

Diseño Mecánico y Análisis Cinemático del Robot Humanoide AXIS

Efraín Hernández Franco

Laboratorio de Mecatrónica y Control de Sistemas (MCS)

Universidad Panamericana

Fracc. Rústicos Calpulli, C.P. 20290, Aguascalientes, Ags., México

Teléfono: +52 (449) 9106200 ext. 7200

ehernandezf@up.edu.mx

Ramiro Velázquez Guerrero

Laboratorio de Mecatrónica y Control de Sistemas (MCS)

Universidad Panamericana

Fracc. Rústicos Calpulli, C.P. 20290, Aguascalientes, Ags., México

Teléfono: +52 (449) 9106200 ext. 7200

rvelazque@up.edu.mx

Resumen

Este artículo presenta el desarrollo y la implementación del robot humanoide AXIS: una plataforma antropomórfica bípeda basada en el modelo biomecánico humano, el cual consiste de 4 extremidades y 20 grados de libertad (GDL). AXIS está construido enteramente de aluminio por lo que es ligero y compacto además de ser fuerte y robusto. AXIS incorpora algoritmos de inteligencia artificial que le brindan un alto grado de autonomía para realizar tareas humanas simples como caminar, girar, agacharse, acostarse y levantarse. Además, AXIS es capaz de realizar seguimiento y reconocimiento de objetos usando una videocámara en su cabeza. La principal motivación detrás de este proyecto es la creación de una plataforma propia de investigación y desarrollo en robótica humanoide: desde el estudio de la marcha bípeda y movimientos que imitan la locomoción humana hasta técnicas avanzadas de control. Este artículo se concentra en el diseño mecánico y el análisis cinemático del prototipo AXIS. En particular se simulan los espacios de trabajo y se determinan los límites de movimiento de

las articulaciones con el fin de establecer un control adecuado de movimiento y evitar colisiones.

Palabras Claves: biomecánica, cinemática, espacios de trabajo, robot humanoide.

1. Introducción

Algunas iniciativas científicas ambiciosas, como la propuesta por RoboCup [1], esperan lograr para el año 2050 que los robots humanoides puedan trabajar en cooperación con los humanos, compartir ambientes de trabajo con los humanos e incluso, vencer a los humanos en juegos físicamente demandantes como el fútbol.

Para lograr estos objetivos, los robots humanoides deberán estar dotados con inteligencia y un alto nivel de autonomía basada en la fusión de múltiples sensores. Recientemente, muchos tipos de robots humanoides sofisticados han sido desarrollados, tales como ASIMO [2], HUBO [3], HRP [4] y LOLA [5], impulsando diversas investigaciones sobre la planificación de movimientos que han dado resultados extraordinarios y avances notables en la robótica. Por otra parte, algunos ejemplos representativos de robots humanoides de alta tecnología que persiguen los objetivos de la RoboCup son DARwIn-OP [6] y NAO [7].

Una de las principales preocupaciones de las plataformas robóticas humanoides es la seguridad, ya que los robots humanoides desarrollan una gran fuerza y son requeridos generalmente para manipular objetos y moverse en un espacio de trabajo limitado. Este problema puede ser más fácilmente entendido si consideramos que un robot humanoide puede dañar a sus vecinos cuando se comparten espacios de trabajo pequeños. Para ser considerados seguros y ser aceptados en la sociedad, los esfuerzos deben estar dirigidos a reducir al mínimo la potencia desarrollada por los robots humanoides.

Grandes esfuerzos se están realizando para lograr este objetivo. Desafortunadamente estos esfuerzos aún son insuficientes y tecnologías más sofisticadas son necesarias, tales como el monitoreo ambiental en tiempo real y un control seguro para los brazos y las piernas [8]. "Un robot humanoide en cada hogar" que cumpla al menos uno de todos los propósitos de la RoboCup es un objetivo complejo y retador que parece ahora un sueño utópico de alcanzar.

Para abordar el tema de la seguridad en los robots humanoides proponemos en este artículo el análisis cinemático y la simulación del espacio de trabajo de nuestro propio robot humanoide AXIS (Fig. 1), una versión mejorada de nuestro anterior robot humanoide ZERO [9]. Este estudio es útil para predecir los límites de movimiento de un robot humanoide en el desempeño de una tarea y para la prevención de colisiones con el ambiente y el propio robot.

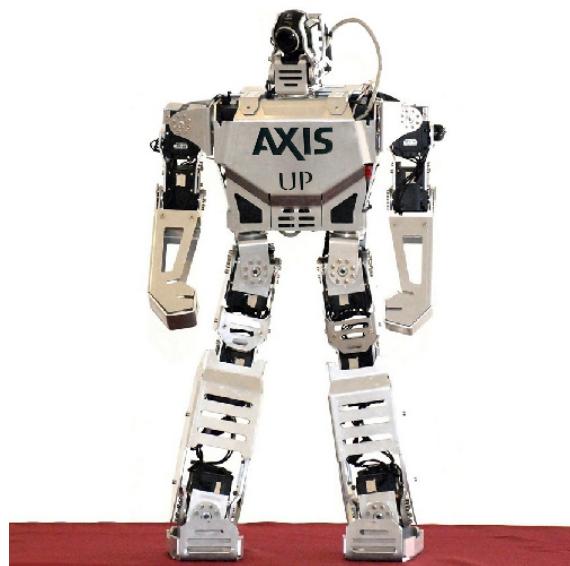


Fig. 1. Robot humanoide AXIS.

AXIS ofrece 20 GDL que le permiten realizar movimientos humanos simples tales como caminar, girar, agacharse, acostarse, levantarse, seguimiento de objetos, etc. Su estructura está compuesta básicamente de eslabones de aluminio y servomotores de gran torque y alta precisión que accionan las articulaciones. A bordo contiene una videocámara, una unidad de procesamiento y una serie de sensores que permiten el desarrollo de estrategias de control para el equilibrio y la marcha bípeda.

Este artículo aborda la mecánica y la cinemática de AXIS. La siguiente sección describe el desarrollo y la implementación del hardware, posteriormente se presenta un análisis cinemático completo del robot humanoide AXIS. Por último, los resultados muestran las

simulaciones de los espacios de trabajo del robot y las conclusiones resumen los principales aportes y las perspectivas de trabajo futuro.

2. Desarrollo del hardware

2.1. Diseño mecánico

El diseño de un robot humanoide requiere un equilibrio preciso entre las dimensiones físicas de los eslabones, el par motor de las articulaciones y la fuente de alimentación. Estos tres elementos están conectados entre sí ya que los eslabones más pesados requieren motores más fuertes y aumentan el consumo de energía. El equilibrio perfecto requiere una gran cantidad de ajustes y experimentación. Por lo tanto, AXIS fue cuidadosamente diseñado para ser ligero, robusto, y de gran rendimiento. AXIS es una plataforma robótica humanoide basada en el modelo biomecánico humano mostrado en la Fig. 2(a), con una estructura antropomórfica que contiene una cabeza, un torso, dos brazos y dos piernas. Su diseño general se muestra en la Fig. 2(b).

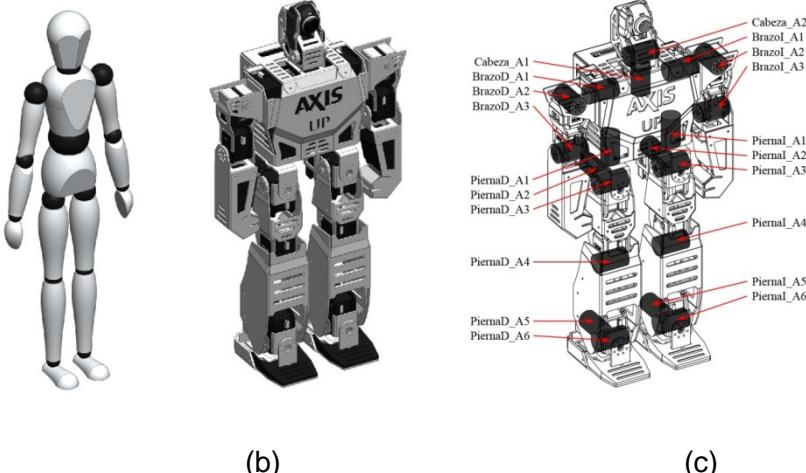


Fig. 2. Robot humanoide AXIS: (a) Diseño basado en el modelo biomecánico humano,

(b) representación conceptual y (c) estructura cinemática.

Los eslabones de la estructura mecánica de AXIS están hechos a partir de dos tipos de aleaciones de aluminio: 3105-H22 y 3003-H23. La primera de ellas es maleable y se utiliza para los eslabones más complejos que contienen dobleces. La segunda es rígida y se utiliza para los eslabones simples. Los eslabones de aluminio H22 fueron cortados con láser con una precisión de $\pm 2 \mu\text{m}$, doblados con prensa hidráulica y unidos por soldadura de arco de gas tungsteno. Los eslabones de aluminio H23 se maquinaron con una fresadora de control numérico de tres ejes.

Los actuadores que accionan las articulaciones de AXIS son servomotores de tipo RX-28 y RX-64 de Dynamixel [10]. Los servomotores RX-28 son utilizados para la cabeza y para las extremidades superiores mientras que los RX-64 se utilizan para las extremidades inferiores.

Finalmente, la fuente de energía requerida para mantener la autonomía de AXIS por 20 min moviendo todos los actuadores a máximo torque, se obtiene a partir de dos paquetes de baterías recargables colocadas en el interior de sus brazos.

2.2. Estructura cinemática

AXIS exhibe 20 GDL impulsados por un total de 20 actuadores que accionan las articulaciones. La cabeza consiste de una estructura de paneo-inclinación unida en su cuello formando una articulación de 2 GDL. Las piernas añaden 12 GDL en total, 6 GDL cada una: tres en el nivel superior a la altura de la cintura que permiten la rotación completa de toda la pierna: balanceo (roll), cabeceo (pitch) y giro (yaw), uno en la rodilla, y dos en el tobillo. Adicionalmente, los brazos añaden 6 GDL en total, 3 GDL cada uno: dos al nivel del hombro que permiten las rotaciones de roll y pitch y uno en el codo. Finalmente, la cabeza, los brazos y las piernas están montados sobre un torso. La estructura cinemática de AXIS se detalla en la Fig. 2(c).

2.3. Implementación del hardware

La Fig. 3 muestra el diagrama de bloques de las conexiones de AXIS. La estructura principal consiste de cuatro tipos de bloques conectados entre sí mediante líneas eléctricas y de datos. Estos bloques representan componentes, sensores y los actuadores superiores e inferiores que forman juntos el hardware del robot.

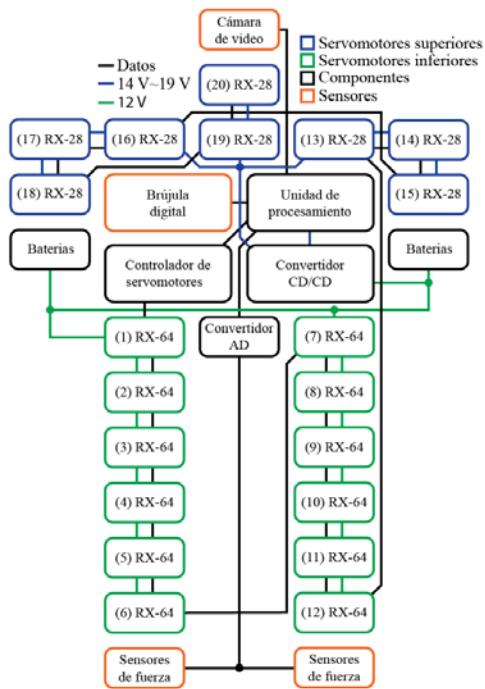


Fig. 3. Diagrama de conexiones del robot humanoide AXIS.

En la parte superior hay ocho servomotores RX-28 (bloques azules), tres por cada brazo (3 GDL) y dos para la cabeza (2 GDL) mientras que en la parte inferior hay 12 servomotores RX-64 (bloques verdes): seis por cada pierna (6 GDL). Dado que los actuadores en el lado inferior requieren un torque más alto debido al peso que tienen que mover, se necesita suministrar una tensión de voltaje más alta (línea verde), mientras que en el lado superior, el torque es mínimo y un voltaje más bajo (línea azul) puede ser suministrado.

Tres tipos de sensores (bloques naranja) son utilizados para obtener información del mundo exterior: una cámara de video colocada en la estructura de paneo-inclinación de la cabeza que permite el seguimiento de objetos, una brújula digital situada en el interior del pecho que incluye sensores magnéticos y acelerómetros que permiten al robot saber si está acostado boca arriba o boca abajo y finalmente, sensores de fuerza colocados en las plantas de los pies utilizados para mantener el equilibrio del robot que envían señales analógicas al convertidor (línea negra). Posteriormente la información digital es enviada a la unidad de procesamiento que se encuentra en el interior del torso de AXIS, dicha unidad es utilizada principalmente para el control de los servomotores y el procesamiento de imágenes.

De la misma manera, las instrucciones para los actuadores se envían por el controlador de servomotores a través de la unidad de procesamiento. Los datos se envían por conexión serial (línea negra) a través de los 20 servomotores, incluso si algunos a la mitad de la cadena no están obligados a moverse. Por último, la fuente de alimentación eléctrica del robot se toma de las baterías colocadas en el interior de los brazos (línea verde). Las especificaciones generales del robot se muestran en la Tabla 1.

Categoría	Descripción	Datos
Dimensiones	Altura	57 cm
	Peso	5 Kg
Grados de libertad	Cabeza	2 GDL
	Brazo	2 x 3 GDL
	Pierna	2 x 6 GDL
Unidad de procesamiento	CPU	Intel Core i7 @ 1.7 GHz
	RAM	6 GB DDR3
	Disco	30 GB SSD
	Comunicación	USB / Ethernet / WiFi
Actuadores	Torque	28 / 64 [kgf-cm] @ 12/15 [V]
	Velocidad	67 / 49 [RPM sin carga]
	Resolución	0,29°

Sensores	Brújula digital	3 Ejes
	Fuerza	2 x 4 FSR
	Cámara de video	2 MP HD
Energía	Baterías	2 x Li-Po 18.5 V @ 750 mAh

Tabla 1. Especificaciones generales del robot humanoide AXIS.

3. Análisis cinemático

Con el fin de predecir los movimientos de AXIS, es importante analizar primero su cinemática. Dado que las estructuras cinemáticas del brazo derecho y pierna derecha del robot humanoide son idénticas a las del lado izquierdo sólo las extremidades derechas serán analizadas y discutidas para efectos prácticos. Las soluciones del lado izquierdo se obtienen con sólo cambiar la dirección de un vector. En esta sección se presenta el modelado cinemático de los brazos y las piernas del robot humanoide AXIS.

3.1. Modelado del brazo derecho

La Fig. 4 muestra la estructura cinemática del brazo derecho. Como se mencionó anteriormente, cada brazo es una estructura de 3 GDL accionados por tres actuadores. Tenga en cuenta que los servomotores que accionan el hombro y el brazo comparten un punto en común en la intersección de sus ejes de rotación.

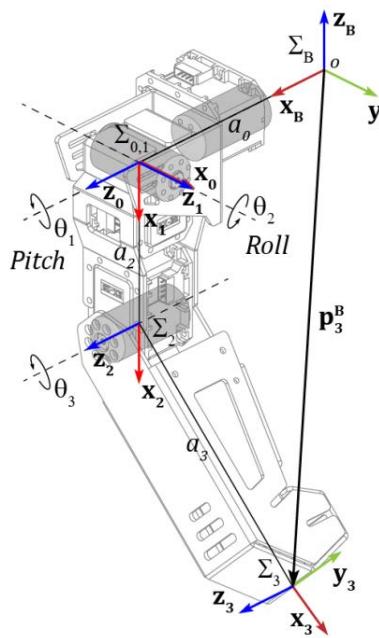


Fig. 4. Estructura cinemática del brazo derecho de AXIS.

En la Fig. 4, la triada base ΣB representa los vectores unitarios de la base (x_B, y_B, z_B) y es la triada de referencia del sistema de coordenadas de todo el brazo. Las triadas $\Sigma 0$, $\Sigma 1$ and $\Sigma 2$ son los ejes locales de los eslabones mientras que $\Sigma 3$ es la triada localizada en el efecto final en el extremo del brazo. Las juntas rotoidales conectan todos los eslabones. Su rotación está denotada por θ_i . La distancia entre ΣB y $\Sigma 0$ está denotada por a_0 mientras que la longitud de cada eslabón está definida por a_i . El objetivo es determinar la posición de la triada situada en el efecto final con respecto a la triada base. Esto se puede lograr estableciendo un modelo cinemático directo que estime el vector resultante p_3^B .

Inspirado en la cinemática de robots manipuladores [11], la posición p_3^B del efecto final puede ser expresada en términos de ΣB y $\Sigma 3$ por la ecuación (1):

$$\Sigma B = R \Sigma 3 \quad (1)$$

Donde R es la matriz de rotación que representa la transformación de coordenadas de la triada $\Sigma 3$ con respecto a la triada ΣB . Para obtener R , se puede considerar el uso de la matriz de transformación homogénea expresada en la ecuación (2):

$$A_n^{n-1}(\theta_n) = \begin{bmatrix} R_n^{n-1} & p_n^{n-1} \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n & s & a & p \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Donde A_n^{n-1} es la matriz de transformación homogénea del eslabón $n - 1$ con respecto al eslabón n . La matriz A está en función de θ_n . El componente R_n^{n-1} es una matriz de 3x3 que representa la rotación, mientras que p_n^{n-1} es un vector de 3x1 que representa la traslación, 0^T (vector nulo 1x3) y 1 son los escalares de perspectiva y escala, respectivamente. En el lado derecho de la ecuación (2), $[n \ s \ a \ p]$ representa el vector normal, el vector deslizante, el vector de acercamiento y el vector de posición del efecto final, respectivamente [12]. Los parámetros de Denavit-Hartenberg (D-H) [13] para el brazo derecho de AXIS se enlistan en la Tabla 2.

Articulación	θ	d	a	α	Rango de movimiento	
1	$-\pi/2$	0	0	$-\pi/2$	-90°	$+180^\circ$
2	0	0	a_2	$\pi/2$	-180°	0°
3	0	0	a_3	0	0°	$+95^\circ$

Tabla 2. Parámetros de Denavit-Hartenberg del brazo.

Así, la ecuación (2) se convierte en la ecuación (3):

$$A_n^{n-1}(\theta_n) = \begin{bmatrix} C_n & -S_n C_{\alpha_n} & S_n S_{\alpha_n} & a_n C_n \\ S_n & C_n C_{\alpha_n} & -C_n S_{\alpha_n} & a_n S_n \\ 0 & S_n & C_{\alpha_n} & d_n \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{cases} C_n = \cos(\theta_n) \\ S_n = \sin(\theta_n) \\ C_{\alpha_n} = \cos(\alpha_n) \\ S_{\alpha_n} = \sin(\alpha_n) \end{cases} \quad (3)$$

Dado que el primer eslabón del brazo empieza a partir de la articulación del hombro, la matriz de transformación de la triada base unida al torso con respecto a la primera triada de coordenadas del brazo derecho está descrita por la ecuación (4):

$$\mathbf{A}_0^B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & a_0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Con el fin de describir la relación de rotación y traslación entre los eslabones adyacentes, usaremos la representación de la matriz D-H para cada eslabón. Así, substituyendo los parámetros de la Tabla 2 en la ecuación (3), se obtienen las matrices de transformación homogénea para todos los eslabones del brazo.

Para $n = 1$, la matriz de transformación de $\Sigma 1$ con respecto a $\Sigma 0$ (ecuación (5)):

$$\mathbf{A}_n^{n-1}(\theta_n) = \begin{bmatrix} C_n & 0 & -S_n & 0 \\ S_n & 0 & C_n & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Para $n = 2$, la matriz de transformación de $\Sigma 2$ con respecto a $\Sigma 1$ (ecuación (6)):

$$\mathbf{A}_n^{n-1}(\theta_n) = \begin{bmatrix} C_n & 0 & S_n & a_n C_n \\ S_n & 0 & -C_n & a_n S_n \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Para $n = 3$, la matriz de transformación de $\Sigma 3$ con respecto a $\Sigma 2$ (ecuación (7)):

$$\mathbf{A}_n^{n-1}(\theta_n) = \begin{bmatrix} C_n & -S_n & 0 & a_n C_n \\ S_n & C_n & 0 & a_n S_n \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

La cinemática directa del brazo T_3^B se establece entonces por la multiplicación en cadena de las matrices de transformación consecutivas A_n^{n-1} (ecuación (8)):

$$T_3^B = \mathbf{A}_0^B \mathbf{A}_1^0 \mathbf{A}_2^1 \mathbf{A}_3^2 = \begin{bmatrix} \mathbf{n}_x & \mathbf{s}_x & \mathbf{a}_x & \mathbf{p}_x \\ \mathbf{n}_y & \mathbf{s}_y & \mathbf{a}_y & \mathbf{p}_y \\ \mathbf{n}_z & \mathbf{s}_z & \mathbf{a}_z & \mathbf{p}_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Dónde:

$$\mathbf{n}_x = -S_2 C_3$$

$$\mathbf{n}_z = S_1 C_2 C_3 + C_1 S_3$$

$$\mathbf{n}_y = C_1 C_2 C_3 - S_1 S_3$$

$$\mathbf{s}_x = S_2 S_3$$

$$\mathbf{s}_y = -C_1 C_2 S_3 - S_1 C_3$$

$$\mathbf{a}_z = S_1 S_2$$

$$\mathbf{s}_z = -S_1 C_2 S_3 + C_1 C_3$$

$$\mathbf{p}_x = a_0 - a_2 S_2 - a_3 S_2 C_3$$

$$\mathbf{a}_x = C_2$$

$$\mathbf{p}_y = a_2 C_1 C_2 + a_3 (C_1 C_2 C_3 - S_1 S_3)$$

$$\mathbf{a}_y = C_1 S_2$$

$$\mathbf{p}_z = a_2 S_1 C_2 + a_3 (S_1 C_2 C_3 + C_1 S_3)$$

Finalmente, el vector \mathbf{p}_3^B (ecuación (9)) está definido por los componentes de translación de la matriz T_3^B y describe la posición del efecto final con respecto a la base.

$$\mathbf{p}_3^B = \begin{bmatrix} \mathbf{p}_x \\ \mathbf{p}_y \\ \mathbf{p}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_0 - a_2 S_2 - a_3 S_2 C_3 \\ a_2 C_1 C_2 + a_3 (C_1 C_2 C_3 - S_1 S_3) \\ a_2 S_1 C_2 + a_3 (S_1 C_2 C_3 + C_1 S_3) \end{bmatrix} \quad (9)$$

3.2. Modelado de la pierna derecha

La Fig. 5 muestra la estructura cinemática de la pierna derecha. Cada pierna es una estructura de 6 GDL accionada por seis actuadores, creando las articulaciones de la cadera, la rodilla, y el tobillo. Note que los tres servomotores que accionan la cadera comparten un punto en común en la intersección de sus ejes de rotación mientras que los dos servomotores del tobillo comparten otro, reduciendo así el número de variables a resolver. Esto permite que la pierna pueda ser simplificada por medio de un desacoplamiento cinemático [14] separando el mecanismo de posición con respecto al de orientación. De esta manera, la pierna puede ser considerada como dos manipuladores concatenados: un manipulador esférico [15] en las tres articulaciones superiores (orientación) y un manipulador antropomórfico [16] en las tres articulaciones inferiores (posición), obteniendo como resultado un modelo cinemático simplificado de la pierna.

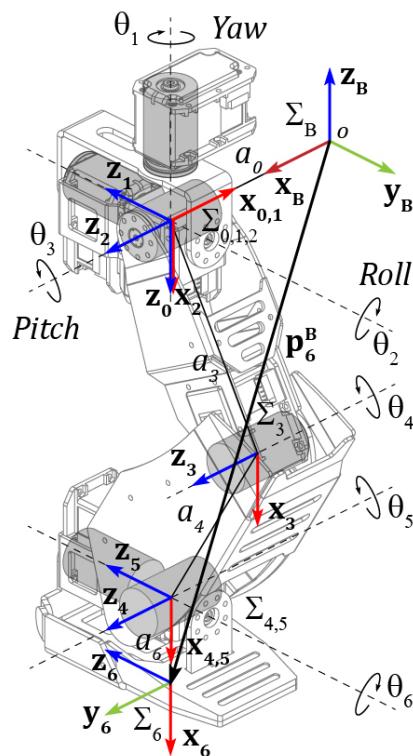


Fig. 5. Estructura cinemática de la pierna derecha de AXIS.

El objetivo aquí es determinar la posición de la triada localizada en la suela del pie con respecto a la triada de referencia del sistema de coordenadas de toda la pierna. Como en el brazo, esto se puede lograr estableciendo un modelo cinemático directo que estime el vector resultante p_6^B expresado en términos de ΣB y $\Sigma 6$ por la ecuación (10):

$$\Sigma B = R \Sigma 6 \quad (10)$$

Para obtener R , puede considerarse de nuevo el uso de la matriz de transformación homogénea A_n^{n-1} expresada en la ecuación (2). Los parámetros D-H para la pierna derecha de AXIS se enlistan en la Tabla 3.

Articulación	θ	d	a	α	Rango de movimiento	
1	0	0	0	$\pi/2$	-37°	$+143^\circ$
2	$\pi/2$	0	0	$-\pi/2$	-37°	$+90^\circ$

3	0	0	a_3	0	-52°	$+118^\circ$
4	0	0	a_4	0	-140°	0°
5	0	0	0	$\pi/2$	-45°	$+90^\circ$
6	0	0	a_6	0	-22°	$+22^\circ$

Tabla 3. Parámetros de Denavit-Hartenberg de la pierna.

La matriz de transformación de la triada base unida al sistema de coordenadas de referencia respecto a la primera triada de la pierna está definida por la ecuación (11):

$$\mathbf{A}_0^B = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & a_0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

Sustituyendo los parámetros de la Tabla 3 en la ecuación (3), se obtienen las matrices de transformación para todos los eslabones de la pierna.

Para $n = 1, 5$, las matrices de transformación se expresan en la ecuación (12):

$$\mathbf{A}_n^{n-1}(\theta_n) = \begin{bmatrix} C_n & 0 & S_n & 0 \\ S_n & 0 & -C_n & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

Mientras que las matrices de transformación para $n = 2$ y para $n = 3, 4, 6$ son las mismas que las descritas en las ecuaciones (5) y (7), respectivamente. La cinemática directa T_3^0 para la parte superior de la pierna (manipulador esférico) está entonces definida por la ecuación (13):

$$\mathbf{T}_3^0 = \mathbf{A}_1^0 \mathbf{A}_2^1 \mathbf{A}_3^2 = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} & f_{14} \\ f_{21} & f_{22} & f_{23} & f_{24} \\ f_{31} & f_{32} & f_{33} & f_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

Dónde:

$$\begin{aligned}
 f_{11} &= C_1 C_2 C_3 - S_1 S_3 & f_{13} &= -C_1 S_2 \\
 f_{21} &= S_1 C_2 C_3 + C_1 S_3 & f_{23} &= -S_1 S_2 \\
 f_{31} &= S_2 C_3 & f_{33} &= C_2 \\
 f_{12} &= -C_1 C_2 S_3 - S_1 C_3 & f_{14} &= a_3(C_1 C_2 C_3 - S_1 S_3) \\
 f_{22} &= -S_1 C_2 S_3 + C_1 C_3 & f_{24} &= a_3(S_1 C_2 C_3 + C_1 S_3) \\
 f_{32} &= -S_2 S_3 & f_{34} &= a_3 S_2 C_3
 \end{aligned}$$

Mientras que la cinemática directa T_6^3 para la parte inferior de la pierna (manipulador antropomórfico) está descrita por la ecuación (14):

$$T_6^3 = \begin{bmatrix} C_{45} C_6 & -C_{45} S_6 & S_{45} & a_4 C_4 + a_6 C_{45} C_6 \\ S_{45} C_6 & -S_{45} S_6 & -C_{45} & a_4 S_4 + a_6 S_{45} C_6 \\ S_6 & C_6 & 0 & a_6 S_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

Ya que la pierna entera puede ser considerada como un doble manipulador (un manipulador esférico para la parte superior y un manipulador antropomórfico para la parte inferior), la ecuación de la cinemática directa de la pierna completa T_6^B está entonces definida por la multiplicación en cadena de las ecuaciones (11), (13), (14) y descrita por la ecuación (15):

$$T_6^B = A_0^B T_3^0 T_6^3 \quad (15)$$

La solución de la ecuación (15) es de hecho compleja de expresar debido a la cantidad de espacio que ocupa. Sin embargo, como se vio anteriormente en el brazo, el vector p_6^B (ecuación (16)) está definido por los componentes de translación de la matriz T_6^B y describe la posición de la suela del pie con respecto a la base de la pierna.

$$p_6^B = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{6\ 14}^B \\ T_{6\ 24}^B \\ T_{6\ 34}^B \end{bmatrix} \quad (16)$$

4. Resultados y discusiones

La simulación por computadora de la ecuación (9) proporciona una visualización del espacio de trabajo alcanzable del brazo derecho de AXIS que es la región descrita por el origen de la triada en el efecto final cuando todas las articulaciones del brazo ejecutan todos los movimientos posibles. La Fig. 6(a) muestra el espacio de trabajo de la rotación en roll del brazo mientras que la Fig. 6(b) muestra el espacio de trabajo de la rotación en pitch del mismo. Note que ambas gráficas están delimitadas por todos los puntos máximos y mínimos que puede alcanzar el brazo mientras que el espacio entre ambas gráficas superpuestas en un mismo origen cartesiano es el espacio de trabajo efectivo del brazo derecho de AXIS. El espacio de trabajo del brazo izquierdo se obtiene reflejando ambas gráficas sobre el origen en el eje x. En este caso, la simulación de la ecuación (9) no muestra colisiones contra el mismo robot.

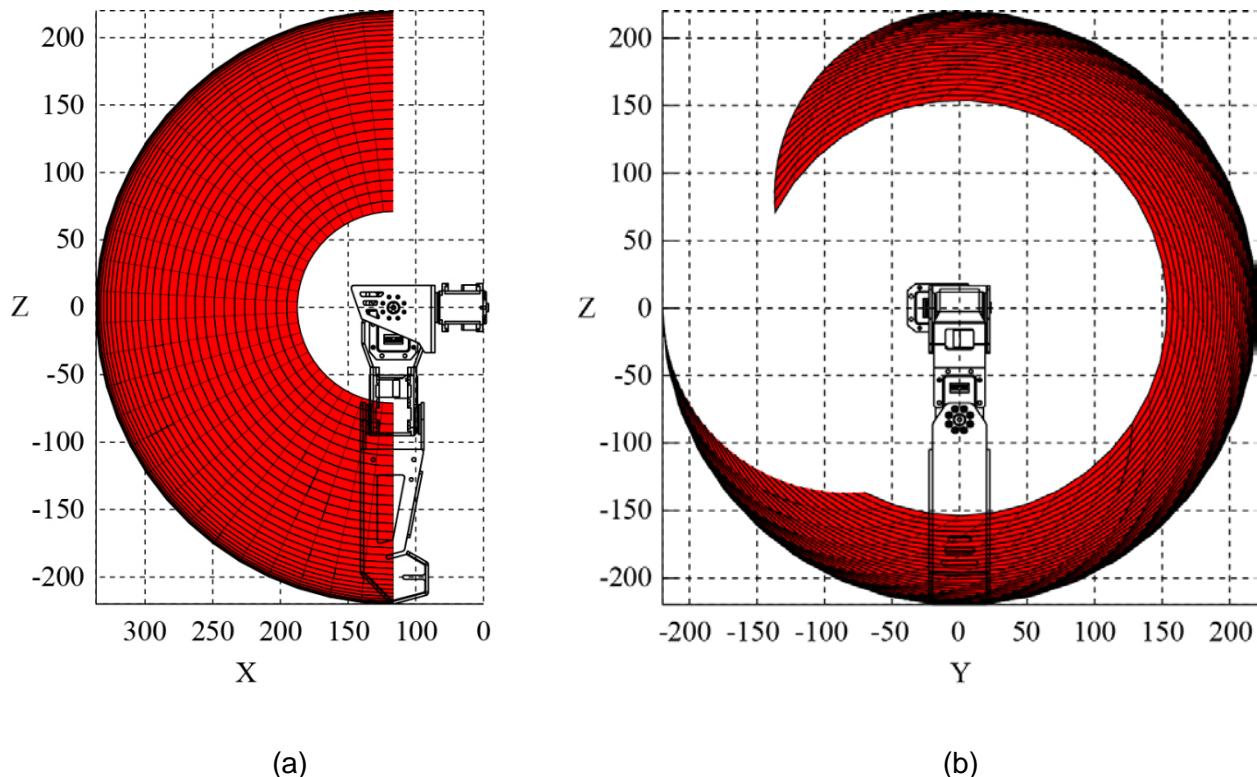


Fig. 6. Espacios de trabajo definidos por el espacio entre los límites alcanzables máximos y mínimos del brazo: (a) rotación en roll y (b) rotación en pitch.

Por otra parte, la simulación de la ecuación (16) proporciona una visualización del espacio de trabajo alcanzable de la pierna derecha de AXIS. La Fig. 7(a) muestra el espacio de trabajo de la rotación en roll de la pierna mientras que la Fig. 7(b) y la Fig. 7(c) muestran los espacios de trabajo de las rotaciones en pitch y yaw respectivamente.

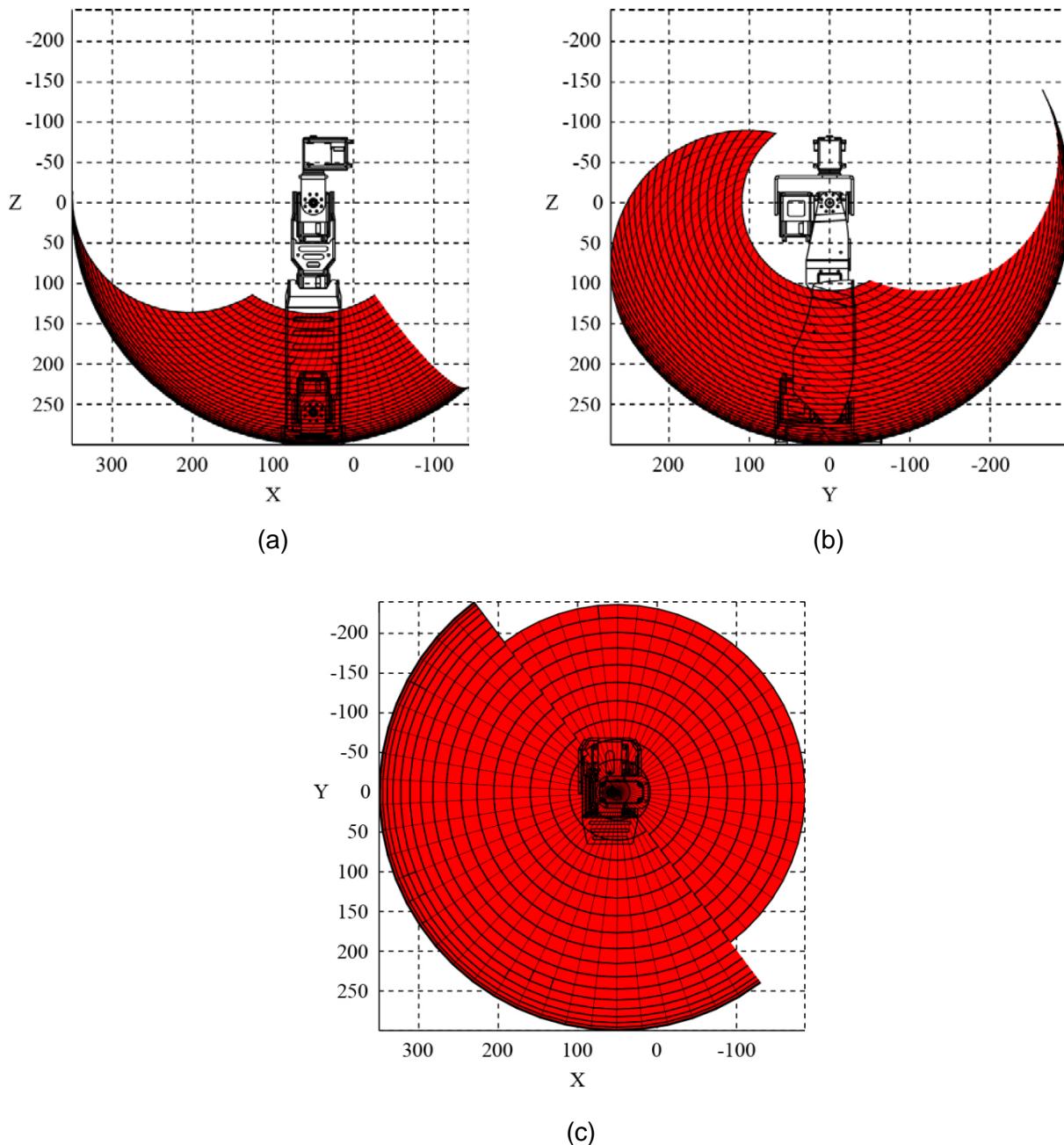
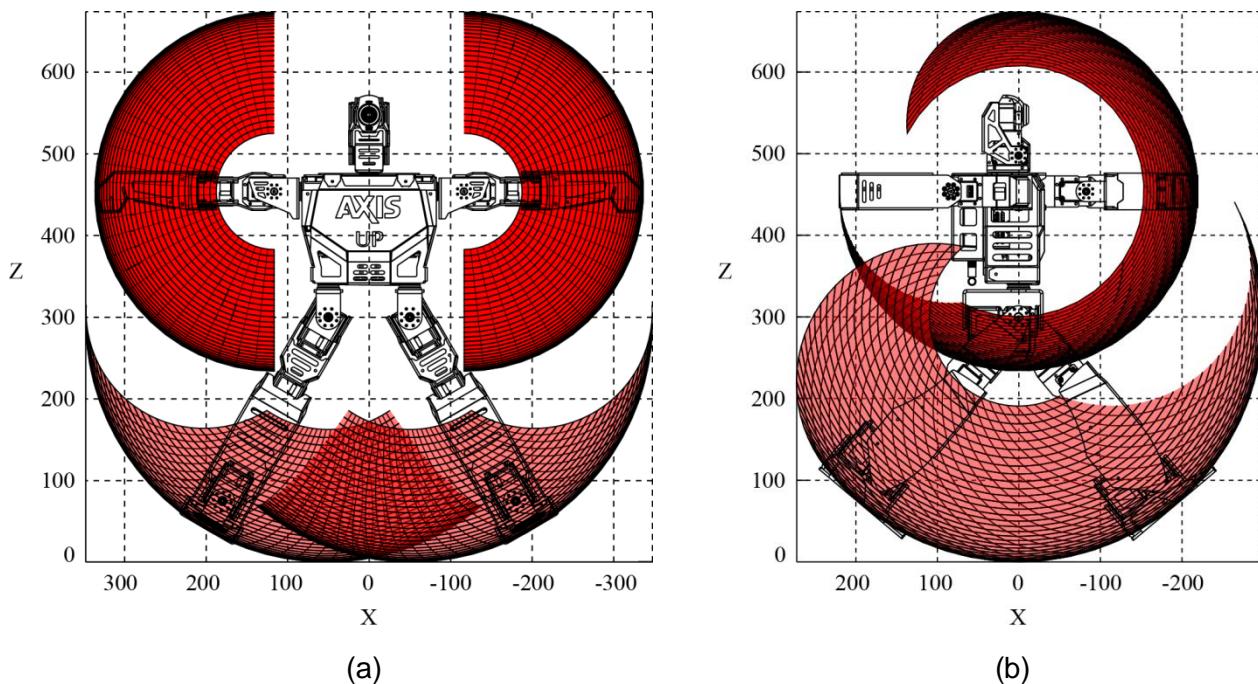


Fig. 7. Espacios de trabajo definidos por el espacio entre los límites alcanzables máximos y mínimos de la pierna: (a) rotación en roll, (b) rotación en pitch y (c) rotación en yaw.

De la misma manera que en el brazo, ambas gráficas están delimitadas por todos los puntos máximos y mínimos que puede alcanzar la pierna mientras que el espacio entre todas las gráficas superpuestas en un mismo origen cartesiano, genera el espacio de trabajo efectivo de la pierna del robot.

El espacio de trabajo de la pierna izquierda, se obtiene reflejando todas las gráficas sobre el origen en el eje x. En este caso, la simulación muestra intersecciones en los espacios de trabajo de la pierna evidenciando colisiones ya que el rango de movimiento de los servomotores permite movimientos más amplios incrementando el espacio alcanzable para la pierna. En algunos casos, como cuando el robot gira, la pierna derecha se sobreponen sobre el espacio de trabajo de la pierna izquierda pero la colisión puede ser evitada estableciendo parámetros condicionales en el control de movimiento del robot. Esta valiosa información es usada para prevenir que el robot se dañe a si mismo mientras desempeña tareas motrices.



**Fig. 8. Espacio de trabajo total del robot humanoide AXIS: (a) rotaciones en roll y
(b) rotaciones en yaw.**

Es posible visualizar el espacio de trabajo completo de AXIS simulando las ecuaciones (9) y (16) en diferentes referencias coordenadas y traslapando las gráficas resultantes. La Fig. 8(a) muestra el espacio de trabajo completo de las rotaciones en roll de las cuatro extremidades del robot humanoide AXIS mientras que la Fig. 8(b) muestra el espacio de trabajo completo de las rotaciones en pitch del robot. El espacio entre ambas gráficas superpuestas en un mismo origen cartesiano define el espacio efectivo entre los límites máximos y mínimos alcanzables de los brazos y las piernas del robot.

5. Conclusiones

Este artículo introdujo el robot humanoide AXIS; un robot de 20 GDL capaz de realizar una gran cantidad de movimientos antropomórficos similares a los humanos además de ser una plataforma de desarrollo propia para la investigación de la marcha bípeda. Se describió el desarrollo del diseño mecánico y la implementación del hardware del robot. Posteriormente se presentó una metodología consistente para derivar el análisis de la cinemática directa para determinar la posición de sus brazos y piernas. Finalmente, simulaciones por computadora ayudaron a visualizar los espacios de trabajo del robot y las colisiones fueron discutidas. Estos modelos serán usados para establecer esquemas precisos de control de posición en un futuro y continuar con el análisis dinámico de los movimientos.

6. Referencias

- [1] H. Kitano, M. Asada. "RoboCup Humanoid Challenge: That's One Small Step for A Robot, One Giant Leap for Mankind". IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Vol. 1. 1998. pp. 419-424.
- [2] K. Hirai, M. Hirose, Y. Haikawa, T. Takenaka. "The Development of Honda Humanoid Robot". IEEE International Conference on Robotics and Automation. Vol. 2. 1998. pp. 1321-1326.
- [3] I.W. Park, J. Y. Kim, J. Lee, J. H. Oh. "Mechanical Design of Humanoid Robot Platform KHR-3 (KAIST Humanoid Robot 3: HUBO)". IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots. 2005. pp. 321-326.
- [4] K. Kaneko, K. Harada, F. Kanehiro, G. Miyamori, K. Akachi. "Humanoid Robot HRP-3". IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2008. pp. 22-26.
- [5] S. Lohmeier, T. Buschmann, H. Ulbrich. "Humanoid Robot LOLA". IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2009. pp. 775-780.
- [6] I. Ha, Y. Tamura, H. Asama, J. Han, D. W. Hong. "Development of Open Humanoid Platform DARwIn-OP". SICE Annual Conference. 2011. pp. 2178-2181.
- [7] D. Gouaillier, V. Hugel, P. Blazevic, C. Kilner, J. Monceaux, P. Lafourcade, B. Marnier, J. Serre, B. Maisonnier. "Mechatronic Design of NAO Humanoid". IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2009. pp. 769-774.
- [8] K. Harada, S. Kajita, F. Kanehiro, K. Fujiwara, K. Kaneko, K. Yokoi, H. Hirukawa. "Real-Time Planning of Humanoid Robots Gait for Force Controlled Manipulation". IEEE International Conference on Robotics and Automation. Vol. 1. 2004. pp. 616-622.
- [9] E. Hernandez, R. Velazquez. "Design and Development of Humanoid Robot ZERO". IEEE IX Latin American and IEEE Colombian Conference on Automatic Control and Industry Applications. 2011. pp. 1-6.

- [10] X. Kang, W. Shen, W. Chen, J. Wang. "The Control of Dynamixel RX-28 Based on VC++ for the Locomotion of Cockroach Robot". IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications. 2009. pp. 495-499.
- [11] R. P. Paul, B. Shimano, E. G. Mayer. "Kinematic Control Equations for Simple Manipulators". IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. Vol. 11. 1981. pp. 449-455.
- [12] K. S. Fu, R. C. González, C. S. G. Lee. "The Direct Kinematics Problem". Robotics: Control, Sensing, Vision, and Intelligence. Ed. McGraw-Hill. New York. 1987. Cap. 2. pp. 29-30.
- [13] J. Denavit, R. S. Hartenberg. "A Kinematic Notation for Lower-Pair Mechanisms Based on Matrices". Transactions ASME Journal of Applied Mechanics. Vol. 22. 1955. pp. 215-221.
- [14] R. Featherstone. "Position and Velocity Transformations Between Robot End effector Coordinates and Joint Angles". International Journal of Robotics Research. Vol. 2. 1983. pp. 35–45.
- [15] R.P. Paul, H. Zhang. "Computationally Efficient Kinematics for Manipulators with Spherical Wrists Based on the Homogeneous Transformation Representation". International Journal of Robotics Research. Vol. 5. 1986. pp. 32–44.
- [16] B. Siciliano, L. Sciavicco, L. Villani, G. Oriolo. "Anthropomorphic Arm". Robotics: Modelling, Planning and Control (Advanced Textbooks in Control and Signal Processing). 1^a ed. Ed. Springer-Verlag London Limited. London. 2009. Cap. 2. pp. 73-74.

7. Autores

Ing. Efraín Hernández Franco es Ingeniero en Mecatrónica con Especialidad en Robótica por la Universidad Panamericana. Actualmente se encuentra cursando la Maestría en Ciencias en la Universidad Panamericana Campus Bonaterra.

Dr. Ramiro Velázquez Guerrero es Ingeniero en Electrónica por la Universidad Panamericana, Maestro en Ciencias por el INSA de Lyon (Francia) y Doctor en Robótica por la Universidad Pierre et Marie Curie (Francia). Actualmente es profesor-investigador y Director de la Facultad de Ingeniería en la Universidad Panamericana Campus Bonaterra. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores (Nivel 1).