

Diseño, Modelado y Simulación de un Robot Bípedo

González Trejo José Enrique, Reyes Cruz Luis Ángel, Andrés Ernesto López Sandoval, Pedraza Ortega Jesús Carlos, Vargas Soto José Emilio, Delgado Rosas Manuel.

Facultad de Informática, Universidad Autónoma de Querétaro.
Av. de las Ciencias S/N Campus Juriquilla, Juriquilla, Querétaro, Qro.
C.P. 76230 México. Tel. 1921200 EXT. 5900
en_gt@hotmail.com

Resumen

Este trabajo propone una estrategia experimental para el diseño, construcción de un robot bípedo de 6 grados de libertad, de forma que se logre la manipulación total de los parámetros de diseño del robot bípedo, tanto de sus componentes de hardware como de software, basados en el modelo de la cinemática directa de una pierna del robot propuesto con los mismos grados de libertad, a fin de contar con una arquitectura abierta que permita adquirir conocimientos experimentales en las áreas de la robótica, programación, telemando y control, entre otras. Se pretende que el robot sea una herramienta y una base experimental que permita desarrollar trabajos de investigaciones futuras en éstas áreas.

La primera parte de la estrategia se basó en analizar trabajos realizados de robots bípedos con los mismos grados de libertad del robot propuesto. Analizar la forma de caminar humana para comprender sus diferentes fases y la relación que tienen con las partes del cuerpo que se involucran en este proceso biomecánico, posteriormente realizar el modelo cinemático directo de una pierna del robot para observar el comportamiento al modificar sus parámetros que nos ayude a comprender mejor los movimientos que se realizan en el proceso de caminata así como los posibles movimientos que realice el robot bípedo.

La segunda parte de la estrategia se refiere al análisis de los materiales y piezas necesarias para construir el robot, tales como los servomotores, el micro-controlador y los componentes electrónicos, así como el diseño y construcción de las piezas que componen el robot bípedo y su ensamble.

Se diseñó un algoritmo básico para generar el movimiento de los servomotores basado en el modelo cinemático directo que se analizó y se realizaron pruebas exhaustivas de estabilidad con los movimientos generados. Se analizaron las limitaciones del robot y las posibles mejoras y adecuaciones.

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

1. Introducción

La robótica está tomando un papel muy importante en el desarrollo de la sociedad ya que cada vez hay más robots que desempeñan tareas que realiza el ser humano y que se implementan en procesos industriales, automatización y control, mediante movimientos y acciones similares como la locomoción humana. En este línea de estudio de la robótica, la parte más difícil es la de mantener el equilibrio de robot, ya que se necesita de una gran cantidad de sensores y actuadores para realizar la

tarea, además de que se sabe que la forma de caminar de las personas no es similar al igual que en los diferentes tipos de robots bípedos en la actualidad, pero gracias al desarrollo e innovación de este proceso por parte de los investigadores, se han generado conocimientos sobre la biomecánica asociada a la forma de caminar y los patrones de movimiento de los músculos y las demás partes involucradas en este proceso.

Entre más articulaciones tenga un robot, más destreza y capacidad tendrá para realizar tareas, pero la complejidad del diseño, construcción y control se vuelve más complejo [1]. Para poder construir un robot útil, podemos seguir dos enfoques: construir un robot especializado para una tarea en particular que pudiera llegar a ser compleja, o bien construir un robot universal que pueda realizar una amplia variedad de tareas más sencillas o de menor dificultad y tal vez solo en ciertos ambientes o situaciones.

En la actualidad existe una amplia variedad de robots humanoides y bípedos tanto prototipos desarrollados por grupos de investigación de distintas Universidades, así como robots construidos por empresas con tecnología de punta y gran presupuesto, y que algunos han salido al mercado.

El E0 en el año 1986 fue el primer intento de Honda de crear un robot humanoide con capacidad de caminar. Este robot era capaz de caminar en línea recta poniendo una pierna después de la otra, sin embargo su desplazamiento era muy lento, requiriendo de cinco segundos entre cada paso [2].

Más adelante, en el 2000, ASIMO, el robot humanoide más avanzado del mundo hace su debut. Este menudo robot es el resultado de catorce años de investigación por parte de la empresa japonesa Honda Co. Su desarrollo marca un conocimiento innovador sobre la mecánica de la locomoción bípeda. En el año 2005 el nuevo ASIMO se crea para aplicaciones profesionales tales como repartir café, entregar mensajes, empujar carritos, entre otras tareas, además de su nueva capacidad de correr a la velocidad de 6 Km/h [3].

El robot NimbRo-OP desarrollado por la Universidad de Bonn en Alemania, mide 95 centímetros y pesa 6.6 kilogramos, utiliza servomotores Dynamixel y el sistema operativo ROS diseñado especialmente para trabajos de robótica e inteligencia artificial, posee 20 grados de libertad, conexión WiFi y la característica más sobresaliente es que constituye un proyecto de plataforma abierta, diseñado para trabajos de investigación en campos como la inteligencia artificial [4].

El robot humanoide “HRP-4C”, desarrollado por un equipo científico del 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 reconoce la voz y puede imitar los movimientos del cuerpo humano, por lo que se podría utilizar tanto en la industria del entretenimiento, como sustituyendo a trabajadores humanos en las pruebas de seguridad en el ámbito industrial. El robot puede simular alegría, sorpresa o enfado gracias a los ocho motores ocultos bajo su rostro, que obedecen a las órdenes humanas. El humanoide mueve su cuerpo articulado de aluminio negro y plateado, gracias a otros treinta motores, que le permiten mover los brazos y las piernas, además de caminar [5].

2. Estrategia

El objetivo es diseñar y desarrollar un prototipo de un robot bípedo experimental de arquitectura abierta (utilizando plataformas como Arduino y Processing), que permita la libertad de modificar tanto el software como el hardware del robot bípedo, dando así a conocer una propuesta del diseño mecánico del robot, utilizando componentes comerciales, de bajo costo y de fácil adquisición; que sea capaz de mantener el equilibrio y realizar una caminata básica para un posterior análisis que nos permita construir una estrategia de locomoción heurística basada en un modelo de cinemática directa que sirva como ayuda para trabajos futuros en esta misma rama de la robótica. La figura a continuación muestra el proceso de la estrategia utilizada.

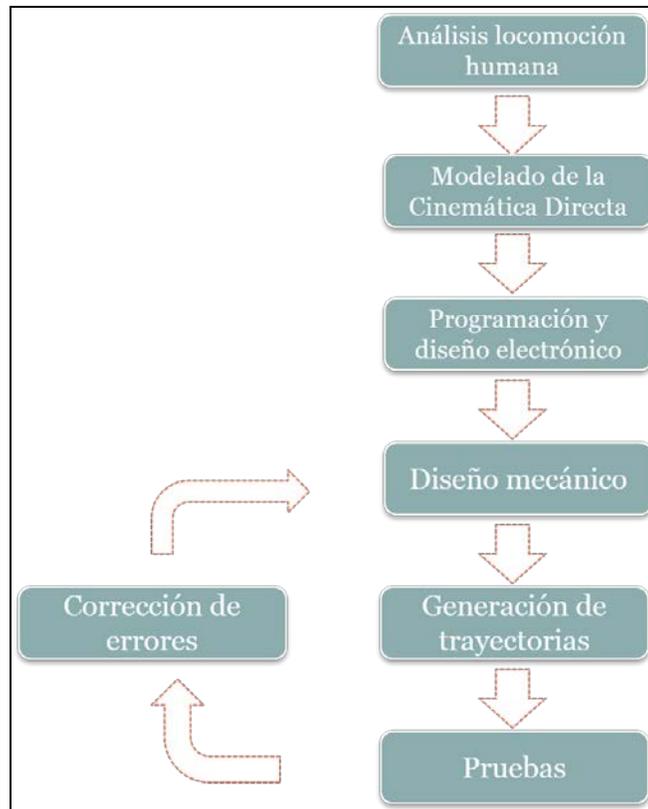


Figura 1. Estrategia propuesta utilizada.

2.1 Análisis de la locomoción humana

Lo primero que hay que entender en el análisis de la locomoción humana es que el caminar es un proceso cíclico, por lo tanto se puede dividir en fases. La manera como se determinan las fases que componen el proceso, depende de la forma como se esté analizando el proceso de caminar: a) se puede analizar haciendo referencia a todo el cuerpo y como es soportado por cada pierna, o b) se puede analizar el movimiento que realiza cada pierna por separado [6].

Al analizar el proceso de cada pierna por separado, se tiene que el ciclo del caminado consta de 2 fases: fase de soporte doble y fase de soporte único. La fase de soporte doble consta del movimiento que hacen las dos piernas cuando están apoyadas al suelo, por lo que el punto de equilibrio y el peso se distribuye entre las dos piernas; mientras que en la fase de soporte único solo una pierna a la vez está apoyada al suelo y la cual se encarga de mantener el peso del cuerpo y el equilibrio de un solo lado.

El prototipo del robot bípedo se basa en un diseño, en el cual se sigue una secuencia de movimientos mediante su cinemática directa para lograr una forma de caminar con un enfoque similar a la locomoción humana. Los movimientos son poses en diferentes estados, moviendo sus articulaciones un cierto ángulo y determinando las posiciones finales de sus eslabones de tal manera que permite al robot moverse y al ser repetitivo este proceso permite desplazarse al robot bípedo.

Para el planteamiento del equilibrio en la locomoción del robot bípedo se utilizó el criterio de estabilidad estática, al momento de dar un movimiento con la pierna derecha y no perder el equilibrio, inclinamos la estructura del robot a la izquierda de tal manera que desplazamos el peso del cuerpo hacia la izquierda. La pierna izquierda se convierte en el apoyo del cuerpo y se puede levantar la pierna derecha sin caerse, de esta forma se compensa el centro de gravedad. A este proceso se le

conoce como fase de soporte único en el cual el pie a que se hace referencia del soporte, es que se encuentra apoyado sobre el suelo y relativamente estacionario y es el encargado de mantener el peso del cuerpo, por lo que se convierte en la base del robot. El inicio de esta fase se observa cuando la pierna que se va a levantar deja el suelo siendo la punta del pie lo último que está en contacto con él; termina cuando se toca el suelo con el talón de la misma pierna, como se muestra en la figura 2.

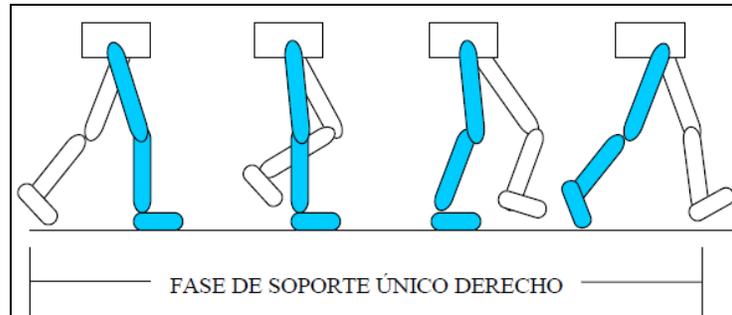


Figura 2. Fase de soporte único derecho [6].

El sistema que describe el movimiento de las piernas del robot consiste de 3 articulaciones prismáticas, una de ellas en el tobillo que permite inclinar la estructura del robot hacia un lado, las otras dos articulaciones se encargan del movimiento de flexión, desplazamiento de la rodilla y de la cadera respectivamente. La figura 3 muestra el diagrama de las articulaciones prismáticas con su sistema de coordenadas correspondiente de una pierna del robot [7][8].

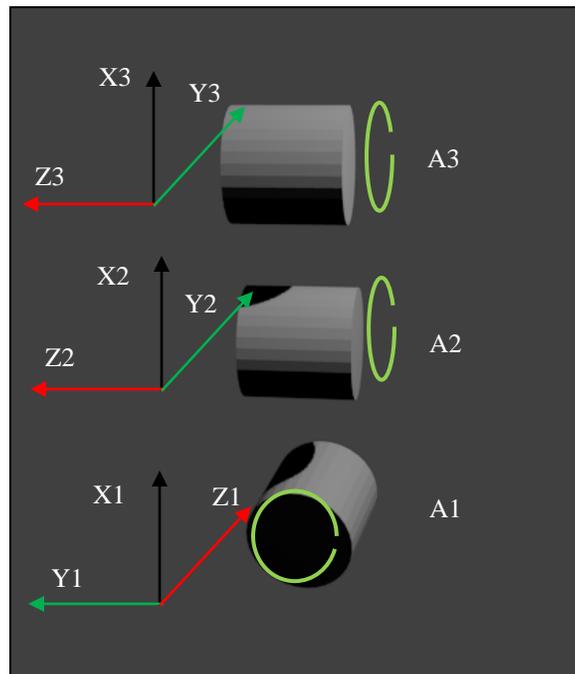


Figura 3. Diagrama de las articulaciones del robot bípodo.

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 1.

Tabla 1. Parámetros de Denavit-Hartenberg para la pierna del robot.

Articulación	θ	d	a	α
1	q_1	0	l_1	90°
2	q_2	0	l_2	0°
3	q_3	l_4	l_3	0°

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 [9]. 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:

$${}^0A_3 = {}^0A_1 * {}^1A_2 * {}^2A_3 \quad (1)$$

$${}^0A_3 = \begin{pmatrix} r_{nx} & r_{ox} & r_{ax} & p_x \\ r_{ny} & r_{oy} & r_{ay} & p_y \\ r_{nz} & r_{oz} & r_{az} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

Donde:

$$r_{nx} = \cos q_1 (\cos^2 q_2 + \cos q_3 \cos q_2 - 1)$$

$$r_{ny} = \sin q_1 (\cos^2 q_2 + \cos q_3 \cos q_2 - 1)$$

$$r_{nz} = \sin q_2 (\cos q_2 + \cos q_3)$$

$$r_{ox} = -\cos q_1 \cos q_2 (\sin q_2 + \sin q_3)$$

$$r_{oy} = -\cos q_2 \sin q_1 (\sin q_2 + \sin q_3)$$

$$r_{oz} = -\sin^2 q_2 - \sin q_3 \sin q_2 + 1$$

$$r_{ax} = \cos q_1$$

$$r_{ay} = -\cos q_1$$

$$r_{az} = 0$$

$$p_x = \cos q_1 (l_1 + l_4 + l_3 \cos(q_2 + q_3) + l_2 \cos q_2)$$

$$p_y = l_1 \sin q_1 - l_4 \cos q_1 + l_2 \cos q_2 \sin q_1 + l_3 (\cos q_2 \cos q_3 \sin q_2 - \sin q_1 \sin q_2 \sin q_3)$$

$$p_z = l_3 \sin(q_2 + q_3) + l_2 \sin q_2$$

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 el pie apoyado al piso. Utilizando este modelo, se realizó una animación para analizar el comportamiento, flexiones y movimientos posibles que pueda realizar una pierna del robot bípedo. La figura 4 muestra la animación de la cinemática directa realizada de la pierna con tres grados de libertad del robot bípedo con los parámetros obtenidos de Denavit-Hartenberg. Mediante una línea discontinua se muestra el eslabón final respecto a la base. Una demostración más detallada de la animación, así como una muestra del código generado, se puede observar en el siguiente enlace (Youtube: <http://youtu.be/EW6a4qZmk0U>).

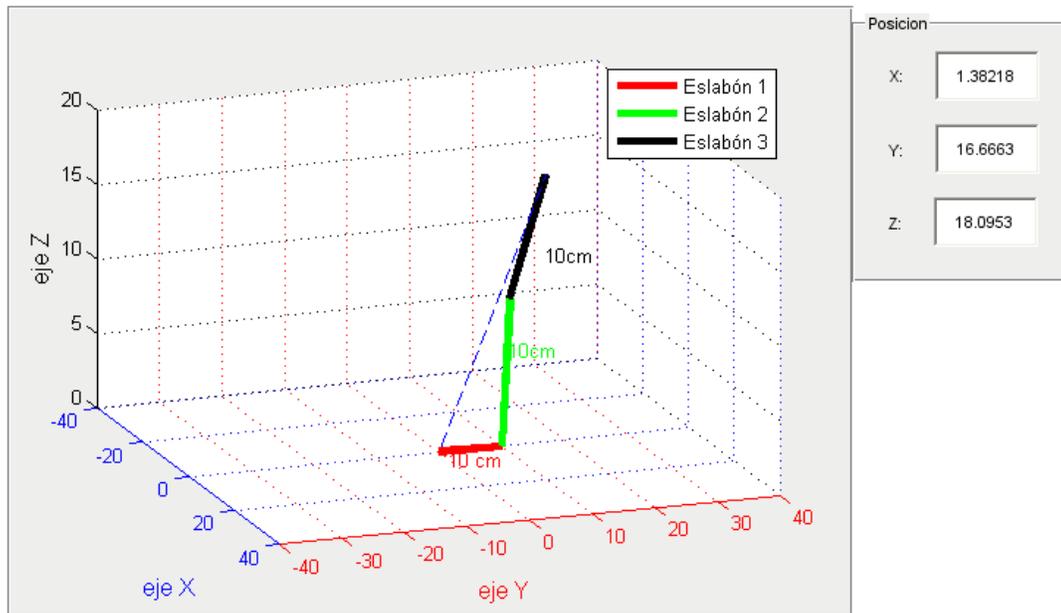


Figura 4. Animación cinemática directa de la pierna del robot bípedo.

Una vez realizado el análisis anterior, se procedió a diseñar el algoritmo a implementar en la caminata del robot, el cual se muestra a continuación:

1. Flexionar y levantar la pierna hacia delante mientras que el tobillo de la otra pierna gira hacia el costado opuesto de la pierna levantada para que el peso sea soportado por esa pierna y equilibrar el cuerpo.
2. Desplazar hacia delante la cadera de la parte de la pierna que está levantada y flexionar un poco la rodilla de la otra pierna.
3. Flexionar un poco más la pierna de apoyo, girar hacia delante el tobillo de la otra pierna y estirla hasta tener apoyo con el suelo y así queda distribuido el peso en las dos piernas.
4. Estirar y desplazar hacia delante la parte de la cadera de la pierna que soportaba todo el peso y girar el tobillo hacia delante para que siga apoyado en el piso y flexionar un poco la rodilla de la otra pierna.

2.2 Diseño y construcción del robot

El diseño del robot bípedo se efectuó considerando una locomoción humana constante, la cual consiste en caminar en una sola dirección. El esquema del exoesqueleto está representado como una cadera articulada que incluye las dos piernas constituidas por: un pie, una rodilla y un muslo; la cadera se encarga de unir las dos piernas por los muslos, como se muestra en la figura 5.



Figura 5. Robot bípedo de 6 grados de libertad.

Cada pierna consta de articulaciones rotacionales: el tobillo, la rodilla y la cadera unidas por eslabones entre cada una de las articulaciones. Las piernas solo tienen movimiento sobre dos ejes, por lo que los movimientos que pueden realizar son limitados para el proceso de la caminata a ejecutar.

Para la elaboración del prototipo del robot bípedo se realizaron comparaciones de materiales como se muestra en la tabla 2 con la final de determinar cuál material es el más adecuado para la construcción del robot.

Tabla 2. Comparación de materiales.

Material	Maleabilidad	Resistencia	Peso
Madera	Baja	Media	Medio
Acrílico	Media	Media	Baja
Aluminio	Alta	Alta	Medio
Plástico	Alta	Medio	Bajo

Se utilizó un sistema de prueba y error en la manipulación de materiales de bajo costo (acrílico y madera) para la construcción del prototipo del robot bípedo, porque de acuerdo con los parámetros determinados para la construcción deberían ser de costo bajo, fácil maleabilidad y ligeros, ya el objetivo es construir un prototipo sencillo.

Como resultado final se utilizó la madera por su resistencia, maleabilidad y facilidad para la construcción y durabilidad de las piezas.

La estructura del robot bípedo es propia ya que el diseño de las piezas se adaptó a las dimensiones de los servomotores Power-HD 1160 (28 x 13.2 x 29.6 mm), los cuales se escogieron por

su fácil implementación, bajo consumo de energía y costo accesible. Las dimensiones de las piezas expresadas en milímetros se muestran en la siguiente figura.

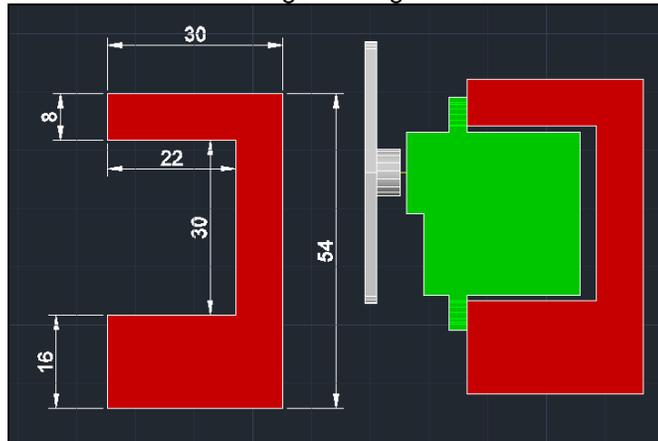


Figura 6. Diseño de pieza para sujeción del servomotor Power-HD 1160.

Las piezas están diseñadas de forma prismática para la sencilla unión entre las articulaciones: muslo, rodilla y pie, que conforman la pierna del robot bípedo (Figura 6), evitando lo más posible la fricción de las piezas y los servomotores de tal manera que el eje de giro de la articulación tenga libertad de movimiento.

El diseño particular de la pieza que une los servomotores del muslo y rodilla del robot bípedo es una adaptación propia que se implementó de acuerdo al tipo de movimiento que el robot tiene que generar como se muestra en la figura 6, permite una mejor estabilidad al permanecer los servomotores en una posición rígida y las aspas realicen el movimiento de las piezas hacia arriba y abajo; este mismo fenómeno sucede con los servomotores que están unidos a la cadera, que al realizar el servomotor el movimiento de rotación levanta toda la pierna del robot hacia delante y atrás; El servomotor que se encuentra en medio de la estructura se encarga de flexionar la pieza que conforman la rodilla y el pie del robot bípedo; simulando el punto de unión entre el primer y segundo eslabón como se puede observar en el modelado cinemático realizado. La tabla 3 muestra las características específicas de peso, dimensiones y propiedades mecánicas y electrónicas del robot bípedo mientras que la figura 7 muestra el diseño completo de la pierna del robot con sus dimensiones expresadas en milímetros y mostrando la posición de los servomotores que corresponden a cada una de las articulaciones.

Tabla 3. Características del robot bípedo.

Característica	Valor
Peso	410gr
Altura	20cm
gAncho	16cm
Grosor	6.5cm
Grados de libertad	6 (3 por pierna)
Torque	0.5 Kg-cm
Alimentación	5 Volts
Corriente	40 mA por Servomotor



Figura 7. Diseño de la pierna del robot bípedo.

2.3 Diseño electrónico y programación

Se construyó el robot con un sistema de arquitectura abierta, los dispositivos electrónicos comerciales y open source, permiten modificar tanto el hardware como el software de manera parcial o total. El hardware está basado en el microcontrolador de la placa Arduino UNO y los servomotores Power HD-1160, con un torque de 2Kg-cm y un consumo de hasta 160 mA a 4.8 V [10].

Los servomotores permite controlar la posición con una rotación de 0-180°, permitiendo establecer y mantener una posición fija, respetando el torque del motor. Los servomotores se controlan usando una Modulación Por Ancho de Pulso (PWM) que genera una onda cuadrada en donde cambia la frecuencia de pulso y al variar este ancho de pulso se consigue modificar el ángulo de giro del servomotor.

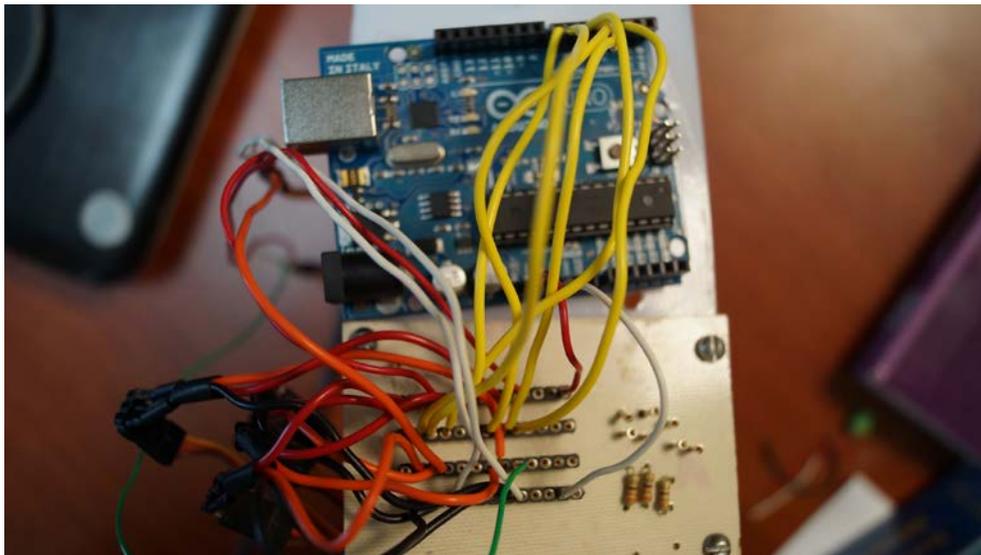
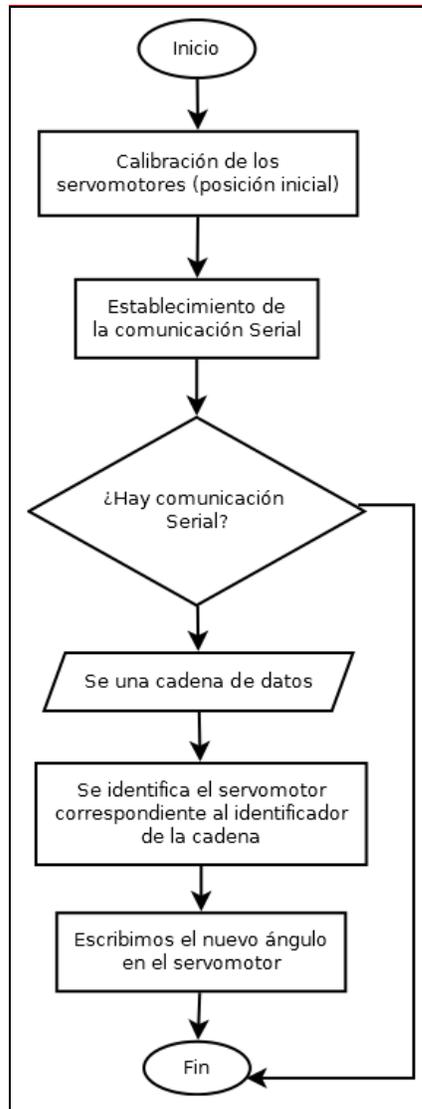


Figura 8. Placa de alimentación de los servomotores y placa Arduino Uno.

Arduino es una plataforma de electrónica abierta para la creación de prototipos basado en software y hardware flexibles y fáciles de utilizar, el software está basado en el lenguaje de programación propio de Arduino (basado en Wiring) y el entorno de desarrollo Arduino (basado en Processing) [11]. La tarjeta Arduino tiene 14 pines digitales de entrada / salida (de las cuales 6 se puede utilizar como salidas PWM) y 6 entradas analógicas.

Se diseñó una placa para la alimentación y control de los servomotores que va unida a la placa de Arduino UNO como se puede observar en la figura 8. Estas dos placas forman la parte electrónica del robot que se encuentra situada en el torso del robot de forma que el peso quede equilibrado para afectar lo menos posible el comportamiento del robot, como lo muestra la figura 5. La alimentación del circuito se da mediante la placa Arduino que está conectada vía USB a una computadora, por lo que el voltaje proporcionado es de 5 Volts y con un máximo de corriente de 500mA. La corriente total que consume el circuito varía dependiendo el toque que van requiriendo los servomotores para realizar los movimientos. La corriente promedio obtenida de varias mediciones con distintos movimientos y poses fue de 180mA, pero puede llegar hasta 230mA cuando los servomotores están en movimiento y manteniendo una posición donde se cargue el peso en una de las piernas del robot.



```

//mientras esté disponible el serial
while (Serial.available()) {
  // obtenemos un nuevo byte y hacemos una resta en código ASCII
  // para la conversión del byte a número; 0 = 48
  int inChar = Serial.read() - '0';

  //Processing envía la información de cada servo separado por una coma
  //cuando encontramos una coma procesamos los valores obtenidos
  if (inChar == ',' - '0'){
    double valor = 0; //variable para almacenar el ángulo
    int i = contador - 1; //variable para la potencia a la que se va
    //elevar el dígito en su correspondiente posición
    contador = 0;
    //ciclo para convertir cada dígito a su valor relativo a la posición
    for (; i >= 0; i--){
      valor = valor + inputString[contador] * pow(10, i);
      contador++;
    }
    //reiniciamos el contador de los dígitos
    contador = 0;
    Serial.println(valor);
    servos[cServos] = valor; //almacenamos el valor convertido
    cServos++; //aumentamos el contador de los servos
    //cuando tenemos los valores de todos los servos
    if (cServos == NUMERO_SERVOS){
      //escribimos los valores de los servos
      Cadera_R.write(servos[0]);
      Rodilla_R.write(servos[1]);
      Tobillo_R.write(servos[2]);
      Cadera_L.write(servos[3]);
      Rodilla_L.write(servos[4]);
      Tobillo_L.write(servos[5]);
      cServos = 0; //reiniciamos el contador de los servos
    }
  } else {
    //almacenamos el dígito obtenido en el arreglo y aumentamos el contador
    inputString[contador] = inChar;
    contador++;
  } //fin del if-else
} //fin del while
  
```

Figura 9. Diagrama de flujo y fragmento de código del software del robot bípedo.

Mediante comunicación serial se controlaron los servomotores del robot para la generación de secuencias, mediante un mecanismo de prueba y error. El diagrama de flujo de programa implementado en Arduino y un fragmento del código, se muestra a continuación.

3. Resultados

Uno de los importantes resultados obtenidos es la animación que nos permite observar y analizar la cinemática directa primeramente de la pierna de un robot con tres grados de libertad para posteriormente pasar al desarrollo completo del robot bípedo de seis grados de libertad, es decir, tres grados por pierna.

En lo referente a la animación de una sola pierna del robot bípedo primeramente podemos decir que la animación realizada de la cinemática directa es una técnica usada en gráficos por computadora, para calcular la posición de partes de una estructura articulada a partir de sus

componentes fijas y las transformaciones inducidas por las articulaciones de la estructura. Como observamos vamos a tener la última posición del eslabón final con respecto al inicial que es fijo.

Utilizando esta parte de la investigación se logró tener una referencia para la consecuente secuencia de movimientos que se desarrolló para el robot bípedo. 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.

También se logró la implementación de movimientos cíclicos que nos permiten de primera instancia caminar sobre una superficie, es decir, únicamente se obtuvo un desplazamiento frontal. Asimismo hay que destacar que el robot bípedo no posee la capacidad de rotar hacia otra dirección; las piernas se deslizan por el suelo manteniendo en todo momento contacto con el suelo, por lo cual no exista la posibilidad de que el robot pueda caer. Sin embargo, se percibe que pueden mejorar dichos movimientos cíclicos basándonos en nuestro sistema de referencias obtenido con la cinemática directa, efectuando un rediseño adecuado del robot para mayor movilidad en las piernas.

Este prototipo es importante porque se pueden analizar y detectar los errores de diseño, elección de material y el estudio para la implementación de servomotores de uso específico en robótica.

Para lograr la locomoción del robot se utilizaron tres diferentes estados de desplazamiento que se obtuvieron conforme al comportamiento que mostraba la estructura en relación con los movimientos generados por los servomotores. Los estados de desplazamiento del robot y los movimientos realizados por los servomotores (representados por posiciones angulares) se muestran en la tabla 3. Un ejemplo de las pruebas realizadas para la generación de secuencias del robot bípedo, así como una muestra de los resultados obtenidos, se puede observar en el siguiente video (youtube: <https://www.youtube.com/watch?v=shSf4Hga8xQ>).

Tabla 4. Representación de posiciones angulares.

Servomotor	1era posición	2da posición	3era posición
Cadera D.	40°	90°	40°
Rodilla D.	140°	90°	140°
Pie D.	100°	90°	100°
Cadera I.	140°	90°	140°
Rodilla I.	40°	70°	40°
Pie I.	110°	80°	110°

La posición inicial de los servomotores es de 90°, el desplazamiento de la posición inicial a la 1era posición se requiere para darle un estado al robot donde pueda ciclar el movimiento de locomoción. Las 3 posiciones mostradas en la tabla 4 son el ciclo de locomoción del robot bípedo que se muestran en la figura 10.

4. Conclusiones

En este trabajo se describió el diseño y el desarrollo un robot bípedo con la finalidad de comprender los aspectos fundamentales de la robótica humanoide y en específico los elementos que intervienen en el desarrollo de un robot bípedo.

Se realizó un modelado matemático de la cinemática directa del robot bípedo así como una simulación que sirvió como punto de partida para la construcción del prototipo, aportando conocimientos experimentales para la investigación, siendo de utilidad este prototipo como antecedente para futuros proyectos de esta área.

Como se mencionó en el apartado de resultados es imperativo y posible mejorar los movimientos mecánicos y cíclicos del robot bípedo no solamente con lo establecido previamente como la cinemática directa si no también con el desarrollo completo de la cinemática del robot bípedo, es decir, considerando la cinemática inversa y diferencial, así como en un futuro la correcta implementación de algoritmos de control como un PID.

Asimismo se propone como trabajo futuro, diseñar y construir un robot bípedo que realice su locomoción de forma más similar a la humana, implementando un sistema con 12 grados de libertad, tomando como base de desarrollo los resultados aquí expuestos, además de la realización de un modelado matemático más elaborado que nos permita analizar tanto la cinemática como la dinámica asociada al proceso de caminar en éste tipo de robots.

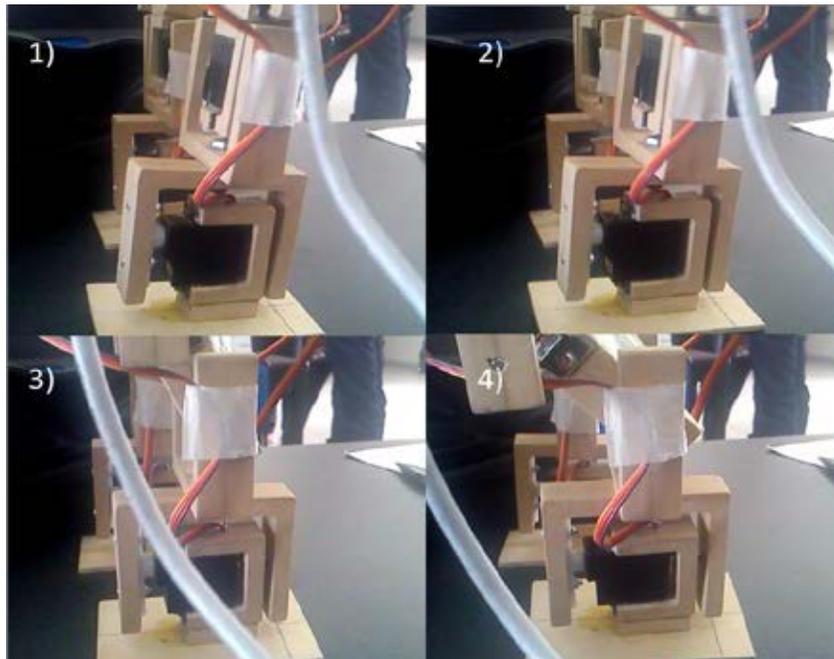


Figura 10. Secuencia de movimiento de la pierna derecha.

Referencias

- [1] Aníbal B., *“Robotica (manipuladores y robots móviles)”*, Alfaomega – Marcombo, España, 1ra edición, 2001.
- [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: 10 de julio de 2013].
- [3] ASIMO website, <http://asimo.honda.com/> [Fecha de consulta: 10 de julio de 2013].
- [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] Craig J., *“Introduction to Robotics Mechanics and Control”*, Pearson Education Inc, United States of America, 3ra edición, 2005.

[8] Spong M., Hutchinson S., Vidyasagar M., *“Robot Modeling and Control”*, John Wiley Sons, INC. 1st Edition, United States, 2005.

[9] Barrientos A., Peñin L., Balaguer C., Aracil R., *“Fundamentos de Robótica”*, MacGraw-Hill, España, 1ra edición, 1997.

[10] PoweHD-1160-A datasheet, <http://www.pololu.com/file/0J318/HD-1160A.pdf> [Fecha de consulta: 20 de julio de 2013].

[11] Arduino website, <http://arduino.cc> [Fecha de consulta: 20 de julio de 2013].