

Sistema de Control de Locomoción de un Robot Hexápodo Caminante

Javier Ollervides, Nadxielli Pineda, Armando Saenz, Víctor Santibáñez y 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 para realizar la locomoción de un robot hexápodo caminante. La aplicación se enfoca en el desplazamiento inteligente del robot, con una planificación en tiempo real de los movimientos de las piernas del robot caminante. El robot interactúa con su ambiente mediante sensores electrónicos de fuerza montados en los extremos de las piernas, y mediante un sistema de sensores inerciales para realimentar la orientación y dirección del tórax del robot hexápodo. Los actuadores del robot son servomotores de CD con impulsor electrónico integrado, el cual cuenta con la alternativa para medir en tiempo real la corriente eléctrica, la posición y la velocidad angulares de la flecha del servomotor conectada en alguna articulación del robot.

I. INTRODUCCIÓN

El problema principal de un robot móvil autónomo es llevar a cabo el control de la locomoción en terreno escabroso. Algunas de las estructuras empleadas para contruir robots móviles son obtenidas del reino animal como en este caso lo es el hexapodo. Varios investigadores han basado los diseños de robots con piernas en animales cuadrúpedos o en insectos. Dentro de investigaciones de robots con piernas se puede decir que el robot más sobresaliente es el “Big Dog” el cual consta de 4 piernas y tiene aplicaciones militares. También se pueden mencionar los robots “RHex” (Moore, 2002) y “MELMANTIS” (Melmantis, 1997) los cuales son robots con seis piernas denominados en la literatura moderna como robots hexápodos. El primero también llamado “Robot Parkour” presenta un solo motor por extremidad y tiene la capacidad de saltar ya bien sea desde suelo firme o brincar de un extremo a otro. El robot “MELMANTIS” usa largas barras en sus extremidades y las cuales pueden conmutar entre piernas y brazo manipulador. También existen robots con un gran número de actuadores en cada una de sus piernas como se menciona en la referencia (Jianhua, 2006) y el cual tiene 42 grados de libertad. Un robot móvil con piernas tiene la capacidad de desplazarse sobre terrenos difíciles, cosa que los robots móviles con ruedas no pueden. Los robots móviles con piernas pueden desplazarse sobre derrumbes o sobre montañas en donde no existen caminos planos, si no más bien escabrosos. El control de un robot caminante hexápodo es un problema complejo. El sistema de locomoción empleado en el robot consiste en el movimiento simultáneo coordinado de seis piernas, cada una con tres grados de libertad (G.D.L.), sien-

do el total 18 G.D.L. del robot hexápodo algunas referencias a de trabajo previos con robots de características parecidas están en (Okamoto, 2009; Roennau, 2010). Debido a que durante la locomoción del robot se realiza la interacción en un ambiente no estructurado es necesario utilizar un sistema electrónico sensorial para la detección de obstáculos. Sin embargo, debe de considerarse que el problema principal es coordinar el movimiento angular de las 18 articulaciones del robot durante la locomoción, 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 de algunos robots hexápodos caminantes puede ser verificada en las referencias (Belter, 2008) y (Showalter, 2009).

II. CONFIGURACIÓN MECÁNICA DEL ROBOT

Se emplea la estructura de un robot basado en el hexapodo Phoenix mostrado en la Figura 1, el cual es un modelo de la empresa Lynxmotion. Esta equipado con servomotores CDS5516 los cuales son compatibles con programación para servomotores AX-12 de Bioloid.

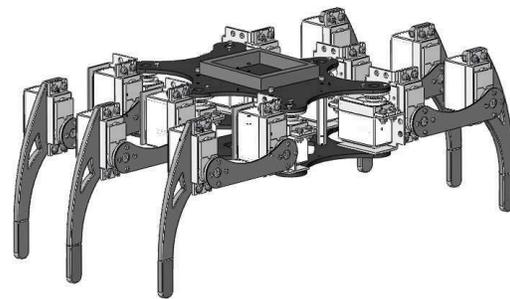


Figura 1. Vista 3D del robot hexápodo.

Para realizar el procesamiento se emplea un driver CM-530 con un procesador ARM Cortex M3, este dispositivo es programable por USB escribiendo el programa en lenguaje C/C++ con Eclipse y las librerías de WinARM. Cada una de las piernas tiene 3 GDL y están actuadas con los

servomotores antes mesionados. La forma del robot fue especialmente elegida para mantener el centro de masa del robot en su centro geométrico, para que de esta forma se mantenga el equilibrio del tórax durante la locomoción del robot. La energía cinética acumulada como consecuencia de la forma física del robot le permite llevar abordo la suficiente cantidad de peso para incluir los servomotores de las piernas, así como el sistema electrónico sensorial de abordo y el sistema electrónico con microcontrolador que implementa el algoritmo de locomoción del robot.

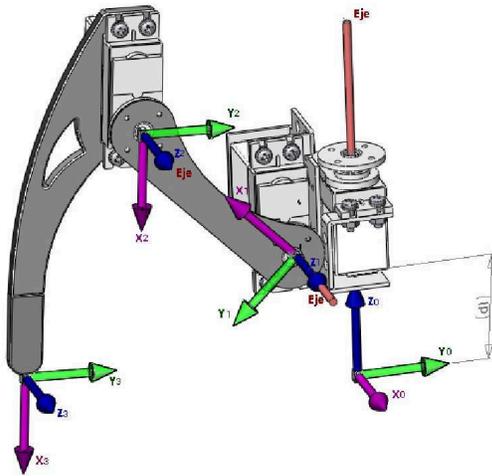


Figura 2. Asignación de marcos en una pierna del robot.

II-.1. Modelo cinemático de una pierna: Es importante seleccionar una configuración mecánica para la pierna del robot que maximice el movimiento y que imponga una menor cantidad de restricciones en la locomoción del robot. Para la implementación de cada una de las piernas del robot hexápodo se ha utilizado una cadena cinemática de tres revoluciones o articulaciones RRR. 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 $i = 1..2$, 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 2. Los diferentes eslabones de las piernas del robot han sido denominadas como: coxa, fémur y tibia (véase la Figura 2). 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 está anclada o montada en el piso; el eslabón uno es el coxa, el eslabón dos es el fémur y el eslabón tres es la tibia con su extremo final como base. Para calcular la ecuación de la cinemática directa se emplearon los parámetros Denavit Hartenberg modificados por Craig (Ollero, 2007) y dan como resultado

las siguientes matrices de transformación

$$T_1^0 = \begin{bmatrix} \cos(q_1) & -\sin(q_1) & 0 & 0 \\ \sin(q_1) & \cos(q_1) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_2^1 = \begin{bmatrix} \cos(q_2) & -\sin(q_2) & 0 & l_1 \\ \sin(q_2) & \cos(q_2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$T_{OT}^2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

donde q_1 es el ángulo del fémur [grados], q_2 es el ángulo de la tibia [grados], l_1 es la medida del fémur [cm], l_2 es la medida de la tibia [cm] para encontrar la matriz de transformación T_{OT}^0 se realiza el producto $T_1^0 \cdot T_2^1 \cdot T_{OT}^2$. El resultado obtenido corresponde con las siguientes ecuaciones para la cinemática directa de cada una de las piernas del robot hexápodo, por lo que las coordenadas del extremo final de una pierna del robot son:

$$x = l_1 \cos(q_1) + l_2 \cos(q_1 + q_2)$$

$$y = l_1 \sin(q_1) + l_2 \sin(q_1 + q_2) \quad (2)$$

mientras que la cinemática diferencial directa relaciona las velocidades de articulación con las velocidades en el espacio de trabajo, por medio de la matriz jacobiana del robot, ésta se obtiene por el método de propagación de velocidades cuya ecuación es

$$v = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{q}_1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x \\ y \\ 0 \end{bmatrix} + R_2^0 \left(\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} l_2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \right) \quad (3)$$

$$R_2^0 = \begin{bmatrix} \cos(q_1 + q_2) & -\sin(q_1 + q_2) & 0 \\ \sin(q_1 + q_2) & \cos(q_1 + q_2) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

siendo v el vector de velocidades traslacionales del extremo de la tibia [cm/s], \dot{q}_1 y \dot{q}_2 las velocidades de los servomotores [grados/s]. Al desarrollar la ecuación 3 se puede obtener un jacobiano reducido que es

$$J(q) = \begin{bmatrix} j_{11} & j_{12} \\ j_{21} & j_{22} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$j_{11} = -l_2 \sin(2q_1 + 2q_2) + l_1 \sin(q_1) + l_1 \sin(2q_1 + q_2)$$

$$j_{12} = -l_2 \sin(q_1 + q_2)$$

$$j_{21} = l_2 \cos(2q_1 + 2q_2) + l_1 \cos(q_1) + l_1 \cos(2q_1 + q_2)$$

$$j_{22} = l_2 \cos(q_1 + q_2)$$

por lo tanto la cinemática diferencial directa se define como

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = J(q) \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

siendo \dot{x} y \dot{y} las velocidades traslacionales [cm/s] del extremo de la tibia en el plano.

II-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 la piernas del robot. Dichas 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 dos variables de articulación 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. Aplicando la cinemática directa mostrada en (2) y considerando las siguientes limitantes: todas las articulaciones permiten la rotación solo sobre un eje, los eslabones del fémur y la tibia siempre tienen una rotación en ejes paralelos, y las limitaciones físicas que se pueden determinar para el ángulo de cada articulación. Bajo las consideraciones anteriores el modelo cinemático inverso de una pierna del robot tiene la siguiente forma para las articulaciones del fémur y la tibia:

$$q_1 = \arctan 2(y, x) - \arctan 2(l_2 - \sin(q_2), l_1 + l_2 \cos(q_2)) + \frac{\pi}{2} \quad (6)$$

$$q_2 = -\arccos\left(\frac{x^2 + y^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1l_2}\right)$$

mientras que la cinemática diferencial inversa relaciona las velocidades en el espacio de trabajo con las velocidades de articulación, por medio de la matriz inversa del jacobiano del robot, ésta se puede expresar de la siguiente forma:

$$J^{-1}(q) = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$h_{11} = \frac{\cos(q_1 + q_2)}{l_2 \sin(q_1 + q_2) + l_1 \sin(q_1) - l_1 \sin(q_2)}$$

$$h_{12} = -\frac{\sin(q_1 + q_2)}{l_2 \sin(q_1 + q_2) + l_1 \sin(q_1) - l_1 \sin(q_2)}$$

$$h_{21} = -\frac{l_2 \cos(2q_1 + 2q_2) + l_1 \cos(q_1) + l_1 \cos(2q_1 + q_2)}{l_2^2 \sin(q_1 + q_2) + l_1 \sin(q_1) - l_1 \sin(q_2)}$$

$$h_{22} = \frac{l_2 \sin(2q_1 + 2q_2) + l_1 \sin(q_1) + l_1 \sin(2q_1 + q_2)}{l_2^2 \sin(q_1 + q_2) + l_1 \sin(q_1) - l_1 \sin(q_2)}$$

III. 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 6, de tal manera que la secuencia de pasos 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 3 y 4 se muestra el tripie de movimiento directo y lateral del robot, respectivamente.

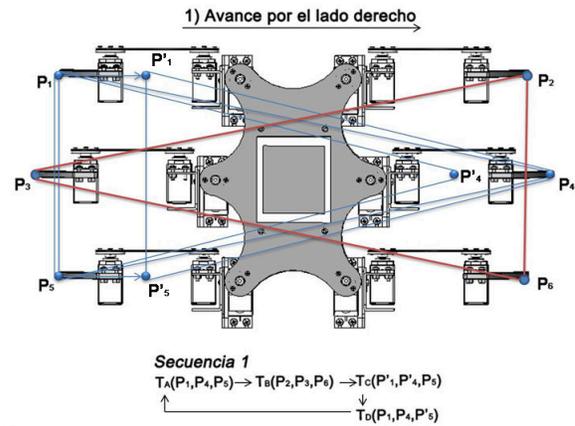


Figura 3. Tripies para el caminado lateral derecho.

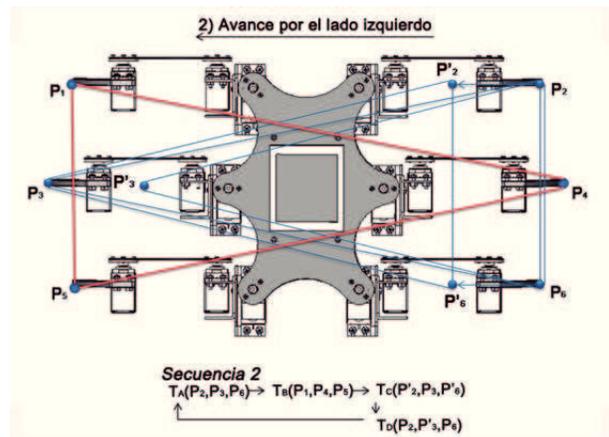


Figura 4. Tripies para el caminado lateral izquierdo.

En la tabla I se muestra la secuencia de tripies para el movimiento del robot. Para obtener más información acerca de métodos de locomoción se debe consultar las siguientes referencias (Showalter, 2009) and (Celaya, 1998).

TABLA I
SECUENCIA DE TRIPIES

Tripod	Forward	Backward	Right side	Left side
A	P_1, P_4, P_5	P_2, P_3, P_6	P_1, P_4, P_5	P_2, P_3, P_6
B	P_2, P_3, P_6	P_1, P_4, P_5	P_2, P_3, P_6	P_1, P_4, P_5
C	P'_1, P'_4, P'_5	P'_2, P'_3, P'_6	P'_1, P'_4, P'_5	P'_2, P'_3, P'_6
D	P_1, P_4, P_5	P_2, P_3, P_6	P_1, P_4, P_5	P_2, P_3, P_6

IV. SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE LOCOMOCIÓN

Para observar las posturas del robot se desarrollo un programa con el paquete “MATLAB” y el “Toolkit Hemo-ro” cuyos comandos pueden consultarse en (Ollero, 2007). Dentro de las ventajas que presenta este Toolkit es la ingresar directamente los parámetros de la convención Denavit-Hatrenberg modificados por Craig y como resultado son las matrices de transformación homogéneas. Los resultados de dicho programa se pueden observar en la Figura 5.

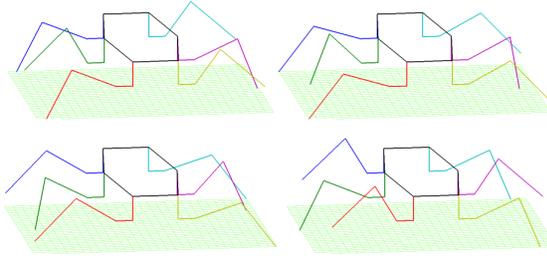


Figura 5. Movimiento lateral del hexapodo

V. SISTEMA DE CONTROL DE LOS SERVOACTUADORES

Los servomotores 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 servomotor tiene integrado un microcontrolador que ejecuta un algoritmo de control realimentado tipo PID-PI. La ley control se expresa como:

$$u_c(t) = K_{pc}i_e(t) + K_{ic} \int i_e(t) \quad (8)$$

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, expresándose como:

$$i_d(t) = K_p\theta_e(t) + K_i \int \theta_e(t) + K_v\dot{\theta}_e(t) \quad (9)$$

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 están expresadas en coordenadas articulares, y se indican 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 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

$$x_d = \frac{x_f - x_i}{2} \left(1 - \cos\left(\frac{\pi t}{t_f - t_i}\right) \right), \quad z_d = -0.2x_d^2 + 2x_d \quad (10)$$

donde los parámetros 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 6 se muestran las gráficas de las trayectorias deseadas de movimiento para el extremo final de una pierna del robot.

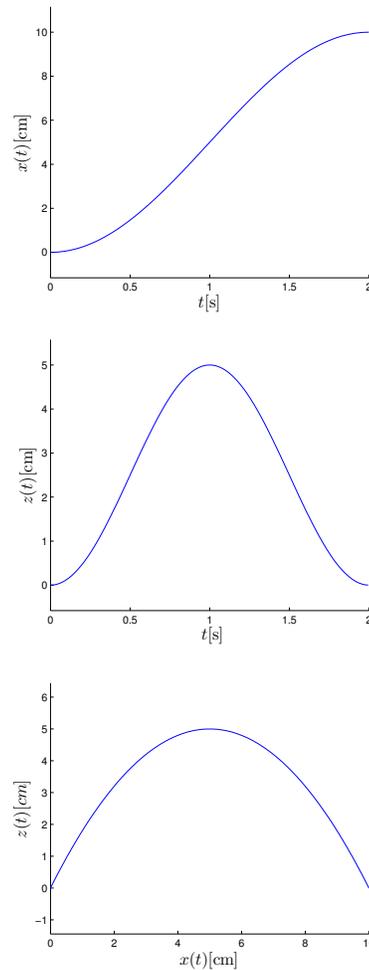


Figura 6. Trayectoria deseada para una pierna del robot.

Existen tres sistemas de control del robot. El primero es el sistema que implementa un controlador PID-PI, el cual es

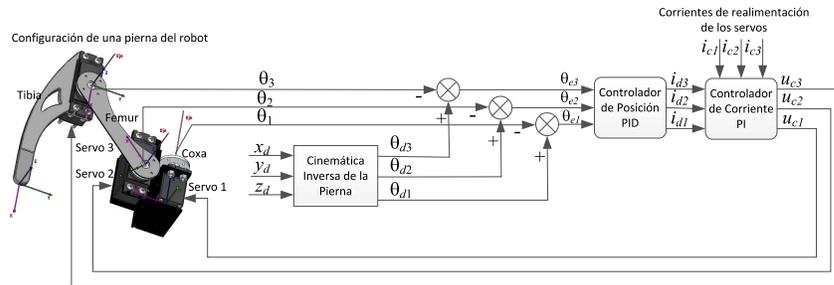


Figura 7. Sistema de servo-control realimentado de una pierna del robot.

usado para controlar la posición y la velocidad en el espacio de trabajo del robot. El segundo lazo de control realimenta 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. En la Figura 8 se observa la trayectoria deseada para el movimiento de cada pierna del robot durante el desplazamiento con tripie.

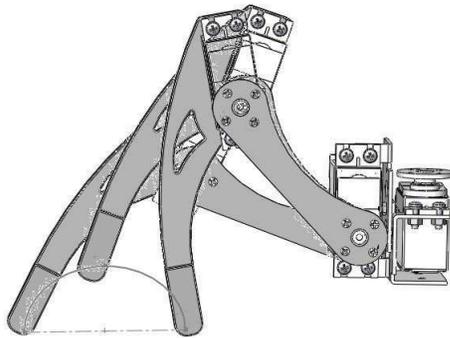


Figura 8. Movimiento deseado de una pierna del robot.

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 medir la inclinación, y un magnetómetro de 3 ejes para medir la dirección.

VI. ARQUITECTURA DEL SISTEMA ELECTRÓNICO DEL ROBOT HEXÁPODO

La arquitectura del sistema electrónico del robot se muestra en las Figuras 9 y 10. 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 abordaje 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 abordaje de la plataforma robótica. La capa 2 de menor nivel está anclada en la plataforma del robot. Esta capa es responsable 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 abordaje del robot. El sistema embebido de abordaje cuenta con un módulo transceptor ZigBee para comunicarse de forma inalámbrica para realizar la ejecución de comandos remotos para la asignación de tareas de navegación específicas. El envío de paquetes de tramas de 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 en el sistema de electrónico integrado de accionamiento que implementa un controlador de posición PID para cada uno de los servos (existen tres servomotores por pierna). El microcontrolador maestro cuenta con tres puertos de comunicación tipo USART (Transmisor Receptor Asíncrono Universal), dedicando cada uno específicamente para 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 abordaje, conectado mediante un circuito de interfaz hacia un puerto I2C del microcn-

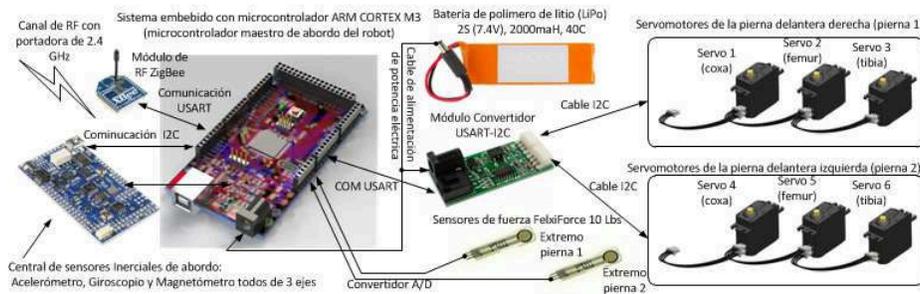


Figura 9. Arquitectura del sistema electrónico del robot hexápodo.

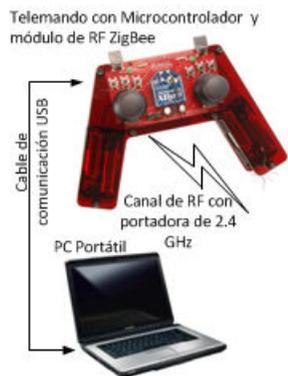


Figura 10. Estación central-base para telemando inalámbrico.

trolador integrado del módulo servo. En este proceso el microcontrolador del servo recibe las consignas de posición y velocidad, y envía las variables medidas de posición, velocidad y de la corriente eléctrica, para cada servomotor de CD montado en la correspondiente articulación del robot.

VII. CONCLUSIÓN

En este trabajo se ha realizado la implementación del sistema de locomoción de un robot hexápodo caminante de arquitectura abierta, el cual puede ser reprogramado para realizar la evaluación de movimientos, mediante la ejecución en tiempo real de algoritmos de control con realimentación sensorial. En la integración de los diversos subsistemas del robot se pudo comprobar la viabilidad de utilizar tarjetas con microcontrolador embebido, 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.

E. Celaya and J.M. Porta (1998) A Control Structure for the Locomotion of a Legged Robot on Difficult Terrain. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, Vol. 5, No. 2, Page(s) 43-51, June 1998.

Jianhua, G. (2006). Design and Kinematic Simulation for Six-DOF Leg Mechanism of Hexapod Robot. *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics* (pp. 625-629). Kunming, China.

Liu, Z., and Wang, B.-W. (2010). Kinematics and Simulations of a 6 - leg, 4-DOF Parallel Manipulator. *2010 International Conference on Intelligent System Design and Engineering Application* (pp. 919-922). Ieee. doi:10.1109/ISDEA.2010.143

Manoui-Olaru Sorin, Nitulescu Mirela, 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 Showalter (2009). *Hexapod Work Space and Walking Algorithm: Work Space Analysis and Walking Algorithm Development for A Radially Symmetric Hexapod Robot*. VDM Verlag.

Mark W. Spong, Seth Hutchinson, and M. Vidyasagar (2005). *Robot Modeling and Control*. John Wiley and Sons.

Melmantis, M., Koyachi, N., Arai, T., & Kawai, K. (1997). Mechanical Design of Hexapods with Integrated Limb. *8th International Conference on Advanced Robotics*. (pp. 273-278). Monterey, CA.

Moore, E. Z., Campbell, D., Grimminger, F., & Buehler, M. (2002). Reliable stair climbing in the simple hexapod "RHex" *Proceedings 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.02CH37292)* (Vol. 3, pp. 2222-2227). Washington, DC: Ieee. doi:10.1109/ROBOT.2002.1013562

Okamoto, N., Kurihara, Y., and Watanabe, K. (2009). Motion control of multi-legged machines. *ICROS-SICE International Joint Conference* (pp. 2700-2704). Fukuoka International Congress Center, Japan.

Ollero, A. (2007). Robótica Manipuladores y Robots Móviles. Alfaomega.

Roennau, A., Kerscher, T., and Dillmann, R. (2010). Design and kinematics of a biologically-inspired leg for a six-legged walking machine. *3rd IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics* (pp. 626-631). Tokyo, Japon: IEEE. doi:10.1109/BIOROB.2010.5626328