

Aplicación del método de campos de potencial artificial para un robot móvil autónomo

Application of the artificial potential fields method for an autonomous mobile robot

GIOVANNI RODRIGO BERMÚDEZ BOHÓRQUEZ

Ingeniero electricista, Universidad Nacional de Colombia, magíster en Ingeniería electrónica y de computadores, Universidad de los Andes. Profesor adscrito a la Facultad Tecnológica de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Director del Grupo de Investigación en Robótica Móvil Autónoma (ROMA).
gbermudez@udistrital.edu.co

LUIS ALEJANDRO ROJAS CASTELLAR

Ingeniero electricista, Universidad Nacional de Colombia. Actualmente adelanta estudios de maestría en Economía en la Universidad Nacional de Colombia. Profesor adscrito a la Facultad Tecnológica de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Investigador del grupo ROMA.
larojascc@udistrital.edu.co

HOLMAN MONTIEL

Ingeniero en Control electrónico e instrumentación de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Investigador del grupo ROMA.
hma_eagle@hotmail.com

MARCO CEBALLOS

Ingeniero en Control electrónico e instrumentación de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Investigador del grupo ROMA.
marcebal_11@hotmail.com

Clasificación del artículo: Investigación.

Fecha de aceptación: junio 30 de 2004.

Fecha de recepción: abril 16 de 2004.

Palabras clave: campos de potenciales artificiales, planificación de movimientos, vehículos guiados automáticamente, estrategias de navegación autónoma

Key words: artificial potential fields, movement planning, automatic guided vehicles, autonomous navigations strategies.

R E S U M E N

Este trabajo presenta resultados y aportes al estudio de planificación de movimientos en entornos desconocidos. Se utilizan los campos de potencial artificial mediante técnicas de cargas ficticias, implementadas en un computador y experimentado sobre el robot Romabot, desarrollado para el Grupo de Investigación en Robótica Móvil Autónoma, ROMA. La planificación de movimientos está siendo utilizada actualmente en el desarrollo del robot Flamebot, que pretende detectar focos de incendios en espacios cerrados, como estrategia de ayuda a grupos de rescate.

A B S T R A C T

This paper presents results and contributions in the movement in unknown environments planning study. The artificial potential fields are used by means of fictitious loads techniques implemented in a computer software and tested in the Romabot robot, developed for the research group in autonomous mobile robots - ROMA. Currently, the movement planning is being used in the development of the Flamebot robot which is aimed to detect fire focuses in closed spaces, as a tool for rescue groups.

1. Introducción

Las aplicaciones potenciales de los robots móviles son innumerables (Everett, 1995, 4): operación en entornos industriales u hostiles, realización de tareas domésticas, desarrollo de diversos sistemas de apoyo en el sector servicios, ayudas técnicas a personas discapacitadas, exploración espacial a distancias en las que la teleoperación no es posible, entre otras. No obstante, las posibles aplicaciones no son el único atributo que hace que la robótica móvil se haya convertido en uno de los campos más frecuentados por los investigadores en los últimos tiempos; hay otra razón, quizás actualmente de mayor peso: el interés teórico del problema.

El problema central del que se ocupa la investigación actual en robótica móvil es el de diseñar y construir sistemas capaces de desenvolverse de modo autónomo en el mundo real, capturando información sensorial y utilizándola para alcanzar determinados objetivos. Paralelamente, esta información puede servir para construir y refinar un modelo del entorno del robot que ayude a planificar misiones posteriores; esta ambiciosa tarea involucra una enorme cantidad de subtareas: percepción, modelado del mundo, planificación de caminos, navegación, control, planificación de tareas y toma de decisiones (Charnley, 1993, 10).

El presente trabajo muestra el estudio de los campos de potencial artificial aplicados sobre los sistemas de navegación de tipo reactivo e implementado sobre la plataforma Romabot¹ para su experimentación. Los algoritmos fueron simulados utilizando el software Mobotsim². Adicionalmente, se desarrollaron estudios para superar problemas presentados por mínimos locales; luego del estudio del método de cargas ficticias se desarrollaron algoritmos modificados de campos de potenciales artificiales. Actualmente, el sistema de navegación está siendo utilizado en el proyecto de investigación Flamebot³, que pretende desarrollar sistemas móviles para la detección de focos de incendios.

2. Sistemas de navegación autónoma

En robótica móvil, la navegación se define como la metodología o arte que permite guiar el curso de un robot a través de un entorno con obstáculos (Álvarez, 1998, 2). Su objetivo principal es hacer que los robots se muevan de manera independiente en su entorno de trabajo, en el cual deben ser capaces de orientarse y elegir la ruta adecuada que les permita desplazarse mientras completan la tarea. La navegación autónoma establece tres problemas de estudio: i) localización, ¿dónde estoy?: consiste en conocer en todo momento las coordenadas del robot

respecto a cierto sistema de referencia; ii) planificación de tareas, ¿hacia dónde quiero ir?: se encarga de decidir acciones y su orden de realización para completar una misión; iii) planificación de movimientos, ¿cómo puedo llegar ahí?: se encarga de generar automáticamente las acciones necesarias para que el robot se desplace entre posiciones cualesquiera del entorno, sin contratiempos tales como colisiones con obstáculos.

2.1 Paradigmas de diseño de sistemas autónomos

Las formas de enfrentar el problema de la robótica móvil (Murphy, 2002, 5) en particular, y de los sistemas autónomos en general, pueden clasificarse en tres grandes grupos. En primer lugar, el denominado “enfoque clásico”, que comprende en el tiempo desde los trabajos de Nilsson; en segundo lugar, el “enfoque reactivo”, que se populariza con los trabajos de Brooks; finalmente, un “enfoque híbrido” cuyos planteamientos intentan sacar partido de los dos enfoques anteriores.

2.1.1 Enfoque clásico o formalista

Se centra principalmente en el planteamiento de trayectorias, suponiendo que el modelo del entorno se conoce y utiliza especialmente en técnicas geométricas (Nilsson, 1969, 345). La planificación se realiza en el llamado “espacio de configuración”, en el cual el robot es un punto en el espacio n-dimensional y los obstáculos corresponden con regiones prohibidas en este espacio. Las técnicas principales utilizadas pueden resumirse en tres grupos: i) mapas de carreteras (*roadmaps*), que capturan la conectividad del espacio libre en una red de curvas unidimensionales; ii) descomposición en celdas: dividen el espacio en regiones simples, llamadas celdas, que forman una retícula; para realizar búsquedas se utiliza la relación de adyacencia entre las celdas, de modo que desde cada celda se pueda transitar a una de las ocho celdas colindantes, y iii) campos de potencial artificial: asimilan el problema de un robot moviéndose en un entorno con obstáculos, de cargas eléctricas inmersas en un campo de potencial, en el cual la meta genera fuerza de atracción y los obstáculos, fuerza repulsiva.

¹ La plataforma desarrollada es de tipo diferencial con restricciones no-holónicas; fue diseñada para este tipo de estudios por el Grupo ROMA. Para el estudio del modelo cinemático y odométrico de este tipo de plataforma, el lector se debe dirigir a Bermúdez, 2003.

² www.mobotsim.com

³ El proyecto Flamebot es un proyecto de investigación desarrollado por el Grupo de Investigación ROMA para la detección de focos de incendio en zonas de difícil acceso mediante el desarrollo de WMR y UAV.

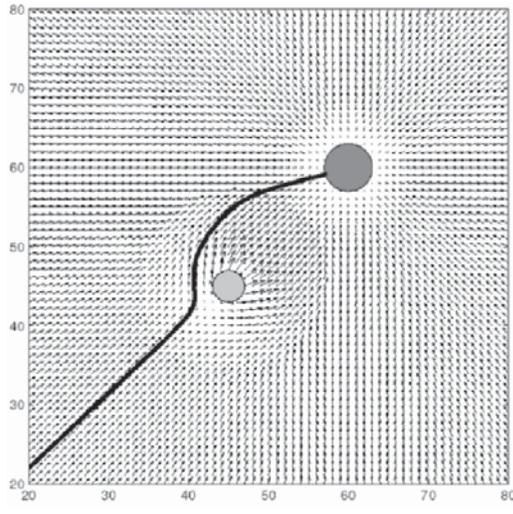


Figura 1. Trayectoria en un ambiente con un obstáculo y un objetivo con campos de potencial artificial

2.1.2 Enfoque reactivo

Los sistemas reactivos usan el mundo como su propia representación. Esta forma de abordar los problemas de planeación de movimientos posibilita la realización de muchas más tareas, con énfasis en la información (Brooks, 1986, 14). Según este enfoque, un sistema reactivo está compuesto por un conjunto de procesos simples, cada uno con bucles de percepción –razonamiento– acción–, que cooperan para alcanzar un objetivo común. Un sistema de arbitraje de comportamientos decide quién toma el control del robot o qué agente debe activarse en cada instante.

2.1.3 Enfoques híbridos

El planeamiento híbrido permite integrar las virtudes de los enfoques clásico (habilidad para la planificación) y reactivo (flexibilidad y dinamismo), basado en la integración de comportamientos que lleven al robot a participar en el entorno donde se desplaza y sin controlarlo (Agre & Chapman, 1990, 17). A partir de este planteamiento, el enfoque reactivo se consideró básicamente conductista, mientras que los enfoques clásicos (en los que predomina el desarrollo de modelos matemáticos) presentan similitudes con los enfoques constructivistas, con los de teoría del procesamiento de la información y, en general, con los modelos de psicología cognitiva.

Basados en estos enfoques y teniendo en cuenta cada uno de los métodos de planificación de movimientos dentro de espacios estructurados y no estructurados, conocidos y no conocidos, el presente trabajo desarrolla

estudios sobre campos de potencial artificial orientados por un mecanismo de movilidad basado en el modo meta (Serradilla & Maravall, 1996, 1159), en donde existen coordenadas del objetivo que se desea alcanzar, integrando la información bajo intervalos de tiempos establecidos.

3 Campos de potenciales artificiales

En el método de campos de potencial artificial⁴ (Khatib, 1986, 90; Borestein & Koren, 1991, 278), el robot se concibe como una partícula inmersa dentro de un campo de potencial cuyas variaciones locales reflejan la estructura del entorno. Los obstáculos son modelados por cargas repulsivas y la meta como una carga atractiva (figura 1). El movimiento del robot se establece de modo iterativo, calculando en cada paso la fuerza generada por el campo de potencial y utilizando la dirección de ésta para modificar el comportamiento del robot.

3.1 Navegador con campo de potencial

Los algoritmos basados en campos de potencial (figura 2) constan al menos de dos componentes: uno de atracción hacia el objetivo y otro de repulsión hacia los obstáculos (Borestein & Koren, 1991, 278). La planificación del movimiento consiste en la adecuada combinación de ambos, de manera que conduzcan al robot hacia el objetivo sin colisiones. Esta operación, denominada fusión de comandos, generará las referencias de control a los actuadores del robot en forma de velocidades (v , ω) de avance y de cambio de orientación, respectivamente.

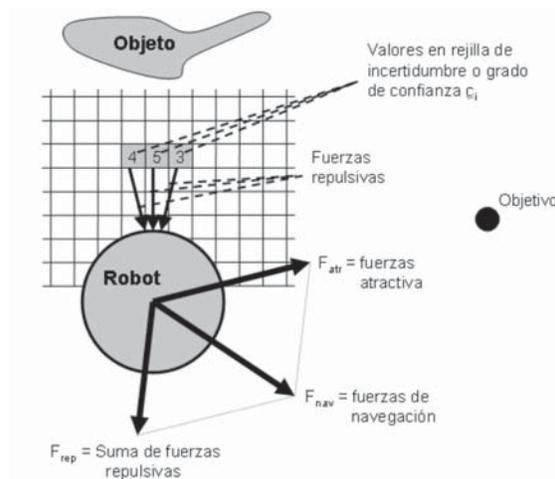


Figura 2. Método de campos de potenciales artificiales

⁴ Aunque la formulación original de la teoría se ocupaba del problema de la planificación de trayectorias en robots articulados, la idea fundamental, con algunas modificaciones, puede aplicarse al problema de la navegación de robots móviles.

El navegador basado en campos de potencial artificial que se presenta, se diseñó para una plataforma diferencial de forma circular con características no holonómicas (Bermúdez, 2003, 19). El robot está dotado de sensores de distancia⁵ dispuestos en su periferia. Cada sensor apunta en una orientación fija, θ_i , respecto al sistema de referencia F_A asociado con el robot (figura 3).

3.1.1 Potencial de atracción

El bloque de atracción genera el movimiento en la dirección del objetivo. Sus entradas son la estimación de la posición actual (x, y) y la posición final (x_f, y_f) por alcanzar.

$$\vec{F}_{atr}(f) = K_{atr} \left(\frac{x_f - x}{d_t} \right) \vec{i} + K_{atr} \left(\frac{y_f - y}{d_t} \right) \vec{j} \quad (1)$$

En la ecuación (1) el módulo K_{atr} es un parámetro de configuración, y d_t la distancia al objetivo en cada instante. La dirección hacia la meta, $\delta_{atr}(t)$, referida al sistema de referencia fijo F_w , se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$\delta_{atr}(t) = \tan^{-1} \left(\frac{y - y_f}{x - x_f} \right), \quad (0 \leq \delta_{atr}(t) < 2\pi) \quad (2)$$

3.1.2. Potencial de repulsión

El bloque de repulsión opera en función de la información dada por los sensores de distancia del robot. La distancia que mide cada sensor, s_i , puede asociarse al módulo de un vector, \vec{s}_i , orientado hacia $\pi + \theta_i$, y es mayor mientras más cerca esté el obstáculo: $\vec{s}_i = -C_{rep} \cos(\theta_i) \vec{i} - C_{rep} \sin(\theta_i) \vec{j}$. En este caso, el módulo C_{rep} es un parámetro de configuración⁶, que se relaciona con la medida del sensor s_i , con otros valores como el grado de confianza en la medida c_i , o las dimensiones del robot en forma de su radio mayor R_r ,

$$C_{rep} = K_{rep} \frac{c_i R_r^2}{s_i^2} \quad (3)$$

⁵ Se implementaron sensores ultrasónicos para determinar las distancias de los obstáculos al robot.

⁶ El módulo C_{rep} es un parámetro más sensible que K_{atr} para la configuración del sistema de navegación, ya que la repulsión depende únicamente de medidas provenientes de los sensores, que llevan asociados, inevitablemente, errores e imprecisiones.

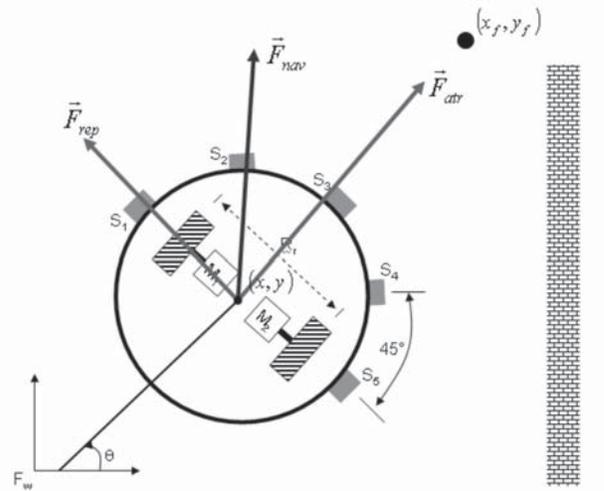


Figura 3. Disposición del robot ROMA-UD1 utilizando para implementar los algoritmos de campos de potencial artificial

En la ecuación (3), K_{rep} es ahora el nuevo parámetro de configuración. Interpretando la medida dada por cada sensor de distancia como un vector de repulsión en la dirección del sensor, la información de los n vectores se integra mediante su suma vectorial:

$$\vec{F}_{rep}(t) = \sum_{i=1}^n \vec{S}_i \quad (4)$$

Un caso muy sencillo de esta integración se presenta si los sensores están dispuestos de manera simétrica respecto al eje x del sistema de referencia móvil F_A . Entonces la dirección de repulsión se puede calcular con una simple suma promediada, que orienta la navegación a zonas con menor densidad de obstáculos⁷:

$$\delta_{rep} = \frac{\sum_{i=1}^n s_i \theta_i}{\sum_i s_i / n} \quad (5)$$

Por último, obsérvese que los resultados de la parte de repulsión, dados en forma de direcciones de espacio libre de obstáculos, se refieren al sistema móvil de navegación; para combinarlas con las provenientes del potencial de atracción, referidas al sistema de referencia fijo F_w , es necesario conocer la orientación del robot θ .

⁷ Nótese que en este caso "escalar", a diferencia del vectorial, no se genera un potencial infinito en el contorno de los obstáculos, ya que la repulsión deja de ser inversamente proporcional a la distancia entre ellos. Por tanto no garantiza la no colisión, y su interés se limita a su extrema sencillez conceptual y de cálculo.

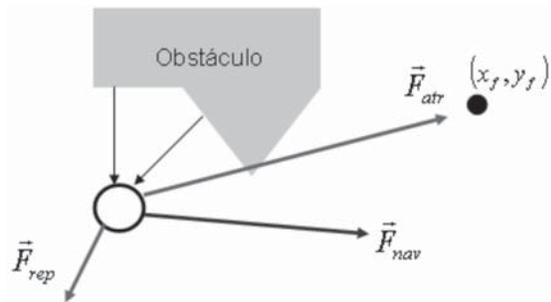


Figura 4. Fuerzas básicas para calcular la trayectoria de navegación del robot.

3.1.3 Fusión de comandos

La fusión de ambos vectores de comportamiento, \vec{F}_{atr} y \vec{F}_{rep} , consiste en una suma vectorial en F_w : $\vec{F}_{nav} = \vec{F}_{atr} + \vec{F}_{rep}$ (figura 4), que produce un vector de ángulo δ que en general apuntará hacia el objetivo por zonas libres de obstáculos. La fusión de comandos se simplifica notablemente escogiendo parámetros (K_{atr} , C_{rep}) tales que los módulos de \vec{F}_{atr} y \vec{F}_{rep} sean siempre iguales, de donde se obtiene:

$$\delta = \tan^{-1} \frac{\sin(\delta_{atr}) + \sin(\delta_{rep})}{\cos(\delta_{atr}) + \cos(\delta_{rep})} \quad (6)$$

que se calcula fácilmente con $\delta = 1/2(\delta_{atr} + \delta_{rep})$, si los ángulos vienen dados en el intervalo $(-\pi, +\pi)$. En este caso, el robot se desplaza en la dirección intermedia entre la meta y la de mayor alejamiento de los obstáculos. El último paso del navegador, que es la elección de las referencias (v , ω) al robot, se puede fijar de varias maneras, por ejemplo,

$$v = V_{cte} \quad y \quad \omega = K_{\omega}(\delta - \theta)$$

que impone una velocidad lineal constante y un control proporcional de la orientación. En tal caso se introducen dos nuevos parámetros de configuración: el valor de la velocidad constante y la velocidad de giro K_{ω} . Otra posibilidad es variar la velocidad de avance v , en función de las condiciones del entorno, por ejemplo $v = V(\vec{s}_i, x_f, y_f)$. El diagrama de bloques (figura 5), esquematiza todos los componentes que intervienen en la simulación. En el bloque etiquetado como planificación se incluyen los componentes de repulsión y atracción y la fusión de comandos; la elección de las referencias de control se consideran parte integrante del algoritmo.

3.2 Método de las cargas ficticias

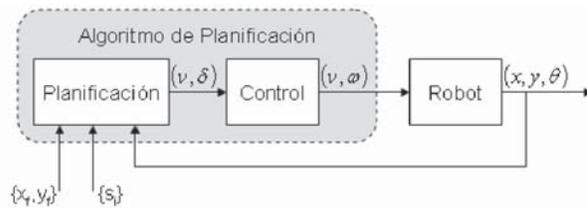


Figura 5. Diagrama de bloques del sistema de navegación

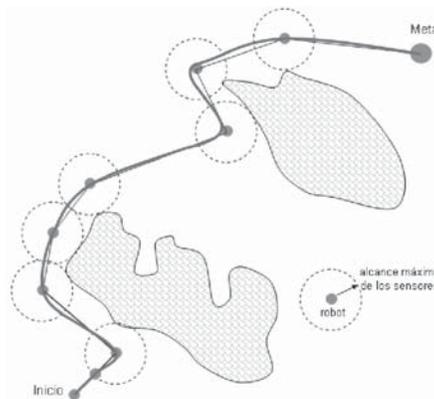


Figura 6. Trayectoria seguida por un robot mediante un algoritmo de campos de potencial artificial entre dos puntos

Un serio problema del enfoque de los campos de potencial artificial, ya detectado por sus creadores (Khatib, 1986, 90), es su elevada sensibilidad a la existencia de mínimos locales. Estos mínimos, además, no sólo son relativamente frecuentes sino que dependen de cada misión particular, por lo que no es posible su prevención⁸. En general, los métodos estudiados para mejorar el sistema de navegación basado en campos de potencial artificial implican un mecanismo de exploración costoso, tanto en tiempo de proceso como en memoria necesaria para almacenar un modelo adicional de la situación de los mínimos locales (Damas, Lima & Custodio, 2002, 191).

Para resolver este problema se realizó el estudio del método denominado de cargas ficticias (Serradilla & Maravall, 1996, 1159), que consiste en dotar al sistema de la capacidad de añadir cargas repulsivas ficticias que obliguen al robot a alejarse de los mínimos locales una vez éstos son detectados⁹; para ello se coloca una carga

⁸ Históricamente se han propuesto varios métodos para escapar de ellos una vez que son detectados, descritos en Latombe, 1993.

⁹ La situación de mínimo local puede detectarse teniendo en cuenta la suma total de las fuerzas que inciden sobre el robot. Cuando esta fuerza se hace muy pequeña, el movimiento inducido debería ser prácticamente nulo; así, se está en un mínimo local cuando la fuerza ejercida sobre el robot es menor que cierto valor umbral.

repulsiva unitaria que incite al robot a escapar del mínimo, en el punto determinado por la ecuación (7).

$$\vec{p}_c = \psi \left(\vec{p} - \vec{F}_{rep} + \vec{l} \right) \quad (7)$$

En (7), \vec{p}_c es la posición actual del robot, \vec{F}_{rep} es la fuerza de repulsión asociada a los obstáculos y \vec{l} es un vector unitario perpendicular al vector que apunta hacia la meta (vector \vec{F}_{atr}). ψ es un número real que determina la distancia a la que se colocará la carga. En este trabajo se utilizó una constante ajustada experimentalmente a un valor de dos radios de robot¹⁰. Debe tenerse en cuenta que en el plano existen dos vectores perpendiculares a \vec{F}_{atr} , dependiendo del lado por el cual se tome la perpendicular (por la derecha o por la izquierda), lo que genera a su vez dos posibles comportamientos para el robot.

Para la elección del vector perpendicular se tienen diversas opciones: i) siempre a la derecha (el robot es zurdo, porque en los mínimos locales tendería a moverse hacia la izquierda); ii) siempre a la izquierda (el robot es diestro); iii) de manera aleatoria a derecha o a izquierda; iv) de manera aleatoria a derecha o a izquierda, en ráfagas (cuando se decide una orientación, se mantendrá durante cierto número de ensayos); v) a izquierda o a derecha, dependiendo de los últimos movimientos del robot, siguiendo la trayectoria más natural¹¹. Cuando se han añadido una o varias cargas, la fuerza total debida a cargas ficticias obedece a la expresión descrita en la ecuación (8).

$$F_{fic} = \sum_i -\frac{k_c}{|\vec{C}_i|^{m_c}} \vec{c}_i \quad (8)$$

En (8), $|\vec{C}_i|$ es la distancia del robot a la carga i , \vec{c}_i es un vector unitario en la dirección de la carga i . De nuevo dos parámetros, k_c y m_c , establecen cómo decae la repulsión con la distancia. Lo ideal sería que k_c fuera proporcional a la magnitud del mínimo local, aunque ésta se desconoce a priori. Tras la incorporación de cargas ficticias al modelo, las fuerzas que intervienen son las mostradas en la ecuación 9 (véase figura 7).

$$\vec{F}_{nav} = \vec{F}_{atr} + \vec{F}_{rep} + \vec{F}_{fic} \quad (9)$$

Latombe alude a una hipotética función de potencial –la función de navegación– que, de encontrarse, permitiría la navegación hasta el objetivo aplicando simplemente un criterio de descenso del gradiente (Latombe, 1993a, 54). Aunque esta función en general no existe,

con el método de las cargas ficticias se obtiene una buena aproximación de ella, corrigiendo el campo de potencial artificial tradicional con la adición de nuevos términos representados mediante las cargas ficticias.

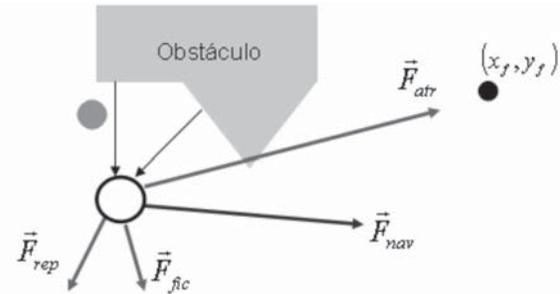


Figura 7. Fuerzas básicas para calcular la trayectorias de navegación del robot incorporando cargas ficticias

4. Implementación y resultados

A partir de los modelos anteriores, para campos de potencial artificial y campos de potencial artificial modificados mediante cargas ficticias, se muestran una serie de resultados empíricos obtenidos a partir del paquete de software Mobotsim, mediante simulaciones y operaciones reales con el robot Romabot¹².

El robot Romabot (figuras 8 y 9) fue implementado a partir de una plataforma diferencial formada por dos servomecanismos controlados a partir de PWM y con sensores odométricos ópticos de tipo incremental para determinar la posición (x, y) y la orientación (θ) del robot. La resolución de los sensores odométricos implementados fue de $3,75^\circ$ por giro de cada rueda. El sistema de proximidad fue implementado a partir de cinco pares sensores ultrasónicos con frecuencia de operación aproximada de 24,2 kHz, distribuidos en 180° de la plataforma, ángulo de apertura de medida de 35° y con una ventana de seguridad entre 15 cm y 1,3 m.

El robot tiene dos tarjetas implementadas empleando el microcontrolador Motorola 68HC908GP32, con las siguientes funciones: i) tarjeta maestro: encargada de la comunicación con el PC de forma serial mediante el protocolo RS232, generación de la señal PWM y

¹⁰ El robot Romabot posee un radio de 6", de modo que, para las pruebas experimentales, es de 12" Montiel & Ceballos, 2003.

¹¹ Por más natural se entiende la que menos difiera en ángulo, la dirección actual del robot.

¹² Las simulaciones han sido realizadas en el Laboratorio de electrónica de la Facultad Tecnológica de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá y en los pasillos de la misma Facultad.



Figura 8. Fotografía de robot Romabot

Tabla 1. Especificaciones generales del robot Romabot utilizadas para las simulaciones y la experimentación del algoritmo de planificación

Plataforma		Sensores ultrasonidos	
Diámetro de plataforma	0,31m	Número de sensores	5
Peso del robot con PC	4 kg	Ángulo entre sensores	45°
Cluster de equilibrio	2	Ángulo de apertura	35°
Diámetro de rueda	0,1 m	Distancia máxima	1,3 m
Ancho de rueda	0,04 m	Distancia mínima	0,2 m
Velocidad del robot	0,06 m/s	Resolución mínima para sensores odométricos	0,04 m

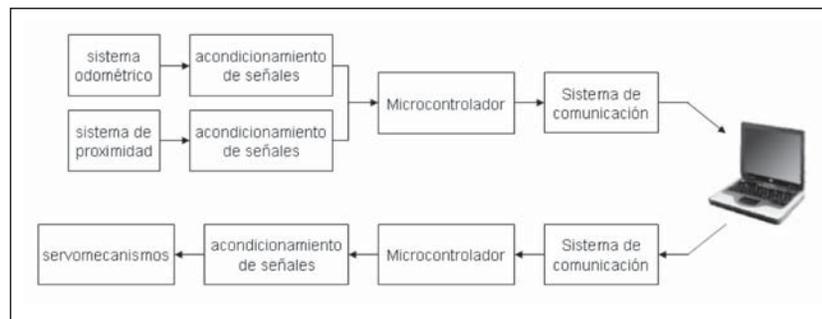


Figura 9. Diagrama de bloques del robot Romabot

4.1 Simulación de algoritmos

Las simulaciones fueron realizadas con el objetivo de analizar e implementar algoritmos de campos de potenciales artificiales utilizando el simulador Mobotsim, verificar el desempeño de los algoritmos y del mismo método de planificación seleccionado, y concluir con respecto a los resultados obtenidos a nivel de simulación, contrastando estos resultados con la implementación real en el robot diseñado.

manejo de la etapa de potencia para los servomecanismos, lectura de los sensores odométricos y comunicación con la tarjeta esclavo; ii) tarjeta esclavo: encargada de realizar la medición de distancia de los obstáculos (dato que es entregado a solicitud de la tarjeta maestro) y el acondicionamiento de la señal de los sensores ultrasónicos (desde la generación de la señal mecánica hasta el filtrado, amplificación y adaptación para la medición de la distancia de los obstáculos). El algoritmo de planificación de movimientos se implementó en un computador portátil Intel Pentium MMX a 166 MHz encargado de ejecutar el algoritmo y control del robot, según los datos suministrados por las tarjetas de los microcontroladores maestro y esclavo.

Las especificaciones generales del robot Romabot utilizadas para las simulaciones y la experimentación del algoritmo de planificación se listan a continuación:

4.1.1 Planificación a partir de campos de potencial

La primera observación interesante sobre el método consistió en que el algoritmo depende de una serie de parámetros de configuración, a saber: $(K_{atr}, K_{rep}, C_i, V_{cet}, K_{\omega})$. Dejando aparte la asignación de los grados de confianza en las medidas de los sensores, para los demás parámetros no aparece en principio un criterio intuitivo para su asignación. Los dos primeros, (K_{atr}, K_{rep}) definen la relación entre los comportamientos de atracción y de repulsión, y los dos últimos (V_{cet}, K_{ω}) , influirán en la velocidad de reacción del robot a través de su control. La elección de parámetros fue resuelta a partir de prueba y error mediante el desarrollo de simulaciones.

A partir del algoritmo principal del método de campos de potenciales artificiales se desarrollaron varias simulaciones con diversas geometrías de obstáculos para analizar el desempeño del algoritmo. Los parámetros del robot utilizados para las simulaciones se describieron anteriormente y los específicos del algoritmo fueron: $K=0,5, K_{rep}=0,86, =1, C_i=1, K_{\omega}=y$; con ellos se obtuvieron

los

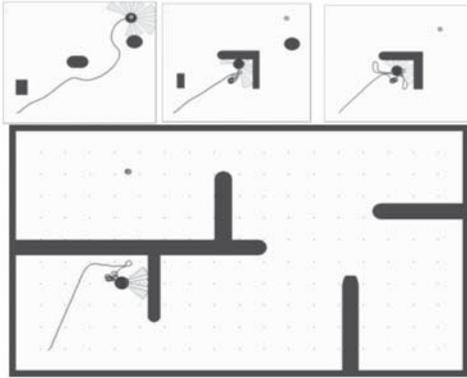


Figura 10. Simbología del algoritmo de campos de potencial artificial

La figura 10 muestra cuatro simulaciones diferentes con los mismos parámetros de simulación en donde lo único que varía es la distribución de los obstáculos. La primera simulación muestra que el robot alcanza el objetivo final sorteando los obstáculos a través de su trayectoria y sin ningún problema. La segunda, muestra el problema del método de campos de potencial artificial, mínimos locales: las fuerzas de atracción y de repulsión tienen una misma magnitud y ángulo, resultando un ángulo de navegación nulo que impide que el robot pueda sortear el obstáculo. Esta misma condición se repite en la tercera y cuarta simulaciones.

De las simulaciones realizadas puede observarse que, dependiendo de la configuración de los obstáculos, el algoritmo va a presentar mínimos locales que confunden al robot y no le dejarán llegar a su objetivo. Por tal motivo se decidió estudiar métodos para modificar y mejorar dicho algoritmo y obtener así un algoritmo robusto que pueda resolver el problema planteado.

4.1.2 Planificación a partir de campos modificados

Este método de planificación permite definir un rumbo determinado o intentar alcanzar unas coordenadas de destino, capaz de eludir obstáculos mediante la ubicación de cargas ficticias en la posición determinada por la ecuación (7).

Las cargas ficticias aportan una fuerza \vec{F}_{fic} determinada por la ecuación (8), que depende de los parámetros k y m , los cuales establecen cómo decae la repulsión con la distancia para dicha carga. A partir de la ecuación que establece la intensidad de la repulsión de cada sensor individual, $f=k/r^m$; pueden obtenerse dos expresiones que permiten calcular k y m , dados dos pares de valores para f y r . f_1 es la fuerza deseada para una distancia r_1 y f_2 la fuerza deseada para una distancia r_2 , ellas están determinadas por:

$$f_1 = \frac{k}{r_1^m}, f_2 = \frac{k}{r_2^m} \quad (10)$$

Calculando logaritmos en la ecuación (10) y operándolos mediante una diferencia, se obtiene, $\ln(f_1) - \ln(f_2) = m \cdot (\ln(r_2) - \ln(r_1))$ de donde resulta:

$$m = \frac{\ln(f_1/f_2)}{\ln(r_2/r_1)} \quad \text{y} \quad k = f_1 \cdot r_1^m \quad (11)$$

Estas dos ecuaciones son útiles, puesto que permiten obtener la curva de rechazo dependiendo de las características particulares de los sensores, fundamentalmente los alcances mínimo y máximo del sensor (ventana de seguridad), y de las fuerzas deseadas en estos puntos. Interesa en particular que las fuerzas generadas en los alcances máximos sean pequeñas, y que las generadas en los alcances mínimos sean de magnitud suficiente para compensar la fuerza de atracción hacia la meta, ya que de lo contrario el robot podría colisionar.

A partir del algoritmo de campos de potenciales modificados con cargas ficticias se desarrollaron varias simulaciones con una misma distribución de obstáculos pero con diferentes puntos de partida y llegada, que generaliza mejor el problema y comprueba la robustez de la solución al problema de mínimos locales. Los parámetros del robot utilizados para las simulaciones son los mismos descritos anteriormente; específicamente para las cargas ficticias fueron: $\psi = 12.1^\circ$, $k = 6$ y $m = 1$; con ellos se obtuvieron los mejores resultados y fueron implementados en el algoritmo desarrollado para Romabot.

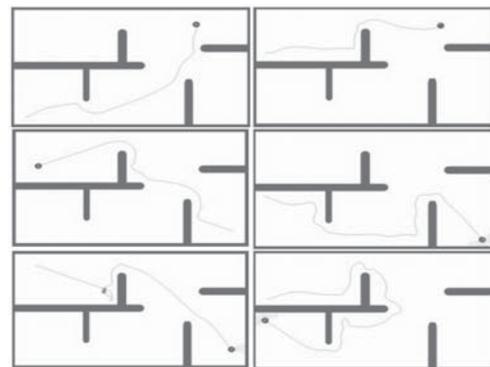


Figura 11. Simulaciones del algoritmo de campos con cargas ficticias.

La figura 11 presenta seis simulaciones diferentes realizadas con los parámetros anteriores. Todas ellas muestran que, para cada condición, el robot se desplaza por el medio

simulado buscando siempre el punto de llegada. Cada simulación también muestra la forma como el robot sorteaba cada obstáculo encontrado; en la quinta simulación puede observarse cómo el robot sorteaba un mínimo local y logra su objetivo principal: llegar al punto final.

De las simulaciones realizadas puede observarse que el algoritmo de campos de potenciales modificados a partir de cargas ficticias mejora el comportamiento del método para configuraciones de obstáculos más complejas; sin embargo, el tiempo de simulación aumentó en un 75% sobre el método original de planificación. Las figuras utilizadas para la simulación fueron espacios mucho más estructurados¹³, pensando en la implementación de este algoritmo como punto de partida para la planificación de movimientos del robot Flamebot dentro de un recinto cerrado, con el objetivo de detectar focos de incendios en etapa latente.

4.2 Implementación

El algoritmo de planificación basado en métodos de cargas ficticias se encuentra distribuido en dos bloques: software, y bloque funcional. El software fue desarrollado en el lenguaje de programación Visual Basic (véase figura 12), y se encarga de calcular y generar la trayectoria para la llegada al sitio de meta u objetivo definido. El bloque funcional fue implementado en microcontroladores como unidades de procesamiento y control en la parte sensorica, manejo de motores y comunicación con el PC.

El software desarrollado permite configurar el robot para su funcionamiento, y fue diseñado para establecer una comunicación con el robot a 9.600 bps. Mediante este programa se habilita al robot para su funcionamiento, de acuerdo con una serie de tramas de información; ellas obtienen la información de distancia recorrida por medio de los odómetros y la información de la distancia calculada por los cinco sensores ultrasónicos instalados en la plataforma. Adicionalmente, en el software se programa una rutina de desplazamiento que calcula la distancia de avance del robot y un ángulo de giro en el momento en que recorra la distancia estipulada. Toda la información suministrada por el robot al computador es utilizada por este último para el cálculo y desarrollo del algoritmo de navegación del primero.

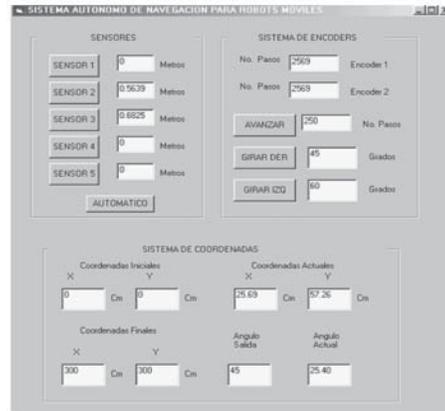


Figura 12. Pantalla principal del software realizado para Romobot.

En la figura 13 se muestran fotografías del robot en experimentación con varias geometrías de obstáculos; así se comprobó la aplicabilidad de los algoritmos diseñados¹⁴.



Figura 13. Fotografía de experimentación con el Romobot.

5. Conclusiones

En todos los ámbitos, uno de los principales obstáculos para la mayoría de implementaciones sobre robots es la dificultad de predecir su comportamiento. La complejidad reside tanto en el sistema mismo (mezcla de actuadores, sensores y programas), como en su interacción con el entorno. En consecuencia, el estado del arte en robótica móvil revela muchas soluciones *ad hoc*, de aplicación concreta y difícil generalización.

La literatura revisada revela cierta divergencia entre la algorítmica y las aplicaciones reales. A menudo, los grupos de investigación dedican sus esfuerzos, de manera independiente, en ambos sentidos. En consecuencia, existe un buen número de algoritmos con probadas cualidades teóricas y numéricas, pero no suficientemente validados en la práctica, algunas veces por su complejidad y otras por su difícil implementación. En este sentido, en el pre-

¹³ Puede considerarse como una distribución típica de una casa.

¹⁴ La experimentación se realiza en el Laboratorio de Electrónica de la Facultad Tecnológica de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá.

sente trabajo se integró la descripción algorítmica de un problema y la adecuación de la solución a condiciones reales, con resultados aceptables.

Con base en las simulaciones realizadas, el algoritmo de planificación de movimientos basado en campos de potenciales artificiales presentó problemas con mínimos locales. Empleando cargas ficticias como método de solución a problemas de mínimos locales mejoró la robustez del algoritmo. Después de una serie de pruebas realizadas al robot Romabot, en cuanto a posibles comportamientos de acuerdo con la ubicación de cargas ficticias, los mejores resultados se lograron con la ubicación dependiente de los últimos movimientos del robot, es decir, siguiendo la trayectoria más natural de desplazamiento.

Para la implementación del modelo odométrico propuesto se desarrolló una plataforma diferencial para un robot móvil, que contiene sensores odométricos; ella permitió la integración del algoritmo de planificación. Para la percepción del espacio se empleó un sistema sensorico que comprende un algoritmo sencillo de fusión sensorial, necesario para la integración de la medida de los sensores. Uno de los problemas presentados fue la integración de la información; no se logró obtener un buen reconocimiento del espacio por el número limitado de sensores utilizados.

Cuando los algoritmos fueron implementados sobre el robot real, bajo sus propias condiciones, se generaron grandes deficiencias computacionales, debido a los problemas del comportamiento del robot y su propia integración de información sensorial y comportamiento de actuadores. Estas limitaciones de capacidad de percepción y computación en el robot real generan nuevos y relevantes cuestionamientos algorítmicos, como la percepción restringida basada en modelo.

El presente trabajo se constituye en punto de partida para estudios teóricos y experimentales de algoritmo de planificación de movimientos que pueden generar niveles de autonomía sobre robots móviles a diferentes niveles de integración, dentro de proyectos de investigación de diferentes tipos. El Grupo de Investigación ROMA ha adquirido conocimiento profundo acerca del problema de focos de incendios en cooperación con el COBB¹⁵.

Otro resultado es el desarrollo de la plataforma misma, que integró la información y permitió la experimentación de los algoritmos diseñados. Sin embargo, debe mencionarse que durante las pruebas experimentales se presentaron problemas de calibración del robot;

dado que éste funciona sobre ruedas, la acumulación de errores de posicionamiento es inevitable. Para controlar estos errores en trabajos futuros se plantea el uso de tres procedimientos: i) establecer un modelo del error y estimar, por mínimos cuadrados, sus parámetros; ii) recalibrar el robot en (x, y), utilizando la información de la posición almacenada en memoria; iii) mejorar el sistema sensorico de posición del robot, incorporando métodos globales y sistemas redundantes de posición a partir de sensores ópticos.

Referencias bibliográficas

- [1] AGRE, R. y CHAPMAN, D. ¿What are plans for? Designing of autonomous agents.. Cambridge, MIT press, P. Maes (ed.), pp. 17-34.
- [2] ÁLVAREZ, J. (1998). "Planificación del movimiento de vehículos autónomos basada en sensores". Tesis doctoral, Universidad de Oviedo, Gijón.
- [3] BERMÚDEZ, G. (2003). "Modelamiento cinemático y odométrico de robots móviles: aspectos matemáticos". En: Revista *Tecnura*, No. 12, pp. 19-30.
- [4] BORESTEIN, J. y KOREN, Y. (1991). "The vector field histogram: fast obstacle avoidance for mobile robots". In: *IEEE transaction on robotics and automation*, 7(3), pp. 278-288.
- [5] BROOKS, R. (1986, March). "A robust layered control system for a mobile robot". In: *IEEE Journal of Robotics and Automation*. Vol. RA-2, No. 1, pp. 14-23.
- [6] CHARNLEY, D. (1993). "Intelligent autonomous vehicles". 1st IFAC international workshop. Oxford, Pergamon Press.
- [7] DAMAS, B., LIMA, P., y CUSTÓDIO, L. (2002). Navegação entre obstáculos usando um método de campos de potencial modificados. Proc. of the Robotica 2002 Portuguese Scientific Meeting. Universidade de Aveiro, Portugal.
- [8] EVERETT, H. R. (1995). *Sensors for Mobile Robots: Theory and Application*, Natick – Massachusetts, AK. Peters.
- [9] HOLLIER, R. (1987). *Automated guided vehicle systems*. IFS Kempston, Bedford, International trends in manufacturing technology.
- [10] IYENGAR, S. y ELFES, A. (1991). "Autonomous mobile robots: perception, mapping and navigation". In: *IEEE Computer Society Press*. Volume 1. Los Alamitos, California.
- [11] KHATIB, O. (1986). "Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots". In: *The International Journal of Robotics Research*. 5, (1), pp. 90-98.
- [12] LATOMBE, J. (1993). *Robot motion planning*. 3rd ed., Boston, Kluwer Academic Publishers.
- [13] MONTIEL, H. y CEBALLOS, M. (2003). Tesis de pregrado para optar título de Ingeniero en Control Electrónico e Instrumentación. Bogotá, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Facultad Tecnológica.

¹⁵ Cuerpo Oficial de Bomberos de Bogotá, D.C.

- [14] MORENO, O. (2002). "Navegación reactiva de robots móviles mediante técnicas de campos potenciales". Trabajo de Grado. Ingeniería de Sistemas y automática. Universidad de Málaga.
- [15] MURPHY, R. (2002). *An Introduction to AI Robotics: Intelligent Robotics and Autonomous Agents*. USA, MIT Press.
- [16] NILSSON, N. (1969). "Mobile automation: an application of artificial intelligence techniques". *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*.
- [17] SERRADILLA, F. y MARAVALL, D. (1996, April). "A Navigation System for Mobile Robots Using Visual Feedback and Artificial Potential Fields". Proc. of the 30 european meeting on cybernetics and system research. Trapp, R (ed.), pp. 1.159-1.164.