

Controlador de postura y marcha de un robot bípedo basado en el ZMP

Eduardo Ontiveros-García, Edmundo Rocha-Cózatl*

* *Departamento de Ingeniería Mecatrónica, Facultad de Ingeniería,
UNAM, Mexico City, Mexico (e-mail:
e.rocha.cozatl@comunidad.unam.mx)*

Resumen

En esta contribución se plantea la estabilización de la marcha y la postura de un robot bípedo de 12 GDL (grados de libertad) implementando un controlador del ZMP medido en el robot. Para ello, se toma el resultado de la planeación de trayectorias de un trabajo previo, con los cuales se obtuvieron datos experimentales que permitieron la definición de una referencia de los valores permisibles del ZMP. El controlador consiste en una serie de controles PID que generan una compensación en ángulo para ciertas articulaciones.

Keywords: Robot bípedo, Control, ZMP, controlador PID.

1. INTRODUCCIÓN

En la robótica bípeda y humanoide se busca que los robots realicen una caminata dinámicamente estable y que puedan desenvolverse en ambientes no controlados, es decir, que puedan desplazarse en cualquier terreno e interactuar con el medio. Para ello, el robot debe ser capaz de lidiar con las perturbaciones e incertidumbres del medio en el que se desempeña. Para lograrlo, se han realizado diversas investigaciones enfocadas en la implementación de controladores que establezcan la marcha basados en el criterio “Zero Moment Point” (ZMP) (Vukobratovic (1972)) y en el movimiento del centro de masa.

El criterio de estabilidad basado en el ZMP establece que si éste se mantiene dentro de una área denominada “polígono de soporte” (que se definirá más adelante), se asegura la estabilidad de la marcha. Las acciones de control se enfocan en corregir el error de posición del ZMP si éste se encuentra fuera de dicho polígono.

Por tanto, de manera implícita, un primer problema es entonces determinar la posición deseada del ZMP. En Park, J & Rhee, Y (1998) se propone una generación de trayectorias deseadas de ZMP determinadas por lógica difusa para un robot bípedo con torso de 7 GDL por medio de la reducción del movimiento del torso.

En la literatura se encuentran diferentes enfoques en el diseño de controladores con el objetivo de estabilizar la marcha, sin embargo, lo más común es realizar un control de seguimiento de trayectorias articulares dinámicamente estables de referencia que son previamente planeadas y calculadas. Por ejemplo, en (Jung-Yup Kim (2007)) se desarrolla un esquema de control dividido en tres grupos de controladores, los cuales son: el control de balance del robot en tiempo continuo (usando el criterio del ZMP), el control del patrón de marcha (orientación del centro de masa), y el control predictivo de pisada (prevención

de caída). El esquema de control completo realiza una compensación en la trayectoria calculada fuera de línea.

De igual forma, en Kagami, S. et al. (2000) se propuso un sistema de control de las dos coordenadas del ZMP (X y Y) para realizar una marcha estable del robot humanoide h5 (30 GDL en total contando 6 GDL en cada pierna) utilizando el torso para compensar los errores calculados. Dicho robot cuenta con 12 sensores de fuerza en cada planta de sus dos pies para realizar mediciones del ZMP.

Por otro lado, en Shin, H.K. & Kim, B.K. (2014) se establece un control del ZMP a través de una zona denominada AZR (Allowable ZMP región o, por su traducción, región de ZMP permisible) que, en realidad, es un área dentro del conjunto de polígonos de soporte que se generan durante la caminata. Para el análisis cinemático se considera un modelo de péndulo invertido en 3D del robot bípedo Darwin que cuenta con 20 GDL, de los cuales 12 corresponden a sus piernas. Para el diseño del ZMP de referencia se consideró el movimiento del centro de masa y se ajustó al AZR, teniendo como resultado una caminata estable con un seguimiento de un ZMP deseado y una reducción en el consumo energético de los motores.

En la presente contribución se implementan controladores PID para estabilizar la marcha de un robot bípedo de 12 GDL basados en el control del patrón de marcha de (Jung-Yup Kim (2007)): empleando las mediciones de la ubicación del ZMP (obtenidas con sensores de fuerza) se corrigen las trayectorias articulares de los eslabones del robot. La efectividad de este controlador se verifica mediante su implementación en el robot bípedo comercial Scout, presentado en la sección 2.

Debe señalarse que los controladores PID son sintonizados experimentalmente, debido principalmente a que la dinámica del robot es compleja y muy extensa, por lo que no es posible utilizar las metodologías usuales de diseño de controladores. Por eso mismo, la estabilidad obtenida no puede ser justificada o probada analíticamente.

* Este trabajo se realizó con el apoyo financiero de UNAM-DGAPA bajo el proyecto PAPIIT IN113915. “Planeación de trayectorias y control de marcha de un robot bípedo de 12 GDL”.

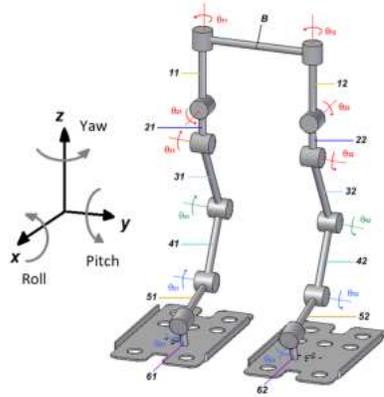


Figura 1. Convención de ángulos y eslabones del robot bípedo Scout (Narváez-Aroche (2010))

En una contribución pasada, Merino, F & Rocha, E. (2016), se propuso un controlador de la postura (orientación) de la cadera por medio de mediciones de ángulo de la misma. Junto con el controlador propuesto aquí, se robustificará la estrategia de control.

A continuación se presenta la organización de este artículo. La arquitectura del robot Scout puede verse en la Sección 2. En la Sección 3 se muestran los conceptos preliminares para el planteamiento del controlador PID. En la Sección 4 se presenta la metodología para la implementación del controlador. Los resultados obtenidos son presentados en la Sección 5. Finalmente, en la sección 6 se presentan las conclusiones y trabajo a futuro.

2. ARQUITECTURA DEL ROBOT BÍPEDO SCOUT

El robot bípedo Scout fue diseñado por Lynxmotion™, tiene 23 (cm) de alto y pesa 1.1 (kg); consta de 12 articulaciones, 6 en cada pierna. Las dos piernas están unidas por una cadera denominada eslabón central; en total el robot tiene 13 eslabones. Cada una de sus articulaciones está actuada mediante 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. Durante este trabajo se denomina a cada servomotor por los números ni , es decir 11, 12, 21, 22, etc.

En la Tabla 1 se muestra la organización articular del robot bípedo. Haciendo una comparación Humano-Robot, el robot bípedo tiene tres grupos de articulaciones, uno que conforma la cadera, otro la rodilla y otro más el tobillo.

3. ANTECEDENTES

3.1 Fases de la caminata bípeda

Un ciclo de caminata comprende cuatro fases periódicas Dekker, M.H.P. (2009), a saber:

1. Fase de Soporte Doble (SD): Se caracteriza por el contacto de ambos pies, compartiendo el peso total del cuerpo.
2. Fase de Pre-balanceo: Los dedos del pie anterior del robot tienen contacto con el suelo mientras su talón se encuentra levantado, por lo que aún se considera SD; es la etapa de transición entre soporte doble y soporte simple.
3. Fase de Soporte Simple (SS): Es el término que se utiliza cuando el robot únicamente cuenta con una superficie de apoyo en contacto con el piso. Sucede cuando el robot sólo está apoyado en un pie.
4. Fase Post-balanceo: Se diferencia por ser la etapa de aterrizaje del pie después del SS.

En la Tabla 1 se describe cómo cada servomotor participa en la estabilización de cada etapa de la marcha del robot. La nomenclatura es la siguiente: SDA - soporte doble con los pies paralelos; SSI - soporte simple con el pie izquierdo; SSD - soporte simple con el pie derecho; SDI - soporte doble con el pie izquierdo adelante; SDD - soporte doble con el pie derecho adelante.

3.2 Punto de momento cero (ZMP)

El término ZMP fue introducido en Vukobratovic (1972). Puede ser definido como en Siciliano (2008): “En la Fig. 2 se proporciona un ejemplo de la distribución de fuerzas en el área del pie. Como la carga tiene el mismo signo en toda la superficie, se puede representar por medio de una fuerza resultante R , cuyo eje de acción estará dentro del área definida por la el pie. Ese punto sobre la superficie del pie en contacto con el piso, por donde actúa la resultante R , se denota como el punto de momento cero o *zero-moment point* (ZMP) ”.

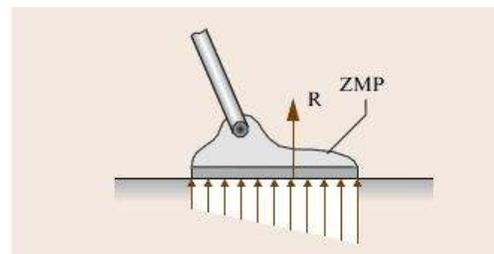


Figura 2. Definición original del ZMP, (Siciliano (2008)).

El ZMP puede ser calculado rigurosamente tomando en cuenta las masas de los eslabones, sus centros de masa, matrices de inercia y de rotación, etc., como se puede consultar también en Siciliano (2008). Sin embargo, este cálculo es costoso computacionalmente si se quisiera utilizar para un procesamiento en línea.

Sin embargo, de acuerdo con Sardain, P. et al. (2004), el ZMP puede ser asociado al centro de presión (CP) de la reacción del piso contra el pie. Por tanto, por medio de la medición de la fuerza ejercida sobre el pie se puede dar un estimado de centro de presión, y por ende, del ZMP. A este estimado le llamaremos el ZMP medido.

Para la medición del ZMP (que coincide con el centro de presión CP en caminatas estables) durante la marcha, se ha instrumentado al robot Scout con un arreglo de 8 sensores FSR Flexiforce® en cada pie. Los arreglos de sensores están dispuestos como en la Figura 3.

Tabla 1. Descripción de las articulaciones Robot Bípedo Scout
Nota: en este artículo sólo se consideran los servomotores que modifican x_{zmp} , y_{zmp}

Segmento	Servo	SDA	SSI	SSD	SDI	SDD
Cadera	11	yaw	yaw		yaw	yaw
	12	yaw		yaw	yaw	yaw
	21	roll, y_{zmp}	roll, y_{zmp}		roll, y_{zmp}	roll, y_{zmp}
	22	roll, y_{zmp}		roll, y_{zmp}	roll, y_{zmp}	roll, y_{zmp}
	31	pitch, roll, x_{zmp} , y_{zmp}	pitch, x_{zmp}		pitch, roll, x_{zmp} , y_{zmp}	pitch, roll, x_{zmp} , y_{zmp}
	32	pitch, roll, x_{zmp} , y_{zmp}		pitch, x_{zmp}	pitch, roll, x_{zmp} , y_{zmp}	pitch, roll, x_{zmp} , y_{zmp}
Rodilla	41	pitch, roll, x_{zmp} , y_{zmp}	pitch, x_{zmp}		pitch, roll, x_{zmp} , y_{zmp}	pitch, roll, x_{zmp} , y_{zmp}
	42	pitch, roll, x_{zmp} , y_{zmp}		pitch, x_{zmp}	pitch, roll, x_{zmp} , y_{zmp}	pitch, roll, x_{zmp} , y_{zmp}
Tobillo	51	pitch, roll, x_{zmp} , y_{zmp}	pitch, x_{zmp}		pitch, roll, x_{zmp} , y_{zmp}	pitch, roll, x_{zmp} , y_{zmp}
	52	pitch, roll, x_{zmp} , y_{zmp}		pitch, x_{zmp}	pitch, roll, x_{zmp} , y_{zmp}	pitch, roll, x_{zmp} , y_{zmp}
	61	roll, y_{zmp}	roll, y_{zmp}		roll, y_{zmp}	roll, y_{zmp}
	62	roll, y_{zmp}		roll, y_{zmp}	roll, y_{zmp}	roll, y_{zmp}

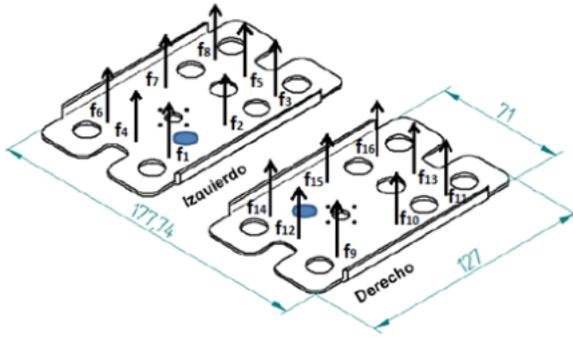


Figura 3. Ubicación de cada sensor Flexiforce® y la fuerza de reacción correspondiente.

El cálculo de la posición del ZMP se reporta en Merino, F & Rocha, E. (2016) y se hace de la siguiente manera:

$$ZMP_X = \frac{F_1 x_1 + F_2 x_2 - F_3 x_3}{F_1 + F_2 + F_3} \quad (1)$$

$$ZMP_Y = \frac{F_4 y_1 - F_5 y_2 - F_6 y_3}{F_4 + F_5 + F_6}$$

donde $x_1 = 54[mm]$, $x_2 = 20[mm]$, $x_3 = 13[mm]$, $y_1 = 13.5[mm]$, $y_2 = 7.5[mm]$, $y_3 = 28.5[mm]$.

Para el pie izquierdo:

$$F_1 = f_8 + f_5 + f_3, F_2 = f_7 + f_2, F_3 = f_6 + f_4 + f_1 \\ F_4 = f_1 + f_2 + f_3, F_5 = f_4 + f_5, F_6 = f_6 + f_7 + f_8$$

Para el pie derecho:

$$F_1 = f_{16} + f_{13} + f_{11}, F_2 = f_{15} + f_{10} \\ F_3 = f_{14} + f_{12} + f_9, F_4 = f_{14} + f_{15} + f_{16} \\ F_5 = f_{12} + f_{13} F_6 = f_9 + f_{10} + f_{11}$$

El polígono de soporte, por otro lado, se define como el área formada por el límite del conjunto mínimo convexo que contiene un número determinado de puntos de contacto con el suelo. En otras palabras, es la región definida por los límites externos de las superficies de un cuerpo que están en contacto con el piso. En el caso del robot bípedo, si éste se encuentra en SS, el polígono de soporte será la silueta del pie en el piso; si el robot está en SD, el polígono será formado por los márgenes de ambos pies (figura 4).

La importancia de ambos términos en la investigación de la locomoción bípeda radica en que tienen una estrecha relación con la estabilidad estática y dinámica de los robots

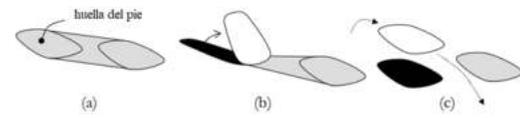


Figura 4. Polígono de soporte, (a) SD (b) SD en pre-balanceo (c) SS (Dekker, M.H.P. (2009)).

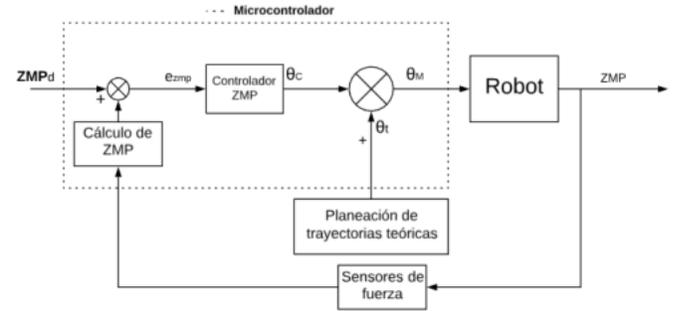


Figura 5. Esquema de control propuesto.

bípedos. De esta manera, cualquier robot logrará una marcha dinámicamente estable si el ZMP se encuentra dentro del polígono de soporte en cada momento de la caminata Dekker, M.H.P. (2009).

Con el fin de aminorar el ruido en los sensores al desarrollarse la caminata, se realizó un promedio de ocho muestras para obtener una señal del ZMP menos ruidosa sin que esto afecte en gran medida el procesamiento del controlador.

3.3 Control PID

El esquema de control es el que se muestra en la figura 5. donde ZMP denota las coordenadas x , y del ZMP real; ZMP_d indica las coordenadas del ZMP deseado; e_{ZMP} es el error en x e y entre el ZMP medido y el deseado; θ_C es el vector de ángulos de corrección de los motores del robot; θ_t representa el vector de ángulos que se obtienen previamente de una planeación de trayectorias fuera de línea, con base en el modelo cinemático del robot bípedo (esta planeación se hace para una caminata en línea recta y se reporta en Merino-Morales (2016)); θ_M es el vector de ángulos que se envían a cada uno de los servomotores.

Por lo tanto, se puede observar la estrategia de control: la medición de la ubicación del ZMP se utiliza para que una serie de controladores PID corrijan las posiciones

articulares del robot bípedo tomando como base aquellas que se obtienen de la planeación de trayectorias.

4. ESTRATEGIA DE CONTROL PROPUESTA

Como se muestra en la Fig. 5, para que el control PID actúe, es necesario obtener una comparación entre la ubicación deseada del ZMP y la ubicación medida (sensores de presión). Si existe una discrepancia entre ellas, se genera un error e_{ZMP} y, con él, un ángulo de corrección θ_C que se calcula con base en la siguiente ley de control:

$$\theta_{Cx} = K_{p_x} e_{ZMPx} \pm K_{i_x} \int_0^t e_{ZMPx} d\tau \pm K_{d_x} (\dot{e}_{ZMPx}(t))$$

$$\theta_{Cy} = K_{p_y} e_{ZMPy} \pm K_{i_y} \int_0^t e_{ZMPy} d\tau \pm K_{d_y} (\dot{e}_{ZMPy}(t))$$

donde θ_{Cx} y θ_{Cy} son los ángulos de corrección de cada servomotor con relación a las coordenadas del ZMP (x, y), respectivamente; K_{p_x} , K_{i_x} y K_{d_x} son las ganancias proporcional, integral y derivativa, en ese orden, del controlador PID relacionado con el control de la coordenada x_{zmp} , obtenidas para cada una de las fases de la caminata y para los servomotores 41, 42, 51, 52 (tabla 2); K_{p_y} , K_{i_y} y K_{d_y} son las ganancias proporcional, integral y derivativa, en ese orden, del controlador PID relacionado con el control de la coordenada y_{zmp} , obtenidas para cada una de las fases de la caminata y cada uno de los servomotores del robot; $e_{x_{zmp}}$ es el error entre el valor deseado y el medido de la coordenada x_{zmp} ; $e_{y_{zmp}}$ es el error entre el valor deseado y el medido de la coordenada y_{zmp} .

Se utiliza la misma señal de error en cada una de las articulaciones, pero no las mismas ganancias; si un servomotor no contribuye con la corrección del ZMP, las ganancias del PID asociado a él son iguales a cero.

Finalmente, la ecuación que representa a los ángulos totales de los servomotores es, de acuerdo a la Figura 5

$$\theta_M = \theta_t + \theta_C$$

Cabe señalar que las trayectorias planeadas generan en lazo abierto una caminata estable, siempre y cuando las condiciones de los experimentos sean controladas, es decir, que el piso sea un plano completamente horizontal y que el peso total del robot sea aquél para el cual se diseñaron las trayectorias.

Para implementar el control, una primer tarea que no resulta trivial es determinar la ubicación deseada del ZMP.

4.1 ZMP de referencia

Como la caminata en lazo abierto resulta estable, se tomaron mediciones del ZMP, la longitud y el ancho del paso de esas caminatas para tener una primer idea de cuál podría ser esa referencia

El primer paso para realizar esta referencia fue conocer cómo se comporta estadísticamente el ZMP del robot durante una caminata (tanto en SS como en SD), por lo que se realizó un promedio de quince muestras de caminatas (Fig. 6) y se procedió a realizar un análisis de cada una de sus fases, para representar su comportamiento por medio de un polinomio de segundo grado a través de regresiones lineales por mínimos cuadrados (Fig. 7).

En las gráficas que se obtienen de estos polinomios, se pueden apreciar algunas discontinuidades durante el cambio

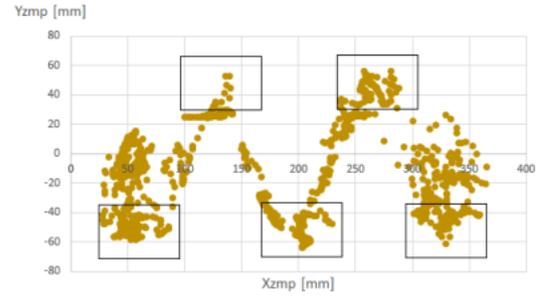


Figura 6. ZMP medido experimentalmente.

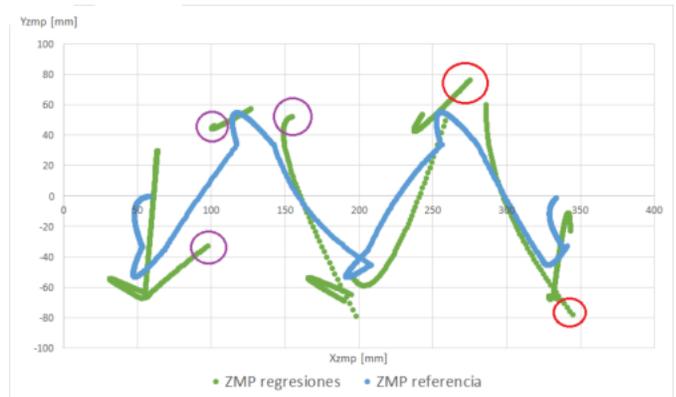


Figura 7. ZMP obtenido de regresión.

de fase, estos representan cambios bruscos en el valor de las coordenadas del ZMP (x_{zmp} , y_{zmp}).

De la trayectoria calculada del ZMP de referencia, se puede concluir que en ocasiones se acerca al borde del polígono de soporte (círculos en rojo), lo que aumenta el riesgo de una caída, también tiende a tener saltos muy grandes en los valores x e y (círculos en morado), lo cual quiere decir que si la ocupamos como referencia, el robot tendría que seguir un valor ideal que cambia bruscamente y esto significaría una perturbación innecesaria a la caminata.

Sin embargo, se está tomando como base para el diseño de la referencia del ZMP con la idea de indicarle al robot por dónde debe pasar su ZMP y asegurar su estabilidad.

Para la creación de tal referencia se tomaron en cuenta las características que se consideran adecuadas de las aproximaciones por regresión de la trayectoria y se intentaron corregir aquellas que se consideran inadecuadas.

Por ejemplo, una característica a conservar se da en las fases de SS, donde el ZMP del robot tiende a ir hacia atrás antes de dar el paso para la fase de SD. Asimismo, se realizó una corrección en los cambios bruscos disminuyéndolos y se tomaron en consideración los efectos pre-balanceo y post-balanceo, lo que producía algunos picos en la gráfica.

La propuesta final se muestra también en la Fig. 7 y fue utilizada en todas las pruebas que se realizaron.

En términos generales, el ZMP de referencia permitirá establecer un parámetro de control en cada momento de la trayectoria de manera continua, con cambios suaves y que minimiza el riesgo de caída del robot al mantenerse en zonas centrales del polígono de soporte.

Tabla 2. Ganancias de los controladores

Control en X		
Servo	Ganancias del PID	Fase
41, 42, 51, 52	$K_{px}=0.05$ $K_{ix}=0.005$ $K_{dx}=0.1$	SDA
	$K_{px}=0.01$ $K_{ix}=0.001$ $K_{dx}=0.01$	SDD
	$K_{px}=0.025$ $K_{ix}=0.001$ $K_{dx}=0.01$	SDI
41, 51	$K_{px}=0.1$ $K_{ix}=0.005$ $K_{dx}=0.01$	SSI
42, 52	$K_{px}=0.1$ $K_{ix}=0.005$ $K_{dx}=0.01$	SSD
Control en Y		
61, 62	$K_{py}=0.03$ $K_{iy}=0.0025$ $K_{dy}=0.02$	SDA
	$K_{py}=0.018$ $K_{iy}=0.00005$ $K_{dy}=0.0001$	SDD
	$K_{py}=0.036$ $K_{iy}=0.0005$ $K_{dy}=0.0001$	SDI
61	$K_{py}=0.04$ $K_{iy}=0.0002$ $K_{dy}=0.01$	SSI
62	$K_{py}=0.06$ $K_{iy}=0.0003$ $K_{dy}=0.01$	SSD
31, 32, 51, 52	$K_{py}=0.005$ $K_{iy}=0.0005$ $K_{dy}=0.02$	SDA
	$K_{py}=0.003$ $K_{iy}=0.0001$ $K_{dy}=0.0001$	SDD
	$K_{py}=0.006$ $K_{iy}=0.0001$ $K_{dy}=0.0001$	SDI
41, 42	$K_{py}=0.01$ $K_{iy}=0.001$ $K_{dy}=0.04$	SDA
	$K_{py}=0.006$ $K_{iy}=0.0002$ $K_{dy}=0.0002$	SDD
	$K_{py}=0.012$ $K_{iy}=0.0002$ $K_{dy}=0.0002$	SDI

4.2 Sintonización del PID

El algoritmo utilizado para obtener los valores PID del sistema de control de ZMP consiste en los siguientes pasos: (1) Se definieron inicialmente K_i y K_d iguales a cero; (2) Se incrementó poco a poco el valor K_p hasta que el robot oscilara; (3) Se estableció K_p aproximadamente a la mitad del valor configurado anteriormente; (4) Se aumentó K_i hasta que se tuvo una velocidad de respuesta adecuada y el error en estado permanente nulo; (5) Se incrementó K_d hasta que el robot fuera capaz de recuperarse de una perturbación brusca.

Es importante destacar que fue necesario manejar diferentes valores de ganancias en cada fase de soporte doble (SDA, SDD, SDI), debido a que el cálculo del ZMP depende de la longitud de paso (que en este caso fue de $69(mm)$). Como el cálculo del ZMP da como resultado una señal con mucho ruido, las ganancias (principalmente las derivativas) resultan en valores muy pequeños en comparación a la ganancia proporcional. En el caso de las fases SDD y SDI, se generan ganancias menores debido a que el sistema, en esas posiciones, tiende a ser un poco más estable gracias a la longitud de paso. Finalmente, en las fases de SS solamente se utilizaron tres motores en el control de las variables x_{zmp} e y_{zmp} , por lo que las ganancias son mayores que en SD. Véase la tabla 2.

5. RESULTADOS

La implementación del controlador se realizó con la tarjeta de desarrollo Tiva[®] TM4C123G LaunchPad de la empresa Texas Instruments. El ciclo de marcha se completa en 2 minutos y el tiempo de muestreo es de 100 (ms).

Se realizaron diferentes pruebas con el robot desarrollando caminatas sobre una base de madera, la cual se colocó inicialmente nivelada, pero después se modificó su pendiente para provocar un cambio en las coordenadas del ZMP y aumentando el riesgo de caída. También se hizo una prueba con el robot soportando una carga mientras realizaba el ciclo de marcha.

De cada prueba se muestran las gráficas obtenidas con las coordenadas del ZMP con control y en lazo abierto (envío

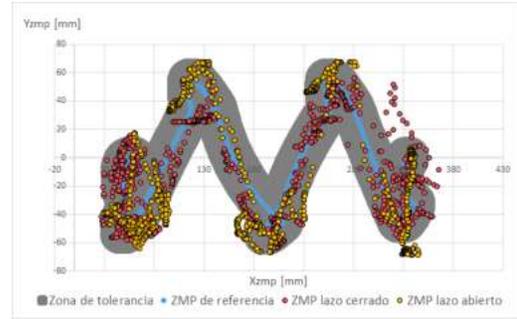


Figura 8. ZMP obtenido de caminata en piso horizontal.

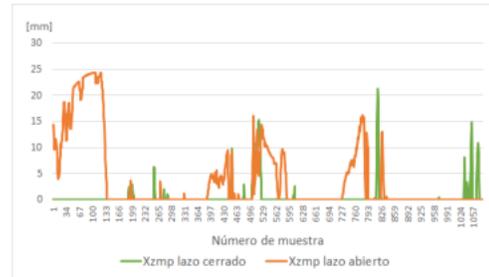


Figura 9. Errores absolutos en ZMPx vs. t; piso horizontal.

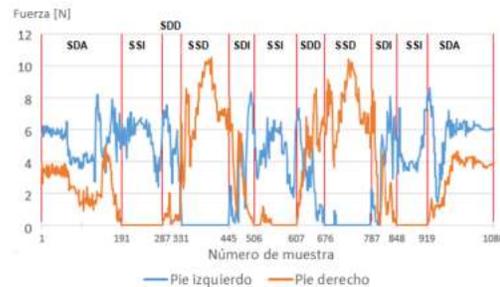


Figura 10. Fuerzas de reacción medidas en cada pie vs. t; piso horizontal.

de trayectorias teóricas). En todos los casos se presentan las coordenadas del ZMP en el plano XY. Por cuestiones de espacio en el primer caso se muestra la evolución en el tiempo de la componente x del ZMP y en el segundo caso de la componente y . Se incluye también una gráfica donde se distinguen las etapas de la caminata, la cual sirve para identificar los instantes en que conmutan los controladores PID propuestos y sus efectos en la señal de error.

5.1 Superficie horizontal

La prueba se realizó sin ningún tipo de inclinación ni perturbación (Fig. 8, 9), el valor de lazo abierto (puntos amarillos) no varía demasiado en comparación al medido en el lazo cerrado (puntos rojos), debido a que se cumplen las condiciones ideales para una marcha sin realimentación. De todas formas, el sistema realimentado presenta un menor error en comparación al lazo abierto.

En las Figs. 9 y 10 se muestra la conmutación entre los diferentes controladores PID; se disminuye el error, pero se identifican sobresaltos en esa misma señal al conmutar.

5.2 Inclinación pitch sentido negativo

El experimento se desarrolló con la plataforma inclinada seis grados en pitch y sentido negativo, esto provoca que

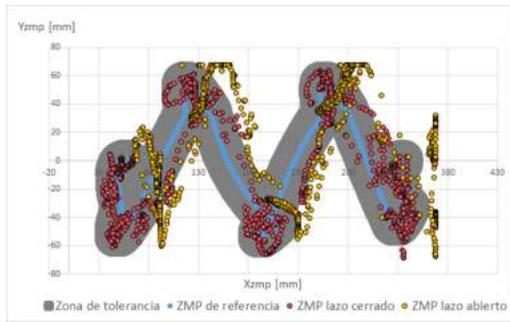


Figura 11. ZMP obtenido de una caminata con inclinación Pitch negativa.

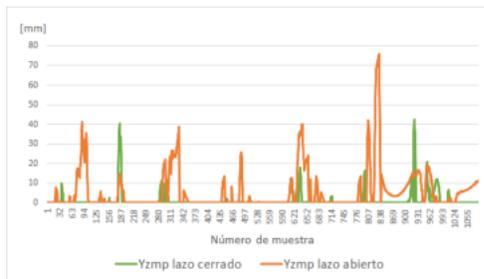


Figura 12. Errores absolutos en ZMPy vs. t con inclinación Pitch negativa.

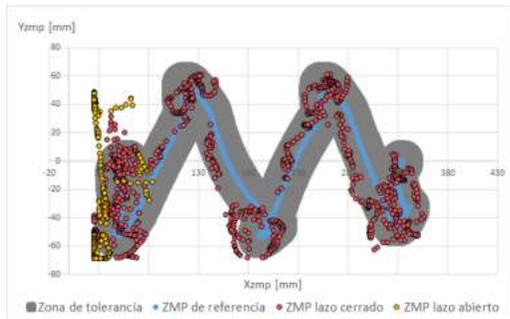


Figura 13. ZMP obtenido de una caminata en plano horizontal con peso adicional.

el robot tenga una tendencia a volcar hacia enfrente, ya que su peso se inclina en esa dirección (Fig. 11). En lazo abierto (puntos amarillos) dicha tendencia es mayor que en lazo cerrado (puntos rojos). Los resultados muestran un buen desempeño del sistema de control que mantuvo el valor del ZMP dentro del área de tolerancia.

5.3 Superficie horizontal con carga

La prueba final consistió en aumentarle una carga de acero con una masa de 150 (g) en la parte posterior lo cual produce un cambio en la coordenada x_{zmp} llevándola hacia el límite inferior de la zona de tolerancia (Fig. 13). En lazo abierto el robot no fue capaz de mantenerse en pie (puntos amarillos), mientras que en lazo cerrado logró completar un ciclo de caminata sin caer (puntos rojos), aunque tuvo mayor cantidad de puntos fuera de la zona de tolerancia.

Para mayor detalle del funcionamiento del control postural y de la marcha ante variaciones en la pendiente de la plataforma, puede consultarse el siguiente enlace:

<https://youtu.be/Cb9XwPsW5Pc>

6. CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO

La modificación de ángulos teóricos, previamente calculados en ciertas articulaciones del robot bípedo, permitió proponer y desarrollar un controlador basado en el ZMP con el cual se mantuvo una postura y marcha estable a pesar de las perturbaciones, tales como el cambio de pendiente en el suelo o la acción de fuerzas puntuales.

La trayectoria deseada del ZMP mostró ser adecuada, así como la sintonización de los controladores, aunque todavía se pueden mejorar ambas. Cabe recordar que uno de los objetivos de este trabajo es verificar que el esquema propuesto funciona. La conmutación de los controladores asociados a cada fase de la caminata produce sobresaltos en los errores de seguimiento, pero no llegan a afectar la estabilidad de la caminata. La sintonización de las ganancias, e incluso una mejor selección del controlador, es parte del trabajo a futuro.

REFERENCIAS

- Dekker, M. H. P. Zero-moment point method for stable biped walking. 2009. Eindhoven, University of Technology. Internship report, DCT no.: 2009.072 .
- Jung-Yup Kim, et.al. (2007). Walking control algorithm of biped humanoid robot on uneven and inclined floor. *J. of intelligent and Robotic Systems*.
- Kagami, S., et al. (2000). A fast generation method of a dynamically stable humanoid robot trajectory with enhanced zmp constraint. En Proc. of IEEE Int. Conference on Humanoid Robotics (Humanoid2000). 2000.
- F. Merino-Morales, E. Rocha-Cózatl, S. Hernández-Márquez. Análisis Experimental de la Marcha Bípeda Basada en el Criterio del ZMP. Memorias del Cong. Anual AMCA 2016. Qro, Méx., 28-30 de Sept., 2016.
- F. Merino-Morales, E. Rocha-Cózatl, S. Hernández-Márquez. Implementación de un Patrón de Marcha Circular en un Robot Bípedo de 12 GDL Internos. Memorias del Cong. Anual AMCA 2016. Qro, Méx., 28-30 de Sept., 2016.
- F. Merino-Morales (2016). *Planeación de Trayectorias de un robot bípedo con un modelo parametrizado carro mesa*. Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México.
- O. Narváez-Aroche. (2010). *Modelo cinemático y dinámico de un robot bípedo de doce grados de libertad internos*. Tesis de Maestría thesis, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Park, Jong H. and Rhee, Yong K. (1998) ZMP trajectory generation for reduced trunk motions of biped robots. Proceedings. 1998 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. p. 90-95.
- P. Sardain, G. Bessonnet. (2004). Forces acting on a biped robot. center of pressure-zero moment point. *Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, IEEE Transactions on*, 34(5), 630-637.
- Shin, H. K.; Kim, B. K. (2014) Energy-efficient gait planning and control for biped robots utilizing the allowable ZMP region. *IEEE Transactions on Robotics*, 2014, vol. 30, no 4, p. 986-993.
- B. Siciliano, O. Khatib (2008). *Springer Handbook of Robotics*. Springer-Verlag.
- M. Vukobratovic, J. Stepanenko. (1972). On the stability of anthropomorphic systems. *Mathematical Institute Beograd*.