

Comparativa de algoritmos de locomoción bípeda para generar un caminado suave en un robot humanoide

Bipedal locomotion algorithms comparison to generate a smooth walk in a humanoid robot.

Arturo Gaona Guzman¹

¹Ingeniería Mecatrónica, DICIS
a.gaonaguzman@ugto.mx

Edgar Oswaldo Zamorategui Navarrete²

²Ingeniería en Comunicaciones y Electrónica, DICIS
eo.zamorateguinavarrete@ugto.mx

José Ricardo Valencia Ramírez³

³Ingeniería Mecatrónica, DICIS
jr.valenciamirez@ugto.mx

Felipe Trujillo Romero⁴

⁴Departamento de Electrónica, DICIS
fdj.trujillo@ugto.mx

Resumen

La investigación sobre locomoción de robots bípedos es el estudio y desarrollo de métodos para lograr estabilidad y equilibrio en el caminado basado en el caminado humano. Este caminado se analiza como una órbita periódica de una fase estable que alterna con una fase inestable. El caminado, por definición, es moverse a un paso moderado levantando y poniendo un pie delante de otro en turnos mientras el otro pie está sobre el suelo. Sin embargo, lograr que un robot humanoide bípedo camine no es una tarea sencilla. Por esa razón en el siguiente trabajo se presenta una comparativa para el control de la locomoción bípeda de un robot humanoide. Los algoritmos por comparar son: 1) el modelo de péndulo invertido lineal tridimensional y 2) el control mediante lógica difusa. Para evaluar los algoritmos seleccionados se realizarán dos pruebas principales, estas son: 1) Exactitud del punto objetivo y 2) Rapidez de ejecución de la trayectoria. Se validarán los métodos implementados en un robot humanoide NAO virtual. Al realizar las pruebas antes mencionadas se encontró que ambos algoritmos son una buena opción para dotar a un robot humanoide de la capacidad del caminado.

Palabras clave: Locomoción bípeda; 3D-LIMP; Lógica difusa; Robot humanoide, NAO.

Introducción

La investigación en robots antropomórficos es uno de los temas más populares e interesantes en el campo de la robótica. Científicos e ingenieros han desarrollado importantes proyectos relacionados con este tipo de sistemas, tales como locomoción bípeda, interacción humano-robot, respuesta estímulo, visión, reconocimiento de audio, manejo de material y ejecución de tareas. Un buen ejemplo de la búsqueda intensiva para mejorar el diseño de interfaz antropomórficos es el desarrollo de plataformas robóticas humanoides. Estos robots usualmente comparten una cinemática similar a los seres humanos, así como también su forma de percepción y comportamiento. Durante los últimos años, una gran cantidad de robots humanoides han sido construidos, tomando diferentes formas y tamaños que emulan distintos aspectos de la forma humana.

Una de las variaciones más notables en los robots humanoides es la presencia o ausencia de ciertas partes del cuerpo. En algunos robots humanoides el diseño sólo se centra en la cabeza y la cara, en otros, en la cabeza y los brazos y finalmente aquellos con cabeza, brazos y piernas. Una diferencia importante entre estos robots es el sistema de locomoción que utilizan para poder desplazarse en ambientes humanos. Los robots móviles generalmente se construyen usando las ruedas como sistema de locomoción debido a que son fáciles de controlar, tiene bajo costo en mantenimiento y se consiguen fácilmente. El problema con la locomoción con ruedas es que sólo funciona de forma confiable en los terrenos planos. Aunque esto es a

menudo el caso en entornos controlados, en el mundo real esto es menos frecuente. Por ejemplo, las escaleras y las elevaciones tales como bordes son obstáculos difíciles para los robots con ruedas. En cuanto al uso de soluciones biológicas para la locomoción terrestre, podemos ver que las piernas, en lugar de las ruedas, son más capaces de hacer frente a la clase de dificultades que nuestro medio ambiente impone al moverse en este tipo de escenarios. Esta clase de robots, ya sean hexápodos, cuadrúpedos o bípedos, todos ellos son sistemas muy dinámicos y flexibles y pueden moverse en muchos entornos y en condiciones diferentes. Además, son versátiles y robustos y representan alternativas muy interesantes a la locomoción con ruedas en la robótica. Aunque ha habido una cantidad significativa de progreso en entender lo que los mecanismos subyacentes son para la locomoción con extremidades, la cuestión de cómo estos mecanismos se utilizan para proporcionar una dinámica de marcha estable en diferentes terrenos para robots bípedos sigue siendo en gran medida sin respuesta. Es precisamente este problema de estabilidad que impide que las soluciones actuales para la locomoción bípeda robótica se utilicen en aplicaciones prácticas de manera común.

Por lo anterior se puede decir que hasta el momento no son robustos, o suficientemente capaces. Sin embargo, el desplazamiento bípedo que realizan los humanos es una prueba fehaciente de su efectividad y eficiencia. Por lo tanto, no sólo es interesante entender mejor la locomoción bípeda en circunstancias reales desde un punto de vista teórico, sino también desde un punto de vista práctico en la aplicación del desplazamiento bípedo de los robots humanoides.

Estado del arte

En 1997 Honda presentó su proyecto P3, que era de 163 cm de altura y 130 Kg. Tres años después, se puso en marcha el robot humanoide ASIMO (Sakagami et al. 2002), que era de 120 cm y 43 Kg. ASIMO está considerado como uno de los más avanzados en el campo de la robótica de humanoides. En la actualidad, aparte del robot ASIMO también se han creado y desarrollado trabajo con otros robots bípedos como: BIOLOID (Robotis 2022), HRP-2 (Kaneko et al. 2002), HRP-3 (Akachie et al. 2005), HRP-4 (Kaneko et al. 2011) y NAO (Gouaillier et al. 2009). En cuanto a su sistema de locomoción de los diferentes robots humanoides con dos piernas, toda la investigación realizada hasta el momento puede ser clasificada en forma general en dos grandes grupos. El primer grupo utiliza el conocimiento preciso de los parámetros del robot como por ejemplo la masa, localización del centro de masa y la inercia de cada eslabón del robot para poder realizar el patrón de caminado. Por lo tanto, se basa principalmente en un modelo muy exacto del robot (Montenegro and Rengifo 2021). Contrariamente, el segundo grupo usa conocimiento limitado de la dinámica del robot como por ejemplo la localización del centro de masa total, el momento angular total, etc. Puesto que el controlador conoce poco sobre la estructura del sistema, este enfoque se basa en un control de lazo cerrado (Zamparelli et al. 2018). A su vez en este segundo grupo, se han trabajado dos enfoques de locomoción bípeda: el primer enfoque se basa en el criterio del ZMP. El criterio indica que el bípedo es estáticamente estable si el ZMP se mantiene dentro de la región del soporte del pie en cada instante de tiempo (Chen, Wang, and Wang 2014). El segundo enfoque se basa en péndulo invertido, cuyos trabajos destacan el de Garzón, Villegas, y Alvarado (2007) que construyen el sistema más simple de locomoción bípeda en 2D denominado paso de compas. Consiste en dos patas rígidas, sin masa, articuladas en la cadera, una masa puntual en la cadera y unas puntas infinitesimales en los pies (Garzón, Villegas, and Alvarado 2007). Tiempo más tarde, se implementó el modelo del péndulo invertido. Este modelo es por mucho el más citado, documentado e implementado en la locomoción bípeda. En este modelo conceptual, la pierna de apoyo es modelado como un péndulo invertido rígido que es pivoteado en el tobillo que permite que el centro de masa (CoM) del cuerpo se mueva en arco, conservando la energía mecánica (Sugihara, Nakamura, y Inoue 2002). Idealmente no es requerido trabajo para mover el cuerpo y no necesita torque en el tobillo para soportar su peso. Para pasos más largos y rápidos no se incrementa el gasto de energía. El modelo funciona a velocidades lentas, pero comienza a fallar a medida que aumenta la velocidad.

El modelo tiende a ser preciso durante la fase de balanceo, pero no durante el apoyo dual. Estas observaciones sugieren que el péndulo invertido no modela las transiciones paso a paso, hecho que también ha sido citado en los exámenes de conservación de la energía entre ciclos de caminata. El método captura varias propiedades de caminado, como la conservación del momento durante la fase de oscilación y el ascenso y descenso del COM. El modelo del péndulo invertido fue extendido a 3D por Tang, y Joo Er (2007) mejorando el sistema del péndulo invertido anteriormente mencionado. Este modelo resultó en una sobreestimación de la amplitud de trayectoria del COM. Sakka, Hayot, y Lacouture (2010) propusieron un modelo híbrido combinando el péndulo invertido y el modelo "seis determinantes del paso". Lo que se encontró a partir de esta combinación fue que el desplazamiento vertical del COM es más aplanado, así la trayectoria

se vuelve más parecida a la real en comparación con la IP-3D. Después de esto, Kajita, et al. (2001) mantuvo los principios del péndulo invertido y aplastó por completo el desplazamiento vertical. A este modelo lo denominó modelo de péndulo invertido lineal (3D-LIPM). Este modelo se deriva de un péndulo invertido 3D general cuyo movimiento está obligado a moverse a lo largo de un plano arbitrariamente definido. Permite un diseño de controlador separado para el movimiento sagital ($x-z$) y lateral ($y-z$), y simplifica mucho la generación de patrones de marcha. El 3D-LIPM es útil para el control de caminado en un espacio 3D, ya que se puede especificar velocidad y dirección que se desea caminar.

Métodos y materiales

¿Cuál es el significado de caminar? Oxford Advanced Learner's Dictionary da una definición concisa. **Caminar:** avanzar a un ritmo moderado levantando y bajando cada pie de manera alternada, de modo que un pie esté en el piso mientras el otro se levanta. Por lo tanto, al menos un pie debe estar en contacto con el suelo en cualquier momento durante la marcha. Existen dos tipos de caminado, a saber, caminado estático y caminado dinámico. En la caminata estática, la proyección del centro de masa nunca abandona el polígono de soporte durante la marcha. Por otra parte, en la caminata dinámica, existen periodos en los que la proyección del centro de masa abandona el polígono de soporte.

La mayoría de los robots de juguete realizan caminatas estáticas usando pies grandes. Esto no es interesante desde el punto de vista de la ingeniería de control, ya que es bastante fácil. Sin embargo, los pies humanos son demasiado pequeños con respecto a la altura del centro de masa para realizar caminatas estáticas. De hecho, estamos realizando caminatas dinámicas en nuestra vida diaria. El estilo de caminar con el que estamos tan acostumbrados se puede realizar mediante un control del equilibrio corporal total, que es esencialmente inestable. Por lo tanto, una máquina para caminado bípedo está más allá del alcance de la ingeniería mecánica convencional. Esta es la razón por la que tantos investigadores e ingenieros se sienten atraídos por las máquinas para caminado bípedo y los robots humanoides.

3D-LIPM

El modelo del péndulo invertido linealizado en 3D es derivado de un general péndulo invertido tridimensional cuyos movimientos están restringidos para moverse a lo largo de un plano definido arbitrariamente. Esto permite controladores de movimiento separados, para los planos sagital ($x-z$) y lateral ($y-z$), y así simplificar bastante la generación del patrón de caminado.

Cuando el robot bípedo soporta su cuerpo con una sola pierna, su dinámica dominante es representada por un simple péndulo invertido que conecta el pie de soporte y el centro de masa de todo el robot. En donde el pivote es representado por el tobillo del robot y la masa se representa por el centro de masa del robot. La posición de la masa $p = (x; y; z)$ es únicamente especificada por las variables de estado $q = (\theta_r; \theta_p; r)$ (Véase Figura 1.).

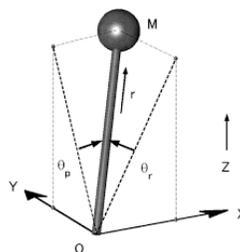


Figura 1. Péndulo 3D.

Cabe mencionar que este método es utilizado principalmente para la implementación del caminado de robots bípedos, aunque se pudiera aplicar a otros robots con extremidades con resultados relativamente aceptables.

Lógica difusa

La teoría de la lógica difusa proporciona un marco matemático que permite modelar la incertidumbre de los procesos cognitivos humanos de forma que pueda ser tratable por una computadora. Básicamente la lógica difusa es una lógica multivaluada que permite representar matemáticamente la incertidumbre y la vaguedad, proporcionando herramientas formales para su tratamiento (Zadeh 1988).

Se dice que, cualquier problema del mundo puede resolverse como: dado un conjunto de variables de entrada (espacio de entrada), se debe obtener un valor adecuado de variables de salida (espacio de salida). La lógica difusa permite establecer este mapeo de una forma adecuada, atendiendo a criterios de significado (y no de precisión).

La lógica difusa es una forma de procesar información basada en reglas lingüísticas y valores difusos para tomar decisiones. En este caso, se utiliza la lógica difusa para ajustar la velocidad de los motores de un robot humanoide de acuerdo con las entradas de sus sensores y las condiciones del entorno.

En este método se describe el funcionamiento del sistema mediante reglas o proposiciones lógicas y se realiza un motor de inferencia que permite el funcionamiento de este, siendo este robusto ante variaciones en las entradas. Dichas variaciones pueden ser entradas nuevas que el sistema nunca ha visto pero que a partir de las reglas con las que se entreno el sistema es capaz de inferir una salida coherente al funcionamiento deseado.

Cinemática del robot

La cinemática puede definirse como el estudio de los movimientos de los cuerpos independientemente de las causas que lo producen. En la robótica este movimiento se estudia con respecto a un sistema de referencia fijo. Así pues, el objetivo principal de la cinemática en robótica es describir analíticamente el movimiento espacial del robot como una función del tiempo y en particular por las relaciones entre la posición y orientación del efector final. Esto en base a las relaciones que toman sus coordenadas articulares.

Existen dos problemas fundamentales a resolver en la cinemática del robot: 1) el problema cinemático directo que consiste en determinar cuál es la posición y orientación del efector final del robot con respecto a su sistema de referencia fijo, conocido los valores articulares y 2) el problema cinemático inverso que consiste en encontrar los valores articulares para alcanzar una determinada posición y orientación deseada.

En la cinemática directa se utiliza fundamentalmente el álgebra vectorial y matricial para representar y describir la localización de un objeto en el espacio tridimensional con respecto a un sistema de referencia fijo. El espacio de las articulaciones revela muy poca información sobre cuál es la posición y orientación del efector final de la cadena. Así pues, la cinemática directa es el camino para pasar del espacio de las articulaciones al espacio tridimensional cartesiano. Dado que en una cadena cinemática de n grados de libertad $[q_1, q_2, \dots, q_n]^T$ la cinemática directa permite encontrar la posición (x, y, z) y la orientación (α, β, γ) del efector final de la cadena en el espacio tridimensional xyz , conociendo los valores de las articulaciones .

Ahora bien, para calcular la cinemática inversa de los robots existen varios métodos. sin embargo, debido a las ventajas de rapidez y efectividad de múltiples soluciones se utilizarán el método analítico y el método evolutivo. El método analítico para el cálculo de cinemática inversa [86], permite encontrar una solución cerrada. Esto es, encontrar una relación matemática explícita que presenta, entre otras, las siguientes ventajas:

1. En muchas aplicaciones, el problema cinemático inverso ha de resolverse en tiempo real.
2. Al contrario de lo que ocurría en el problema cinemático directo, con cierta frecuencia la solución del problema cinemático inverso no es única; existiendo diferentes n -tuplas $[q_1, q_2, \dots, q_n]^T$ que posicionan y orientan el extremo del robot del mismo modo.

En el caso del método evolutivo, este es un enfoque alternativo que consiste en formular el problema cinemático inverso como un problema de optimización de alguna función objetivo adecuada de acuerdo con las tareas a desempeñar por el robot. En general, consiste en calcular el vector de coordenadas articulares

que minimice el error de posición y orientación del efector final respecto a un vector de coordenadas cartesianas deseadas. La principal ventaja de estos métodos es su estabilidad frente a métodos basados en matriz jacobiano y no es necesario el cálculo de ecuaciones que llevan un tedioso proceso algebraico para encontrar una solución.

Robot humanoide NAO

El robot humanoide que se utilizará para validar los algoritmos que se implementarán en este trabajo es el NAO H25 (Ver Figura X), diseñado y fabricado por la compañía francesa Aldebarán Robotics. NAO es un robot de tecnología de punta, programable y controlable mediante una interfaz de comunicación muy flexible. Permite realizar movimientos precisos y coordinados. Además, para facilitar su uso, lleva incorporadas una serie de funciones en C++ y Python para su sistema de locomoción, audición y visión.

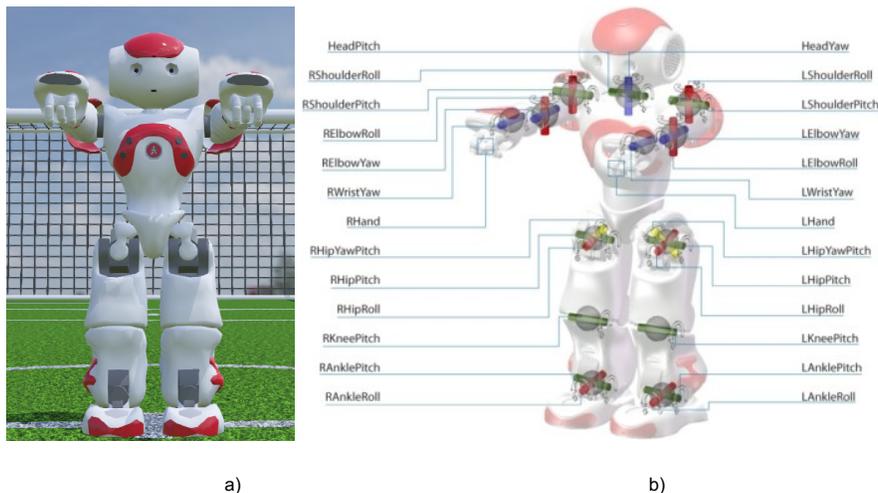


Figura 2. a) Robot NAO virtual , b) articulación del robot NAO.

El robot NAO mide 58cm de altura, pesa 4.3kg y la carcasa está fabricada en plástico. Usa una batería de litio de 21.6V, con una autonomía aproximada de 45 min. El consumo en uso normal es de 30W, y en actividad de 70W. Tiene un total de 25 grados de libertad, las cuales están distribuidas de la siguiente manera: 2 en la cabeza, 5 en cada brazo, 1 en cada mano, 1 en la pelvis y 5 en cada pierna. También incorpora 2 altavoces situados en los laterales de la cabeza, 4 micrófonos y 2 cámaras VGA. Además, tiene 4 sensores de ultrasonidos situados en el pecho, 4 sensores de fuerza en cada pie, sensores de tacto en la parte frontal de cada pie, sensores inerciales (acelerómetro de 3 ejes y giroscopio de 2 ejes), y en cada articulación sensores de posición con una resolución de 0.1 grados. Para hacerlo más vistoso, incorpora LEDs de colores en los ojos, orejas, pecho y pies. La conexión puede hacerse vía Wi-Fi IEE 802.11g o Ethernet.

Entorno simulación

Para ver el comportamiento de los algoritmos que se desarrollarán, se utilizará el entorno de simulación, Webots (Michel 2004). Webots es un entorno de desarrollo para modelar, programar y simular robots móviles, fue desarrollado por Cyberbotics y es el simulador estandarizado por la empresa Aldebarán Robotics, para simular el robot NAO. En la Figura 3, se puede observar la ventana principal del entorno de simulación de Webots. Este incluye diferentes elementos como editor de código, navegador de la estructura de la simulación, y la región donde se visualiza los elementos simulados, entre otros.

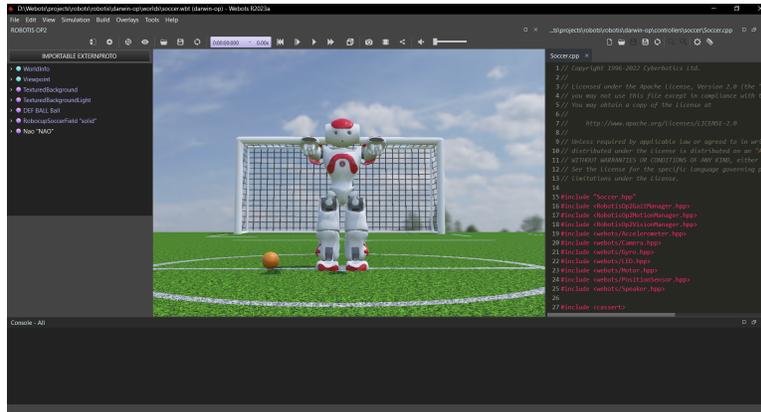


Figura 3. Pantalla principal del simulador Webots.

Con Webots se puede crear un mundo virtual con varios robots que interactúen entre ellos y realizar una simulación física precisa gracias al motor de física que posee. También permite grabar video en AVI o MPG las simulaciones. Se puede realizar la programación con diversos lenguajes, como, por ejemplo: C/C++, Java y Python.

Generación del patrón de caminado: 3D-LIPM

Cinemática inversa de la pierna izquierda

La cadena cinemática de la pierna del robot NAO tiene seis articulaciones, por lo tanto, es más difícil la solución. Debido a que las primeras tres articulaciones (LHipYawPitch, LHipRoll, LHipPitch) tiene ejes muy interesantes, el problema es posible resolverse. La matriz simbólica para esta cadena es bastante complicada, por lo tanto, para simplificarla se eliminarán las conocidas traslaciones de la cadena cinemática a partir de las relaciones siguientes:

$$T = A_{Base}^0 T_1^1 T_2^2 T_3^3 T_4^4 T_5^5 R_z(\pi) R_y(-\pi/2) A_6^{Final}$$

$$\hat{T} = (A_{Base}^0)^{-1} T (A_6^{Final})^{-1}$$

Ahora, se tiene una cadena desde el marco de referencia de la primera articulación hasta el marco de referencia de la última articulación. La primera articulación, LHipYawPitch, está por construcción rotado por sobre el eje x con respecto al marco de referencia del torso. Se rota el origen de la cadena sobre el eje x para hacer la primera articulación (LHipYawPitch) una articulación Yaw (Alineado con el eje z) como:

$$\tilde{T} = R_x\left(\frac{\pi}{4}\right) \hat{T}$$

Así, invertimos la matriz de transformación para formar la cadena inversa. Ahora sólo las articulaciones LAnkleRoll, LAnklePitch y LKneePitch afectan la posición:

$$T' = (\tilde{T})^{-1}$$

La matriz simbólica resultante es todavía bastante compleja, pero por ahora sólo necesitamos el bloque de traducción, que es relativamente simple:

$$\begin{aligned}r_{14} &= l_2 \sin \theta_5 - l_1 \sin(\theta_4 + \theta_5) \\r_{24} &= (l_2 \cos \theta_5 + l_1 \cos(\theta_4 + \theta_5)) \sin \theta_6 \\r_{34} &= (l_2 \cos \theta_5 + l_1 \cos(\theta_4 + \theta_5)) \cos \theta_6\end{aligned}$$

Dónde $l_1 = \text{ThighLength}$ y $l_2 = \text{TibiaLength}$. Ahora podemos encontrar θ_4 de la misma manera que encontramos θ_4 para los brazos. Nos centramos en el triángulo formado por la pierna con ThighLength , TibiaLength , y la distancia de la base al efector final en la cadena inversa como lados:

$$d = \sqrt{(s_x + p'_x)^2 + (s_y + p'_y)^2 + (s_z + p'_z)^2}$$

Donde $(s_x, s_y, s_z) = (0, 0, 0)$ es el nuevo origen y (p'_x, p'_y, p'_z) Es la posición del nuevo punto objetivo. Ahora, podemos usar la ley de los cosenos para encontrar el ángulo interior θ_4 entre los lados del triángulo del muslo y la tibia:

$$\theta'_4 = \arccos \left(\frac{l_1^2 + l_2^2 - d^2}{2l_1 l_2} \right)$$

Dado que representa un ángulo interior, mientras que la articulación LKneePitch se estira en la posición cero, el ángulo resultante en este intervalo se calcula mediante:

$$\theta''_4 = \pi - \theta'_4$$

Dado que el rango de la articulación LKneePitch incluye ángulos positivos y negativos, finalmente extraemos θ_4 como:

$$\theta_4 = \pm \theta''_4$$

A continuación, extraemos el ángulo θ_6 del bloque de translación usando r_{24} y r_{34} :

$$\begin{aligned}\frac{r_{24}}{r_{34}} &= \frac{p'_y}{p'_z} \\ \theta_6 &= \arctan \left(\frac{T'_{2,4}}{T'_{3,4}} \right)\end{aligned}$$

Posteriormente se extrae θ_5

$$\begin{aligned}\theta_5 &= \pi - \arcsin \left(\frac{T''_{2,4} (l_2 + l_1 \cos \theta_4) + l_1 T''_{1,4} \sin \theta_4}{l_1^2 \sin^2 \theta_4 + (l_2 + l_1 \cos \theta_4)} \right) \\ \theta_2 &= \pm \arccos \left(T'''_{(2,3)} \right) - \frac{\pi}{4} \\ \theta_3 &= \pi - \arcsin \left(\frac{T'''_{(2,2)}}{\sin \left(\theta_2 + \frac{\pi}{4} \right)} \right) \\ \theta_1 &= \pm \arccos \left(\frac{T'''_{(1,3)}}{\sin \left(\theta_2 + \frac{\pi}{4} \right)} \right) + \frac{\pi}{2}\end{aligned}$$

Finalmente θ_4

$$\theta_4 = \pm \left(\pi - \arccos \left(\frac{l_1^2 + l_2^2 - \sqrt{(0 - T'_{(1,4)})^2 + (0 - T'_{(2,4)})^2 + (0 + T'_{(3,4)})^2}}{2l_1 l_2} \right) \right)$$

Para la pierna derecha se realiza un cálculo similar.

Comportamiento del péndulo invertido lineal

El péndulo invertido lineal nos proporciona un trato matemáticamente fácil de su dinámica. Vamos a investigar el movimiento horizontal.

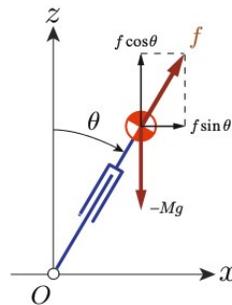


Figura 4. Relación del movimiento horizontal.

Al revisar nuevamente la Figura 4, vemos que la componente horizontal de la fuerza de retroceso f permanece mientras que la componente vertical se cancela por gravedad. El componente horizontal acelera el CoM horizontalmente, así tenemos:

$$M\ddot{x} = f \sin\theta$$

$$M\ddot{x} \frac{Mg}{\cos\theta} \sin\theta = Mg \tan\theta = Mg \frac{x}{z}$$

donde, x , z da el CoM del péndulo invertido. Al reescribir la ecuación anterior, obtenemos una ecuación diferencial para la dinámica horizontal del CoM.

$$\ddot{x} = \frac{g}{z}x$$

Como tenemos constante z en un péndulo invertido lineal, podemos fácilmente resolver esta ecuación diferencial ordinaria:

$$x(t) = x(0) \cosh(t/T_c) + T_c \dot{x}(0) \sinh(t/T_c)$$

$$\dot{x}(t) = x(0)/T_c \sinh(t/T_c) + \dot{x}(0) \cosh(t/T_c)$$

$$T_c = \sqrt{\frac{z}{g}}$$

donde T_c es la constante de tiempo dependiendo de la altura del CoM y la gravedad aceleración. La posición y la velocidad iniciales están dadas por $x(0)$, $\dot{x}(0)$, que juntas se llaman las condiciones iniciales.

Generación del patrón de caminado: Controlador lógico difuso

Empezamos con realizar la fuzzificación de las variables de entrada y salida. Por lo tanto, se considera dos variables de entrada para el sistema de locomoción bípeda: el ángulo de la pierna apoyada al suelo y el ángulo de la pierna balanceada. Estos ángulos se intercalan conforme se ejecuta el caminado, por comodidad se define ángulo 1 como pierna derecha y ángulo 2 como pierna izquierda.

Tomando en cuenta las restricciones de rango máximo para los ángulos de las piernas, se considera que ambos ángulos no pueden tener valores mayores al rango -45° a 45° . Otra restricción es que los ángulos solo serán iguales en 0° que es la posición de pie. Con estas restricciones se procede a modelar las funciones de membresía para la variable de salida que es definida como el ángulo de inclinación de un punto en el torso del bípedo que debe ser cercano a cero.

Para cada una de las piernas se consideran cinco funciones de membresía de tipo Gaussiana ya que el caminado bípedo es un ciclo continuo y suave. Las funciones de membresía se definen para las posiciones del pie: atrás, menos atrás, centro, menos adelante y adelante. Las funciones Gaussianas tienen diferentes amplitudes, estas se definen a continuación:

$$x_1, x_2 = \begin{cases} \text{atras} & e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-(-45)}{12} \right)^2} \\ \text{menos - atras} & e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-(-20)}{5} \right)^2} \\ \text{centro} & e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-(0)}{5} \right)^2} \\ \text{menos - adelante} & e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-(20)}{5} \right)^2} \\ \text{adelante} & e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-(45)}{12} \right)^2} \end{cases}$$

Para la variable de salida que es el ángulo del torso con respecto a un punto de referencia, se definen tres funciones triangulares. Estas funciones son:

$$y = \begin{cases} \text{menos - centro} & \frac{x-(-20)}{(-10)-(-20)}, \frac{20-x}{20-(-10)} \\ \text{centro} & \frac{x-(-20)}{(0)-(-20)}, \frac{20-x}{20-(0)} \\ \text{mas - centro} & \frac{x-(-20)}{(10)-(-20)}, \frac{20-x}{20-(10)} \end{cases}$$

Para la inferencia del sistema se basa en el conocimiento del resultado del análisis de la órbita del caminado. En el caminado, ambas piernas nunca tendrán la misma posición más que en la posición de inicio o reposo.

	Adelante-Atrás	Adelante-Menos Atrás	Adelante-Centro	Adelante-Menos Adelante	Adelante-Adelante
	Menos Adelante-Atrás	Menos Adelante-Menos Atrás	Menos Adelante-Centro	Menos Adelante-Menos Adelante	Menos Adelante-Adelante
Derecho	Centro-Atrás	Centro-Menos Atrás	Centro-Centro	Centro-Menos Adelante	Centro-Adelante
	Menos Atrás-Atrás	Menos Atrás-Menos Atrás	Menos Atrás-Centro	Menos Atrás-Menos Adelante	Menos Atrás-Adelante
	Atrás-Atrás	Atrás-Menos Atrás	Atrás-Centro	Atrás-Menos Adelante	Atrás-Adelante
	Izquierdo				

Figura 5. Posición de las piernas en los pasos de un caminado.

En la Figura 5, se muestran las posibles posiciones de las piernas de un caminado. En verde se muestran las posiciones posibles y en rojo las posiciones restringidas. En base a estas posiciones se definen las reglas difusas mediante proposiciones de Mamdani. A partir de la relación que se muestra en la Figura 5 se establecen 19 reglas difusas, de las cuales se muestran a continuación ejemplos de reglas pertenecientes a las sombreadas de color verde oscuro:

- IF (ángulo 1) is (centro) AND (ángulo 2) is (adelante) THEN (ángulo 3) is (centro)
- IF (ángulo 1) is (centro) AND (ángulo 2) is (centro) THEN (ángulo 3) is (centro)
- IF (ángulo 1) is (centro) AND (ángulo 2) is (atras) THEN (ángulo 3) is (centro)
- IF (ángulo 1) is (adelante) AND (ángulo 2) is (centro) THEN (ángulo 3) is (centro)
- IF (ángulo 1) is (menos adelante) AND (ángulo 2) is (centro) THEN (ángulo 3) is (menos centro)
- IF (ángulo 1) is (menos atras) AND (ángulo 2) is (centro) THEN (ángulo 3) is (mas centro)

- IF (angulo 1) is (atras) AND (angulo 2) is (centro) THEN (angulo 3) is (centro)
- IF (angulo 1) is (adelante) AND (angulo 2) is (atras) THEN (angulo 3) is (centro)

Finalmente, para la defuzzificación se eligió el método del centroide, el cual es el promedio de todo el espacio de salida. Este método queda definido como se muestra a continuación:

$$y = \frac{\sum_{i=1}^N y_i \mu(y_i)}{\sum_{i=1}^N \mu(y_i)}, \quad i = 1, 2, \dots, n,$$

Comparativa

Una vez desarrollado e implementado los dos métodos de locomoción bípeda, se analizará una comparativa entre estos dos métodos. El objetivo del análisis es obtener las ventajas y desventajas presentadas en cada uno de los enfoques. Los puntos que evaluar serán: 1) La exactitud del método para que el robot alcance el punto objetivo, y 2) la rapidez con la que el algoritmo ejecuta la trayectoria.

Exactitud del punto objetivo

Para poder evaluar la exactitud del movimiento del robot se eligió un punto en particular del escenario. Debido a que se está utilizando el entorno del estadio estándar de la Robocup, el cual está construido a escala para el robot NAO. En las pruebas realizadas el robot NAO se posicionará en el centro de la cancha. El balón será colocado en frente del robot, a una distancia de 1.325 mts desde el centro de la cancha. Por lo tanto, el objetivo del sistema de locomoción bípeda será lograr que el robot humanoide pueda finalizar su movimiento de caminado bípedo lo más cercano al balón.

En la Figura 6 se muestra el entorno con el robot y el balón en la cancha del simulador Webots. Este entorno se usó para evaluar el desempeño de ambos algoritmos.



Figura 6. Prueba del caminado mediante FLC.

Para verificar la posición del robot y el balón dentro del simulador Webots, se establece un marco de referencia fijo en el centro de la cancha. Los ejes están orientados en el mismo sentido que el marco de referencia local del robot que se posiciono en su torso. Es decir, el eje x va desde el centro estadio hacia la parte donde el robot está mirando, el eje y va desde el centro del estadio hacia el costado izquierdo del robot y el eje z va desde el centro hacia arriba. La Tabla 1 muestra los puntos inicial y final del robot en el plano transversal (x, y) después de las dos ejecuciones mediante FLC.

Posteriormente se realizó a nivel de simulación el caminado bípedo mediante el método 3D-LIPM. Las posiciones de partida (inicio del robot) y objetivo (balón) son las mismas utilizadas en el método mediante FLC. Los resultados se muestran en la Tabla 1 se muestran las posiciones iniciales y finales del robot así como el punto objetivo y el error de la posición final del robot de la prueba realizada mediante 3D-LIPM.

Tabla 1. Comparativa exactitud punto final

Método	Punto inicial [m]	Punto final [m]	balón [m]	Error [m]
3D-LIPM	(0.0,0.0)	(1.155,0.303)	(1.325,0.032)	(0.170, 0.271)
FLC	(0.0,0.0)	(1.120,0.305)	(1.325,0.032)	(0.205, 0.273)

Rapidez de ejecución de la trayectoria

En esta parte de la comparativa, se verificará la velocidad promedio alcanzada por los algoritmos de locomoción bípeda. Para realizar esta medición a nivel de simulación mediante el simulador Webots se utilizará nuevamente el estadio de la robocup. El robot inicia su trayectoria en el marco de referencia fijo, elegido en el centro del estadio de fútbol (vista en la sección anterior). El punto final será el balón colocado en frente del robot en su posición inicial en donde interseca con el círculo central del estadio, es decir a distancia de 1.325m. La Figura 7 muestra el escenario para la prueba de velocidad.



Figura 7. Prueba del caminado mediante 3D-LIPM.

Para poder medir la velocidad promedio de la trayectoria se tomará el tiempo que le lleva al robot de ir de la posición inicial(centro del robot) a la posición final(balón). Debido a que se conoce la distancia del punto objetivo (1.325 mts), se dividirá entre el tiempo que le tomo al robot terminar la trayectoria recta.

Las pruebas se realizaron primero utilizando el método mediante Lógica difusa y posteriormente se realizaron las pruebas utilizando el método del péndulo invertido lineal con las mismas condiciones con las que se realizó con FLC. La Tabla 2 muestra los resultados obtenidos de las pruebas de velocidad del caminado del robot realizado con ambos algoritmos FLC y 3D-LIPM.

Tabla 2. Comparativa rapidez movimiento

Método	Distancia [m]	Tiempo [s]	Velocidad [cm/s]
3D-LIPM	1.325	15.73	7.26
FLC	1.325	18.84	6.06

Una vez realizada las pruebas de velocidades de caminado con los dos métodos de locomoción bípeda se pueden destacar las diferencias sobresalientes de velocidades. El 3D-LIPM alcanza velocidades más altas debido a que tanto su cinemática inversa como su estabilizador de caminado utilizan metas analíticas. A diferencia al método de FLC, le toma tiempo aleatorio más largo para converger y por ende mayor gasto computacional. Es importante también destacar que el método 3D-LIPM puede alcanzar mayores velocidades, pero en cierto punto se vuelve inestable debido a los cambios de soporte y el robot se cae.

Conclusiones

Este trabajo se enfocó a una amplia serie de conceptos geométricos, cinemáticos y dinámicos, que se tomaron en conjunto para diseñar el generador de dos patrones de caminado para robots humanoides. Para alcanzar los objetivos del presente proyecto, se propusieron una serie de soluciones a los problemas más comunes presentes en los campos de estudio involucrados en la robótica.

Particularmente, este trabajo propuso, por un lado, una forma genérica de resolver cinemática a las cadenas cinemáticas del robot NAO H25 mediante un método inteligente y demostrando robustez a las singularidades. Los métodos desarrollados en este trabajo pueden ser emigrados a cualquier cadena cinemática con solo conocer sus parámetros D-H. también se mostró un método analítico completo para determinar cinemática directa e inversa del robot NAO H25, mostrando que es eficiente para poder realizar trabajos de estabilidad en el robot. Por otro lado, se propuso dos métodos eficientes para planificar caminado bípedo como lo son mediante el uso de FLC y mediante 3D-LIPM. En la locomoción bípeda mediante FLC tanto el planificador del patrón de caminado como el estabilizador de la trayectoria se realizó mediante FLC. En cambio, en la locomoción bípeda mediante 3D-LIPM la planificación bípeda realizó mediante uso del método del péndulo Invertido Linealizado.

Una vez implementados, probados y analizados cada uno de los métodos a nivel simulación se presentaron los rubros de exactitud de objetivo, y rapidez que cada método presentaba. El 3D-LIPM tenía ventajas en cuanto a la rapidez del movimiento, pero presentaba ser menos estable que el sistema realizado mediante FLC. Es posible hasta este punto concluir que según la aplicación se puede elegir que método utilizar ya que cada uno de los dos presenta sus ventajas y deficiencias.

Bibliografía/Referencias

- Sakagami, Y., R. Watanabe, C. Aoyama, S. Matsunaga, N. Higaki, and K. Fujimura. 2002. "The Intelligent ASIMO: System Overview and Integration." Pp. 2478–83 vol.3 in IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Vol. 3.
- Robotis. n.d. "Bioid Premium E-Manual." ROBOTIS E-Manual. Retrieved September 14, 2022 (<https://emanual.robotis.com/docs/en/edu/bioid/premium/>).
- Kaneko, K., F. Kanehiro, S. Kajita, K. Yokoyama, K. Akachi, T. Kawasaki, S. Ota, and T. Isozumi. 2002. "Design of Prototype Humanoid Robotics Platform for HRP." Pp. 2431–36 vol.3 in IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Vol. 3.
- Akachi, K., K. Kaneko, N. Kanehira, S. Ota, G. Miyamori, M. Hirata, S. Kajita, and F. Kanehiro. 2005. "Development of Humanoid Robot HRP-3P." Pp. 50–55 in 5th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, 2005.
- Kaneko, Kenji, Fumio Kanehiro, Mitsuharu Morisawa, Kazuhiko Akachi, Go Miyamori, Atsushi Hayashi, and Noriyuki Kanehira. 2011. "Humanoid Robot HRP-4 - Humanoid Robotics Platform with Lightweight and Slim Body." Pp. 4400–4407 in 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems.
- Gouaillier, David, Vincent Hugel, Pierre Blazevic, Chris Kilner, Jerome Monceaux, Pascal Lafourcade, Brice Marnier, Julien Serre, and Bruno Maisonnier. 2009. "Mechatronic Design of NAO Humanoid." Pp. 769–74 in 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation.
- Montenegro, Diego Alberto Bravo, and Carlos F. Rengifo F. 2021. "Generación de trayectorias de marcha para un robot humanoide a partir de captura de movimiento." *Ciencia en Desarrollo* 12(2). doi: 10.19053/01217488.v12.n2.2021.12446.
- Zamparelli, Alessio, Nicola Scianca, Leonardo Lanari, and Giuseppe Oriolo. 2018. "Humanoid Gait Generation on Uneven Ground Using Intrinsically Stable MPC **This Work Is Supported by the EU H2020 Project COMANOID." *IFAC-PapersOnLine* 51(22):393–98. doi: 10.1016/j.ifacol.2018.11.574.
- Chen, Guangrong, Junzheng Wang, and Lipeng Wang. 2014. "Gait Planning and Compliance Control of a Biped Robot on Stairs with Desired ZMP." *IFAC Proceedings Volumes* 47(3):2165–70. doi: 10.3182/20140824-6-ZA-1003.02341.

- Garzón, Máximo Alejandro Roa, Camilo Villegas, and Diego Alexander Garzón Alvarado. 2007. "Modelling, Stability and Biomechanical Implications of Three DOF Passive Bipedal Gait." *Ingeniería e Investigación* 27(2):77–84. doi: 10.15446/ing.investig.v27n2.14833.
- Sugihara, T., Y. Nakamura, and H. Inoue. 2002. "Real-Time Humanoid Motion Generation through ZMP Manipulation Based on Inverted Pendulum Control." Pp. 1404–9 vol.2 in *Proceedings 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.02CH37292)*. Vol. 2.
- Tang, Zhe, and Meng Joo Er. 2007. "Humanoid 3D Gait Generation Based on Inverted Pendulum Model." Pp. 339–44 in *2007 IEEE 22nd International Symposium on Intelligent Control*.
- Sakka, Sophie, Chris Hayot, and Patrick Lacouture. 2010. "A Generalized 3D Inverted Pendulum Model to Represent Human Normal Walking." Pp. 486–91 in *2010 10th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*.
- Kajita, S., F. Kanehiro, K. Kaneko, K. Yokoi, and H. Hirukawa. 2001. "The 3D Linear Inverted Pendulum Mode: A Simple Modeling for a Biped Walking Pattern Generation." Pp. 239–46 vol.1 in *Proceedings 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Expanding the Societal Role of Robotics in the the Next Millennium (Cat. No.01CH37180)*. Vol. 1.
- Zadeh, L. A. 1988. "Fuzzy Logic." *Computer* 21(4):83–93. doi: 10.1109/2.53.
- Michel, Olivier. 2004. "Cyberbotics Ltd. Webots™: Professional Mobile Robot Simulation." *International Journal of Advanced Robotic Systems* 1(1):5. doi: 10.5772/5618.