

Propuesta de Generación de Secuencias de Movimientos de un Robot Bípedo de Arquitectura Abierta

López Sandoval Andrés Ernesto, Reyes Cruz Luis Ángel, González Trejo José Enrique, Pedraza Ortega Jesús Carlos, Ramos Arreguín Juan Manuel, Tovar Arriaga Saúl y Vargas Soto José Emilio.

Facultad de Informática, Universidad Autónoma de Querétaro.
Av. de las Ciencias S/N Campus Juriquilla, Juriquilla, CP 76230 Querétaro.
en_gt@hotmail.com

Resumen

En el presente trabajo se muestra una estrategia para la generación de secuencias de movimientos de un robot bípedo de arquitectura abierta de doce grados de libertad. Esta estrategia se basa en el modelo cinemático directo mediante el algoritmo de Denavit-Hartenberg, utilizando la plataforma de Kinect junto con el software de animación Blender.

La primera etapa de la estrategia consiste en un análisis mecánico de la estructura del robot bípedo así como de la locomoción humana con las herramientas Kinect y Blender para comprender la forma en que se realiza: como las fases y movimientos que se involucran en este proceso biomecánico.

La segunda parte de la estrategia se refiere al análisis y modelo cinemático de una pierna del robot bípedo, posteriormente la realización de una simulación de este modelo, que nos permita entender el comportamiento de cada uno de los eslabones que conforman la pierna del robot al modificar sus parámetros y relacionarlos con los resultados obtenidos del análisis de la locomoción humana.

Por último se implementara el modelo cinemático en el software de animación Blender para la generación de secuencias de movimiento y replicarlas en la pierna física del robot bípedo.

Palabras clave: Robot bípedo, humanoide, biomecánica, Cinemática directa.

1. Introducción

Generar secuencias de movimientos en robots humanoides similares a las que realizamos los humanos es uno de los principales motivos por los que se desarrollan robots humanoides y representa una tarea muy compleja debido a la gran cantidad de elementos y factores que se involucran en este proceso como: los grados de libertad del robot, el tipo de actuadores y de sensores, la mecánica del robot y su estructura [1]. En los últimos años, esta parte de la robótica ha tenido un gran avance debido a que varias Universidades y empresas han realizado una ardua investigación y desarrollos, algunos de estos comercializados con la finalidad de brindar entretenimiento o proporcionar algún servicio. Por ejemplo el ASIMO de Honda es uno de los robots más avanzados del mundo y representa más de dieciocho años de investigación por parte de la empresa Japonesa, este robot puede realizar tareas como servir café, saludar, responder preguntas correr, subir escaleras, saltar, entre otras [2][3].

Otros robots humanoides desarrollados por Universidades han aportado un gran conocimiento en esta área de la robótica como: El robot NimbRo-OP desarrollado por la Universidad de Bonn en Alemania, este robot posee veinte grados de libertad y utiliza el sistema operativo ROS diseñado especialmente para trabajos de robótica, es un proyecto de plataforma abierta [4]. Otro robot humanoide muy avanzado y de importante aporte es el robot "HRP-4C", desarrollado por el Instituto

Nacional de Ciencia y Tecnología Industrial Avanzada de Japón, mide 1,58 centímetros, pesa 43 kilogramos y tiene un rostro de silicón. Este robot puede imitar los movimientos del cuerpo humano. El robot puede simular alegría, sorpresa o enfado gracias a los ocho motores ocultos bajo su rostro, que obedecen a las órdenes humanas. El robot humanoide mueve su cuerpo articulado de aluminio, gracias a otros treinta actuadores, que le permiten mover los brazos y las piernas. Como estos desarrollos, se han realizado muchos más, usando distintos modelos matemáticos y técnicas para la generación de secuencias de movimientos [5].

Cada robot desarrollado posee una particular estructura mecánica distinta, al igual que distintos grados de libertad, distintos actuadores y sensores, esto produce que la forma de caminar de cada uno de los robots sea diferente y por consecuencia también los movimientos que generan, de igual manera se sabe que aunque la forma en que caminamos los humanos es similar unos con otros, pero no llega a ser idéntica [6].

2. Estrategia

El objetivo es desarrollar un método para la generación de secuencias de movimientos de un prototipo de un robot bípedo de arquitectura abierta (utilizando plataformas como Arduino [14]), basado en el análisis y modelado de la cinemática directa, que permita la libertad de modificar sus parámetros mediante el software de animación Blender y permitiendo hacer una réplica de la secuencia de movimientos en el prototipo de robot bípedo; de esta manera realizar secuencias de caminata y equilibrio para un posterior análisis que nos permita construir una estrategia de locomoción heurística que sirva como ayuda para trabajos futuros en esta misma rama de la robótica. La estrategia utilizada se muestra en la figura 1.

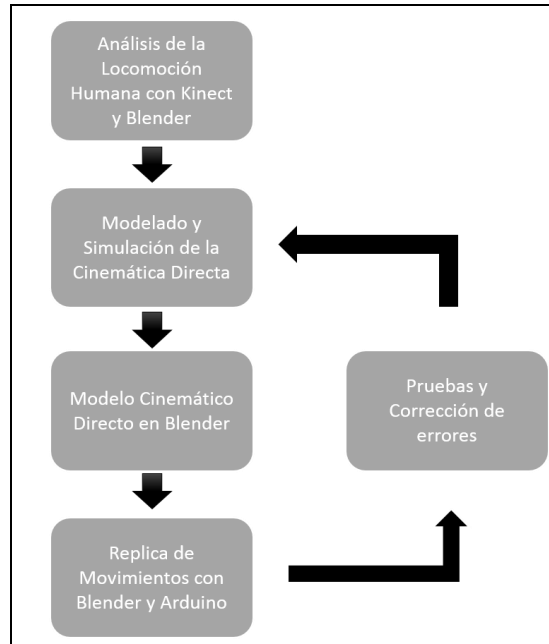


Figura 1. Estrategia propuesta utilizada.

2.1 Análisis de la locomoción humana con Kinect y Blender

Para el movimiento de las piernas del robot se realizó un análisis de la locomoción humana a través de la observación y captura de los movimientos de cuatro personas cuando caminan, mediante Kinect [7], Ni Mate [8] y Blender [9], Ni Mate mediante el sensor de profundidad del Kinect es capaz

replicar los movimientos de una persona en tiempo real, con Blender se importaron los movimientos a través de un esqueleto y se grabaron la secuencias de cuatro personas diferentes para caminar como se muestra en la figura 2.

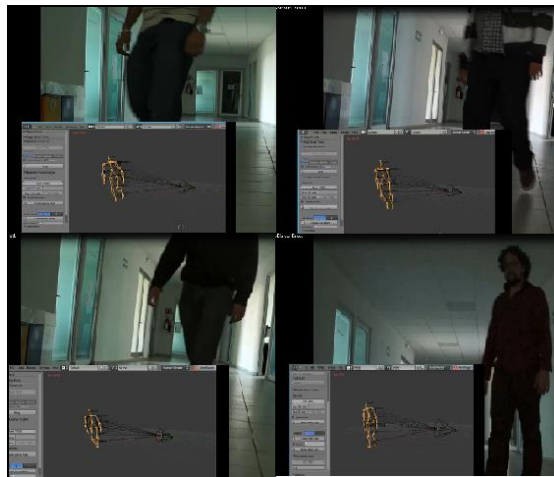


Figura 2. Grabación de movimientos a través Kinect con NI Mate y Blender.

Una vez grabados los movimientos en un esqueleto en el entorno 3D de Blender, mediante el entorno de animación y gestión de movimientos, tenemos acceso a la información de la rotación de las articulaciones básicas del esqueleto en las coordenadas X, Y y Z, así como también una gráfica, generada por la posición de la articulación en cada uno de los fotogramas de la grabación (como se muestra en la figura 3), se realizó por separado el análisis de cada parte del cuerpo en una solo componente a través de filtros para ajustarse lo más posible a los grados de libertad del robot; como cada persona y robot construido tiene una manera particular y única de caminar y moverse, se generalizaron los movimientos más básicos y se adecuaron al exoesqueleto del robot.

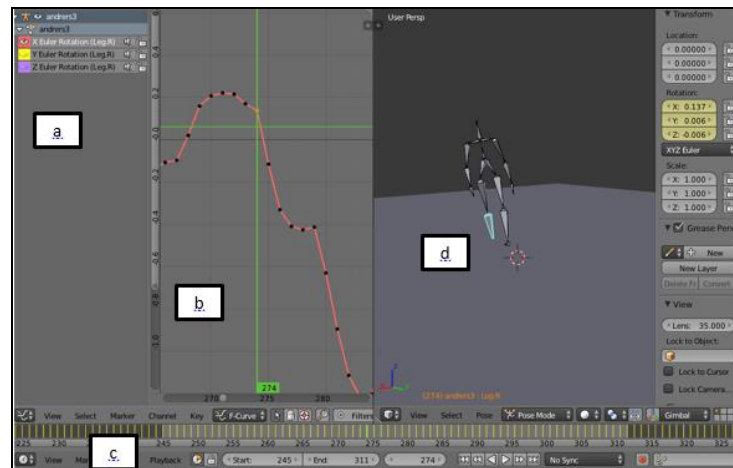


Fig. 3. a) Componentes de rotación X, Y y Z de la articulación de la pierna. b) Gráfica de rotación de la pierna derecha en la componente X. c) Fotogramas de la grabación de la camita. d) esqueleto que replica los movimientos de la persona grabada.

2.2 Modelado y Simulación de la Cinemática Directa

El sistema que describe el movimiento de las piernas del robot consiste de seis articulaciones prismáticas, tres de ellas en la cadera, que giran la pierna en los ejes Z, X, y Y respectivamente, una articulación en la rodilla, una más en el tobillo y una en el pie, estas últimas permiten realizar

movimientos en los ejes X y Y (movimientos de flexión y de inclinación), como se muestra de una manera más detallada en la tabla 1. La figura 4 muestra el diagrama del diseño de la pierna del robot bípedo con las seis articulaciones prismáticas [10][11].

Tabla 1. Propiedades de las articulaciones del robot bípedo.

Articulación	θ
Pie	x
Tobillo	y
Rodilla	Y
Muslo1	Y
Muslo2	X
Cadera	Z

Utilizando el diagrama de las articulaciones con sus sistemas de referencias, se obtuvieron los parámetros de Denavit-Hartenberg para el modelado de la cinemática directa de la pierna del robot. Estos parámetros además de un conjunto de transformaciones de translación y rotación nos permiten conocer la orientación y posición de cada uno de los eslabones de la pierna del robot respecto a la base del robot. Los parámetros obtenidos de acuerdo a la convención de Denavit-Hartenberg son listados en la tabla 2.

La solución de la cinemática directa mediante el algoritmo de Denavit-Hartenberg da como resultado una matriz de transformación homogénea por cada uno de los eslabones de la cadena articulada del robot respecto a una base fija o sistema de referencia 0 [12][13]. Estos sistemas pueden ser representados mediante una matriz ${}^{i-1}A_i$ donde i es el eslabón al que se realiza la transformación de coordenadas respecto al eslabón i-1, quedando la matriz del eslabón final respecto a la base del robot de la siguiente manera:

$${}^0A_6 = {}^0A_1 * {}^1A_2 * {}^2A_3 * {}^3A_4 * {}^4A_5 * {}^5A_6 \quad (1)$$



Fig. 4. Diseño de la pierna del robot bípedo.

Tabla. 2. Parámetros de Denavit-Hartenberg.

Articulación	α_i	a_i	θ_i	d_i
1	α_1	0	0	d_1
2	0	0	q_2	0
3	$pi/2$	l_3	q_3	0
4	0	l_4	q_4	0
5	0	l_5	q_5	0
6	$-pi/2$	0	q_6	0

La ecuación 2 describe la posición y orientación del eslabón final (pie del robot bípedo) respecto a la base (la parte superior de la cadera) mediante la multiplicación de cada una de las matrices de transformación homogénea como lo indica la ecuación 1 y utilizando los parámetros de la tabla 2.

$${}^0A_6 = \begin{bmatrix} r_{nx} & r_{ox} & r_{ax} & p_x \\ r_{ny} & r_{oy} & r_{ay} & p_y \\ r_{nz} & r_{oz} & r_{az} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Donde:

$$r_{nx} = \cos(q_1 + q_3) \cos(q_4 + q_5 + q_6) \quad (3)$$

$$r_{ny} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} -\cos(\alpha_1 - q_4 - q_5 - q_6) + \\ \cos(\alpha_1 + q_4 + q_5 + q_6) + \\ 2 \cos \alpha_1 \cos(q_4 + q_5 + q_6) \\ \sin(q_2 + q_3) \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$r_{nz} = \frac{1}{4} \begin{pmatrix} \cos(\alpha_1 - q_2 - q_3 - q_4 - q_5 - q_6) - \\ \cos(\alpha_1 + q_2 + q_3 - q_4 - q_5 - q_6) + \\ \cos(\alpha_1 - q_2 - q_3 + q_4 + q_5 + q_6) - \\ \cos(\alpha_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6) - \\ 2 \sin(\alpha_1 - q_4 - q_5 - q_6) + \\ 2 \sin(\alpha_1 + q_4 + q_5 + q_6) \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$r_{ox} = -\sin(q_2 + q_3) \quad (6)$$

$$r_{oy} = \cos \alpha_1 \cos(q_2 + q_3) \quad (7)$$

$$r_{oz} = \cos(q_2 + q_3) \sin \alpha_1 \quad (8)$$

$$r_{ax} = -\cos(q_2 + q_3) \sin(q_4 + q_5 + q_6) \quad (9)$$

$$r_{ay} = \frac{1}{4} \begin{pmatrix} \cos(\alpha_1 - q_2 - q_3 - q_4 - q_5 - q_6) - \\ \cos(\alpha_1 + q_2 + q_3 - q_4 - q_5 - q_6) - \\ \cos(\alpha_1 - q_2 - q_3 + q_4 + q_5 + q_6) + \\ \cos(\alpha_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6) - \\ 2\sin(\alpha_1 - q_4 - q_5 - q_6) - \\ 2\sin(\alpha_1 + q_4 + q_5 + q_6) \end{pmatrix} \quad (10)$$

$$r_{az} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} \cos(\alpha_1 - q_4 - q_5 - q_6) + \\ \cos(\alpha_1 + q_4 + q_5 + q_6) - \\ 2\sin \alpha_1 \sin(q_2 + q_3) \\ \sin(q_4 + q_5 + q_6) \end{pmatrix} \quad (11)$$

$$p_x = \cos(q_2 + q_3)(l_3 + l_4 \cos q_4 + l_5 \cos(q_4 + q_5)) \quad (12)$$

$$p_y = \cos \alpha_1 (l_3 + l_4 \cos q_4 + l_5 \cos(q_4 + q_5)) \sin(q_2 + q_3) - \sin \alpha_1 (l_4 \sin q_4 + l_5 \sin(q_4 + q_5)) \quad (13)$$

$$p_z = d_1 + \cos q_3 (l_3 + l_5 \cos q_4 \cos q_5) \sin \alpha_1 \sin q_2 + \cos q_2 (l_3 + l_5 \cos q_4 \cos q_5) \sin \alpha_1 \sin q_3 + l_4 \cos q_4 \sin \alpha_1 \sin(q_2 + q_3) + l_4 \cos q_4 + l_5 \cos \alpha_1 \cos q_5 \sin q_4 + l_5 \cos \alpha_1 \cos q_5 \sin q_5 - l_5 \sin \alpha_1 \sin(q_2 + q_3) \sin q_4 \sin q_5 \quad (14)$$

Teniendo esta serie de matrices, se puede determinar la orientación y posición de cada uno de los eslabones de la pierna del robot, respecto a la base, que en este caso es la cadera fija. Utilizando este modelo, se realizó una animación mediante una interfaz gráfica en MATLAB que nos permita variar los parámetros del algoritmo de Denavit-Hartenberg, es decir, mediante esta interfaz con su respectiva grafica podemos observar y manipular los eslabones correspondientes a la configuración de la pierna del robot (como se muestra en la figura 5), además de que nos permite conocer la orientación y posición de cada uno de los eslabones respecto a la base del robot, para analizar el comportamiento, flexiones y movimientos posibles que pueda realizar una pierna del robot bípedo.

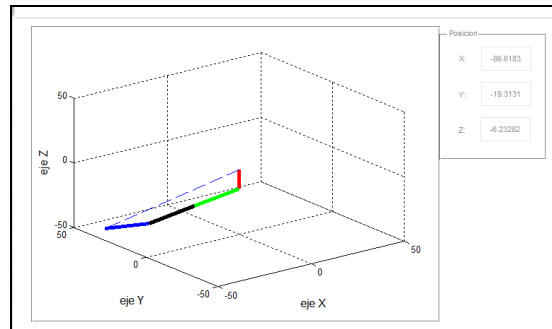


Fig. 5. Animación cinemática directa de la pierna del robot bípedo.

2.3 Cinemática Directa con Blender.

Blender es un Software open Source, conformado por una gran variedad de herramientas para el desarrollo de contenido 3D y 2D, integrado por modelado, mapeo uv, animación, simulaciones, scripting, entre muchos más; con su código fuente disponible bajo la licencia GNU GPL.

Mediante este software se realizaron simulaciones de la cinemática directa, este proceso se realizó importando y ensamblando cada una de las piezas que conforman el exoesqueleto de la pierna del robot bípedo en el entorno 3D de Blender, al importar las piezas con el formato "STL", Blender respeta las características y dimensiones de los polígonos que forman la pieza en 3D, de esta forma es más fiable realizar simulaciones con respecto al modelo original; mediante la generación de un esqueleto que se incorpora a la estructura de la pierna del robot, el cual está integrado por 6 huesos poligonales unidos por una articulación, cada uno de ellos simula los grados de libertad con los que está conformado el robot bípedo, como se muestra en la figura 6, cada uno de estos huesos, está ligado con las piezas que se desplazan con respecto a cada grado de libertad, en este caso a cada servomotor, estos huesos son capaces de moverse y girar en las componentes X, Y, y Z, en el entorno 3D, pero para la simulación de la pierna solo se considera la rotación de la articulación en un solo componente dependiendo de la ubicación del servomotor, como se muestra en la tabla 1. De esta forma se realizaron distintas poses de la pierna del robot bípedo considerando la cinemática directa.

Para mover la pierna en un punto deseado, se rotan cada uno los huesos con respecto a su articulación hasta obtener la pose requerida, con este procedimiento se pueden saber y obtener los grados que se requieren rotar para cada servomotor.

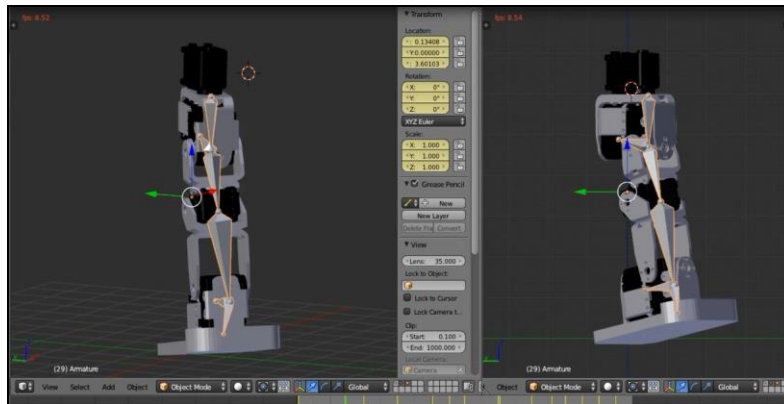


Fig. 6. Pierna del robot bípedo en Blender.

3. Análisis de resultados

Uno de los importantes resultados obtenidos es el análisis de la locomoción humana con Kinect y Blender, esto nos permitió observar los diferentes tipos de movimientos que generan la cadera, rodilla y tobillo para realizar el proceso de caminata como se muestra en la figura 7.

Se realizó un modelo de la cinemática directa de una pierna de seis grados de libertad del robot bípedo para describir el comportamiento de cada uno de los eslabones al modificar los ángulos de sus articulaciones, para comprobar este modelo se realizó la animación, la cual calcula la posición de las partes de la estructura articulada del robot. Obteniendo de esta manera la posición del eslabón final con respecto a la base de la cadena articulada, como se muestra en el siguiente video: ([youtube: http://goo.gl/cS4AB4](http://goo.gl/cS4AB4)).

Utilizando esta parte de la investigación se logró tener una referencia para la consecuente secuencia de movimientos que se desarrolló para la pierna del robot bípedo mediante Blender y el

diseño de la pierna. Esto es de gran importancia para tener mejor referenciada la ubicación de la posición de los eslabones conforme vaya variando en nuestro ciclo de caminata. Algunos resultados de las pruebas realizadas se muestran en el siguiente video (youtube: <http://goo.gl/KbSSlv>).

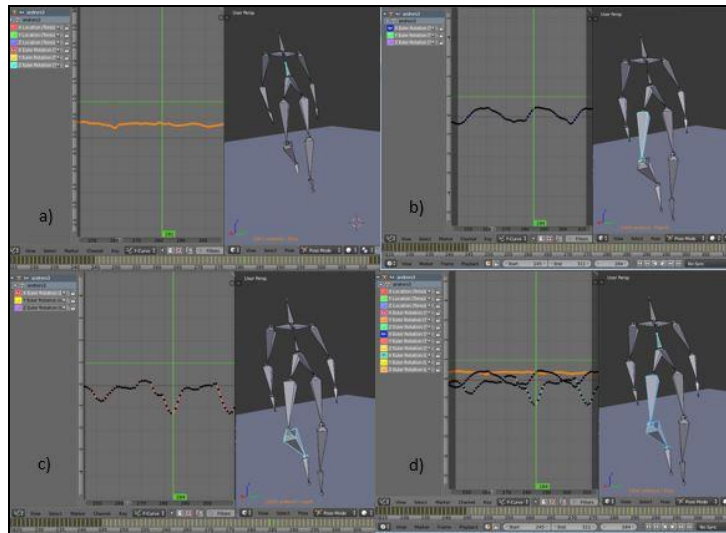


Fig. 7. Grafica de movimiento de cada una de las articulaciones de la pierna del robot bípedo implementadas en Blender.

4. Conclusiones

Se analizó la locomoción humana con varias personas mediante el uso de distintas herramientas, que nos permitirá tener un marco de referencia para la generación de secuencias de movimientos para la caminata del robot bípedo.

Se realizó un modelado matemático de la cinemática directa del robot bípedo así como una animación que sirvió como punto de partida para el modelo de la pierna del robot en Blender. Se realizaron secuencias de movimientos en Blender para su réplica en la pierna del robot bípedo, de esta manera tenemos un análisis más claro de los movimientos que se necesitan para realizar la locomoción del robot bípedo.

Se propone como trabajo futuro el modelo en Blender del robot bípedo completo para generar secuencias de movimientos y realizar la réplica mediante Blender con Python y Arduino, de tal manera que se genere una secuencia de locomoción básica del robot.

Referencias

- [1] Craig J., "Introduction to Robotics Mechanics and Control", Pearson Education Inc, United States of America, 3ra edición, 2005.
- [2] Historia de los robots de Honda, <http://www.abadiadigital.com/historia-de-los-robots-de-honda-del-proyecto-e0-a-asimo/> [Fecha de consulta: 20 de julio de 2014].
- [3] ASIMO website, <http://asimo.honda.com/> [Fecha de consulta: 18 de julio de 2014].
- [4] NimbRo-OP website, <http://www.nimb-ro.net/OP/> [Fecha de consulta: 2 de Febrero de 2014]
- [5] Kajita S., Morisawa M., Miura K., Nakaoka S., Harada K., Kaneko K., Kanehiro F., Yokoi K., "Biped Walking Stabilization Based on Linear Inverted Pendulum Tracking", Proceedings of 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.4489-4496, 2010.
- [6] Rodríguez A., Cruz C., Vite, A., "Generación de trayectorias para marcha semi-estática de un robot bípedo: diseño y pruebas experimentales", Ingeniería, Revista Académica de la FIUADY, 15-2, pp 57-68, ISSN: 1665-529-X, 2011.

- [7] Borenstein, G., "Making Things See: 3D vision with Kinect, Processing, Arduino, and MakerBot". O'Reilly Media, Inc.. 2012
- [8] NI Mate website, <http://www.ni-mate.com/> [Fecha de consulta: 7 de abril del 2014].
- [9] Blender website, <http://www.blender.org/> [Fecha de consulta: 12 de abril del 2014].
- [10] Spong M., Hutchinson S., Vidyasagar M., "Robot Modeling and Control", John Wiley Sons, INC. 1st Edition, United States, 2005.
- [11] Barrientos A., Peñin L., Balaguer C., Aracil R., "Fundamentos de Robótica", MacGraw-Hill, España, 1ra edición, 1997.
- [12] Aníbal B., "Robotica (manipuladores y robots móviles)", Alfaomega – Marcombo, España, 1ra edición, 2001
- [13] Adly M., Amirfaiz W., Faizura, W., Elamvazuthi, I, Begam M., "Design and kinematic analysis of biped robot". In Intelligent and Advanced Systems (ICIAS), 2010 International Conference on (pp. 1-5). IEEE. 2010.
- [14] Arduino website, <http://arduino.cc> [Fecha de consulta: 10 de abril de 2014].