

PLANIFICACIÓN DE MOVIMIENTO MEDIANTE CAMPO DE POTENCIAL CON RESTRICCIONES DINÁMICAS PARA ROBOTS MÓVILES

Humberto Rodríguez, Ph. D.
Universidad Tecnológica de Panamá
humberto.rodriguez@utp.ac.pa

RESUMEN

Se presenta en este trabajo una propuesta para considerar las restricciones dinámicas cuando se utiliza el método de Campo de Potencial, en la etapa de planificación de trayectorias para robot móviles. Con este método se genera un campo de potencial virtual compuesto de la suma de un campo repulsivo, obtenido a partir de la información sobre el contorno de los obstáculos y de un campo atractivo virtual, el cual se crea teniendo la posición de la meta o submeta como foco de atracción. En consecuencia, las trayectorias se obtienen al quedar el robot expuesto al efecto de las fuerzas generadas por estos campos. Generalmente, con el fin de conseguir velocidades constantes, sólo la dirección y no la magnitud de la fuerza es utilizada para guiar el vehículo.

Si bien en la literatura se han presentado diferentes alternativas para considerar las restricciones cinemáticas e inclusive se ha considerado la restricción que impone la desaceleración máxima, para evitar colisiones, otros tipos de restricciones dinámicas no han sido tratadas dentro de este tipo de planificación. La inclusión de restricciones dinámicas, tales como aceleración máxima, curvatura y deslizamiento cobra mayor importancia cuando los robots móviles se mueven a altas velocidades. De allí que, se presenta en este trabajo una formulación que permite filtrar los cambios bruscos de aceleración y generar consignas de velocidad que respetan las restricciones de aceleración máxima. Para lograr esto, las fuerzas generadas por el campo virtual son aplicadas, en una etapa previa, a un modelo dinámico del robot y de las fuerzas de tracción, cuyas velocidades de respuesta son entonces impuestas al robot real. El robot móvil, el entorno y la estrategia de planificación han sido simulados para probar su efectividad.

Palabras claves: robot móvil, planificación de trayectorias, campo de potencial, restricciones dinámicas, deslizamiento, aceleración.

ABSTRACT

In this paper a technique for including dynamics constraints when using potential field based navigation, is proposed. For potential field path planning a virtual potential field is generated as the sum of a repulsive and an attractive field. The former is obtained from the contour of the robot obstacles, while the latter is created by taking either, a final or an intermediate goal as the focus of attraction. Thus, the trajectory naturally evolves once the mobile robot is exposed to the forces from the total potential field. Generally, only

the force direction, not its magnitude, is used to guide the vehicle.

In the literature on potential field path planning, different alternatives can be found to include kinematics constraints and even to consider the maximum deceleration to avoid collisions. However, dynamics constraints, such as maximum acceleration, curvature and slippage are rarely treated. Moreover, these constraints are of mayor importance when mobile robots move at high velocities. Thus, the formulation presented on this work allows for filtering sudden acceleration changes and generates wheel angular velocities which comply with the acceleration constraints. In order to achieve these outputs, in a previous stage, a robot dynamic model is exited with the virtual potential field forces and the resulting angular velocities are imposed to the real robot. The path planning strategy is simulated to test its effectiveness.

Keywords: mobile robots, path planning, potential field, dynamic constraints, slip, acceleration.

1. INTRODUCCIÓN

El problema básico de planificación de movimiento para robots móviles, en presencia de obstáculos, consiste en encontrar una ruta que le permita al vehículo ir de una posición inicial a una posición final o meta dentro de su *espacio de trabajo*, sin colisionar con objeto alguno. La información de distancia del robot al contorno de los objetos es captada continuamente por los sensores, lo cual le permite al robot reaccionar inclusive ante la presencia de objetos en movimiento.

A pesar de que, en general, los robots móviles exhiben restricciones dinámicas (por ejemplo, la aceleración máxima que se puede alcanzar, con un determinado motor y para una carga específica) la mayoría de los métodos de navegación reactivos no las consideran [1]. El no tomar en cuenta las restricciones puede conducir a rutas no factibles e inclusive originar colisiones. Esto es especialmente cierto cuando los robots se mueven a alta velocidad o bien cuando la dinámica del

robot es tan lenta que su respuesta a las fuerzas reactivas es pobre. Entre los métodos de planificación de movimiento reactivos más usados está el método de campo de potencial [2], el de histograma de campo vectorial [3] y de banda elástica [4].

En la literatura se encuentran algunos pocos trabajos sobre la incorporación de las restricciones dinámicas en la formulación de los métodos de planificación reactivos. Miguez *et al.* [1] construyeron una representación espacial (“Ego-Dynamic Space”) en donde las distancias del robot a los objetos, en el espacio de trabajo, son transformadas en distancias que dependen de la restricción de desaceleración y en el tiempo de muestreo. Moon *et al.* [5] mostraron que un robot móvil con tracción diferencial no es capaz de seguir una trayectoria recta con exactitud, debido a las restricciones de aceleración de los controladores, por lo que propusieron un método de corrección de trayectorias. Esta nueva trayectoria, sin embargo, no fue integrada como parte del método de planificación de movimiento global. Por otro lado, Adams e Ibáñez [6] trataron el problema de mantener las velocidades y aceleraciones acotadas usando un controlador con retroalimentación de posición y aceleración, derivado a partir de métodos de energía y considerando sólo un campo atractivo lineal. Su propuesta se centra en el control de *bajo nivel* de los controladores de velocidad sin integrarla con ningún método de planificación en particular.

La contribución de este trabajo consiste en la incorporación de restricciones de deslizamiento, a parte de las de aceleración y velocidad, como una última etapa dentro del método de planificación mediante campo de potencial. Para ello se utiliza un modelo dinámico del robot que incluye las fuerzas de fricción entre las ruedas y el suelo, por lo que se relaja la restricción generalmente asumida de que las ruedas giran sin deslizarse. Esto trae como consecuencia que el número de grados de libertad del vehículo sea de tres (3) en lugar de los dos grados que se utilizan comúnmente. Además, el hecho de aplicar las fuerzas generadas por el campo de potencial primero al modelo del robot y luego las velocidades resultantes al robot real, trae como consecuencia que se filtren los

cambios bruscos de aceleración que pudieran resultar.

En la sección 2 se presenta el modelo dinámico del robot utilizado en las simulaciones del método de planificación. En la sección 3 se detalla la implementación realizada del método de campo de potencial y el entorno de simulación. En la sección 4 se presentan los resultados, mientras que la siguiente sección se discuten los mismos y se

2. MODELO DINÁMICO DEL ROBOT DE TRACCIÓN DIFERENCIAL

El modelo dinámico que se presenta en esta sección será excitado por las fuerzas generadas a partir del campo de potencial, las cuales son función sólo de la posición del punto específico del campo que se considere. Así, existe sólo una fuerza y ningún momento asociado a cada punto del campo. Por lo tanto, con el fin de orientar el robot en una dirección perpendicular a las líneas iso-potenciales, para cualquier posición dentro su espacio de trabajo, la fuerza virtual (F) obtenida del campo se aplica al punto medio del semicírculo frontal del robot [7], como se muestra en la figura 1. En esta figura aparecen también los parámetros geométricos del robot de tracción diferencial.

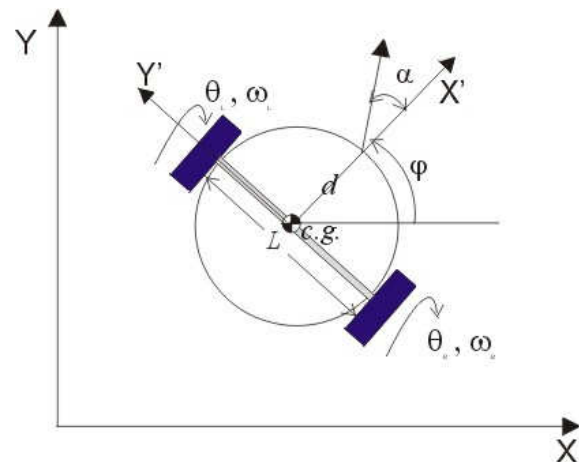


Figura 1. Parámetros geométricos del robot de tracción diferencial.

En donde, α y φ son el ángulo de aplicación de la fuerza del campo y el de rotación del robot con respecto al sistema de referencia global o *del mundo*. Nótese que el centro de gravedad del robot se ha hecho coincidir con el punto medio del

eje de las ruedas, esto simplifica las ecuaciones diferenciales que de otra manera serían no lineales [7]. De hecho con el diseño mecánico de los robots de tracción diferencial, en términos generales, se asegura que esta condición se cumpla.

La práctica usual para obtener las velocidades y aceleraciones del centro de gravedad en función de las velocidades angulares de las ruedas, $\dot{\theta}_R$ y $\dot{\theta}_L$, y de $\dot{\varphi}$, es asumir que las ruedas giran sin deslizar. De allí, que se obtenga la conocida ecuación de restricción [7]:

$$\dot{\varphi}L = (\dot{\theta}_R - \dot{\theta}_L)r$$

Por lo tanto, se tendrían entonces dos grados de libertad y podríamos utilizar cualesquiera dos de los ángulos, por ejemplo, θ_R y φ , para describir el movimiento del sistema. Sin embargo, se ha demostrado que, en general, las restricciones laterales y longitudinales (de giro sin deslizamiento) no pueden ser preservadas por robots móviles con ruedas ya sea, fijas, centradas u omnidireccionales [8]. Además, si lo que se quiere es conseguir que el movimiento generado por el campo de potencial satisfaga inclusive restricciones de deslizamiento, se debe incluir este fenómeno en el modelo. Por lo tanto, sólo se puede establecer la siguiente relación cinemática entre la velocidad angular, $\dot{\varphi}$, la velocidad lineal del centro de gravedad, v_C , y las velocidades lineales de las ruedas, v_R y v_L , estas tres últimas con dirección X', [9]:

$$\begin{bmatrix} 1 & L/2 \\ 1 & -L/2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v_C \\ \dot{\varphi} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} v_R \\ v_L \end{Bmatrix}. \quad (1)$$

Por otro lado, el análisis dinámico considerando deslizamiento conduce al siguiente conjunto de ecuaciones diferenciales:

$$\begin{aligned} m\dot{v}_c + c_a &= F_R + F_L \\ I_{ZZ}\ddot{\varphi} + c_a L^2 \dot{\varphi} &= L/2(F_R - F_L) \\ I_W \dot{\omega}_R + B\omega_R &= \tau_R - rF_R \\ I_W \dot{\omega}_L + B\omega_L &= \tau_L - rF_L, \end{aligned} \quad (2)$$

en donde, ω_R y ω_L son las velocidades angulares de las ruedas, I_{ZZ} e I_W , son los momentos de inercia del robot en dirección z con respecto al centro de gravedad y el momento de inercia de cada rueda incluyendo su eje. c_a , B y r son el coeficiente de fricción viscosa equivalente del vehículo, el coeficiente de fricción viscosa asociado a la rotación de la rueda y el radio de la rueda respectivamente. Además, F_R y F_L , son las fuerzas de fricción en las ruedas, mientras que τ_R y τ_L son los torques aplicados a cada rueda y que se obtienen de la fuerza generada por el campo. La fuerza F aplicada con un ángulo α , se puede descomponer en dos fuerzas aplicadas a cada una de las ruedas y estas a su vez se multiplican por el radio de la rueda para obtener los torques de excitación.

3. GENERACIÓN DEL CAMPO DE POTENCIAL

El campo de potencial se consigue con la superposición de un campo atractivo originado por la posición de final deseada y de campo repulsivo creado por los obstáculos. El campo atractivo más común calcula el potencial como si entre el robot y la meta existiera un resorte virtual, de allí que se obtenga la expresión [2]:

$$U_A(q) = 1/2k_{arc}[(x - x_g)^2 + (y - y_g)^2]. \quad (3)$$

Sin embargo, el inconveniente con este tipo de potencial atractivo es que, como ocurre con un resorte, la fuerza va disminuyendo según el robot se acerca a la meta. Es por ello que algunos autores sólo utilizan la dirección de la fuerza que origina el campo y asumen la magnitud constante. Una forma de potencial que produce fuerzas de magnitud constante y que se ha utilizado también en este trabajo, es la siguiente:

$$U_A(q) = k_{arc}[|x - x_g| + |y - y_g|]. \quad (4)$$

Las componentes de la fuerza atractiva se obtienen, entonces, como:

$$F_{arc}(q) = -\nabla U_A, \text{ en donde } q = (x, y).$$

En cuanto al potencial repulsivo, la idea es generar una fuerza más fuerte cuanto más cercano esté el

robot al obstáculo, de manera que esta se desvanezca a cierta distancia del mismo. De allí que, se ha utilizado la siguiente expresión [2]:

$$U_R = \begin{cases} \frac{1}{2} k_{rep} \left(\frac{1}{\rho(q)} - \frac{1}{\rho_0} \right)^2 & \text{si, } \rho(q) \leq \rho_0 \\ 0 & \text{si, } \rho(q) > \rho_0 \end{cases}$$

Los componentes de fuerza repulsiva se obtienen, entonces, como:

$$F_{rep}(q) = -\nabla U_R$$

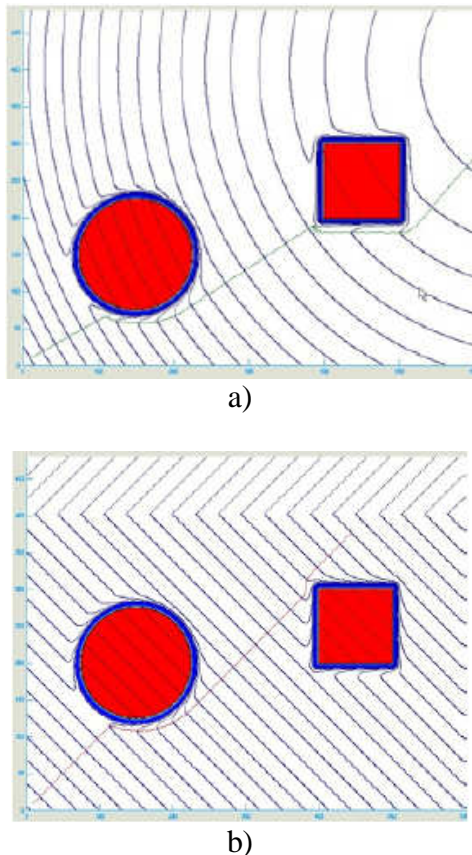


Figura 2. a) Campo resultante cuando el potencial atractivo es cuadrático, b) Campo resultante cuando el potencial atractivo es lineal.

En la figura 2 se muestran las líneas equipotenciales para un espacio de trabajo con algunos obstáculos. En la parte (a) de la figura se ha utilizado el potencial atractivo cuadrático de la ecuación 3, mientras que en la parte (b) el potencial de la ecuación 4. Se ve también en la figura 2 los caminos generados mediante la estrategia, que llamaremos, *clásica* es decir,

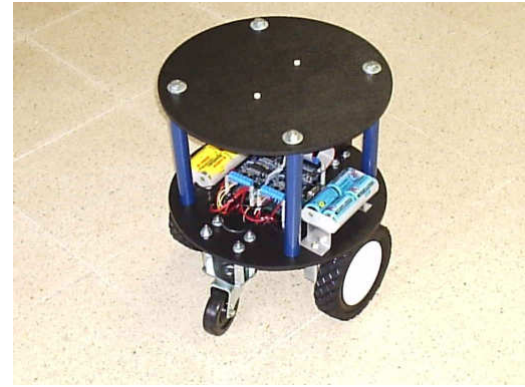


Figura 3. Robot móvil CIARBOT

tomando sólo la dirección de la fuerza virtual generada por el campo de potencial e imponiendo una velocidad constante al robot sin importar las restricciones dinámicas. El entorno de simulación utilizado para generar estos gráficos fue desarrollado con el interfaz gráfico para usuarios de MATLAB.

4. RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES

Los parámetros geométricos y dinámicos utilizados para el modelo han sido los del robot móvil CIARBOT del Laboratorio Especializado de Análisis, Diseño y Simulación, que se aprecia en la figura 3. Además, la curva utilizada para describir la relación *Fuerza de fricción/Fuerza Normal* como función del *deslizamiento*, para cada rueda, se presenta en la figura 4. Se utilizaron valores típicos para la pendiente y para el valor máximo de esta función, pero se necesitaría ajustar estos parámetros para las condiciones del contacto específico entre las ruedas de CIARBOT y el piso sobre el que maniobra, si se desea un modelo aún más preciso.

Se ha ejecutado la simulación de la estrategia de planificación propuesta para los dos tipos de campos atractivos y se ha comparado la trayectoria resultante con aquella que resulta de aplicar la *estrategia clásica*. Igualmente, se han comparado las aceleraciones angulares de las ruedas que resultan de la aplicación de ambas estrategias. Para todas las simulaciones se ha tomado un periodo de actualización de las fuerzas virtuales de 50 ms y se han considerado dos velocidades medias de avance, diferentes de 1 m/seg y de 15 cm/seg. A continuación se muestran, en la figura 5 una

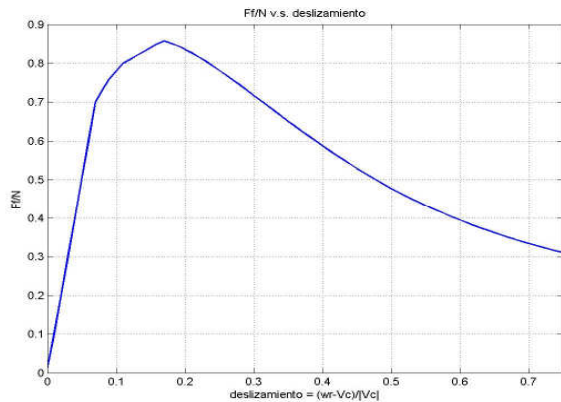


Figura 4. Curva de Fuerza de fricción/Fuerza Normal como función del deslizamiento.

comparación de las trayectorias en las zonas de mayor diferencia.

Comparando la figura 5a y 5b se observa cómo se han filtrado las oscilaciones producto, tanto de la aproximación directa con la esquina, como del movimiento paralelo al contorno. En la figura 5c, a pesar de que el obstáculo tiene un contorno más suave, también se producen oscilaciones, que son igualmente filtradas por la estrategia propuesta.

En la figura 6, se comparan las aceleraciones angulares resultantes en la rueda derecha con ambas estrategias de planificación, la *clásica* y la propuesta, para una velocidad lineal media del robot de 15 cm/seg, la cual es una velocidad baja. Se aprecia una gran diferencia no sólo en la amplitud de las aceleraciones angulares, sino también en la frecuencia de las oscilaciones.

Por otro lado, el deslizamiento registrado para las trayectorias simuladas con la estrategia propuesta fue en todo momento menor al 0.5%.

5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Resulta notable, por una parte, que algunas de los problemas con frecuencia señalados del método de campo de potencial queden resueltas con el método de filtrado propuesto. Es el caso de las oscilaciones cuando el robot viaja paralelo a un contorno y el de los mínimos locales. Estos últimos se salvan con facilidad a gracias a que el momento generado por la ubicación de la fuerza virtual está presente, en general, por pequeño que sea el ángulo, α , de la fuerza, lo cual se convierte en un mecanismo de escape de los mínimos.

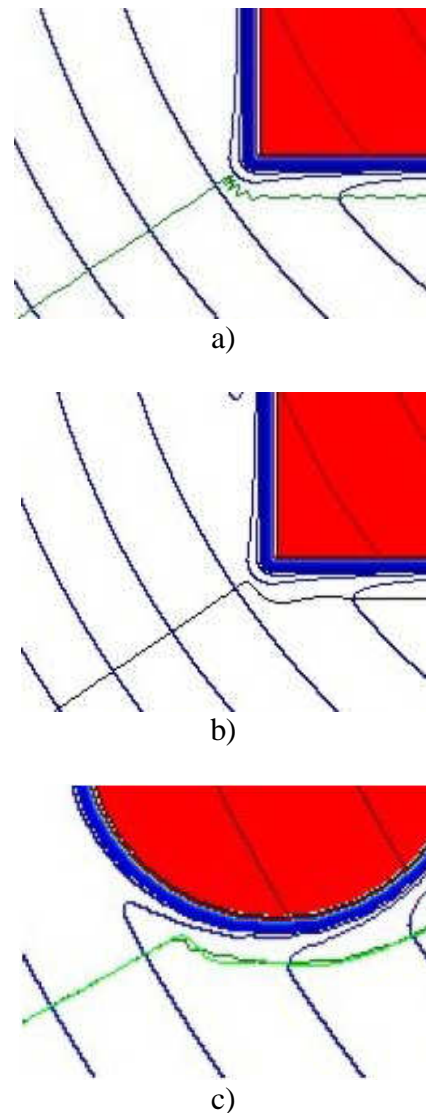


Figura 5. a) Trayectoria con la estrategia clásica 1 m/seg, b) trayectoria con la estrategia compuesta a 1m/seg, c) ambas trayectorias para la zona cercana a otro objeto.

Se comprobó también que las aceleraciones angulares de las ruedas, que serán eventualmente suplidas por los motores, son de uno y hasta de dos órdenes de magnitud menores cuando se utiliza la estrategia propuesta. A su vez, los cambios de aceleración son mucho menos bruscos en este último caso.

Por último, vale la pena notar que aún cuando no se hayan ajustado los parámetros de la curva de fuerza de fricción para nuestro robot en particular, los resultados de las simulaciones, realizadas con diferentes valores de la pendiente de esta función y del coeficiente de fricción para deslizamiento cero,

mostraron una baja sensibilidad a dichos valores. Esperamos confirmar estas observaciones con futuros trabajos.

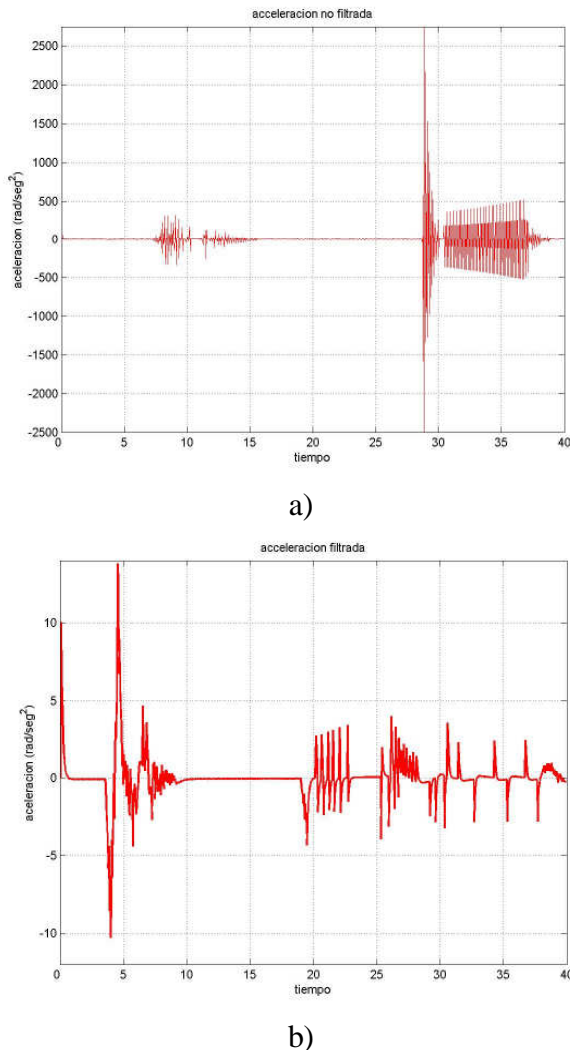


Figura 6. Aceleraciones angulares de la rueda derecha cuando se utilizan la estrategia clásica (a) y la estrategia propuesta (b), para un velocidad lineal media de 15 cm/seg.

A nuestro juicio, la principal ventaja de esta estrategia es que permite acotar tanto las aceleraciones, como el deslizamiento antes de enviar los valores de consigna final a los motores. Resta aplicar esta estrategia al robot real para valorar, en su justa dimensión, las ventajas de la aplicación de la estrategia propuesta, desde el punto de vista de la controlabilidad y consumo de potencia del sistema resultante.

6. REFERENCIAS

- [1] J. Minguez, L. Montano y O. Khatib, “Reactive Collision Avoidance for Navigation with Dynamic Constraints”, Proceedings IEEE Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems EPFL, pp. 588-594, Lausanne, Suiza, Octubre 2002.
- [2] O. Khatib, “Real Time Obstacle Avoidance for Manipulation and Mobile Robots”, The International Journal of Robotics Research, Vol. 5, No. 1, pp. 90-98, 1986.
- [3] J. Borestein, y Y. Koren, “The Vector Field Histogram –Fast Obstacle Avoidance for Mobile Robots”, IEEE Journal of Robotics and Automation, 7, pp. 278-288, 1991.
- [4] O. Khatib y S. Quinlan, “Elastic Bands: Connecting, Path Planning and Control”, Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Albuquerque, Nuevo México, Abril, 1997.
- [5] J. Moon, C. Park y F. Harashima, “Kinematic Correction for a Differential Drive Mobile Robot and a Design for Velocity Trajectory with Acceleration Constraints on Motors Controllers”, IEEE Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 930-935, 1999.
- [6] M. Adams y J. Ibañez, “Safe Path Planning and Control Constraints for Autonomous Goal Seeking”, Proceedings IEEE Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems pp. 2377-82, Lausanne, Suiza, Octubre 2002.
- [7] L. Montano, J. Asensio, “Real-Time Robot Navigation in Unstructured Environments Using a 3D Laser Rangefinder”, IEEE Proceedings of IROS, pp. 526-532, 1997.
- [8] S. Shekhar, “Wheel Rolling Constraints and Slip in Mobile Robot”, Technical Report of the Robotics and Process System Revision, Oak Ridge National Laboratory, Julio 1996.
- [9] R. Siegwart y I. Nourbakhsh, “Introduction to Autonomous Mobile Robots”, The MIT Press, Capitulo 3, Cambridge, Massachusetts, Londres, 2004.