

Diseño un Robot Hexápodo Tipo Hormiga

Vargas Soto Jose Emilio

Universidad Anáhuac – Mexico Sur, Facultad de Ingeniería
Av. De las Torres 131, Col. Olivar de los Padres. CP 01780 México D.F.
emiliov@ds.uas.mx

Resumen

En este artículo se muestra el diseño de un robot caminante de seis patas, el cual está inspirado en la configuración de una hormiga obrera. Los resultados obtenidos sobre el estudio de la estabilidad estática fueron obtenidos considerando algoritmos de locomoción libre, y flexibilidad en el cuerpo de robot. Se muestran resultados originales sobre la forma de simplificar la parametrización de la estabilidad del robot.

Así mismo, se reporta el avance en el diseño de las patas y del cuerpo del robot como tarea fundamental en el desarrollo de este tipo de máquinas. El artículo muestra las dimensiones obtenidas bajo diseño paramétrico, y la forma en que se determinan los parámetros de locomoción libre, principalmente el radio de seguridad.

1. Introducción

Es indudable el crecimiento de nuevas líneas de investigación en la robótica móvil en los últimos años. Particularmente, las investigaciones dentro del área de vehículos caminantes con seis patas llevan más de medio siglo. Sin embargo, en la actualidad no se ha logrado satisfacer del todo las respuestas asociadas a crear de forma segura y eficiente máquinas que caminen con seis patas.

El desarrollo de la mayoría de estas máquinas caminantes ha concluido en máquinas muy grandes, pesadas y lentas como el AMBLER-CMU [1] y debido a estas características de peso y tamaño presentan problemas en aplicaciones prácticas. Por el contrario también se han diseñado máquinas muy pequeñas, las cuales presentan el inconveniente de que la carga útil que pueden soportar es muy pequeña como los robots insectos diseñados por R. Brooks en el MIT [2]. También es posible encontrar máquinas de tamaño medio como el HAMLET desarrollado en la Universidad de Canterbury, Nueva Zelanda, los cuales pueden soportar una pequeña carga y no presentan el problema del tamaño [3].

Una de las áreas de investigación en el desarrollo de los robots caminantes es el diseño mecánico, el cual interviene en el diseño de las patas y el diseño del cuerpo del robot. Para el caso del estudio que se reporta en este trabajo, se tomó como base para la determinación de las longitudes principales de las patas, y las dimensiones del cuerpo de robot, investigaciones de morfología de las hormigas obreras. Esto con el fin de adquirir algunas de sus características (capacidad de carga, y adaptabilidad de desplazamiento por terrenos irregulares). Con el propósito de estudiar y adquirir experiencia en robots caminantes en la Universidad Anáhuac México Sur se están diseñando y construyendo una serie de robots móviles con seis extremidades, entre ellos el diseño que se presenta en la Figura 1.

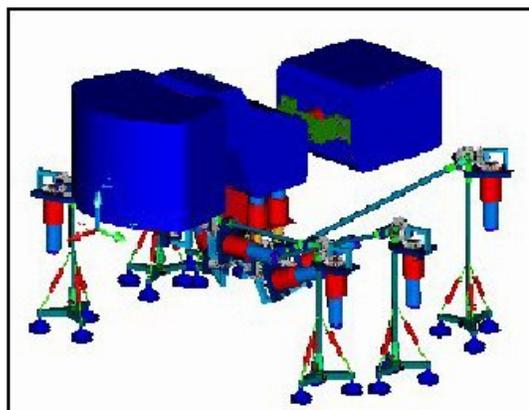


Figura1. Diseño del robot caminante

2. Diseño del robot

El estudio y la observación de la hormiga tanto en su ámbito natural como en su morfología llevó a determinar las características físicas del robot de forma paramétrica. De esta forma, resulta relativamente sencillo escalar el diseño del robot con base a algunos parámetros de diseño, para nuestro caso se consideró como medida de referencia la longitud del cuerpo del robot. En la tabla 1 se muestran las longitudes de los eslabones de cada una de las patas del robot, estas

longitudes guardan la relación y proporción de las extremidades de las hormigas investigadas.

La configuración del robot muestra que las seis patas se encuentran sobre el cuerpo del robot, localizadas específicamente en el tórax del robot (parte central), tres patas se disponen de un lado, y las otras tres patas se disponen de otro lado.

Extremidad	Eslabón 1	Eslabón 2
Pata 1	0.210 m	0.280 m
Pata 2	0.210 m	0.280 m
Pata 3	0.266 m	0.364 m
Pata 4	0.266 m	0.364 m
Pata 5	0.350 m	0.476 m
Pata 6	0.350 m	0.476 m

Tabla 1. Longitudes de las patas.

Cada pata esta compuesta por dos eslabones principales, los cuales logran un movimiento rotacional mediante tres motores de corriente directa. Dos motores se ubican en la base de la para, y un tercer motor se ubica entre los eslabones de la pata. Bajo este diseño, cada pata tiene 3 grados de libertad.

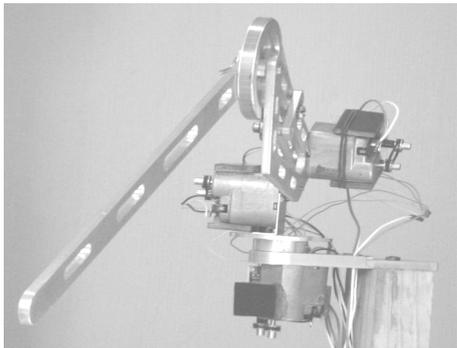


Figura 2. 1er Prototipo de pata

La Figura 2 muestra el primer prototipo de pata diseñada y construida para este tipo de robot caminante [4]. Como resultado de este trabajo, se verificaron las ecuaciones asociadas a la cinemática inversa del robot, y el control de posición y velocidad para realizar la locomoción. Sin embargo, el nuevo diseño reportado en este trabajo considera el uso de un sistema neumático, debido a que se tiene proyectado aplicar el nuevo diseño de robot en locomoción sobre paredes verticales. La sujeción del robot sobre las dichas superficies se realizará mediante ventosas y un sistema de vacío independiente en cada ventosa.

El nuevo diseño, considera que la longitud total del cuerpo del robot se determinó de 1.0 m, teniendo como longitud de la cabeza de 0.278 m, la longitud del tórax 0.31 m y la longitud del abdomen de 0.37 m, el ancho

en la cabeza es de 0.394 m, en el tórax es de 0.20 m y en el abdomen de 0.28 m. La altura estandar del cuerpo del robot sobre la superficie es de 0.5 m.

La mayor parte del material considerado para construir el cuerpo del robot es aluminio, por lo que se obtiene un robot ligero y que cuenta con suficiente resistencia en su configuración física. El tipo de unión en la mayoría de las diferentes piezas diseñadas es de tipo no permanente, esto para permitir ensamblar y desensamblar el robot en las diferentes etapas de prueba, e intercambio de componentes. La transmisión diseñada esta basada a partir de engranes cónicos, brindando de esta manera exactitud y resistencia de los componentes de la transmisión al realizar los movimientos. El peso proyectado del cuerpo del robot es de 11.22 kg. y el peso de cada una de las patas es de 3.9 kg. Bajo estas consideraciones se espera construir un robot que pese menos de 40 Kgs..

3. Estabilidad en locomoción libre

En la locomoción de vehículos con patas se han detectado dos problemas que se presentan en el control. 1) determinar el modo de andar y localización de cada pata para conseguir que el cuerpo se desplace de un lugar a otro; 2) conseguir que en cada instante el robot permanezca estable durante su locomoción. Con el objetivo de tratar de entender “el cómo” de la locomoción del robot, se han investigado particularmente algoritmos de locomoción libre, esto es que el caminar del robot no obedece a una secuencia conocida o previamente programada. Durante las investigaciones realizadas se hicieron algunas consideraciones para realizar los movimientos de cada una de las patas. Una de estas consideraciones es la movilidad de las patas dentro de un área de trabajo correspondiente, esto para mantener la estabilidad estática del robot evitando que éste caiga como consecuencia de una inestabilidad al caminar.

Analizando el modo de caminar del vehículo desde el punto de vista estático se requiere que en todo momento de locomoción de las patas soporten el cuerpo. La proyección del centro de gravedad del cuerpo dentro del polígono de apoyo que forman las patas apoyadas juega un papel muy importante dentro de la estabilidad del robot. El número de patas mínimas consideradas que aseguran una buena estabilidad son tres, que al ser apoyadas en la superficie generan un triángulo donde el robot esta soportado, si se apoyan cuatro se tiene un polígono de cuatro lados, y cinco lados se tiene en el caso que solamente una de las patas esté en movimiento o fuera del contacto de la superficie.

Independientemente del número de patas que estén realizando contacto con la superficie, la proyección del

centro de gravedad debe estar dentro del área del polígono que se forma con las patas que están soportando el cuerpo del robot como se puede ver en la Figura 3. Ésta es la condición indispensable que evita que el robot caiga.

El polígono de apoyo es el que se forma en la superficie por las patas que soportan el cuerpo. Particularmente en este caso el polígono de apoyo está formado por tres patas que son P1, P4 y P5.

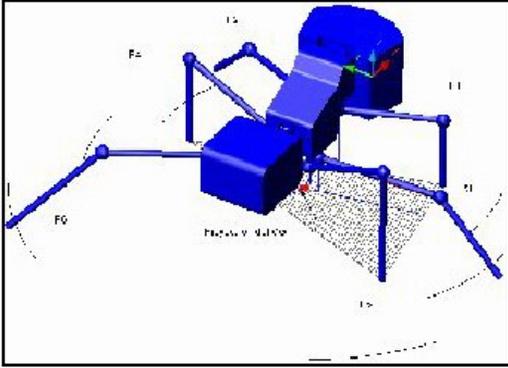


Figura 3. Representación del polígono de apoyo

3.1 Margen de estabilidad

El margen de estabilidad del robot está definido como la mínima distancia que hay entre la proyección del centro de gravedad del cuerpo dentro de un margen de seguridad y la frontera que existe en cada uno de los lados del polígono de apoyo, generado instantáneamente dicho margen en base al estado actual de la configuración del robot [4].

Para ejemplificar este concepto, el polígono de apoyo se muestra en la fig. 4 donde se tienen las patas P2, P3 y P6 apoyadas en la superficie; en este caso se requiere calcular tres distancias S1, S2 y S3.

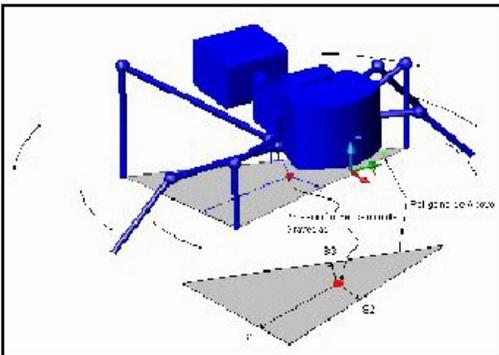


Fig.4 Margen de estabilidad estático

Por otro lado, el margen de seguridad es un valor que permite asegurar que el centro de gravedad se

encuentre dentro del polígono de apoyo. El radio de seguridad (R_s) es la incertidumbre de la posición real del centro de gravedad del robot con respecto al centro geométrico del cuerpo [6]. De esta forma, analizando y evaluando estos conceptos se puede asegurar la estabilidad del robot.

El cálculo de las distancias S del centro de gravedad proyectado $C.G.(x_g, y_g, z_g)$, y el punto $P(x_p, y_p, z_p)$ que forma la perpendicular con el centro de gravedad y la línea formada por dos patas del robot que lo soportan se representa por la ecuación:

$$S = \sqrt{(x_g - x_p)^2 + (y_g - y_p)^2 + (z_g - z_p)^2} \quad (1)$$

Donde (x_g, y_g, z_g) son las coordenadas de la proyección del centro de gravedad y (x_p, y_p, z_p) son las coordenadas del punto P ambas respecto a un sistema de referencia inercial. Utilizando la ecuación de la recta en el espacio la distancia S esta dada a continuación:

$$S = \frac{|Ax_g + By_g + Cz_g + D|}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} \quad (2)$$

Para simplificar el modelo tridimensional, se considera un plano en xy tomando un valor promedio de altura z de las patas, de esta manera el cálculo de la distancia buscada se simplifica a \mathfrak{R}^2 . La distancia S en el plano xy donde las coordenadas del centro de gravedad se denotan como $C.G.(x_g, y_g)$, se considera el punto $P(x_p, y_p)$ donde se forma la perpendicular con el centro de gravedad y la recta formada, por ejemplo por la pata $P_1(x_1, y_1)$ y $P_2(x_2, y_2)$ [7].

$$S = \sqrt{(x_g - x_p)^2 + (y_g - y_p)^2} \quad (3)$$

Despejando, se llega a:

$$a = \sqrt{c^2 - s^2}$$

$$(l - a) = \sqrt{d^2 - s^2}$$

Efectuando una sustitución de variables se obtiene la ecuación:

$$l = \sqrt{d^2 - s^2} + \sqrt{c^2 - s^2} \quad (4)$$

Se esta forma, al despejar S se obtiene:

$$s^2 = d^2 - \frac{1}{4} \left(l + \frac{d^2 - c^2}{l} \right)^2$$

or (5)

$$s^2 = c^2 - \frac{1}{4} \left(l + \frac{c^2 - d^2}{l} \right)^2$$

de donde las variables c , d , y l quedan en función de x_g , y_g , x_1 , y_1 , x_2 , y_2 .

$$\begin{aligned} c^2 &= (x_g - x_1)^2 + (y_g - y_1)^2 \\ d^2 &= (x_g - x_2)^2 + (y_g - y_2)^2 \\ l^2 &= (x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 \end{aligned} \quad (6)$$

3.2 Evaluación del círculo de seguridad

Uno de los parámetros que permiten la reducción de operaciones para determinar la ubicación del centro de gravedad del robot es el círculo de seguridad. Para evaluar del círculo de seguridad se simularon cientos de posiciones del robot, calculando así el centroide en cada una de estas posiciones. Esta tarea, permitió identificar cuales posiciones son las más críticas en el caminar del robot, así como los límites permitidos del radio de seguridad para caminar de forma segura.

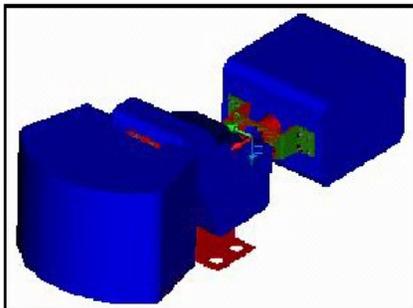


Fig. 5 Diseño del cuerpo del robot (flexible).

Con la aplicación de una herramienta computacional denominada: Mechanical Desktop, se realizaron las simulaciones que permitieron obtener las posiciones del robot, así como el cálculo de su centro de gravedad para cada posición. En la Fig. 5 se muestra el diseño del cuerpo del robot, mismo que permite variar la posición al contar con un grado de libertad (cuerpo flexible).

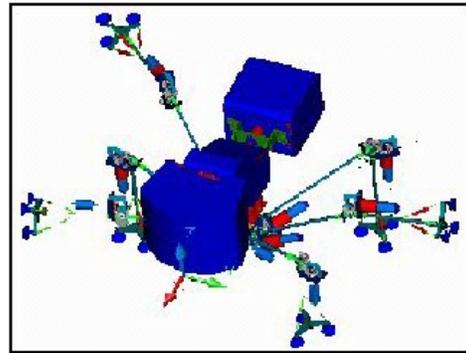


Fig. 6 Posición de análisis de estabilidad.

La Figura 6 muestra una de las posiciones analizadas al momento de simular el caminar del robot. En este caso, se analizó la estabilidad y el valor de los parámetros de locomoción cuando el robot esta soportado únicamente por las patas 1, 4 y 5, y que todas las patas se encuentran hacia delante, de acuerdo a los límites que les permiten sus espacios de trabajo.

	x	y	z	
1	-339.61	0	94.92	
2	-349.329	0	-13.185	123456D
3	-348.241	1.885	-12.029	13456D2U
4	-361.257	2.883	-12.029	13456D2U
5	-361.257	-1.332	-7.815	1456D32U
6	-377.048	3.395	-7.815	1456D23U
7	-380.202	9.847	0.769	145D623U
8	-400.08	-8.7	0.77	145D236U
9	-393.858	-12.295	-7.815	1456D23U
10	-391.543	-8.774	-12.029	14536D2U
11	-390.75	-10.8	-13.19	145236D
12	-389.666	-12.687	-12.029	45236D1U
13	-389.666	-8.47	-7.81	5236D14U
14	-392.82	-14.925	0.769	236D145U
15	-412.7	3.63	0.77	236D514U
16	-428.487	-1.1	0.769	236D451U
17	-441.503	-2.098	0.769	236D145U
18	-435.284	1.493	-7.815	2356D14U
19	-434.495	3.521	-8.971	12356D4U
20	-432.18	0	-13.185	123456D
21	-343.501	1.885	-23.472	13456D2UG
22	-436.764	-2.098	-10.674	236D145UG

123456 = No. De pata del robot

■ = Adelante

■ = Atrás

D = Abajo

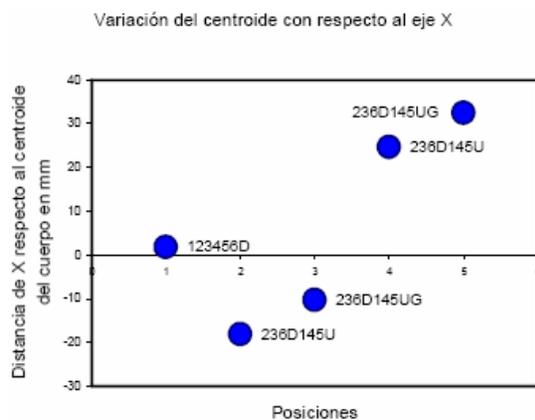
U = Arriba

G = Abdomen en su posición max. de giro

Tabla 2. Ubicaciones del centro de gravedad

En la tabla 2 se sintetizan los valores del centro de gravedad que se obtuvieron en las simulaciones realizadas. Las posiciones están en milímetros y interpreta de la tabla que de las 22 posiciones críticas analizadas, la mayor diferencia en la variación de la posición del centro de gravedad corresponde en la dirección longitudinal del cuerpo del robot. Los valores determinados permitirán variar de forma dinámica el radio de seguridad.

La gráfica 1 muestra los límites máximos del centro de gravedad en el eje x , esto es cuando las patas se encuentran hacia atrás y 1, 4 y 5 están levantadas dando el paso, y el otro límite es cuando las patas están hacia atrás cuando 1, 4 y 5 están levantadas, también se puede observar que con ayuda de la articulación se puede disminuir o aumentar la distancia con respecto al centroide del cuerpo, como es el caso de cuando todas las patas se encuentran hacia atrás, 1, 4 y 5 levantadas y el abdomen girado hacia abajo en un ángulo de 45° para este caso se observa una menor diferencia, la cual es aproximadamente de 10 mm, en el caso donde las patas se encuentran hacia delante y 1, 4 y 5 levantadas, la diferencia aumenta, lo que conduce a considerarlo para así proponer el radio de seguridad, basado en estos datos.



Gráfica 1. Comportamiento del centro de gravedad

4. Resultados

Como resultado del desarrollo de este tipo de robot, se ha logrado un diseño de cuerpo articulado y la determinación del comportamiento de sus parámetros de locomoción libre, para simplificar el cálculo de la estabilidad estática. La realización de algunos aspectos del diseño, tenían que ser tales que no afectaron la funcionalidad del cuerpo, el espacio y las dimensiones,

ya que se pretende conservar la proporcionalidad a escala con respecto a las de una hormiga obrera. Las dimensiones generales del robot son de 1000 mm. de longitud, 392 mm. de ancho, 280 mm. de altura, y la longitud de las patas traseras es de 826 mm, la longitud de las patas intermedias es de 630 mm, y la longitud de las patas delanteras es de 490 mm.

Como resultado del trabajo realizado, se generó un estudio sobre el comportamiento del radio de seguridad, lo que permite determinar la incertidumbre de la posición del centro de gravedad del robot. Dentro de este estudio también se evaluó el efecto que presenta la articulación del cuerpo, la cual ayuda a disminuir esta incertidumbre, permitiendo disminuir en algunas posiciones el radio de seguridad, manteniendo la estabilidad en el robot al caminar. Por otra parte, el resultado de la evaluación del radio de seguridad se comparó con la evaluación del margen de estabilidad del polígono de apoyo, donde los resultados que esta comparación muestra resultados son satisfactorios, ya que el círculo de seguridad siempre se encuentra dentro del polígono de apoyo, siendo muy pequeño en comparación del margen de estabilidad, en donde $S_1 = 111.85$ mm., $S_2 = 386.41$ mm., $S_3 = 178.30$ mm., lo cual indica que estas distancias son mayores a la distancia del radio de seguridad que es de 25 mm., por lo que hace prever una robustez en la locomoción libre. Esto indica que la estabilidad del robot es buena en condiciones estáticas y no se corre el riesgo de que pierda el equilibrio.

El diseño y la prueba en simulación de un cuerpo articulado muestra una propuesta original en comparación con otros tipos de robots con seis patas.

5. Conclusiones

En este artículo se presenta el diseño de un robot caminante de seis patas, el cual está inspirado en la configuración de una hormiga. Se incluye una breve descripción de su configuración y se muestran los criterios utilizados para mantener la estabilidad del robot bajo los criterios de una locomoción libre. Los resultados del análisis del margen de estabilidad y el círculo de seguridad permiten concluir una simplificación en la parametrización y un comportamiento en sus límites, lo que permitirá implementar de forma más sencilla el control de la estabilidad del robot.

Este diseño constituye un banco de ensayos para futuras investigaciones en máquinas caminantes tales como generación de modos de caminar, diseño del sistema de control, fabricación del prototipo, entre otros trabajos de interés.

6. Referencias

- [1] Bares, J.E.,Whittaker. “*Configuration of an autonomous robot for mars exploration*”, World Conference on robotics research: the next five years and beyond. Gaithersburg, Maryland, 1989.
- [2] Brooks, R. “*A robot that walks: Emergent behaviors from a carefully evolve network*”. Massachusetts Institute of technology, vol. 1, pp. 253–262, 1989.
- [3] Fielding, M “*Hamlet: Force/Position Controlled Hexapod Walker- Design and Systems*”. pp. 1-5 University of Canterbury, New Zealand, 2001.
- [4] Gorrostieta E., “*Diseñando un Robot Caminante de Seis Patas*” Segundo Congreso Nacional de Robótica, Asociación Mexicana de Robótica e Instituto Tecnológico de Toluca, septiembre 2000.
- [5] Song S., Waldron K.J.. “*Machine the Walk: The Adaptive Suspencion Vehicle*”. The MIT Press Series In The Intelligence Artificial. First Edition. pp. 37-48, London pp.28, 1989.
- [6] Vargas E., M.A. Jiménez, M.A Armada., “ *A Graphics Simulator for the Telepresence Station of a Legged Locomotion Robot*”, 4th International Symposium on Offshore, Robotics and Artificial Intelligence. pp. 153-162, Marseille, France, 1991.
- [7] Vargas Soto José Emilio “*Diseño y Realización de Algoritmos de Locomoción Libre para Robots Caminantes de Cuatro Patas*”, Universidad Computense de Madrid Departamento de Informática y Automática Facultad de Ciencias Físicas. Madrid España.1994.