

Sistema de Control Electrónico Aplicado en la Navegación de un Robot Hexápodo

Javier Ollervides, Jorge Orrante-Sakanassi, Víctor Santibáñez, Alejandro Dzul
Instituto Tecnológico de la Laguna, Blvd. Revolución y Cuauhtémoc, Torreón, Coah., 27000, México
e-mail: jollervi@itlalaguna.edu.mx, vsantiba@itlalaguna.edu.mx, dzul@faraday.itlalaguna.edu.mx
Teléfono: (52)-871-7051324

Resumen—En este trabajo se describe la implementación de un sistema de control electrónico multivariable de un robot hexápodo caminante. La aplicación se enfoca en el sistema de navegación para el desplazamiento del robot, planificando los movimientos de las piernas del robot. La medición de las variables físicas del robot se realiza utilizando sensores electrónicos de fuerza montados en los extremos de las piernas. Así como un sistema de sensores inerciales para realimentar la orientación y dirección en el sistema de navegación del robot hexápodo. El accionamiento de este robot se implemento con servoactuadores de CD con realimentación de corriente eléctrica, posición y velocidad angulares.

I. INTRODUCCIÓN

El problema principal de un robot móvil autónomo es llevar a cabo el control de la locomoción en terreno escabroso. Un robot caminante puede ser una alternativa convincente en la solución de este problema. Por lo que para llevar a cabo esta tarea, se ha implementado un robot caminante de seis piernas denominado en la literatura moderna como robot hexápodo navegante. La principal razón para la elección de este tipo de robot, consiste en el hecho de que el modelo cinemático de un robot hexápodo presenta el concepto de estabilidad estática durante la locomoción de sus pernas cuando se encuentra navegando, por lo que el control de navegación de este tipo de robots es un gran reto.

El control de un robot caminante hexápodo es un problema complejo, ya que la navegación de robot consiste en el movimiento simultáneo coordinado de seis piernas, cada una con tres grados de libertad (GDL), siendo el total 18 GDL del robot hexápodo. Debido a que durante la navegación del robot se realiza la iteración en un ambiente no estructurado es necesario utilizar un sistema electrónico sensorial para llevar a cabo la realimentación de las variables físicas. No obstante, el robot debe ser capaz de realizar sus tareas bajo una alta incertidumbre en las señales eléctricas que pueden entregar los sensores. Sin embargo, debe de considerarse que el problema principal es coordinar el movimiento angular de las 18 articulaciones del robot durante la locomoción de caminado, en particular la secuencia de los pasos. Este problema puede ser resuelto mediante la implementación un sistema electrónico dedicado de arquitectura distribuida. Información sobre la implementación

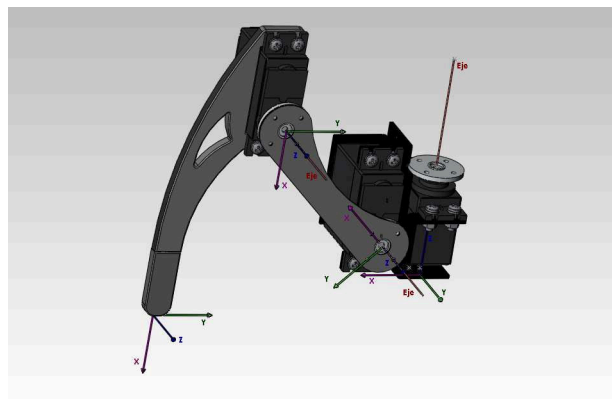


Figura 1. Configuración cinemática de las extremidades del robot.

de algunos robots hexápodos puede ser verificada en las referencias (Belter, 2008) y (Showalter, 2009).

II. ESTRUCTURA MECÁNICA DEL ROBOT

En la Figura 1 se observa la configuración cinemática de una de las extremidades del robot, donde se ha utilizado el sistema de coordenadas en la notación convencional de Denavit-Hartenberg para cada de las articulaciones de una extremidad del robot. Las seis piernas del robot son mecánicamente idénticas. Para la implementación del robot móvil fue necesario llevar a cabo un proceso de diseño de prueba y error para determinar las dimensiones apropiadas de la longitud de los eslabones de cada extremidad. El principal parámetro de diseño tomado en cuenta es el par eléctrico máximo y las dimensiones de los servoactuadores del robot. Muchas de las partes de la estructura están implementadas con aluminio de alta densidad. La forma del robot fue especialmente elegida para mantener el centro de masa del robot en su centro geométrico, y de esta forma mantener el equilibrio de la estructura durante la dinámica de locomoción de las piernas del robot, mientras se ejecuta la secuencia de caminado tipo tripie. La energía cinética acumulada como consecuencia de la forma física del robot le permite llevar a bordo la suficiente cantidad de peso que incluye los servoactuadores de las piernas, así como el sistema electrónico sensorial de abordaje y el sistema electrónico con microcontrolador que implementa el algoritmo de navegación del robot. En la Figura 2 se observa



Figura 2. Vista completa del robot hexápodo.

una vista completa del robot. Cada una de las piernas de robot esta equipada con un sensor de fuerza montado en la parte posterior del extremo final. Este sensor de fuerza es de tipo resistivo, es decir, las resistencia eléctrica entregada por el sensor varía de forma no-lineal en función de la fuerza aplicada en la membrana superficial del sensor, lo que permite que el robot detecte los puntos de apoyo del extremo final de cada pierna sobre una superficie.

III. MODELO DE UNA PIERNA DEL ROBOT

III-1. Modelo cinemático directo: El desempeño de un robot móvil con piernas depende en gran medida del diseño que se elija, por lo que es importante seleccionar un diseño mecánico para la pierna del robot que maximice el movimiento y que imponga una menor cantidad de restricciones en la locomoción de caminado. Para la implementación de cada una de las piernas del robot hexápodo se ha utilizado una cadena cinemática de tres revoluciones o articulaciones RRR. La asignación de los marcos de referencia de las articulaciones utiliza el modelo propuesto por el algoritmo geométrico de Denavit-Hartenberg (Spong, 2006). El modelo geométrico directo para el mecanismo de cada pierna ha sido formulado mediante un marco móvil $O_i(x_i, y_i, z_i)$ en cada articulación, con $i = 1..3$, y un marco fijo $O_W(X_W, Y_W, Z_W)$. Las coordenadas de los marcos del robot son asignados tal como se muestra en la Figura 1. Los diferentes eslabones de las piernas del robot han sido denominadas como: coxa, femur y tibia (véase la Figura 1). El marco de referencia de la pierna del robot inicia con el eslabón cero que es el punto de la estructura del robot donde la pierna esta anclada o montada; el eslabón uno es el coxa, el eslabón dos es el femur y el eslabón tres es la tibia con su extremo final como base. La forma general de la matriz de transformación del eslabón i hasta el eslabón $i - 1$ es mostrada en (1).

$$T_i^{i-1} = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i \cos\alpha_i & \sin\theta_i \sin\alpha_i & L_i \cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i \cos\alpha_i & -\cos\theta_i \sin\alpha_i & L_i \sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

La matriz de transformación se calcula a partir de la siguiente serie de transformaciones:

- 1) Trasladar d_i a lo largo del eje z_{i-1} ,
- 2) Rotar θ_i sobre el eje z_{i-1} ,
- 3) Trasladar a_i a lo largo del eje x_{i-1}
- 4) Rotar α_i a lo largo del eje x_{i-1} .

La transformación total es obtenida como un producto entre las tres matrices de transformación del sistema:

$$T_{base}^{coxa} = T_{femur}^{coxa} T_{tibia}^{femur} T_{base}^{tibia} \quad (2)$$

donde cada una de estas matrices de transformación está definida como:

$$T_{femur}^{coxa} = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & 0 & \sin\theta_1 & L_1 \cos\theta_1 \\ \sin\theta_1 & 0 & -\cos\theta_1 & L_1 \sin\theta_1 \\ 0 & 1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$T_{tibia}^{femur} = \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & -\sin\theta_2 & 0 & L_2 \cos\theta_2 \\ \sin\theta_2 & \cos\theta_2 & 0 & L_2 \sin\theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$T_{base}^{tibia} = \begin{bmatrix} \cos\theta_3 & -\sin\theta_3 & 0 & L_3 \cos\theta_3 \\ \sin\theta_3 & \cos\theta_3 & 0 & L_3 \sin\theta_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Utilizando (2) y considerando (3)-(5) las coordenadas del extremo final de una pierna del robot son:

$$\begin{aligned} x &= \cos\theta_1(L_1 + L_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) + L_2 \cos\theta_2) \\ y &= \sin\theta_1(L_1 + L_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) + L_2 \cos\theta_2) \\ z &= d_1 + L_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) + L_2 \cos\theta_2 \end{aligned} \quad (6)$$

donde el parámetro d_1 es la distancia desde la superficie de desplazamiento hacia la articulación de la coxa y el parámetro L_i representa la longitud de cada eslabón de una pierna del robot.

III-2. Modelo cinemático inverso: El modelo geométrico descrito anteriormente establece la conexión entre las variables articulares y la posición y orientación del marco ubicado en el extremo final de la pierna. El problema del modelo cinemático inverso consiste en determinar las variables articulares a partir de una posición y orientación del marco de referencia del extremo final. Obtener la solución a este problema es importante para especificar las trayectorias de movimiento de las variables articulares de cada una de las piernas del robot. Dichas

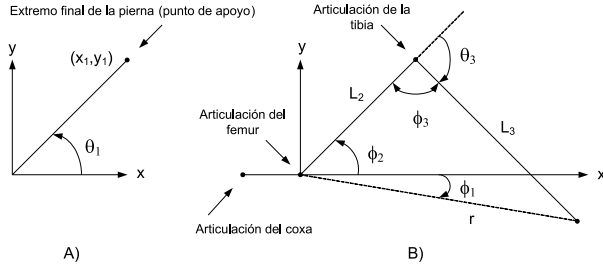


Figura 3. Esquema del modelo cinemático inverso.

trayectorias se obtienen a partir de la transformación de movimiento de la trayectoria asignada en coordenadas de trabajo (x, y, z) , correspondientemente con el movimiento deseado del marco de referencia del extremo final de la pierna. Entonces el objetivo es obtener las tres variables de articulación θ_1 , θ_2 y θ_3 que corresponden a la posición deseada del marco del extremo final. En este caso no se está analizando la orientación del marco de referencia del extremo final ya que solo estamos interesados en su posición. Este procedimiento puede ser verificado en (Sorin, 2011)

Aplicando la cinemática directa mostrada en (6) y considerando las siguientes limitantes: todas las articulaciones permiten la rotación solo sobre un eje, los eslabones del femur y la tibia siempre tienen una rotación en ejes paralelos, y las limitaciones físicas que se pueden determinar para el ángulo de cada articulación. El ángulo de la articulación de la coxa puede obtenerse mediante la función arco-tangente si se observa la figura 3.A.

$$\theta_1 = \arctan\left(\frac{x_1}{y_1}\right) \quad (7)$$

En el orden de determinar las otras dos variables articulares se considera un enfoque geométrico. Además para simplificar el análisis las coordenadas del extremo final de la pierna serán transformadas hacia el marco de referencia del coxa usando la matriz de transformación mostrada a continuación:

$$T_{coxa}^{femur} = \begin{bmatrix} (R_{femur}^{coxa})^T & -(R_{femur}^{coxa})^T * d_{femur}^{coxa} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

La variable ϕ_2 es el ángulo relacionado con la posición del servoactuador del femur, entonces del triángulo mostrado en la Figura 3.B se puede deducir directamente que:

$$\theta_2 = \phi_2 \quad (9)$$

La variable ϕ_1 es el ángulo entre el eje x y el vector resultante r y puede ser calculado utilizando la función arco-tangente:

$$\phi_1 = \arctan\left(\frac{y_3}{x_3}\right) \quad (10)$$

donde x_3 e y_3 son las coordenadas del extremo final de la pierna con respecto al marco de referencia de la coxa. Si consideramos el ángulo ϕ_t como la suma de los ángulos $\phi_1 + \phi_2$ y aplicamos la ley de los cosenos para el triángulo formado por los lados L_2 , L_3 y r (véase la Figura 3.B) se obtiene:

$$\phi_t = \arccos\left(\frac{L_2^2 + r^2 - L_3^2}{2L_2r}\right) \quad (11)$$

donde $r = \sqrt{(x_3^2 + y_3^2)}$. Entonces la variable de la articulación del femur es expresada como:

$$\theta_2 = \arccos\left(\frac{L_2^2 + r^2 - L_3^2}{2L_2r}\right) + \arctan\left(\frac{y_3}{x_3}\right) \quad (12)$$

finalmente aplicando la ley de los cosenos al triángulo mostrado en la Figura 3.B, se calcula el ángulo ϕ_3 como:

$$\phi_3 = \arccos\left(\frac{L_2^2 + L_3^2 - r^2}{2L_2L_3}\right) \quad (13)$$

observando la Figura 3.B se deduce la variable de articulación θ_3 como:

$$\theta_3 = \pi - \phi_3 \quad (14)$$

IV. ARQUITECTURA DE CONTROL DEL ROBOT HEXÁPODO

La arquitectura del sistema del control se muestra en las Figuras 4 y 5. El sistema de control distribuido se divide en 3 capas:

- Capa 1 - Microcontrolador central incrustado (estación base de tele-operación)
- Capa 2 - Microcontrolador maestro incrustado abordo del robot
- Capa 3 - Microcontrolador integrado en el módulo del servo.

La capa de mayor nivel (capa 1) está ubicada en el microcontrolador de la estación central y habilita la comunicación remota con el robot. El microcontrolador central o estación base está dedicado a recibir las señales que representan las variables físicas del robot, como lo son: las posiciones y velocidades angulares, corrientes de los servos. La comunicación entre el sistema electrónico de abordo del robot y el microcontrolador de la estación base se realiza a través de un enlace de radiofrecuencia (RF) mediante un transceptor ZigBee con un canal de comunicación en la frecuencia de 2.4 GHz.

Las siguientes dos capas son parte del sistema de abordo de la plataforma robótica. La capa 2 de menor nivel está anclada en la plataforma del robot. Esta capa es responsable

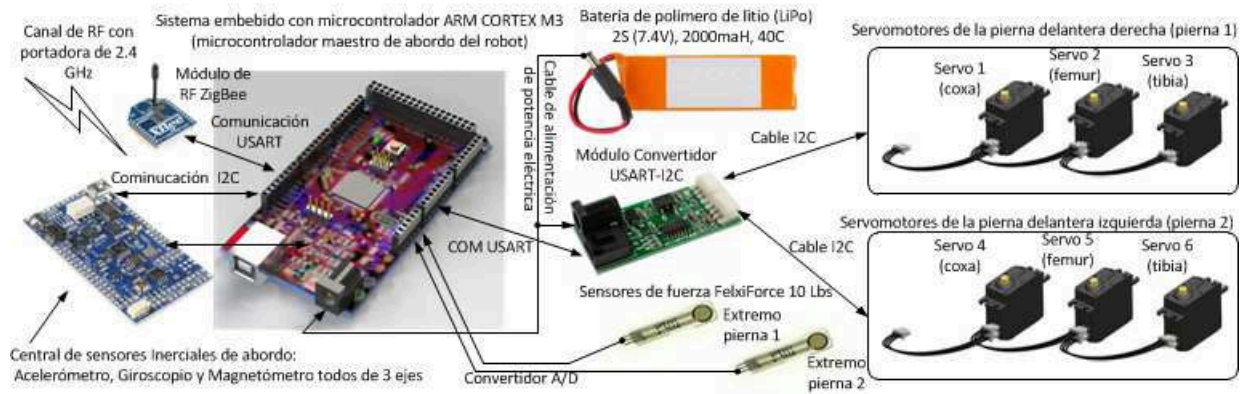


Figura 4. Arquitectura del sistema de control electrónico del robot hexápodo.

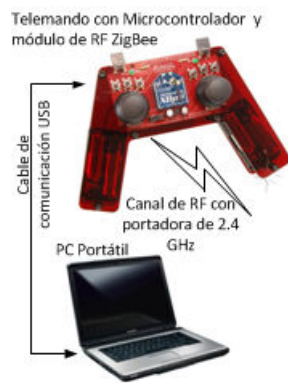


Figura 5. Estación central-base para telemando inalámbrico.

de la planeación de trayectorias para calcular las trayectorias deseadas de posición de los servos, así como de procesar las señales entregadas por el sistema electrónico sensorial de abordo del robot. El sistema embebido de abordo cuenta con un módulo transceptor ZigBee para comunicarse de forma inalámbrica para realizar la ejecución comandos remotos para la asignación de tareas de navegación específicas. El envío de paquetes de tramas datos en un orden a una tasa de velocidad fija, permite que las variables físicas del robot sean graficadas en tiempo real en el visualizador del sistema de la estación central. La capa de menor nivel (capa 3) consiste el sistema de electrónico integrado de accionamiento que implementa un controlador de posición PID para cada uno de los servos (existen tres servoactuadores por pierna). El microcontrolador maestro cuenta con tres puertos de comunicación tipo USART (Transmisor Receptor Asíncrono Universal), dedicando cada uno específicamente realizar el enlace de comunicación serial con dos piernas de forma simultánea. La medición en tiempo real de las variables de estado físicas (posición y velocidad angulares, así como la corriente eléctrica del servo) se realiza por medio del microcontrolador integrado en el módulo del servomotor, la comunicación de datos se realiza mediante

el tercer puerto USART de microcontrolador maestro de abordo, conectado mediante un circuito de interfaz hacia un puerto I2C del microcontrolador integrado del módulo servo. En este proceso el microcontrolador del servo recibe las consignas de posición y velocidad, y envía los datos medidos de los sensores.

V. SISTEMA DE CONTROL DE LOS SERVOACTUADORES

Los servoactuadores utilizados para esta aplicación cuentan con un sistema de comunicación en serie para recibir las consignas de posición y velocidad en formato digital, también cuentan con la capacidad de enviar paquetes de datos que representan las variables de estado del servomotor como lo son la posición y velocidad angular, así como la corriente y el par eléctricos de servomotor. Cada servoactuador tiene integrado un microcontrolador que ejecuta un algoritmo de control realimentado tipo PID-PI. La ley control se expresa como:

$$u_c(t) = K_{pc}i_e(t) + K_{ic} \int i_e(t) \quad (15)$$

donde $i_e(t) = i_d(t) - i_c(t)$ es el vector de error de la corriente eléctrica de los servomotores de una pierna, mientras que $i_c(t)$ es el vector de las corrientes eléctricas medidas de los servomotores de una pierna, e $i_d(t)$ es el vector de las corrientes deseadas del controlador PI de corriente. El vector $i_d(t)$ representa la ley de control PID de posición para las articulaciones de una pierna, expresandose como:

$$i_d(t) = K_p\theta_e(t) + K_i \int \theta_e(t) + K_v\dot{\theta}_e(t) \quad (16)$$

donde $\theta_e(t) = \theta_d(t) - \theta(t)$ es vector del el error de posición, $\theta_d(t)$ es el vector de la posición deseada y $\theta(t)$ es la posición actual, todas las variables mencionadas estan expresadas en coordenadas articulares, y se indicane específicamente para una pierna del robot. Para calcular la trayectoria del paso de una pierna del robot en coordenadas articulares, es necesario recurrir a la planificación de

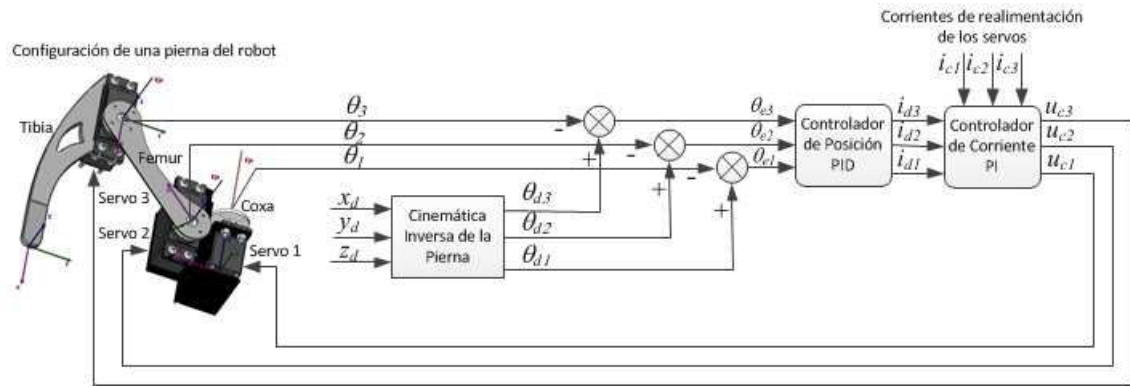


Figura 6. Sistema de servo-control realimentado de una pierna del robot.

trayectorias deseadas de movimiento de tipo parabólico en coordenadas de trabajo, y al modelo cinemático inverso del robot. Las ecuaciones para la planeación del movimiento parabólico son

$$x_d = \frac{x_f - x_i}{2} \left(1 - \cos\left(\frac{\pi t}{t_f - t_i}\right) \right), \quad z_d = -0,2x_d^2 + 2x_d \quad (17)$$

donde los parametros x_i y x_f la distancia inicial y la distancia final en el eje x , mientras que las constantes t_i y t_f representan el tiempo transcurrido al avanzar la distancia. En la Figura 7 se muestran las graficas de las trayectorias deseadas de movimiento para el extremo final de una pierna del robot.

Existen tres lazos de realimentación en el sistema de control del robot. Uno es el lazo que implementa un controlador PID-PI, el cual es usado para controlar la posición y la velocidad en el espacio de trabajo del robot. El otro lazo realiza la realimentación la fuerza aplicada en el extremo final de cada pierna del robot para determinar la compensación de movimiento de las piernas, si se encuentra algún obstáculo en la superficie de desplazamiento. Este lazo puede ser considerado como el controlador de movimiento de una pierna completa del robot, por lo que en total se tienen seis controladores de movimiento, uno por cada pierna del robot. Un tercer controlador realimenta la orientación y la dirección de navegación del robot. Los sensores utilizados para tal medición son: un acelerómetro de 3 ejes en conjunto con un giroscopio de 3 ejes utilizados para le medir la inclinación, y un magnetómetro de 3 ejes para medir la dirección.

VI. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE LOCOMOCIÓN PARA LA NAVEGACIÓN DEL ROBOT

El algoritmo de locomoción implementado para llevar a cabo la navegación del robot es programado en el lenguaje de programación $C++$ para el microcontrolador ARM CORTEX M3. Los movimientos de avance del robot hexápodo son calculados en el espacio de trabajo (x,y,z) , mediante trayectorias parabólicas como la que se observa en la Figura 7, de tal manera que la secuencia de pasos

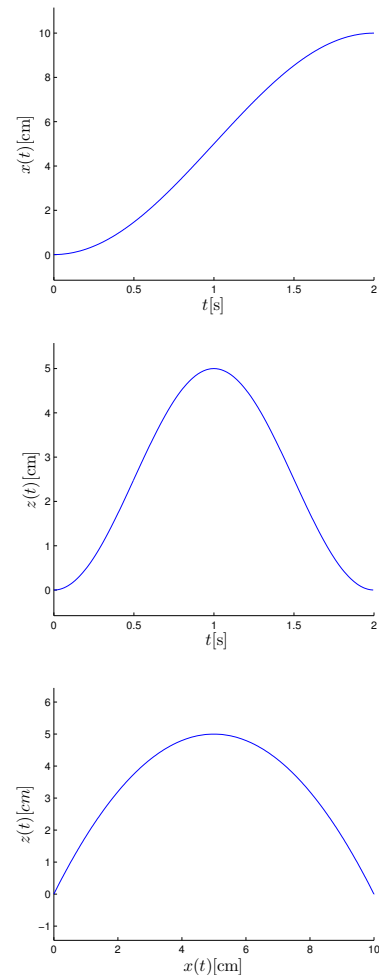


Figura 7. Trayectoria deseada para una pierna del robot.

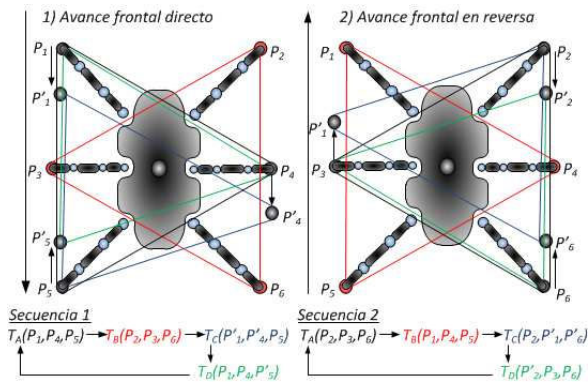


Figura 8. Tripies para el caminado frontal del robot.

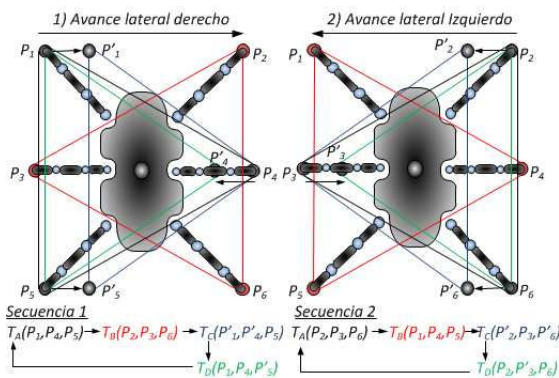


Figura 9. Tripies para el caminado lateral del robot.

del robot se realiza por medio del control de movimiento de tripie con una consigna de seguimiento de trayecto parabólico. El robot puede avanzar de forma frontal y lateral, así como realizar movimientos de rotación sobre su centro geométrico. Para realizar movimientos simultáneos con tres piernas, se aplica el concepto conocido como caminado con tripie o triángulo de equilibrio, donde el robot hexápodo conserva su equilibrio, ya sea que este sostenido estáticamente o realizando un movimiento de avance o de rotación. El concepto consiste conservar el centro de gravedad del robot dentro del área formada por el tripie o triángulo de apoyo. En las Figuras 8 y 9 se muestra el tripie de movimiento directo y lateral del robot, respectivamente.

VII. CONCLUSIÓN

En este trabajo se ha realizado la implementación de un robot hexápodo caminante de arquitectura abierta, el cual puede ser reprogramado para realizar la evaluación de algoritmos de control de navegación con realimentación sensorial. Los resultados experimentales obtenidos en la plataforma de control electrónico de abordo del robot pueden ser almacenados en un computador central y graficados en tiempo real mediante un sistema de comunicación de datos inalámbrico. En la integración de los diversos sistemas electrónicos de comunicación, control y percepción sensorial se pudo comprobar la viabilidad de utilizar sis-

temas electrónicos con microcontroladores embebidos, que permiten una mayor miniaturización del sistema de control de abordo de un robot móvil.

VIII. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo a sido financiado parcialmente por DGEST, CONACyT y proyecto CONACyT 134534.

REFERENCIAS

- D. Belter, K. Walas, and A. Kasinski (2008) Distributed control system of DC servomotors for six legged walking robot. *Power Electronics and Motion Control Conference, 2008. EPE-PEMC 2008. 13th*, 1044 - 1049, 1-3 Sept. 2008.
- Mark Showalter (2009). *Hexapod Work Space and Walking Algorithm: Work Space Analysis and Walking Algorithm Development for A Radially Symmetric Hexapod Robot*. VDM Verlag.
- Manoui-Olaru Sorin, Nitulescu Micrea, and Stoian Viorel (2011). Hexapod Robot. Mathematical Support for Modeling and Control. *System Theory, Control, and Computing (ICSTCC), 2011 15th International Conference on*, 1-6, 14-16 Oct. 2011.
- Mark W. Spong, Seth Hutchinson, and M. Vidyasagar (2005). *Robot Modeling and Control*. John Wiley and Sons.