

Diseño y Control de Robots Móviles

Aguilera Hernández Martha I., Bautista Miguel A., Iruegas Joaquín
Depto de Ing. Eléctrica y Electrónica
Instituto Tecnológico de Nuevo Laredo
Reforma Sur 2007
88250, Nuevo Laredo, Tam.

Resumen

Este artículo presenta una descripción general de los diferentes tipos de control aplicados en el campo de los robots móviles. Como aplicación experimental se muestran dos de las técnicas control. La primera aplicada a un robot con ruedas y la segunda enfocada a un robot con patas hexápodo. Se muestran las etapas de diseño del control y los resultados obtenidos tanto experimentales como de simulación de cada uno de ellos. También se presenta el diseño y construcción de un robot móvil con tres ruedas. Se muestra el procedimiento utilizado así como las características mecánicas del robot. Este robot fue diseñado con la finalidad de poder implementar en él algoritmos de seguimiento y planeación de trayectorias teniendo un amplio conocimiento de sus características físicas. Asimismo obtener un prototipo robótico a menor costo que uno comercial.

Palabras claves: Robots con patas, Robots con ruedas, Hexápodo.

1. INTRODUCCIÓN.

En nuestros días, es común hablar de robots con alguna forma de movimiento autónoma, debido al creciente interés que ha despertado esta área de la robótica. El movimiento autónomo se ha logrado mediante la implementación de técnicas de control auxiliado por el software y hardware moderno. Una forma de lograr autonomía en el robot es implementarle rieles, ruedas o patas para su movimiento. Dependiendo de la tarea a realizar, se prefieren los rieles, las patas o las ruedas en el sistema. Por ejemplo si el terreno a atravesar es disparejo, se preferiría la implementación de un buen sistema de tracción en el robot o la implementación de patas.

Una definición de robot móvil viene de la teoría clásica de robots[10]: “Un robot móvil es un vehículo de propulsión autónoma y movimiento (re) programado por medio de control automático para realizar una tarea específica.”

Los robots móviles se clasifican en guiados y no guiados. El vehículo guiado está restringido a un conjunto de trayectorias predefinidas en su área de trabajo. Estas trayectorias están indicadas por líneas ópticas ó magnéticas o una secuencia de movimientos guardados en la memoria. El robot en ningún momento puede abandonar la trayectoria. A estos robots se les llama también vehículos automáticos guiados. Los vehículos no-guiados no están restringidos a una trayectoria predefinida. A este tipo de robots no-guiados pertenecen los robots submarinos (bajo el agua), los del espacio aéreo y/o espacial y los terrestres. Los robots terrestres han sido clasificados por su sistema de movimiento en robot con ruedas, con patas o con rieles. Así cada robot desarrolla diferentes tareas de acuerdo a su capacidad.

El problema básico de un robot móvil es el de navegación, es decir, moverse de un lugar a otro auxiliado de sensores, planeación y control. El problema de navegación (Figura 1) es simplemente encontrar una trayectoria desde un inicio (O) a un objetivo (F).

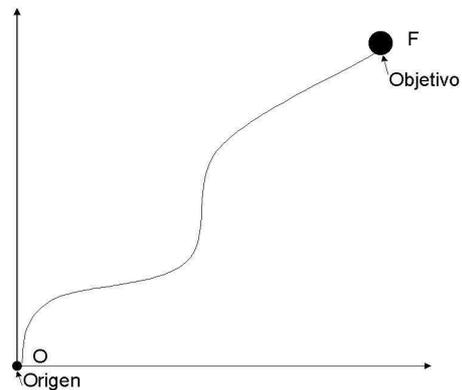


Figura 1: Trayectoria de un robot móvil

En [10] se muestra la relación entre las tareas que componen la navegación. Estas son principalmente: Mapeo del Ambiente, La planeación de Trayectoria y el Seguimiento de ésta.

Esta última tiene como subtarefas la de sensado del ambiente, eludir obstáculos y control de movimiento. Este artículo se enfoca al estudio del control de movimiento en robots móviles. El artículo se enfoca al control de robots móviles terrestres. Se abarcan las técnicas de control Proporcional-Derivativo(PD), Proporcional-Integral(PI), Adaptivas y de Inteligencia artificial. Como muestra experimental se presentan dos estudios realizados: El primero con un robot con ruedas y el segundo enfocado a un robot con patas hexápodo. El robot experimental con ruedas consta de dos ruedas controlables (con dos servomotores) y una rueda libre, teniendo en su base un brazo manipulador de 4 grados de libertad. En la segunda parte se muestra un sistema robótico con 6 patas, denominado hexápodo con la implementación de un controlador PD Aumentado.

Para que su movimiento sea eficiente y autónomo requiere de sensores y actuadores que le permitan tener información del mundo real. También requiere de una buena interface que le permita recibir los estímulos de forma óptima y generar la respuesta adecuada para el desarrollo de su tarea.

Teniendo esta capacidad el robot puede planear sus movimientos y ejecutarlos de manera eficiente teniendo un conjunto de algoritmos especiales. Esto requiere del conocimiento de la cinemática que nos dará el conjunto de movimientos posibles del robot y de la dinámica la cual nos dará el conjunto de fuerzas que se requieren para obtener el movimiento apropiado para cumplir el objetivo de la tarea.

Existen en el mercado diversos robots diseñados para tareas y aplicaciones específicas. Esta especialización puede llegar a ser un inconveniente cuando se desea añadir una tarea o grupo de tareas diferentes a la que fue diseñado, ya que con frecuencia los comerciantes o diseñadores solo facilitan la información básica del robot referente a la tarea específica. Otro detalle más es el costo elevado que estos prototipos tienen.

El artículo está organizado de la siguiente manera: La sección I presenta la introducción, la sección II presenta el control de robots móviles con ruedas y un ejemplo experimental. La sección 3, el control de robots con patas y un ejemplo experimental. La sección 4 se enfoca al diseño e implementación de un robot móvil con tres ruedas. Finalmente se muestran las conclusiones de este artículo.

2. CONTROL DE ROBOTS MÓVILES CON RUEDAS

El diseño del control para los robots móviles con ruedas depende de su capacidad de desplazarse en

determinada dirección. Los diseños holonómicos son aquellos en los cuales el robot puede maniobrar en cualquier dirección desde cualquier dirección arbitraria. El vehículo robótico omnidireccional holonómico tiene 3 movimientos planares independientes, dos para traslación y uno para rotación. Esto permite que las estrategias de control sean más sencillas de implementar. Para los vehículos no-holonómicos, el movimiento es producido por dos desplazamientos independientes y el espacio de configuración es de dimensión tres. Esto hace que las estrategias de control se vuelvan más complejas pero el aspecto de diseño mecánico es más sencillo. Ejemplo de un sistema omnidireccional en un robot móvil se encuentra en [11], consiste de tres ruedas ensambladas con un espaciado de 120 grados una de otra. Cada ensamble de rueda consiste de un par de ruedas ortogonales con un actuador activo y una dirección pasiva que es ortogonal una de otra. El punto de simetría, se asume que es generalmente coincidente con el centro de masa.

Los vehículos robóticos omnidireccionales holonómicos pueden ser estabilizados por retroalimentación de estado [8], estrategia muy similar al control por dinámica inversa utilizada en robots manipuladores rígidos. En [11], se implementó la acción de control dada por:

$$q(\theta, t) = P(\theta)U(t)$$

con

$$P(\theta) = \begin{pmatrix} -\sin\theta & -\sin(\frac{\pi}{3}-\theta) & \sin(\frac{\pi}{3}+\theta) \\ \cos\theta & -\cos(\frac{\pi}{3}-\theta) & -\cos(\frac{\pi}{3}+\theta) \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

donde θ es el ángulo de rotación en el sentido de las manecillas del reloj y U es el conjunto de entradas admisibles. En este trabajo se restringen las entradas admisibles para poder aplicar una estrategia de control óptima para el sistema robótico, con la finalidad de reducir el costo computacional.

Para el diseño del control en los robots no-holonómicos se tienen que tomar en cuenta las restricciones de movimiento mecánicas que se tienen. Aun así las estrategias de control aplicables son muy variadas. La figura 2, muestra una estrategia común de control para robots móviles, una vez que la trayectoria está definida, es la misión del sistema de control garantizar un seguimiento de trayectoria efectiva que sea estable bajo condiciones de cambio en los actuadores de las ruedas.

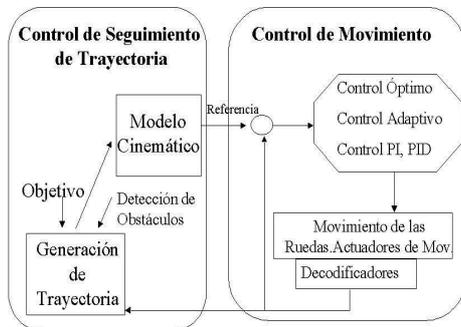


Figura 2: Control de Mov. de Robots Móviles

Los controladores utilizados son:

Control Adaptivo óptimo: Este controlador minimiza comportamientos indeseables relacionados con la limitación física del sistema. Por ejemplo, las sillas de ruedas robotizadas, presentan una estructura de tracción con dos ruedas que dan la dirección y dos ruedas al frente. El comportamiento del sistema de dirección es casi lineal, excepto por las zonas muertas y donde existe saturación. Para compensar la acción de perturbaciones externas indeseables como la fricción, y efectos como la variación interna de los parámetros, se implementa este tipo de estrategia de control en los actuadores.

Control Proporcional-Integral y control Proporcional-Derivativo-Integral: Estas estrategias siguen siendo muy utilizadas en el área de la robótica debido a su sencillez de cálculo. Tienden a utilizarse combinándolas con otras más sofisticadas como las técnicas de inteligencia artificial para disminuir los efectos de perturbaciones indeseables.

Inteligencia Artificial: En este tipo de controladores se encuentran los basados en redes neuronales, algoritmos Fuzzy, etc. Este tipo de algoritmos son frecuentemente utilizados en robots que debido a su estructura ligera o por el ambiente en el que trabajan estarán sujetos a perturbaciones, cuyos parámetros pueden no conocerse en su totalidad.

2.1. Ejemplo Experimental con un robot con ruedas

El robot experimental con ruedas consta de dos ruedas controlables (con dos servomotores) y una

rueda libre, teniendo en su base un brazo manipulador de 4 grados de libertad (figura 3)

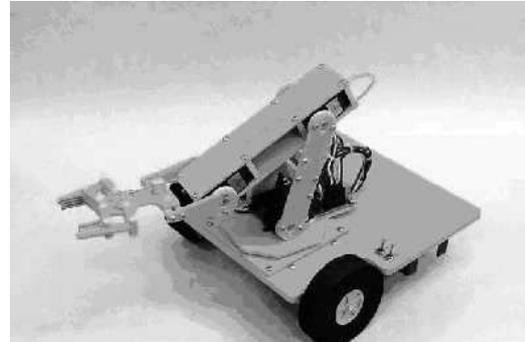


Figura 3: Robot experimental con ruedas

Todos los eslabones y las ruedas son accionados por servomotores de corriente directa. En su base se encuentra un servocontrolador al cual se conectan los servomotores. En este mismo servocontrolador se conecta un cable serial por el cual llegan las señales de control provenientes de una PC. En esta última se realizan los algoritmos para el control de movimiento del robot. El software utilizado para la simulación es Matlab y el control se ha implementado en lenguaje C para el manejo del robot. Los servomotores trabajan con señales desde 0-255 bin manejados por el servocontrolador. La computadora manda estas señales que corresponden a cierto movimiento angular de la rueda. Por software se puede guardar y calcular el número de señales enviadas para generar cierto movimiento. La comparación de las señales de los dos motores de las ruedas representa el error del sistema dado por: $E(I) = |P_1(I)| - |P_2(I)|$

El controlador aplicado es de tipo proporcional-integral que permite obtener velocidades iguales, garantizando un error de orientación de estado estable igual a cero.

Las ecuaciones del controlador PI son:

$$S(I) = S(I-1) + E(I) \quad \text{donde}$$

$$M(I) = K_i S(I) + K_p E(I)$$

$K_p = 10, K_i = 1 \text{ sec}^{-1}$, representan las ganancias proporcional e integral respectivamente.

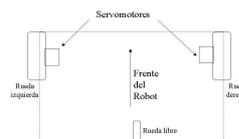


Figura 4: Diagrama de la plataforma móvil

Se hicieron dos recorridos en una pista con dos obstáculos. Los datos de importancia para esta prueba fueron el tiempo y la velocidad del robot. Los resultados fueron los siguientes:

Parámetro	Recorrido 1	Recorrido 2
Tiempo	3min. 20seg.	3min. 19seg
Velocidad	12cm./seg	13cm./seg
Tiempo de Respuesta	0.1seg	0.1seg

Los resultados obtenidos muestran que se puede controlar al robot siguiendo una trayectoria dada con este tipo de controlador.

3. CONTROL DE ROBOTS CON PATAS

El movimiento de los robots con patas está inspirado en sistemas biológicos. Entre las ventajas que ofrecen estos sistemas robóticos están la de obtener un movimiento flexible en terreno no-preparado, menor deformación, mas manejabilidad al tener radios de movimiento más pequeños y poder presentar diferentes velocidades. Entre los retos de diseño que se presentan para este tipo de estructuras están: el diseño de la pata, el número de patas y la coordinación de patas múltiples. La selección de determinado tipo y número de patas tiene que estar condicionado a mantener estabilidad, maximizar el margen de estabilidad y velocidad. El diseño del control para este tipo de sistemas es complejo tanto si se tiene un número menor de patas (en el cual un factor clave sería la de estabilidad) ó si se aumenta el número de patas (en el cual el factor clave se concentra en la sincronización del movimiento).

Entre las estrategias de control para estos sistemas se encuentran:

- ◆ PD, PID: Generalmente son utilizados en paralelo con una computadora PC, la cual genera la trayectoria y las señales para cada pata del sistema. Como trabajo representativo se tiene en [12], donde se diseñó un robot con cuatro patas controlado utilizando PID.
- ◆ Inteligencia Artificial: Este tipo de algoritmos son frecuentemente utilizados en robot con dos patas o en aquellos en los cuales por su estructura ligera o por el ambiente en el que trabajan estarán sujetos a perturbaciones, cuyos parámetros pueden no conocerse en su totalidad. Un ejemplo es el Control por Modelo Virtual(VMC) en el cual el robot actúa como un joystick y las interacciones que el robot realiza con el mundo están gobernadas por componentes virtuales en paralelo con la estructura dinámica del robot. Aunque no es

una metodología de control, VMC es un lenguaje para expresar las leyes de control del robot[13].

- ◆ Control Adaptivo óptimo: Al igual que en los robots con ruedas, este controlador minimiza comportamientos indeseables relacionados con la limitación física del sistema.

3.1. Ejemplo Experimental

El robot con patas experimental se presenta en la Figura 5. Es un robot hexápodo, el cual tiene dos grados de libertad en cada pata. Contiene 12 servomotores, dos por cada pata para realizar los movimiento. Las variables de las patas están dadas por θ_1 y θ_2 . El software utilizado para la simulación es Matlab y el control se ha implementado en qBasic para el manejo del hexápodo.



Figura 5: Robot Hexápodo Experimental

El algoritmo[1] que se implementó en las patas es el de Tripod Gait que mantiene siempre una base estable triangular en el piso (misma forma de andar que utilizan las cucarachas). Este algoritmo muestra la necesidad de controlar independientemente cada pata, pero a la vez generar además un control para que las patas sigan una señal de referencia.

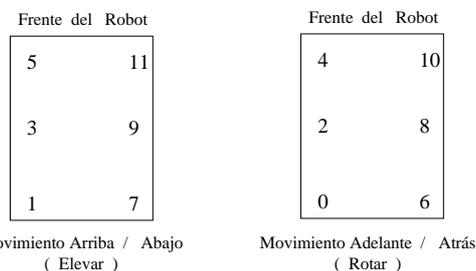


Figura 6: Posición de los servomotores del robot

De esta manera de acuerdo a su estudio cinemático, es posible posicionar adecuadamente la pata de acuerdo a la trayectoria o posición seleccionada.

El control utilizado es un Proporcional-Derivativo Aumentado en cada eslabón implementado una señal de referencia específica para cada pata. Se realizó la simulación del modelo del robot con un control Proporcional-Derivativo Aumentado en la cual cada eslabón de cada pata sigue una señal de referencia. El modelo robótico está expresado en Simulink de tal forma que las longitudes, masas, gravedad, etc. puedan ser modificados en cualquier momento sin alterar el modelo y de esta manera se pueda observar como influyen éstos parámetros en los resultados de la simulación; pudiendo sugerir así materiales y dimensiones adecuadas para un mejor desempeño real del robot. Un resultado de una simulación se muestra en la figura 7, donde el sistema es capaz de posicionar la pata en la posición deseada. Resultados similares se obtienen para cada pata.

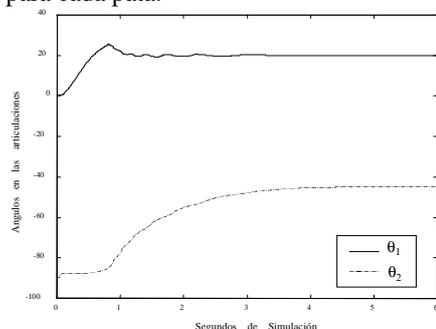


Figura 7: Resultado de simulación del hexápodo.

4. DISEÑO DEL ROBOT MÓVIL CON TRES RUEDAS

Como primera etapa de diseño se analizaron en forma teórica las diferentes configuraciones de robots móviles. Como estudios experimentales antecedentes se tienen el elaborado por Roque et. al.[1] y el de Bautista et al. [2]. Estos trabajos experimentales dieron las bases para poder elaborar un modelo de robot que cumpliera características de velocidad y movimiento para ser utilizado en el área industrial de modo eficiente.

Se optó por un modelo robótico con base triangular con tres ruedas. Cada rueda posee movimiento a través de dos servomotores, lo que le permite cambiar de dirección en cualquier momento. De esta forma se puede controlar la dirección de sus ruedas y cambiar el frente de referencia cuando se requiera. Esta capacidad permite al robot cambiar de dirección en menor tiempo. En cada esquina de la base triangular se colocaron dos servomotores. Uno para la dirección y otro para el movimiento. La distancia entre cada servo de dirección es la

misma para facilitar la referencia entre ellos (Figura 8).

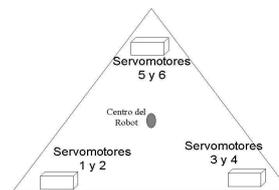


Figura 8: Posición de servos

Los tres servomotores de direccionamiento son del tipo HS-700BB (que pueden conseguirse a un precio menor de 25 dls) y los tres servomotores de desplazamiento son del tipo HS-300 (que pueden conseguirse a un precio menor de 10 dls). Todos estos servos son controlados por un servocontrolador el cual está conectado al puerto serial de una computadora. El movimiento de las ruedas a través de los servomotores está enlazado por medio de software para que se muevan en la misma dirección todo el tiempo. El robot diseñado se muestra en la figura 9. La base del robot es de acrílico liso, material que fue seleccionado por la facilidad de trabajarlo con herramientas comunes, además de tener buena resistencia y poco peso.



Figura 9: Robot Diseñado

4.1 CONTROL DEL ROBOT

Hablar de control de movimiento, indica la estrategia por la cual el vehículo puede llegar a una posición deseada y la implementación de esta estrategia. El robot diseñado tiene la capacidad de desplazarse en línea recta, donde todos los motores corren en la misma dirección y a la misma velocidad ó en rotación alrededor del centro del vehículo, en donde los motores corren a la misma velocidad pero en direcciones opuestas entre ellos.

La figura 10 presenta en forma esquemática la posición en el plano de las tres ruedas del robot. Cada una de ellas se encuentra a 120 grados de separación una de la otra. El centro del robot se considera como punto de referencia para la posición del robot en el ambiente.

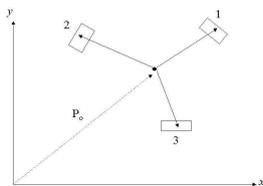


Figura 10: Posición del robot móvil.

El diagrama de Control del Robot se muestra en la figura 11. Los servomotores del robot están conectados a un servocontrolador y éste a su vez está conectado a la computadora donde se realizan los algoritmos de control. El servocontrolador maneja señales digitales de 0 a 255. Como sensor visual se tiene actualmente una cámara digital la cual envía la información directamente a la computadora

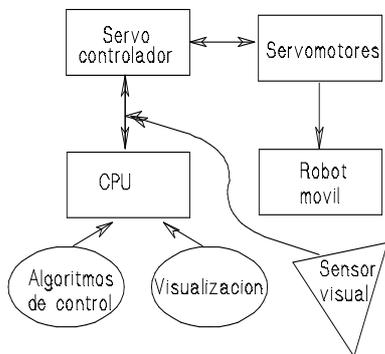


Figura 11: Diagrama de control del robot

Se tiene un algoritmo de visualización y reconocimiento del contorno de imágenes, lo cual permite implementar el algoritmo denominado de Espacio de Configuración [7] para determinar un itinerario para que el robot llegue al objetivo. La representación del ambiente utilizando este método se basa en la descripción de objetos poligonales existentes. Cada polígono se describe por medio de sus vértices y sus ángulos. De esta forma el robot se mueve en un espacio con obstáculos de acuerdo a su punto de referencia que es el centro y de ahí a los demás puntos del ambiente en el que se está

moviendo. El algoritmo de control utilizado actualmente es de tipo Proporcional-Integral.

4.2 RESULTADOS EXPERIMENTALES

Para verificar el desempeño del robot en la implementación de un recorrido con obstáculos se fijó el área mostrada en la figura 14. El recorrido inicia y finaliza en el mismo lugar. El robot tiene que esquivar los dos obstáculos mostrados.

Se hicieron dos recorridos los cuales arrojaron los datos siguientes:

Parámetro	Recorrido 1	Recorrido 2
Tiempo	3min. 40seg.	3min. 75seg
Velocidad	10cm./seg	11cm./seg
Tiempo de Respuesta	0.1seg	0.1seg

El segundo recorrido tuvo un tiempo mayor debido a que las llantas del robot tuvieron problema de arrastre. Este problema se superó con una alineación correcta de las llantas del robot.

CONCLUSIONES

En este artículo se presentaron las estrategias de control mas comunes en robot móviles terrestres. Las técnicas de control clásicas como PD, PI y PID siguen siendo utilizadas y una forma de trabajo es la de combinar estas técnicas clásicas con nuevas metodologías de control que puedan lidiar con estructuras robóticas que cuenten con mecanismos complejos. Las nuevas herramientas de hardware y software abren una gran gama de posibilidades para este desarrollo. También se presentó el desarrollo de un robot experimental móvil con tres ruedas.

Los resultados experimentales muestran que se puede posicionar el robot en el lugar deseado. El robot está diseñado para que se puedan implementar nuevas estrategias de control que ayuden a un mejor desempeño del mismo. El robot sigue una trayectoria dada con una velocidad máxima de 11 cm/seg . Todo el estudio muestra que va a ser indispensable enfrentar situaciones adicionales como problemas mecánicos, situación del terreno así como el abastecimiento de energía para el sistema. Se tienen previstos nuevos estudios para lograr en un futuro, la autonomía completa en el funcionamiento de los robots.

BIBLIOGRAFIA

[1] Roque R., "Modelado y Control de un Robot Hexápodo", Tesis de Maestría, I.T. Nuevo Laredo, Marzo 2000.

[2] Bautista M., "Diseño del Control para un robot móvil con retroalimentación para seguimiento de trayectorias". Tesis de Maestría en Proceso. I.T. Nuevo Laredo, 2002.

[3] Spong, Vidyasagar, "Robot dynamics and control", Ed. Wiley & Sons, 1989.

[4] Murray R., Li Z., Shankar S., "A mathematical introduction to robotic manipulation", CRC Press, 1993.

[5] Aguilera M., "Manual del Curso: Introducción al Estudio de Robots Manipuladores", Instituto Tecnológico de Nuevo Laredo, Enero de 2000.

[6] Groover Mike P.; Weiss Mitchel, "Industrial robotics", Ed. Mc. Graw Hill.

[7] Segovia Armando, "Tutorial de Robots Móviles", ISRA '98.

[8] Canudas de Witt, Siciliano B., Bastin G., "Theory of Robot Control", Springer Verlag, 1997.

[9] Borenstein J., Koren Y., "Motion Control Analysis of a Mobile Robot", Journal of Dynamics, Measurements and Control, Vol. 109, No. 2, p.p. 73-79.

[10] Lazea, "Aspects on path planning for mobile robots", Reporte interno de la Technical University of Cluj-Napoca. 2001.

[11] Kalmár-Nagy T., D'Andrea R., Ganguly P., "Near-Optimal Dynamic Trajectory Generation and Control of an Omnidirectional Vehicle", Reporte Interno, Sibley School of Mechanical and AeroSpace Eng., Cornell University, April 8, 2002.

[12] Gonzalez d., Armada A., Jiménez M., "Ship Building with rover", IEEE Robotics & Automation Magazine, Vol. 7, No. 4, December 2000.

[13] Pratt G., "Legged Robots at MIT: What's New Since Raibert", IEEE Robotics & Automation Magazine, Vol. 7, No. 3, September 2000.

Figura 12: Recorrido Experimental del robot

