la cadera), E_c (elevación de la cadera), V_{ecm} (velocidad intermedia en la elevación de la cadera), ϕ_c (rotación de la cadera alrededor del eje z_B), ψ_c (rotación de la cadera sobre el eje $z_{B\phi}$); las funciones definidas por intervalos respecto al tiempo t que describen el movimiento de los efectores finales se escriben a continuación.

Funciones para el pie flotante

- Función que define el movimiento del pie flotante sobre el eje x con respecto al tiempo

$$x_{pf}(t) = \begin{cases} P_p + 12a_1t^2 + 16a_2t^3, & T_{sd} \leq t < \frac{T_{ss}}{2} \\ F_p - 12a_1t^2 - 16a_2t^3, & \frac{T_{ss}}{2} \leq t < T_{sd} + T_{ss} \end{cases}$$

$$\text{donde } a_1 = \frac{F_p - P_p}{T_{ss}^2}, \quad a_2 = \frac{P_p - F_p}{T_{ss}^3}.$$

- Función que define el movimiento del pie flotante sobre el eje y con respecto al tiempo

$$y_{pf}(t) = \begin{cases} 0, & t < T_{sd} \\ 3\frac{L_p}{T_{ss}^2}t^2 - 2\frac{L_p}{T_{ss}^3}t^3, & T_{sd} \leq t < T_{sd} + T_{ss} \\ L_p, & t \geq T_{sd} + T_{ss} \end{cases}$$

- Función que define el movimiento del pie flotante sobre el eje z con respecto al tiempo

$$z_{pf}(t) = \begin{cases} 0, & t < T_{sd} \\ 12\frac{E_p}{T_{ss}^2}t^2 - 16\frac{E_p}{T_{ss}^3}t^3, & T_{sd} \leq t < \frac{T_{ss}}{2} \\ E_p - 12\frac{E_p}{T_{ss}^2}t^2 + 16\frac{E_p}{T_{ss}^3}t^3, & \frac{T_{ss}}{2} \leq t < T_{sd} + T_{ss} \\ 0, & t \geq T_{sd} + T_{ss} \end{cases}$$

Funciones para la cadera

- Función que define el movimiento de la cadera sobre el eje x con respecto al tiempo

$$x_B(t) = \begin{cases} V_{fco}t + b_1t^2 - b_2t^3, & 0 \leq t < \frac{T}{2} \\ F_c + V_{fcm}t - b_3t^2 + b_4t^3, & \frac{T}{2} \leq t < T \end{cases}$$

$$\text{donde } b_1 = 4\frac{3F_c - (2V_{fco} + V_{fcm})T}{T^2},$$

$$b_2 = 8\frac{2F_c - (V_{fco} + V_{fcm})T}{T^3}, \quad b_3 = 4\frac{3F_c + (2V_{fcm} + V_{fco})T}{T^2},$$

$$b_4 = 8\frac{2F_c + (V_{fcm} + V_{fco})T}{T^3}.$$

- Función que define el movimiento de la cadera sobre el eje y con respecto al tiempo

$$y_B(t) = \begin{cases} D_{cp} + V_{ico}t + c_1t^2 - c_2t^3, & 0 \leq t < \frac{T}{2} \\ D_{cp} + \frac{L_p}{4} + V_{icm}t - c_3t^2 + c_4t^3, & \frac{T}{2} \leq t < T \end{cases}$$

$$\text{donde } c_1 = \frac{3L_p - 4(2V_{ico} + V_{icm})T}{T^2},$$

$$c_2 = 4\frac{L_p - 2(V_{ico} + V_{icm})T}{T^3}, \quad c_3 = \frac{3L_p + 4(2V_{icm} + V_{ico})T}{T^2},$$

$$c_4 = 4\frac{L_p + 2(V_{icm} + V_{ico})T}{T^3}.$$

- Función que define el movimiento de la cadera sobre el eje z con respecto al tiempo

$$z_B(t) = \begin{cases} H_c + V_{ecm}t + d_1t^2 - d_2t^3, & 0 \leq t < \frac{T}{2} \\ E_c + V_{ecm}t - d_1t^2 + d_2t^3, & \frac{T}{2} \leq t < T \end{cases}$$

$$\text{donde } d_1 = 6\frac{E_c - H_c}{T^2}, \quad d_2 = 8\frac{H_c - E_c}{T^3}.$$

- Función que define la rotación de la cadera alrededor del eje y con respecto al tiempo.

$$\phi_B(t) = \begin{cases} 0, & t < T_{sd} \\ e_1t^2 - e_2t^3, & \text{Si } T_{sd} \leq t < \frac{T_{ss}}{2} \\ \phi_c - e_1t^2 + e_2t^3, & \text{Si } \frac{T_{ss}}{2} \leq t < T_{sd} + T_{ss} \\ 0, & \text{Si } t \geq T_{sd} + T_{ss} \end{cases}$$

$$\text{donde } e_1 = 12\frac{\phi_c}{T_{ss}^2}, \quad e_2 = 16\frac{\phi_c}{T_{ss}^3}.$$

- Función que define la rotación de la cadera alrededor del eje z con respecto al tiempo.

$$\psi_B(t) = \begin{cases} \psi_c, & \text{Si } t < T_{sd} \\ \psi_c - f_1t^2 - f_2t^3, & \text{Si } T_{sd} \leq t < T_{sd} + T_{ss} \\ -\psi_c, & \text{Si } t \geq T_{sd} + T_{ss} \end{cases}$$

$$\text{donde } f_1 = 6\frac{\psi_c}{T_{ss}^2}, \quad f_2 = 4\frac{\psi_c}{T_{ss}^3}.$$

Cabe señalar que tanto en el inicio como en el paro de la marcha existen variaciones de las funciones presentadas. Sin embargo, por razones de espacio, en este trabajo no se incluye la planificación de estas etapas de la caminata.

IV. OPTIMIZACIÓN DE LA MARCHA

Siendo la planificación mediante parámetros el método empleado para la generación de patrones de marcha, se emplean a los algoritmos genéticos para optimizar la marcha, de manera que los parámetros que definen a las trayectorias seguidas por los efectores finales del robot, sean aquellos que aseguren la mayor estabilidad de éste durante la ejecución del ciclo de marcha. Este método parte de la propuesta mostrada en (Goswami, 2009), con la modificación de que los parámetros que definen la trayectoria del pie flotante se establecen como parámetros de entrada.

Para la optimización de la marcha, el algoritmo genético cuenta con los operadores básicos: selección, cruce y mutación (Whitley, 1994). También cuenta con una función objetivo que evalúa a cada cromosoma según una medida de la estabilidad dinámica de su marcha. La población está compuesta por cromosomas cuyos genes contienen a los parámetros de posición y velocidad que definen a la trayectoria de la cadera. Los parámetros que definen a la trayectoria del pie flotante funcionan como entradas.

Representación

Los valores de entrada al algoritmo genético son aquellos que sirven para configurar el tiempo y definir la trayectoria del pie flotante. Se usan dos parámetros para la configuración del tiempo. Uno, T , representa el tiempo que tarda el robot en dar un paso, y el otro T_{psd} representa el porcentaje de T en el que el bípodo se encuentra en la fase de soporte doble. Los parámetros para el pie flotante siguen siendo los mismos.

En este caso, los genes de los cromosomas son el subconjunto de parámetros empleados en la generación de ciclos de marcha que definen al movimiento del eslabón L_B

Generación de la población inicial

La población inicial es la principal fuente de material genético para el algoritmo, y debe contener cromosomas que estén bien dispersos en el espacio de soluciones. Las restricciones mecánicas del robot limitan los valores de los parámetros a elegir. Por lo tanto, aunque los parámetros son generados al azar, éstos se encuentran dentro de intervalos físicamente posibles.

Función objetivo

La función objetivo evalúa a cada uno de los individuos y mide la calidad de la solución que representan. Es la herramienta que permite simular el concepto de individuos mejor adaptados. Aquellos individuos cuya función de evaluación refleja un mayor nivel de adaptación, tienen más posibilidades de ser elegidos para construir a la siguiente población.

El concepto del ZMP se emplea para garantizar la estabilidad dinámica de un robot bípodo durante la marcha. Teóricamente, si el ZMP está dentro del área convexa

formada por los puntos de contacto entre el pie y el suelo, el robot puede caminar de manera estable. Sin embargo, si el ZMP se encuentra cercano a los límites del polígono de soporte, la sensibilidad del bípodo a perturbaciones es mayor. Para evitar este problema se suele recurrir a un área de seguridad (figura 3) que excluye zonas cercanas al perímetro del polígono de soporte. La estabilidad de los sistemas bípodos puede ser cuantificada por la distancia del ZMP con respecto al polígono de soporte. Entre más cercano esté el ZMP al centro del polígono de soporte, mayor es su margen de estabilidad. Por lo tanto, la función que se usa para evaluar a los individuos del algoritmo genético emplea como base a la posición del ZMP con respecto al polígono de soporte.

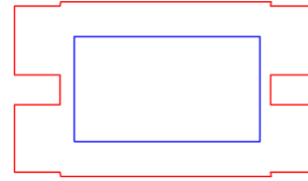


Figura 3. Polígono de soporte del bípodo (rojo) y perímetro del área de seguridad (azul).

Se propone una variable auxiliar Q como una función definida a tramos:

$$Q(t) = q_a(t) + q_b(t)$$

con

$$q_a(t) = \begin{cases} 0 & \text{Si } x_m \leq x_{zmp} \leq x_M \\ x(t)_{zmp}^2 & \text{Si } x_{zmp} < x_m \text{ o } x_{zmp} > x_M \end{cases}$$

$$q_b(t) = \begin{cases} 0 & \text{Si } y_m \leq y_{zmp} \leq y_M \\ y(t)_{zmp}^2 & \text{Si } y_{zmp} < y_m \text{ o } y_{zmp} > y_M \end{cases}$$

donde x_m , x_M denotan, respectivamente, los límites inferior y superior del área de seguridad sobre el eje x ; y_m , y_M denotan a su vez, los límites inferior y superior, respectivamente, del área de seguridad sobre el eje y .

El valor de la función no aumenta si la posición del ZMP está dentro del área de seguridad. Entre más lejos se encuentra el ZMP de dicha área, mayor es su valor.

Finalmente, la función objetivo, que proporciona el ajuste de cada cromosoma es

$$f = \frac{1}{Q(t) + 1}$$

cuyo valor máximo es 1. Entre más apto es un cromosoma, su nivel de adaptación se encuentra más cercano a 1. Los cromosomas menos aptos se encuentran más cercanos a 0.

Para el cálculo del ZMP, que requiere la función objetivo, se emplea el modelo de péndulo invertido (Kajita *et al.*, 2001), que describe de manera aproximada la dinámica del robot durante la fase de soporte simple. El modelo consiste en una partícula de masa ubicada en el centro de masa del robot y de un segmento imaginario que conecta al centro de masa del robot con un punto de contacto del robot con el suelo. Bajo este modelo se asume que la fuerza

de fricción en el suelo es lo suficientemente grande para evitar deslizamientos y que las fuerzas de reacción del suelo actúan en un solo punto dentro de la zona de contacto del pie de soporte con la superficie. Considerando este modelo, las ecuaciones que determinan la posición del ZMP son

$$x_{zmp} = \frac{z\ddot{x} - x\ddot{z}}{g} + x$$

$$y_{zmp} = \frac{y\ddot{z} - z\ddot{y}}{g} + y$$

Selección

Para el algoritmo propuesto se usa el método de selección por ruleta, donde la posibilidad que tienen los individuos de formar a las nuevas generaciones es proporcional a su nivel de adaptación (Mitchell, 1998). La función que asigna la probabilidad (en porcentaje) a cada elemento es

$$p_i = \frac{f_i}{\sum_{j=1}^n f_j} * 100$$

donde p_i es la probabilidad del elemento i , f_i el ajuste (o *fitness*) del elemento i , f_j ajuste (o *fitness*) del elemento j , n el tamaño de la población.

Reproducción

El operador de cruce o reproducción transfiere el material genético de una población a otra; parte de dos cromosomas, padres, para formar a un cromosoma, hijo.

En el algoritmo se emplea la cruce multipunto, que consiste en seccionar a dos cromosomas padres y seleccionar genes diferentes de cada uno para formar un nuevo cromosoma. Debido a que cada una de las curvas para definir la trayectoria de la cadera debe cumplir con ciertas condiciones preestablecidas y a que las características de cada curva están en función de varios parámetros (genes), la recombinación genética podría producir curvas defectuosas. Para evitar este problema, se organizan los cromosomas en grupos, donde cada uno contiene a los parámetros para definir a los polinomios de alguna curva de la cadera. Los puntos de cruce posibles son aquellos que permiten a cada grupo de genes mantenerse completo.

Mutación

El operador de mutación realiza la permutación de un bit en algún lugar aleatorio del cromosoma. Las mutaciones garantizan la variabilidad, de manera que cualquier punto en el espacio de búsqueda tiene la probabilidad de ser analizado. La probabilidad de mutación es baja. En caso de que un elemento deba ser mutado, se selecciona al azar un gen para aplicarle una permutación. Una vez seleccionado, se codifica en una cadena de bits y se selecciona a alguno de éstos para permutar su valor. Posteriormente, se decodifica y se integra al cromosoma.

V. RESULTADOS

Para la generación de ciclos de marcha dinámicamente estables, pero también para evaluar al algoritmo genético, éste se ejecuta tres veces, en las que, a excepción de la

longitud del paso, se emplean los mismos parámetros de entrada. Con el fin de comparar los resultados, el número de generaciones se fija a 15 para cada longitud de paso.

Selección de parámetros

Los parámetros a utilizar en los tres ciclos de marcha son los siguientes (cabe señalar que los parámetros de tiempo están en segundos, mientras que los de distancia, en milímetros).

Parámetros de tiempo: $T = 8$, $Tsd = 35$, $\Delta t = \frac{4}{15}$

Parámetros para el pie flotante: $E_p = 85$, $F_p = 5$, y

$$L_p = \begin{cases} 100 & \text{Patrón 1} \\ 150 & \text{Patrón 2} \\ 200 & \text{Patrón 3} \end{cases}$$

Desempeño del algoritmo

El algoritmo para la optimización de la marcha se ejecutó una vez para cada conjunto de parámetros de entrada. En cada caso se tomaron los siguientes valores:

Población = 30, Generaciones = 15, Mutación = 10 [%].

En la figura 4 se observa que, mediante los procesos de selección natural y genética natural que el algoritmo genético simula, a través del avance generacional, se obtienen cada vez individuos mejor evaluados, que representan una mejor solución al problema de estabilidad dinámica de la marcha. En resumen, en cada ejecución del algoritmo la función de costo convergió y se acercó a su valor máximo.

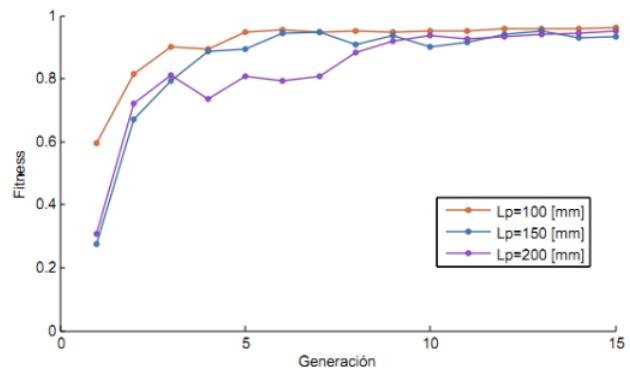


Figura 4. Evolución del algoritmo por generación para las tres pruebas.

Selección de cromosomas

Debido a que el programa para la optimación de la marcha encontró, para cada caso, más de un individuo con el máximo ajuste, se seleccionó únicamente uno para cada patrón de marcha.

Trayectorias del ZMP de los patrones optimizados

De acuerdo a las trayectorias para los eslabones L_{61} y L_{62} y a la trayectoria del eslabón L_B , es posible dibujar la trayectoria del ZMP para cada patrón de caminata. De acuerdo a los resultados del algoritmo genético, el ZMP se encuentra, siempre, durante la etapa cíclica de la marcha, dentro del área de seguridad (figura 5).

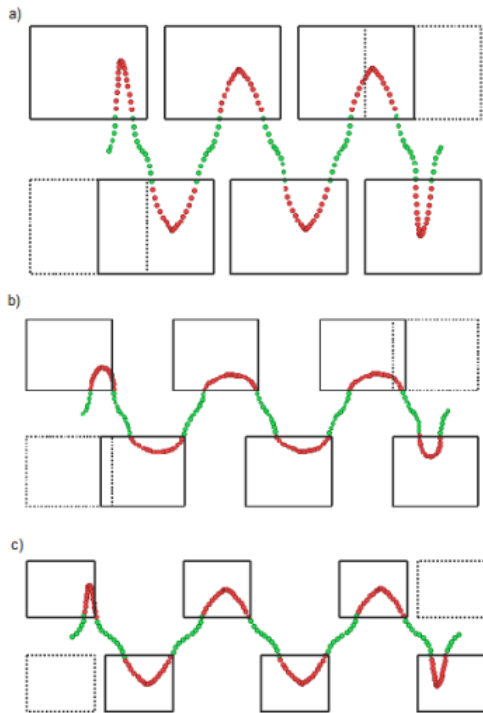


Figura 5. Trayectorias del ZMP para los patrones de caminata optimizados. En a) $L_p = 100[mm]$, b) $L_p = 150[mm]$ y c) $L_p = 200[mm]$.

Prueba con el prototipo físico

Finalmente, se logró implementar exitosamente el ciclo de marcha propuesto en el prototipo físico (figura 6). Se emplaron 120 muestras para 32 [s], la señal se actualizaba cada $\Delta t = 270 [ms]$. En estas pruebas se observaron vibraciones en la estructura y problemas de seguimiento de las trayectorias angulares por los servomotores. Durante la marcha, el robot es sensible a la orientación de la superficie de apoyo y a cualquier perturbación. Sin embargo, el prototipo físico fue capaz de desplazarse con características similares a las obtenidas en simulaciones: elevación del pie flotante, inclinación de la cadera con respecto a la superficie de desplazamiento (soporte simple) y el movimiento frontal de la cadera (soporte doble); para mayor detalle, se pueden observar los videos en (López-García, 2012).

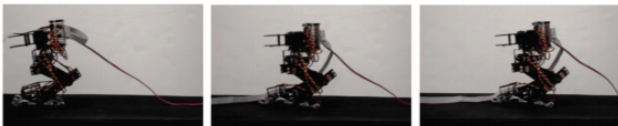


Figura 6. Funcionamiento del prototipo físico.

VI. CONCLUSIONES

Con el algoritmo propuesto se lograron producir patrones de caminata dinámicamente estables: se eligieron las trayectorias deseadas para los pies, mientras que el

algoritmo genético determinó la trayectoria óptima para la cadera. El algoritmo, en todos los casos produjo elementos con un ajuste (o *fitness*) elevado, consiguiendo ciclos de marcha cuyo ZMP se mantuvo dentro o cercano al área de seguridad. Con el ciclo de marcha optimizado, el robot camina sin caerse y levantando el pie flotante, con lo que se demostró la validez del método empleado.

En las pruebas con el prototipo físico, el patrón de marcha seleccionado se logró implementar exitosamente, aunque se presentaron algunos problemas de vibraciones en la operación de los motores durante la marcha. Al ser únicamente un patrón de caminata sin control retroalimentado, el bípodo es muy sensible a perturbaciones y cambios en el entorno. El diseño de controladores para corregir este desempeño abre una oportunidad de investigación a realizarse en el futuro.

REFERENCIAS

- R. Chalodhorn, D.B. Grimes, K. Grochow, R. P. N. Rao. Learning to walk through imitation. *Proceedings of the 20th international joint conference on Artificial intelligence, IJCAI'07*, pages 2084–2090, San Francisco, CA, USA, 2007. Morgan Kaufmann Publishers Inc.
- L. France, A. Girault, B. Espiau. Generation of walk transient trajectories for a biped robot. *International Conference on Advanced Robotics, ICAR'99*, Tokyo, Japan, October 1999.
- D. Goswami. *Biped Locomotion: Stability Analysis, Gait Generation and Control*. PhD thesis, Department of Electrical and Computer Engineering, National University of Singapore, 2009.
- Q. Huang, K. Yokoi, S. Kajita, K. Kaneko, H. Arai, N. Koyachi, K. Tanie. Planning walking patterns for a biped robot. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 17:280–289, 2001.
- S. Kagami, K. Nishiwaki. Online generation of humanoid walking motion based on a fast generation method of motion pattern that follows desired zmp. *Proceed. of the 2002 IEEE/RSJ*, pp. 2684–2689, 2002.
- S. Kajita, F. Kanehiro, K. Kaneko, K. Yokoi, H. Hirukawa. The 3d linear inverted pendulum mode: a simple modeling for a biped walking pattern generation. *Proceed. 2001 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems Expanding the Societal Role of Robotics in the the Next Millennium Cat No01CH37180*, 1(4):239–246, 2001.
- R. López-García, O. Narváez-Aroche, E. Rocha-Cózatl. Desarrollo de una interfaz gráfica de usuario para desarrollar pruebas de marcha en un robot bípodo. *Memorias del XVII Cong. Internal. Anual de la SOMIM*, San Luis Potosí, SLP, México, 21 - 23 de Sep. de 2011.
- R. López-García. *Canal de videos del robot bípodo*, 2012. <http://www.youtube.com/playlist?list=PLBDBF5CD7D5868CDD>.
- M. Mitchell. *An Introduction to Genetic Algorithms*. MIT Press, Cambridge, MA, USA, 1998.
- O. Narváez-Aroche, E. Rocha-Cózatl, F. Cuenca-Jiménez Kinematic Analysis and Computation of ZMP for a 12-Internal-DOF Biped Robot. *Memorias del 13th World Congress in Mechanism and Machine Science*, Guanajuato, Mexico, 19 - 25 de Junio de 2011.
- O. Narváez-Aroche, E. Rocha-Cózatl, F. Cuenca-Jiménez Modelo Dinámico de un Robot Bípodo de 12 gdl Internos. *Memorias del XVII Cong. Internal. Anual de la SOMIM*, San Luis Potosí, SLP, México, 21 - 23 de Sep. de 2011.
- L. Righetti, A.J. Ijspeert. Programmable central pattern generators: an application to biped locomotion control. *Proceed. of the 2006 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1585–1590, 2006.
- M. Vukobratovic, B. Borovac. Zero-moment point - thirty five years of its life. *I. J. Humanoid Robotics*, 2(2):225–227, 2005.
- D. Whitley. A genetic algorithm tutorial. *Statistics and Computing*, 4:65–85, 1994.