

Estrategias de adaptabilidad estáticamente estables al cambio de terreno para un robot caminante de seis extremidades

X. Yamile Sandoval Castro^{a,*}, Eduardo Castillo Castañeda^b

^aCONACYT-Instituto Politécnico Nacional. Av. Insurgentes Sur 1582, Col. Crédito Constructor. Del. Benito Juárez C.P. 03940, Ciudad de México.

^bInstituto Politécnico Nacional. Cerro Blanco 141, Colinas del Cimatario. C.P. 76090. Santiago de Querétaro, Querétaro, México.

Resumen

Este artículo presenta la cinemática directa e inversa en posición de un robot caminante hexápodo, tomando en cuenta la pose del tórax. También se presentan tres estrategias de adaptabilidad al terreno que garantizan la estabilidad: *orientación constante del tórax*, *estrategia geométrica* y *estrategia de emergencia*. El diseño de las estrategias de adaptabilidad considera los parámetros geométricos y el peso de todos los elementos. La cinemática directa e inversa es esencial para redireccionar la postura del robot caminante. La estabilidad de las estrategias es evaluada con el **margen normalizado de estabilidad energético** (NESM). Las estrategias fueron simuladas en software especializado y se validaron experimentalmente.

Palabras Clave: cinemática directa, cinemática inversa, orientación constante del tórax, estrategia de emergencia, estrategia geométrica, estabilidad

Terrain adaptability strategies statically-stable for a walking hexapod robot

Abstract

This article describes the forward and inverse kinematic model of position of the Hex-piderix robot, taking on account current attitude. Also three strategies to get terrain adaptability to the robot, guaranty statically stability are presented: constant orientation of the thorax, geometric strategy and emergency strategy. The designing of the adaptability strategies are considered geometric parameters and the weight of each of its components; both direct and inverse kinematics in position is essential for the robot could redirect. Statically stable is evaluated by using Normalized Energy Stability Margin. Adaptability strategies were simulated in MatLab and experimentally validated by using LabView.

Keywords: Forward kinematics; Inverse kinematics; Adaptability; Constant orientation of the thorax; Emergency strategy; Geometric strategy; Stability

1. Introducción

Recientemente, muchas arquitecturas de gran altura como edificios, plantas nucleares, tanques repositivos y puentes se están construyendo una forma geométrica más compleja. El uso de robots en la construcción, mantenimiento, inspección, limpieza o rescate es de gran ayuda, por la complejidad de la tarea o el bajo costo que implica su uso, pero especialmente por el peligro que éstas implican. Para llevar a cabo dichas misiones en estructuras complejas, los robots deben tener buena capacidad de adaptabilidad a su entorno tanto en la marcha como en el ascenso y descenso. Así, entre los diferentes tipos de robots el hexápodo es una de las soluciones más adecuadas para estas aplicaciones, gracias a su gran adaptabilidad tanto en terreno irregular como en estructuras de gran altura.

Varias investigaciones acerca de robots caminantes y escaladores (WCR) han reportado distintos tipos de ambientes, así como terrenos irregulares, paredes y pendientes. Se han desarrollado numerosos robots que tienen un rendimiento excepcional durante su caminata. Entre ellos BigDog que ha emergido como un excelente robot con estabilidad dinámica, (Raibert et al., 2008). Algunos robots capaces de adaptarse al terreno irregular fueron presentados por (Zhang et al., 2014), (Mao et al., 2014), (Jun et al., 2016), (Pollack et al., 2004), (Komatsu et al., 2014), etc. Sin embargo, algunos robots poseen diferentes estrategias que les permiten realizar sus tareas ante la presencia de perturbaciones, como cambios en el campo o la transición de la tierra al agua. El robot TITAN XIII, puede adaptarse a ligeros cambios en el terreno mediante un mecanismo pasivo conectado en

*Autor para correspondencia: yamile.sandoval.castro1@gmail.com

la punta de cada extremidad, (Kim et al., 2016). (Rushworth et al., 2015) propusieron una estructura de robot hexápodo con extremidades libres para caminar en diferentes tipos de terreno como rampas o superficies escalonadas, obteniendo una marcha óptima basada en el margen de estabilidad. (Carabin et al., 2016) presentan un sistema articulado de 4 ruedas, donde se muestra la posibilidad de adaptarse a terrenos irregulares gracias a un grado pasivo central de la libertad. (Loc et al., 2010) presentaron el desarrollo de un robot que se puede adaptar a diferentes tipos de terreno, tales como pendientes y superficies verticales gracias a una compleja fusión de sensores el robot puede planificar la marcha en terrenos irregulares. (Görner and Stelzer, 2013) implementaron en el robot DLR varios sensores como una cámara, sensores ultrasónicos e IMU, de esta manera fue posible estimar la cinemática directa de cada extremidad. Un robot capaz de caminar en contra del viento se reporta por (Taniwaki et al., 2008), cuyo objetivo es explorar el campo y recolectar datos agronómicos del suelo, tales como nutrientes, temperatura, humedad y crecimiento de la planta; para lograrlo el robot lleva consigo un arreglo para detectar la dirección del viento que consta de 4 sensores de flujo de aire. Con la información recabada del arreglo de sensores el robot es capaz de superar perturbaciones frente al viento. (Sun et al., 2016) propusieron un mecanismo de paleta excéntrica para integrar el movimiento de remo en un mecanismo tradicional de ruedas en un robot cuadrúpedo. Varios modos de locomoción fueron incluidos, rodar con ruedas, gatear con las piernas, caminar, remar, el remo oscilante y el balanceo asistido con paleta.

(Kimura and Fukuoka, 2006) diseñaron un sistema neuromecánico. La adaptación de movimiento se puede integrar en función de la dinámica de los sistemas mecánico y neuronal. El diseño de un elemento variable pasivo-flexible (VPC) fue desarrollado por (Koco et al., 2016), el cual se utilizó como implante en la parte inferior de la pierna robot cuadrúpedo completamente eléctrico; el sistema VPC permite adaptarse al robot a distintos tipos de terrenos.

(Rejas et al., 2015) presenta un sistema de mapeo de ambientes y detección 3D que utiliza un sensor láser 2D con un sistema de rotación; el sistema es capaz de generar una nube de puntos en tiempo real, detectando así obstáculos y produciendo mapas para vehículos terrestres no tripulados.

Hay varias formas de lograr adaptabilidad al terreno; algunas de estas estrategias se llevan a cabo a través de un sistema mecánico, por fusión de sensores o el uso de algoritmos de control. Sin embargo, es importante que las estrategias de adaptabilidad se puedan evaluar con algún método de estabilidad estático o dinámico, ya que cuando el robot se desplaza en terreno irregular puede perder equilibrio y eventualmente caer. Por otro lado, los algoritmos computacionales deberían ser ligeros para poder ser implementarse en sistemas integrados, ya que muchos de estos mecanismos suelen ser autónomos; cuando se tiene una fusión de sensores muy sofisticados se incrementa el gasto computacional.

En este artículo se propone una estrategia de adaptabilidad basada en un modelo geométrico que toma en cuenta tanto los parámetros geométricos del robot como la cinemática directa e inversa en posición de cada extremidad; además de usar algunos sensores de distancia para detectar que triada se encuentra tocando la superficie de apoyo y un sensor IMU para estimar la

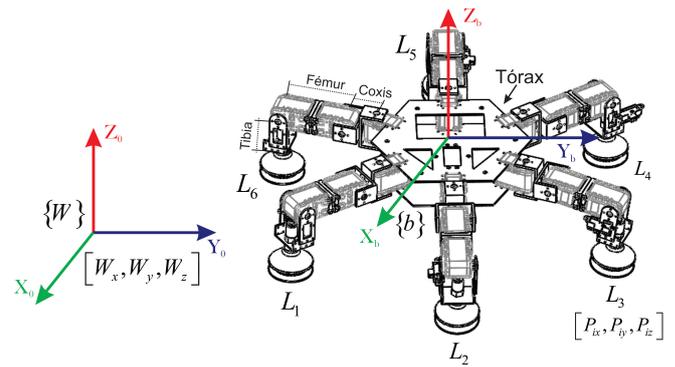


Figura 1: Morfología del robot caminante de 6 extremidades.

postura del robot. Se presentan estrategias de bajo costo computacional, que utilizan pocos sensores y aprovechan en su totalidad el análisis cinemático del robot. Se presenta también la evaluación de la estabilidad estática para distintas posturas. Las estrategias fueron validadas experimentalmente.

2. Descripción del robot

La arquitectura básica propuesta para el robot caminante de 6 extremidades es la mostrada en la Figura 1, el marco de referencia $\{b\}$ es el ubicado en el centro del tórax, $\{W\}$ indica el marco de referencia global. El robot se compone de seis extremidades idénticas (L_1, L_2, \dots, L_6), que están distribuidas simétricamente alrededor del tórax. Cada pierna tiene 3GDL y están formadas por tres eslabones, coxis, fémur y tibia, conectados mediante articulaciones rotacionales. La distribución radial de las extremidades presentada en el robot, permite omnidireccionalidad a diferencia de la distribución lateral. Además de facilitar el análisis cinemático pues hay una distancia de 60° entre cada extremidad.

2.1. Modelo cinemático del robot caminante de 6 extremidades

Con el propósito de diseñar estrategias de adaptabilidad, es importante tener un modelo que describa el comportamiento cinemático del robot.

2.1.1. Cinemática directa de posición

El objetivo de este análisis es encontrar la pose de cada extremidad con respecto al marco de referencia absoluto $\{0\}$ para un conjunto de ángulos conocidos q_{ij} , donde i representa el número de extremidad ($i = 1..6$) y j el número de articulación ($j = 1, 2, 3$). El problema se resuelve por separado para cada pierna, usando el modelo directo considerando tres restricciones:

1. Todas las articulaciones permiten movimiento rotacional únicamente alrededor de un eje.
2. El fémur y la tibia rotan siempre alrededor de ejes paralelos.
3. Las restricciones físicas de cada extremidad brindan un rango angular restringido para cada articulación.

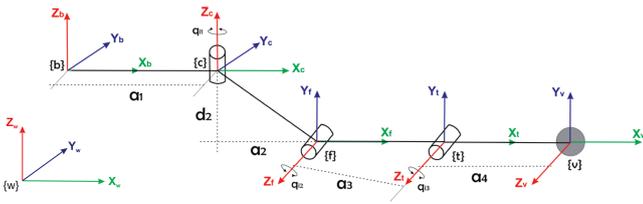


Figura 2: Diagrama cinemático de la *i*-ésima extremidad.

La cinemática directa de posición se resuelve utilizando la convención de Denavit-Hartenberg (D-H) para cada extremidad. En la Figura 2 se definen las articulaciones variables del mecanismo de la extremidad q_{i1} , q_{i2} y q_{i3} , así como las longitudes de los eslabones, coxis, fémur y tibia a_1 , a_2 , a_3 y a_4 y el offset del motor que se define por d_2 . La Tabla 1 por su parte, muestra los parámetros de D-H.

Tabla 1: Parámetros de D-H.

Joint	θ_i	α_i	a_i	d_i
Bse	0	0	a_1	0
Coxa	q_{i1}	-90	a_2	d_2
Femur	q_{i2}	0	a_3	0
Tibia	q_{i3}	0	a_4	0

Utilizando las matrices de transformación homogénea que describen la traslación y rotación entre los marcos de referencia i e $i - 1$ (de la base a la punta de la extremidad) y tomando en cuenta la transformación que existe entre el marco de referencia global $\{W\}$ y la base $\{b\}$ (Ec. 1) se tiene que las posiciones P_{ix} , P_{iy} y P_{iz} están representados por las Ecuaciones 2, 3 y 4 respectivamente para la i -ésima extremidad.

$$T_b^0 = \begin{bmatrix} c\phi c\theta & c\phi s\theta s\psi + s\phi c\psi & c\phi s\theta c\psi + s\phi s\psi & W_x \\ s\phi c\theta & s\phi s\theta s\psi + c\phi c\psi & s\phi s\theta c\psi + s\phi c\psi & W_y \\ -s\theta & c\theta s\psi & c\theta c\psi & W_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Donde las sub-matriz de rotación (roll-pitch-yaw) de la Ecuación 1 representa el cambio de orientación que se presenta en el tórax $\{b\}$ respecto a $\{W\}$; ψ , θ y ϕ corresponden a los cambios de orientación alrededor de los ejes X, Y y Z, respectivamente. Mientras que W_x , W_y , y W_z describe el desplazamiento del robot medido desde el origen.

$$P_{ix} = W_x - d_2 b_1 - a_3 s q_{i2} b_1 + b_2 + \frac{1}{2} a_2 c q_{i1} c \phi c \theta + a_4 c q_{i3} (c q_{i2} (s q_{i1} (b_3 - \frac{1}{2} b_4 + \frac{1}{2} b_5 + c q_{i1} (b_3 + b_2)) - s q_{i2} b_1) - a_4 s q_{i3} (s q_{i2} (s q_{i1} (b_3 - b_4 + b_5) c q_{i1} (b_3 + b_2)) + c q_{i2} b_1) + \frac{1}{2} a_1 c \phi c \theta + a_2 s q_{i1} (b_3 - b_4 + b_5) + a_1 b_2 + a_3 c q_{i2} (s q_{i2} (b_2 - b_4 + b_5) + c q_{i1} (\frac{1}{2} c \phi c \theta + b_2))) \quad (2)$$

$$P_{iy} = W_y - d_2 b_6 + a_3 c q_{i2} (s q_{i1} (b_4 + b_5 + b_3) + c q_{i1} (b_7 - 3^{1/2} \frac{1}{2} b_1)) + a_3 s q_{i2} b_6 + a_2 c q_{i1} (b_7 - b_2) + a_4 c q_{i3} c q_{i2} (s q_{i1} (b_4 + b_8 + 3^{1/2} b_4) + c q_{i1} (b_7 - b_9 + b_8) + s q_{i2} (c \phi s \psi - b_6)) + s q_{i2} b_6 + a_4 s q_{i3} (c q_{i2} b_6 - s q_{i2} (s q_{i1} (b_4 + b_8 + b_7 3^{1/2}) + c q_{i1} (b_7 - b_9))) + a_1 b_7 + a_2 s q_{i1} (b_4 + b_8 + 3^{1/2} b_7) - a_1 b_9 \quad (3)$$

$$P_{iz} = W_z - \frac{1}{2} a_1 s \theta - a_4 c q_{i3} (c q_{i2} (c q_{i1} (\frac{1}{2} s \theta + 3^{1/2} b_7) - s q_{i1} (b_7 + b_{10})) - s q_{i2} c \theta) + a_4 s q_{i3} (s q_{i2} (c q_{i1} (\frac{1}{2} s \theta + 3^{1/2} b_7) - s q_{i1} (b_7 + b_{10})) - c q_{i2} c \psi c \theta) - d_2 c \psi c \theta - a_3 c q_{i2} (c q_{i1} (\frac{1}{2} s \theta + 3^{1/2} b_7) - s q_{i1} (b_7 - b_{10})) - a_2 c q_{i1} (\frac{1}{2} s \theta + 3^{1/2} b_7) + a_2 s q_{i1} (b_7 - b_{10}) - a_3 s q_{i2} c \psi c \theta - 3^{1/2} a_1 b_7 \quad (4)$$

Donde

$$b_1 = s \phi s \psi + c \phi c \psi s \theta, b_2 = 3^{1/2} \frac{1}{2} (c \psi s \phi - c \phi s \psi s \theta), b_3 = 3^{1/2} \frac{1}{2} (c \phi c \theta), b_4 = \frac{1}{2} (c \psi c \phi), b_5 = 1 \frac{1}{2} (c \phi s \psi s \theta), b_6 = (c \psi s \phi - c \phi s \psi s \theta), b_7 = \frac{1}{2} c \theta s \phi, b_8 = \frac{1}{2} s \phi s \psi s \theta, b_9 = 3^{1/2} \frac{1}{2} (c \phi c \psi + s \phi s \psi s \theta), b_{10} = 3^{1/2} \frac{1}{2} 2 s \theta$$

2.1.2. Cinemática inversa en posición

El problema cinemático inverso se resuelve usando las matrices de transformación homogénea obtenidas en el análisis anterior, así como las Ecuaciones 2, 3, 4 correspondientes a la posición de la i -ésima extremidad; obteniéndose así las variables articulares, q_{i1} , q_{i2} , q_{i3} mostradas en las Ecuaciones 5, 6 y 7.

$$q_{i1} = \text{atan} \left(\frac{p_{o2}}{c_{o2}} \right) \quad (5)$$

Donde

$$p_{o2} = P_{iz} c \theta s \psi - W_y e + W_x f - W_z c \theta s \psi + P_{ix} (c \phi s \psi s \theta - c \psi s \phi) + P_{iy} (c \phi c \theta + s \phi s \psi s \theta) \\ c_{o2} = W_x c \phi c \theta - W_z s \theta + W_y c \theta s \phi + P_{iz} s \theta + a_1 - P_{ix} c \phi c \theta - P_{iy} c \theta s \phi$$

$$q_{i2} = \text{atan} \left(\frac{s a_2}{t a_2} \right) \quad (6)$$

Donde

$$s a_2 = -P_{iy} (s q_{i1} e + c q_{i1} c \theta c \phi) + P_{ix} (s q_{i1} f - c q_{i1} c \phi c \theta) + a_2 + P_{iz} (c q_{i1} s \theta - s q_{i1} c \theta s \psi) + s q_{i1} (W_y e - W_x f + W_z c \theta s \psi) + c q_{i1} (a_1 + W_x c \phi c \theta - W_z s \theta + W_y c \theta s \phi)$$

$$q_{i3} = \text{atan} \left(\frac{s a_3}{t a_3} \right) \quad (7)$$

Donde

$$s a_3 = P_{iy} (s q_{i2} f + c q_{i2} s q_{i1} e + c q_{i1} c q_{i2} c \theta c \phi) - P_{ix} (s q_{i2} v + c q_{i2} s q_{i1} u - c \phi c q_{i1} c q_{i2} c \theta) - a_3 s q_{i2} + s q_{i2} (W_x v - P_{iy} f + W_x c \psi c \theta) - c q_{i2} a_2 - d_2 s q_{i2} - P_{iz} (c \psi c \theta s q_{i2} + c q_{i1} c q_{i2} s \theta - c q_{i2} c \psi s q_{i1}) - a_3 c q_{i2} - c q_{i2} s q_{i1} (W_y e - W_x f + W_z c \theta s \psi) - a_1 c q_{i1} c q_{i2} c q_{i1} c q_{i2} (W_x c \phi c \theta W_z s \theta + W_y c \theta s \phi) \\ t a_3 = c q_{i2} (W_x v - W_y f + W_z c \psi c \theta) - P_{iy} (s q_{i1} s q_{i2} e - c q_{i1} f c q_{i1} c \theta + s \phi s q_{i2}) + P_{ix} (c q_{i2} v - s q_{i1} s q_{i2} u - c \phi c q_{i1} c \theta s q_{i2}) - d_2 c q_{i2} + s q_{i2} a_2 - P_{iz} (c \psi c q_{i2} c \theta - c q_{i1} s q_{i2} s \theta + c \theta s \psi s q_{i1} s q_{i2}) + s q_{i1} s q_{i2} (W_y e - W_x u - W_z c \theta s \psi) + a_1 c q_{i1} s q_{i2} + c q_{i1} s q_{i2} (W_x c \phi c \theta - W_z s \theta + W_y c \theta s \phi)$$

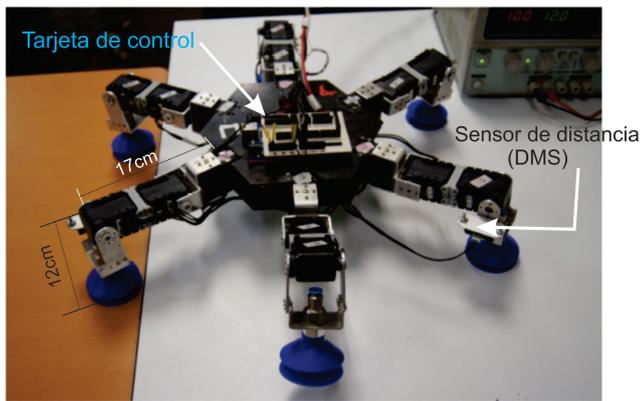


Figura 3: Construcción del robot hexápodo.

2.2. Robot hexápodo

Los principales componentes que dan lugar a la estructura del robot son: actuadores, extremidades y el tórax. Los actuadores implementados en las extremidades son servomotores AX-12+ con un torque de 12kg-cm a 16kg-cm que proporcionan retroalimentación sobre la posición, velocidad angular y el par presente a través de un bus serial de comunicación. Las extremidades fueron diseñadas en base a la morfología de una hormiga y el tórax se basó en la distribución radial por las ventajas que presenta.

Las extremidades fueron construidas en aluminio y plástico, mientras que el tórax se manufacturó en fibra de carbono con la finalidad de disminuir peso. La Figura 3 muestra la construcción del robot hexápodo, donde además de los principales componentes se pueden observar también sensores DMS de corto alcance colocados en la punta de algunas extremidades (Sharp 2Y0A21) y una tarjeta de control en el tórax, cuya función implementar los algoritmos de las estrategias de adaptabilidad. Las dimensiones del robot se especifican en la Figura 3, la altura para esa posición es de 12cm (cuando todas las posiciones articulares corresponden a 0° , excepto los eslabones de la tibia), el tórax mide 20cm.

3. Estrategias de adaptabilidad

Para el diseño de las estrategias de adaptabilidad se tomaron en cuenta los siguientes aspectos.

1. El robot se desplaza mediante la marcha trípode alternativo.
2. Se tienen solamente tres extremidades tocando la superficie de apoyo.
3. Los puntos de apoyo se mantienen.

La metodología para las estrategias de adaptabilidad está descrita en el diagrama de flujo de la Figura 4.

Para llevar a cabo las estrategias de adaptabilidad, es importante conocer el centro de gravedad (CG) del robot, que para este caso fue derivado por el método de cuerpos compuestos y validado para distintas posturas en un software de diseño CAD especializado (?). Además, es necesario estimar la postura inicial del robot para analizar si esa postura es o no estáticamente

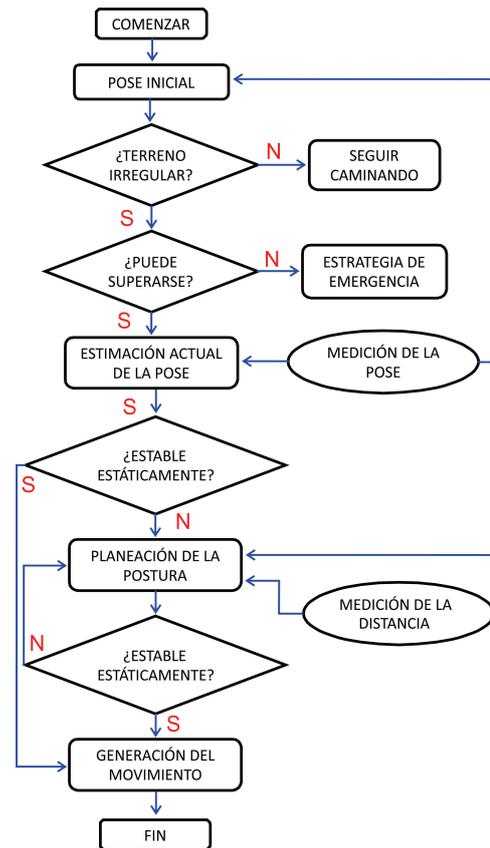


Figura 4: Diagrama de flujo para las estrategias de adaptabilidad

estable, esto con ayuda del criterio de estabilidad normalizado por el peso (NESM), (?).

La planeación de la postura consiste en determinar una estrategia para que el robot se adapte al terreno, garantizando su estabilidad estática. Se tienen 3 variantes de estrategias de adaptabilidad: **Orientación constante del tórax**, **Estrategia geométrica** y **Estrategia de emergencia**.

3.1. Orientación constante del tórax

Esta estrategia consiste en conservar los tres puntos de apoyo y llevar el tórax a una orientación de 0° alrededor de los ejes X y Y, a través de la cinemática inversa (Ecuaciones 5, 6 y 7) para la i -ésima extremidad.

3.2. Estrategia geométrica

Es importante para esta estrategia definir las triadas del robot, para lo cual se toma en cuenta la distribución de las extremidades denotada en la Figura 1. La triada 1 (Figura 5 (a)) corresponde a las extremidades L_1 , L_3 , L_5 y triada 2 (Figura 5 (b)) a L_2 , L_4 , L_6 .

La **estrategia geométrica** consiste en calcular la altura de cada extremidad que se encuentra tocando la superficie de apoyo, así como la altura del tórax respecto a la horizontal. La Figura 6 muestra una representación del robot Hex-piderix, donde se aprecian las alturas de las tres extremidades denotadas por h_1 , h_2 y h_3 , así como los puntos P_1 , P_2 y P_3 que forman el plano de apoyo.

Se calcula la altura de la i -ésima extremidad (Ec. 8) en función de las variables articulares, q_{i1} , q_{i2} y q_{i3} .

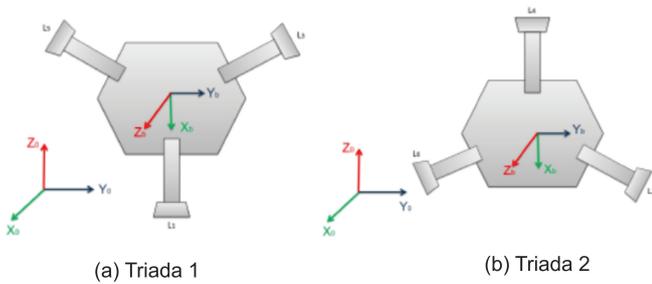


Figura 5: Triadas del robot.

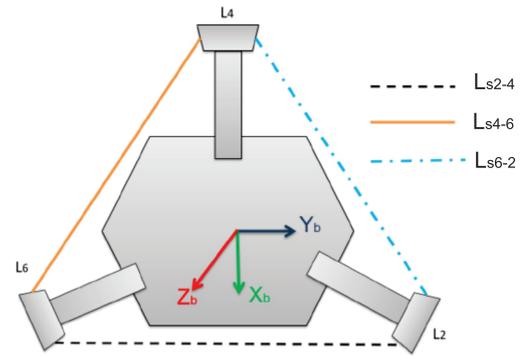


Figura 8: Posibles líneas de soporte para la triada 2.

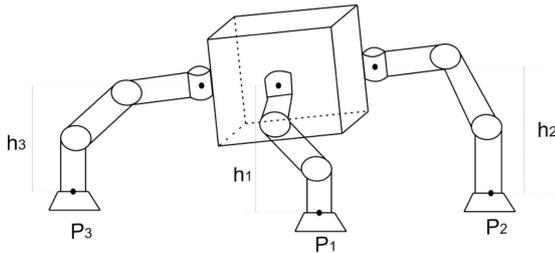


Figura 6: Representación de la altura de las extremidades del hexápodo.

$$h_i = d_2 + a_3sq_{i2} + a_4sq_{i3} \quad (8)$$

Para llevar a cabo esta estrategia es necesario conocer la orientación actual del tórax. Además, es importante ubicar sobre que triada está posicionado el robot ya que a partir de esto se puede asociar una línea de soporte adecuada para reorientar al robot alrededor del eje X o Y . Para la triada 1, se tienen tres posibles líneas de soporte: L_{s3-5} (línea formada entre las extremidades L_3 y L_5), L_{s5-1} (extremidades L_5 y L_1), L_{s1-3} (extremidades L_1 y L_3) las cuales pueden ser apreciadas en la Figura 7. La línea de soporte L_{s3-5} permite un cambio de orientación alrededor del eje Y , mientras que L_{s5-1} y L_{s1-3} lo permiten para el eje X .

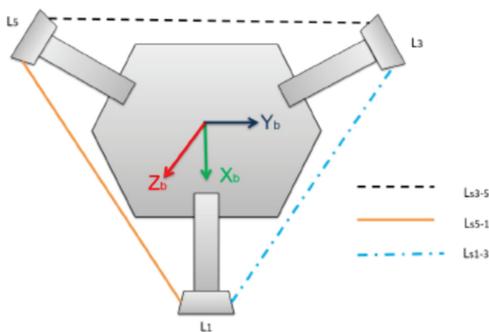


Figura 7: Posibles líneas de soporte para la triada 1.

La Figura 8 muestra las tres posibles líneas de soporte para la triada 2; la primera de ellas, denominada L_{s2-4} está compuesta por las extremidades L_2 y L_4 y L_{s4-6} por L_4 y L_6 y ambas líneas permiten el cambio de orientación alrededor del eje X ; por otro lado L_{s6-2} se forma de las extremidades L_6 y L_2 y puede generar un cambio de orientación alrededor del eje Y .

Teniendo información acerca de las alturas de las extremidades, de la orientación del tórax y de las líneas de soporte es

posible tomar decisiones para una correcta adaptabilidad del robot. Lo primero a tomar en cuenta es sobre qué triada se encuentra posicionado el robot, se comparan las alturas de las extremidades y se elige una línea de soporte (la que se encuentra entre las extremidades más alineadas), el robot se puede reorientar como máximo la mitad de la orientación actual, de esta manera el tórax quedaría paralelo a la superficie de apoyo y no se tendrían problemas con posibles colisiones de cualquiera de las extremidades. Además se toma en cuenta el criterio de estabilidad NESM.

3.3. Estrategia de emergencia

Cuando el robot no es capaz de mantener la estabilidad con tres extremidades tocando la superficie de apoyo, se recurre al uso de una extremidad adicional. Esta decisión se toma en base a las distancias que hay entre todas ellas.

La Figura 9 muestra un diagrama de las distancias que existen entre todas las extremidades del robot. El triángulo en color rojo compuesto por L_2, L_4, L_6 corresponde a la triada 2; el triángulo en líneas punteadas azules que se compone de las extremidades L_1, L_3, L_5 corresponde a la triada 1.

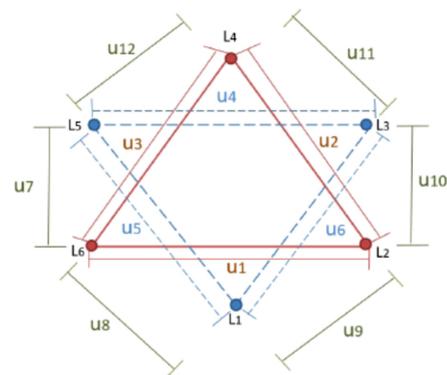


Figura 9: Diagrama de distancias entre las extremidades del robot.

En esta estrategia se calculan todas las posibles distancias entre todas las extremidades, al combinar ambas triadas. u_1, u_2, u_3 se forman entre las extremidades correspondientes a la triada 2, u_4, u_5 y u_6 las distancias de la triada 1; y el resto de las distancias ($u_7, u_8, u_9, u_{10}, u_{11}$ y u_{12}) son combinaciones de ambas triadas.

Una vez calculadas todas las distancias, la elección de la próxima extremidad de apoyo se hace en base a la distancia más grande (Ecuación 9) para así aumentar el área del polígono de apoyo y garantizar que la proyección del CG caerá dentro de este. Teniendo el punto de apoyo deseado se calcula la cinemática inversa y se reposiciona al robot para adaptarse al cambio de terreno.

$$l_{ad} = u_{max}(u_1, u_2, u_3 \dots u_{12}) \tag{9}$$

4. Validación de las estrategias de adaptabilidad

Para validar las estrategias de adaptabilidad anteriormente descritas, se desarrolló un algoritmo que fue simulado en MatLab para diversas posturas en un ambiente controlado. Además, los resultados de las Ecuaciones fueron validados experimentalmente.

4.1. Simulaciones de las estrategias de adaptabilidad

Las simulaciones de todas las estrategias de adaptabilidad parten del supuesto que el robot se encuentra posicionado sobre una superficie horizontal utilizando la triada 1. La Figura 10 muestra la animación del robot hexápodo en el instante inicial (plano color negro), el tórax se simula como un hexágono y las extremidades están representadas en alambres; se consideraron las longitudes reales de los eslabones, así como la masa (para calcular el CG y determinar el criterio de estabilidad) de cada componente. Las triadas 1 y 2 están simbolizadas por los colores verde y azul respectivamente.

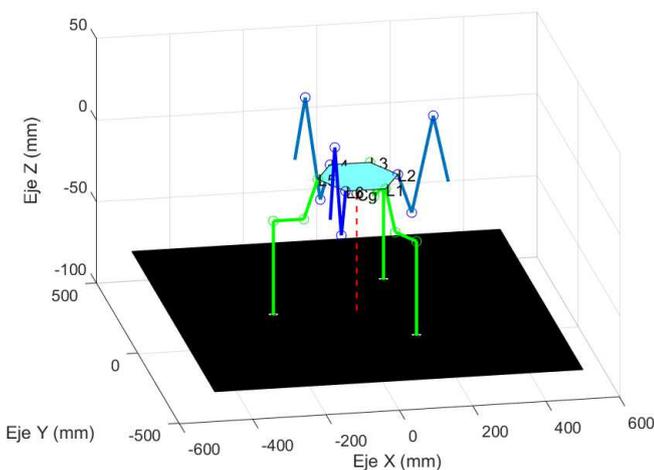


Figura 10: Posición inicial del robot sobre una superficie horizontal en una simulación.

4.1.1. Simulaciones: Orientación constante

Las simulaciones que se realizaron para la estrategia de adaptabilidad **orientación constante**, consisten en suponer que el robot se situará en una superficie inclinada, esto se debe a que al tener tres puntos de apoyo se forma un plano y sea cual sea la geometría del terreno siempre se posicionará en un plano. Se comienza inclinando la superficie 15° alrededor del eje Y (Fig. 11), donde se conservan los ángulos de las 18 articulaciones.

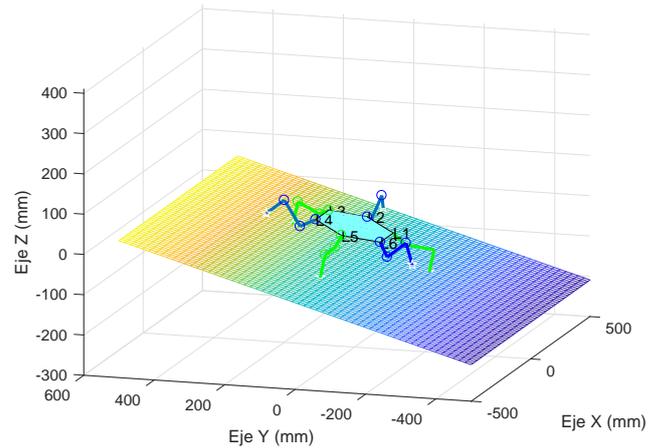


Figura 11: Robot posicionado sobre una superficie inclinada de 15° alrededor del eje Y en una simulación.

En la Figura 12 se aprecia como el robot se adaptó al cambio del terreno a través de la estrategia de adaptabilidad orientación constante, llevando al tórax a una orientación de 0° alrededor de los ejes X y Y, por lo tanto el tórax quedó paralelo respecto a la horizontal; también es posible observar en esta Figura el análisis de estabilidad por medio del criterio NESM, el círculo en magenta representa al CG instantáneo y la línea punteada es la proyección del mismo que como es notorio cae dentro del polígono de apoyo, la línea continua en color negro entre las extremidades L_1 y L_5 representa la línea de soporte (que puede ser cualquier combinación entre los puntos de apoyo). Esta postura resulta ser estáticamente estable para la estrategia orientación constante.

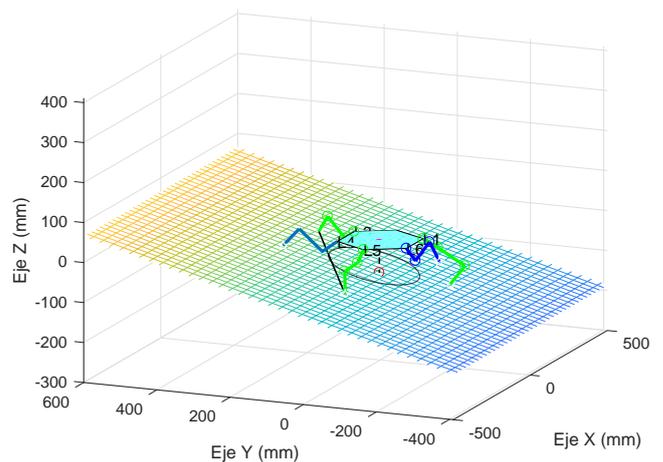


Figura 12: Simulación del reposicionamiento del robot en un plano inclinado de 15°, a través de la estrategia de adaptabilidad "orientación constante".

Por otra parte, en la Figura 13 se observa una inclinación de 30° alrededor del eje Y respecto a la Figura 10, para esta postura también se conservan los ángulos iniciales de las 18 articulaciones.

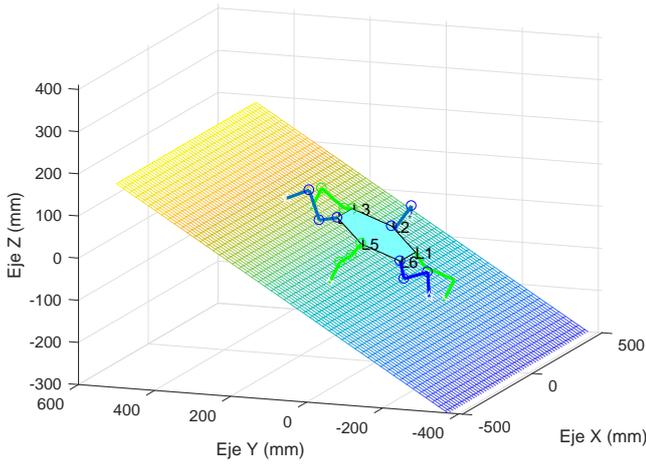


Figura 13: Robot posicionado sobre una superficie inclinada de 30° alrededor del eje Y en una simulación.

En la Figura 14 se observa como el robot se adapta a este cambio, siendo esta posición estáticamente estable. Sin embargo, es una postura crítica en la estrategia de adaptabilidad orientación constante pues la extremidad L_4 está a punto de colisionar con la superficie; *esta estrategia no es recomendable para pendientes mayores a 30°*.

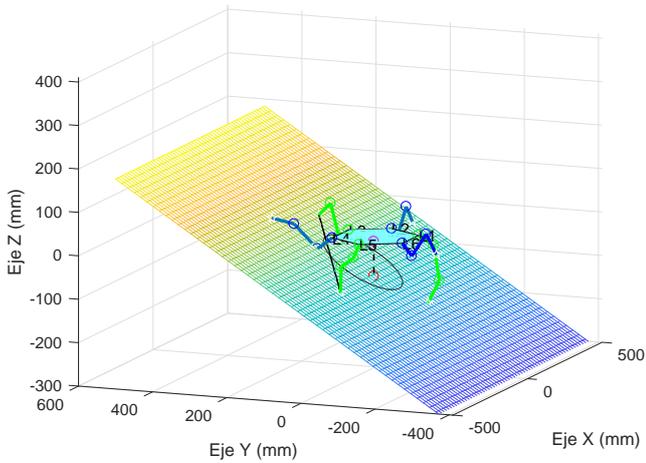


Figura 14: Simulación del reposicionamiento del robot en un plano inclinado de 30°, a través de la estrategia de adaptabilidad “orientación constante”.

4.1.2. Simulaciones: Estrategia geométrica

Como se mencionó anteriormente, la estrategia de adaptabilidad orientación constante no puede implementarse para una pendiente mayor a 30°, pues sus extremidades colisionarían con la misma superficie.

En la Figura 15 se observa un cambio de inclinación de la superficie de 45° alrededor del eje Y respecto a la postura inicial mostrada en la Figura 10.

En a Figura 16 se muestra como el robot se reposiciona al

cambio de inclinación de 45° a través de la estrategia de adaptabilidad geométrica, para lo cual fue necesario reorientar al robot 26° alrededor del eje Y tomando como línea de soporte la formada entre las extremidades L_5 y L_3 ; esta postura fue evaluada mediante el criterio NESM y resultó ser estáticamente estable.

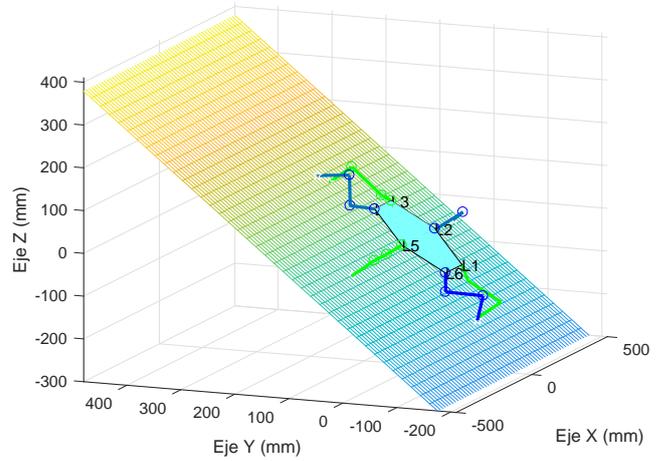


Figura 15: Robot posicionado sobre una superficie inclinada de 45° alrededor del eje Y en una simulación.

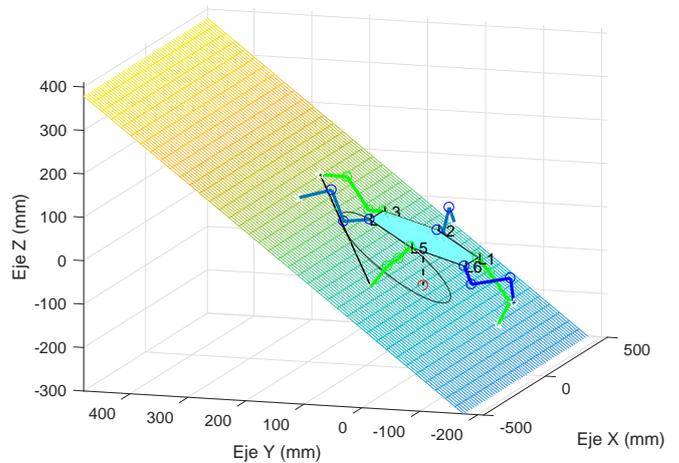


Figura 16: Simulación del reposicionamiento del robot en un plano inclinado de 45°, a través de la estrategia de adaptabilidad “geométrica”.

En la Figura 17 es posible observar un cambio de inclinación de la superficie de 50° alrededor del eje Y respecto a la postura inicial mostrada en la Figura 10.

Usando la estrategia geométrica para esa postura se obtiene el resultado de la Figura 18. Para este caso se eligió la línea de soporte L_{5-1} pues estas extremidades son las que se encuentran más alineadas. La reorientación del robot se hizo para 32° alrededor del eje Y de esta manera se evitan colisiones en cualquiera de las extremidades, ya sea que estén en fase de apoyo o de balanceo. Al implementar el criterio de estabilidad NESM se aprecia que el reposicionamiento a través de la estartegia de adaptabilidad geométrica, es estáticamente estable .

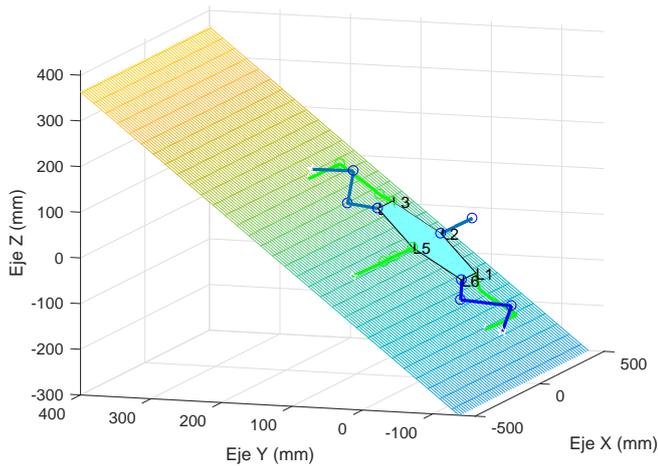


Figura 17: Robot posicionado sobre una superficie inclinada de 50° alrededor del eje Y en una simulación.

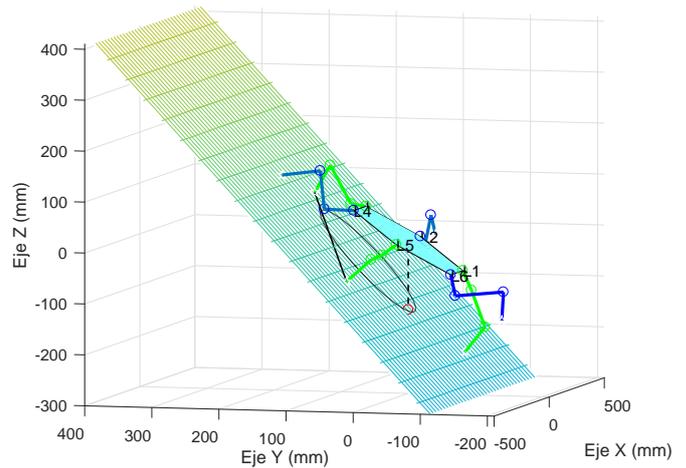


Figura 19: Simulación del reposicionamiento del robot en un plano inclinado de 55°, a través de la estrategia de adaptabilidad “geométrica”.

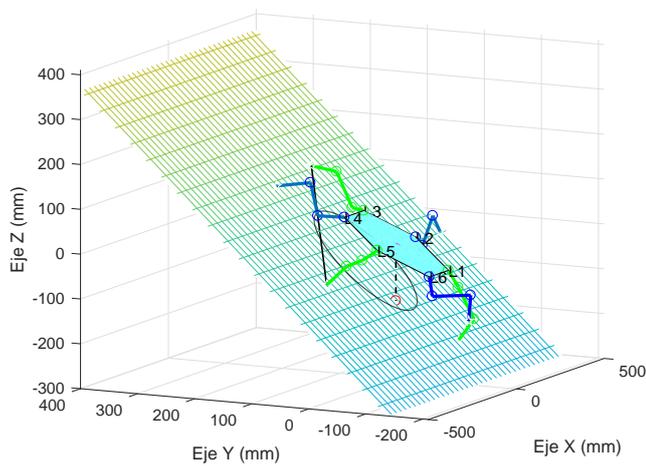


Figura 18: Simulación del reposicionamiento del robot en un plano inclinado de 50°, a través de la estrategia de adaptabilidad “geométrica”.

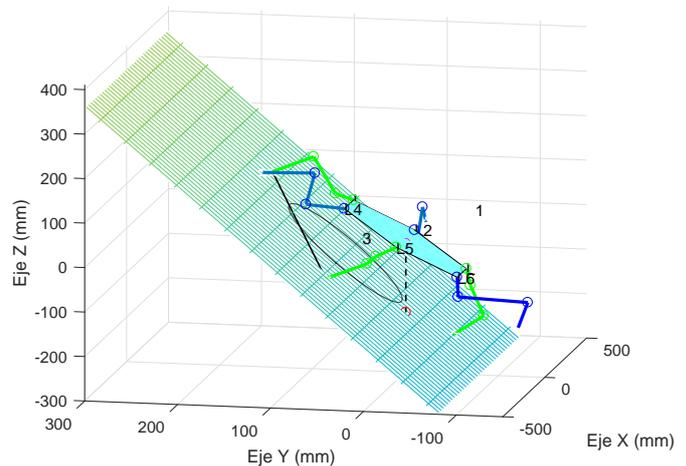


Figura 20: Simulación del reposicionamiento del robot en un plano inclinado de 60°, a través de la estrategia de adaptabilidad “geométrica”.

Por otro lado, se realizó un cambio de inclinación de la superficie de 55° y 60° alrededor del eje Y respecto a la postura inicial mostrada en la Figura 10.

Para el caso del cambio de inclinación de 55°, el robot se reposicionó considerando la línea de soporte L_{5-1} y una orientación de 33° alrededor del eje Y. Aplicando el criterio de estabilidad NESM, la postura resulta críticamente estable como lo ilustra la Figura 18.

Para el caso del cambio de inclinación de 60° en la superficie respecto a la posición inicial, el robot se reposicionó considerando la misma línea de soporte L_{5-1} que el caso anterior y una orientación de 34° alrededor del eje Y. Al aplicarse el criterio de estabilidad NESM se obtiene inestable como lo ilustra la Figura 18, aunque ninguna de sus extremidades entra en colisión.

4.1.3. Simulaciones: Estrategia de emergencia

Para ejemplificar la funcionalidad de esta estrategia, se propone una posición inicial distinta a la que se presentó en la Figura 10. En la Figura 21, se observa que el robot se encuentra posicionado sobre las extremidades L_3 , L_5 y L_6 , es decir, no se está haciendo uso de ninguna triada; esto con la finalidad de mostrar una postura crítica, las extremidades L_3 y L_5 están completamente alineadas formando un polígono de apoyo reducido; lo que da como resultado que la proyección del CG caiga justo en la línea de soporte formada por L_3 y L_5 provocando inestabilidad estática para ese instante.

La Figura 22 muestra un cambio en la inclinación de la superficie de 30° al rededor del eje Y respecto al instante inicial (Figura 21), para esta postura el robot conserva las mismas extremidades de apoyo L_3 , L_5 y L_6 .

La Figura 23, por su parte, muestra al robot reposicionado agregando como punto de apoyo extra la extremidad L_1 , el al-

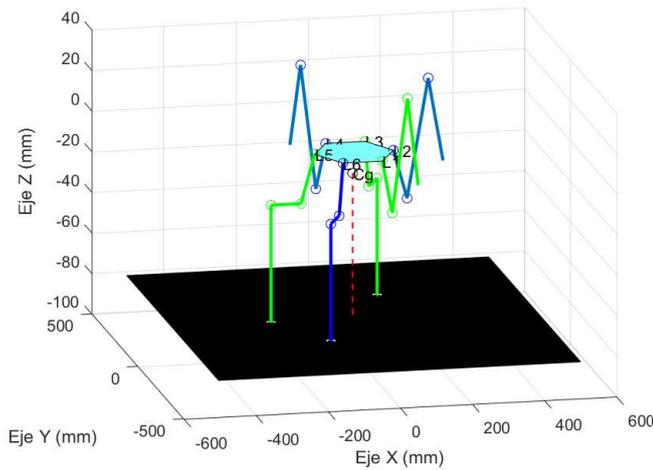


Figura 21: Robot posicionado sobre una superficie horizontal, tomando como puntos de apoyo L3, L5 y L6 en una simulación.

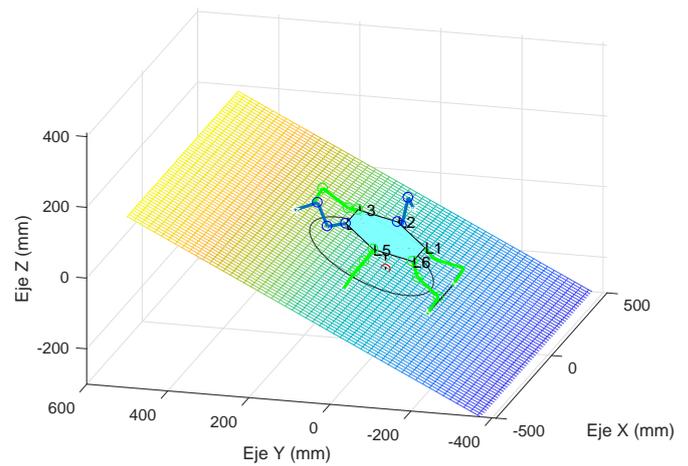


Figura 23: Simulación del reposicionamiento del robot en un plano inclinado de 30°, a través de la estrategia de adaptabilidad de “emergencia”.

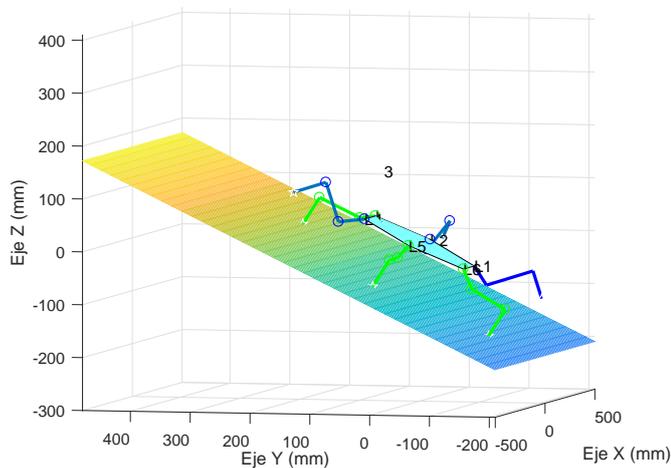


Figura 22: Robot posicionado sobre una superficie inclinada de 30° alrededor del eje Y, utilizando L3, L5 y L6 como puntos de apoyo en una simulación.

goritmo de la estrategia de adaptabilidad de emergencia define cuál extremidad es más conveniente apoyar para aumentar el polígono de apoyo. La postura mostrada en esta Figura fue evaluada a través del criterio de estabilidad NESM, dando como resultado que la postura es estáticamente estable.

4.2. Criterio para la elección de la estrategia

Estudiando los resultados de las simulaciones mostradas anteriormente, es posible tener un criterio para la correcta elección de cualquiera de ellas. La metodología para la elección de la estrategia se describe a continuación:

- Evaluación del criterio de estabilidad NESM para la postura actual. De ser estable se continúa la marcha.
- Cálculo de las estrategias *orientación constante del tórax y estrategia geométrica*; la *orientación constante del tórax* es descartada cuando la inclinación del plano de apoyo es mayor o igual a 30°.

- Se comparan las distancias entre la línea de soporte y la proyección del CG obtenidas del criterio de estabilidad NESM aplicado a cada una de las estrategias.
- La estrategia de adaptabilidad es elegida en base a las distancias obtenidas en el punto anterior, la estrategia que tenga la distancias más grande se considera la adecuada, ya que esto garantiza que se tiene un polígono de apoyo más amplio y por lo tanto el robot es menos propenso a perder el equilibrio y sufrir una volcadura.

4.3. Validación experimental de las estrategias de adaptabilidad

La Figura 24 muestra al sistema físico compuesto por una PC, fuente de alimentación, controlador y el robot hexápodo.

Las estrategias de adaptabilidad fueron implementadas en un robot caminante de 6 extremidades que fue construido considerando el diseño mostrado en la Figura 1. El robot fue instrumentado con el sensor IMU MPU-6050 que permite estimar la postura del robot.

La validación experimental se llevo a cabo con algunas de las posturas mostradas en la sección de simulación. También se realizo experimentación en terreno natural con la finalidad de observar cómo se comportan las estrategias de adaptabilidad en un terreno distinto a un plano inclinado.

La implementación de las estrategias se validó para los planos inclinados de 15° y 30°, mostrados en las Figuras 25 y 26, respectivamente.

En la Figura 27 se observa al robot reposicionado en u superficie inclinada de 15°, a través de la estrategia de adaptabilidad *orientación constante* de forma experimental. El comportamiento obtenido fue el que se observó en las simulaciones.

Por su parte, la Figura 28 muestra una ejemplificación clara de la aplicación de la estrategia de adaptabilidad *orientación constante*, traslado de una carga a un punto específico. Como se aprecia el robot es capaz de mantener el tórax paralelo a la horizontal y así mantener la carga en una sola posición.

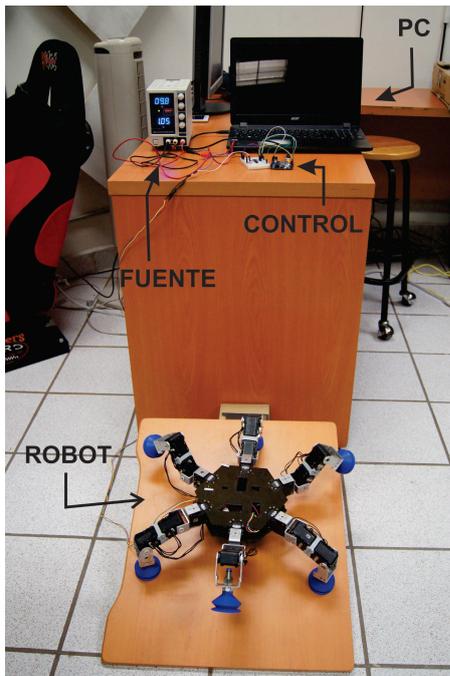


Figura 24: Robot real y sus componentes.

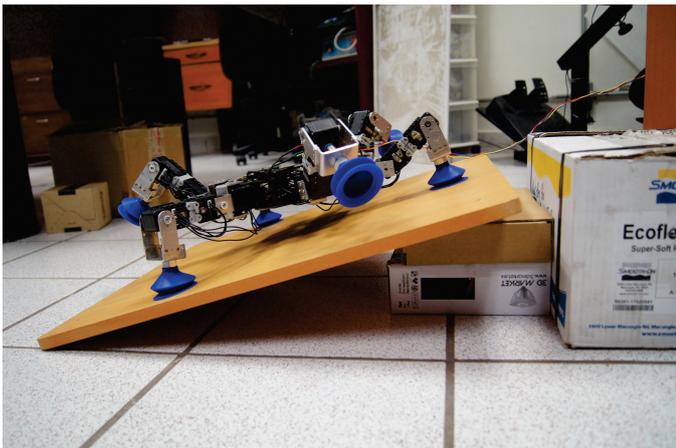


Figura 25: Robot hexápodo posicionado en una superficie inclinada de 15° , en un ambiente real.

La Figura 29 muestra al robot reposicionado en superficie inclinada de 30° respecto a la Figura 26, a través de la estrategia de adaptabilidad *geométrica* de forma experimental, su comportamiento al igual que el plano de 15° fue el esperado en las simulaciones. La postura como se puede apreciar es estáticamente estable.

No se muestran experimentos con planos inclinados de 45° , 50° y 55° , ya que a partir de los 45° el robot resbala del plano de experimentación pues este trabajo no considera la fricción entre los puntos de apoyo y la superficie.

En la Figura 30 se puede observar la implementación de la *estrategia de emergencia* en un plano inclinado de 15° , tomando 4 puntos de apoyo, lo que permite tener un polígono de apoyo más amplio y garantizar la estabilidad estática.

Finalmente, se realizaron experimentos en terreno natural, pendiente inclinada de concreto y pasto; Figuras 31 y 32, respectivamente. En ambos casos se implementó al estrategia de



Figura 26: Robot hexápodo posicionado en una superficie inclinada de 30° .



Figura 27: Robot hexápodo reposicionado en una superficie inclinada de 15° , utilizando la estrategia de adaptabilidad orientación constante de forma experimental

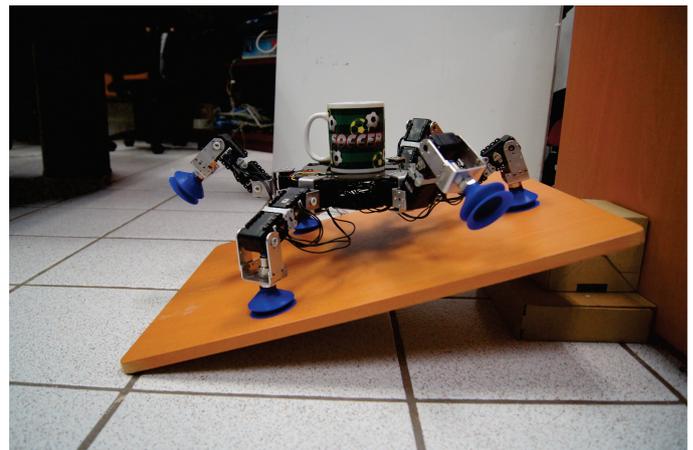


Figura 28: Robot posicionado en una superficie inclinada de 15° , utilizando la estrategia de adaptabilidad orientación constante de forma experimental, llevando una carga.

adaptabilidad orientación constante, siendo el pasto el terreno más escabroso para el robot, pues además de pasto hay algunas rocas pequeñas, desniveles e incluso baches. Para la validación

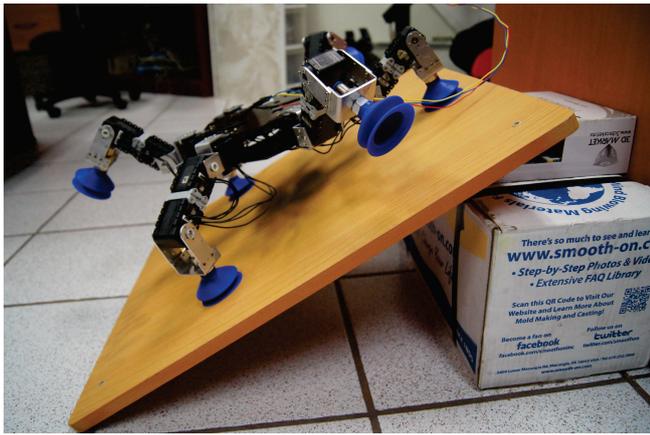


Figura 29: Robot hexápodo adaptado a una superficie inclinada de 30° , utilizando la estrategia de adaptabilidad geométrica de forma experimental.



Figura 31: Implementación de la estrategia orientación constante en terreno natural (pendiente de concreto).

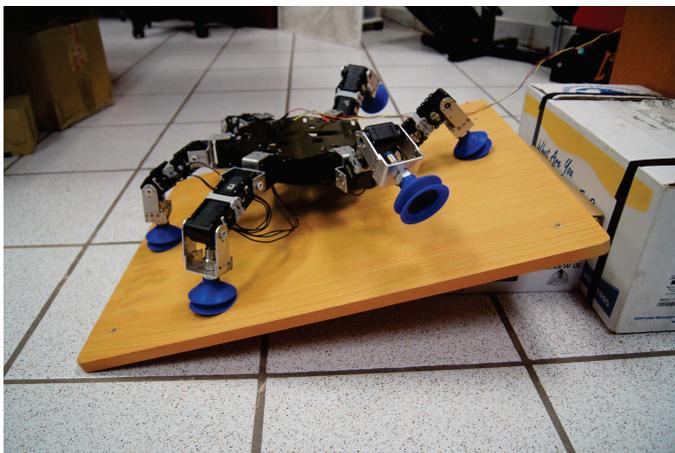


Figura 30: Robot hexápodo adaptado a una superficie inclinada de 15° , utilizando la estrategia emergencia de forma experimental.



Figura 32: Implementación de la estrategia orientación constante en terreno natural (pasto).

en terreo natural se consideraron 3 puntos de apoyo que forma un plano de 6° para el concreto y un plano de 10° para el pasto, posturas estáticamente estables para la estrategia de adaptabilidad utilizada.

5. Conclusión

En este artículo se presentó el modelo cinemático directo e inverso en posición de un robot caminante de 6 extremidades, así como su construcción en materiales ligeros.

Además, se mostró el diseño, simulación y validación experimental de estrategias de adaptabilidad estáticamente estables.

Para el diseño de las estrategias de adaptabilidad se tomaron en cuenta los parámetros geométricos del robot, así como el peso de cada uno de sus componentes para calcular el CG; tanto la cinemática directa como la inversa en posición fueron fundamentales para que el robot se pudiera reorientar; se presentaron tres estrategias, *orientación constante*, *estrategia geométrica* y *estrategia de emergencia*, la última consistió en tomar un punto de apoyo más para aumentar el polígono de apoyo y así garantizar la estabilidad.

La estrategia de adaptabilidad *orientación constante* resultó ser la más sencilla de todas pues el robot se adapta al terreno cambiando su orientación a 0° alrededor de los ejes X y Y realizando los cálculos de cinemática inversa. Sin embargo, esta estrategia es la más limitada de todas; el robot puede adaptarse a cambios de inclinación menores o igual a 30° , cuando el robot se adapta con esta estrategia a superficies con una inclinación mayor a 30° ocurren colisiones con las extremidades que están en reposo. Por otra parte, esta estrategia es útil cuando se desea llevar una carga a lugares remotos, ya que al mantener paralelo el tórax a la horizontal la posible carga no caería.

Se realizaron simulaciones para inclinaciones de 45° , 50° , 55° y 60° utilizando la *estrategia geométrica*, encontrándose que para 45° y 50° esta estrategia es estable, para 55° es críticamente estable y para 60° es inestable.

La estrategia *estrategia de emergencia* se usa solamente cuando ninguna de las anteriores son estáticamente estables o en situaciones críticas.

Para llevar a cabo las estrategias de adaptabilidad al terreno, es necesario conocer la postura actual del robot, así como la geometría; ya que conociendo la posición tanto de la punta de las extremidades como del centro del tórax se puede reorientar al robot con el uso exclusivo del cálculo de la cinemática in-

versa, lo que permite tener un sistema más económico que los presentados por Görner and Stelzer (2013) y Loc et al. (2010).

Las estrategias fueron resueltas a través de un modelo geométrico, por lo que el consumo de recursos computacionales es bajo. Resolver las estrategias mediante un modelo geométrico permite aprovechar el modelo cinemático directo e inverso del robot, las alturas de las extremidades se pueden conocer teniendo como entrada únicamente la posición angular de cada motor. Además, todas las posturas presentadas fueron evaluadas a través del criterio de estabilidad NESM que permite evaluar la estabilidad de cada estrategia.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado parcialmente gracias al apoyo del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT).

Referencias

- Carabin, G., Gasparetto, A., Mazzetto, F., Vidoni, R., 2016. Design, implementation and validation of a stability model for articulated autonomous robotic systems. *Robotics and Autonomous Systems* 83 (Supplement C), 158 – 168.
- Görner, M., Stelzer, A., May 2013. A leg proprioception based 6 dof odometry for statically stable walking robots. *Auton. Robots* 34 (4), 311–326.
- Jun, J.-Y., Saut, J.-P., Benamar, F., 2016. Pose estimation-based path planning for a tracked mobile robot traversing uneven terrains. *Robotics and Autonomous Systems* 75 (Part B), 325 – 339.
- Kim, H., Lee, D., Liu, Y., Jeong, K., Seo, T., 2016. Hexapedal robotic platform for amphibious locomotion on ground and water surface. *Journal of Bionic Engineering* 13 (1), 39 – 47.
- Kimura, H., Fukuoka, Y., 2006. *Dynamics-Based Motion Adaptation for a Quadruped Robo*. Springer Tokyo, Tokyo, Ch. Adaptive Motion of Animals and Machines, pp. 217–226.
- Koco, E., Mutka, A., Kovacic, Z., 2016. New variable passive-compliant element design for quadruped adaptation to stiffness-varying terrain. *International Journal of Advanced Robotic Systems* 13 (3), 90.
- Komatsu, H., Ogata, M., Hodoshima, R., Endo, G., Fukushima, E. F., Hirose, S., 2014. Development of quadruped walking robot titan xii and its basic consideration on the control of large obstacle traversing motion. *Transactions of the JSME (in Japanese)* 80 (813), DR0128–DR0128.
- Loc, V.-G., goh Roh, S., Koo, I. M., Tran, D. T., Kim, H. M., Moon, H., Choi, H. R., 2010. Sensing and gait planning of quadruped walking and climbing robot for traversing in complex environment. *Robotics and Autonomous Systems* 58 (5), 666 – 675.
- Mao, S., Dong, E., Jin, H., Xu, M., Zhang, S., Yang, J., Low, K. H., 2014. Gait study and pattern generation of a starfish-like soft robot with flexible rays actuated by smas. *Journal of Bionic Engineering* 11 (3), 400 – 411.
- Pollack, J., Bedau, M. A., Husbands, P., Watson, R. A., Ikegami, T., 2004. The Evolution of Control and Adaptation in a 3D Powered Passive Dynamic Walker. MIT Press, Ch. Artificial Life IX: Proceedings of the Ninth International Conference on the Simulation and Synthesis of Living Systems, pp. 139–145.
- Raibert, M., Blankespoor, K., Nelson, G., Playter, R., 2008. Bigdog, the rough-terrain quadruped robot. *IFAC Proceedings Volumes* 41 (2), 10822 – 10825, 17th IFAC World Congress.
- Rejas, J.-I., Sanchez, A., de Rivera, G. G., Prieto, M., Garrido, J., 2015. Environment mapping using a 3d laser scanner for unmanned ground vehicles. *Microprocessors and Microsystems* 39 (8), 939 – 949.
- Rushworth, A., Cobos-Guzman, S., Axinte, D., Raffles, M., 2015. Pre-gait analysis using optimal parameters for a walking machine tool based on a free-leg hexapod structure. *Robotics and Autonomous Systems* 70 (Supplement C), 36 – 51.
- Sun, Y., Yang, Y., Ma, S., Pu, H., Jun 2016. Design of a high-mobility multi-terrain robot based on eccentric paddle mechanism. *Robotics and Biomimetics* 3 (1), 8.
- Taniwaki, M., Iida, M., Kang, D., Tanaka, M., Izumi, T., Umeda, M., 2008. Walking behaviour of a hexapod robot using a wind direction detector. *Biosystems Engineering* 100 (4), 516 – 523.
- Zhang, H., Liu, Y., Zhao, J., Chen, J., Yan, J., 2014. Development of a bionic hexapod robot for walking on unstructured terrain. *Journal of Bionic Engineering* 11 (2), 176 – 187.