



Métodos Usados en la Solución del Problema de Evasión de Obstáculos en RMR

M. R. Cordero-Ocampo^{†‡}, R. Silva-Ortigoza[†], M. Marciano-Melchor[†] y J. A. Butrón-Guillén[‡]

[†]CIDETEC-IPN. Departamento de Posgrado. Área de Mecatrónica.

Av. Juan de Dios Bátiz s/n. Esq. Miguel de Othón de Mendizábal.

“Unidad Profesional Adolfo López Mateos”. C.P. 07700, México, D.F., MÉXICO

e-mail: {rsilva, mmarciano}@ipn.mx

[‡]Centro Nacional de Actualización Docente (CNAD-DGETI). Área de Control.

Av. Estanislao Ramírez s/n. Esq. Mar de las Lluvias.

Col. Selene, Del. Tláhuac. C.P. 13420, México, D.F., MÉXICO.

e-mail: martinkordero@yahoo.com.mx, robot_abg@yahoo.com.

Resumen—En este documento inicialmente se presenta un panorama general de los métodos que dan solución al problema de evasión de obstáculos en robot móviles de ruedas. Posteriormente se profundiza en el método de campos potenciales artificiales, asimismo se presentan algunos resultados experimentales obtenidos con este método, así como de la combinación de este método con otros para dar solución al problema de evasión de obstáculos.

Palabras clave: Robótica, robots móviles de ruedas, evasión de obstáculos, campos potenciales artificiales.

I. INTRODUCCIÓN

Desde finales del siglo XX y comienzos del XXI los robots móviles de ruedas (RMR), han sido estudiados y desarrollados ampliamente por parte de la comunidad académica, científica y militar, debido a que:

- En su proyección se apoyan de la integración sinérgica de disciplinas como física, matemáticas, mecánica, electrónica, control automático y computación.
- Por su amplio campo de aplicación en superficies interiores y exteriores, desarrollan actividades repetitivas y peligrosas donde la actividad del ser humano es impracticable o innecesaria. Por ejemplo desactivar artefactos explosivos, supervisión, vigilancia local y remota (Behan y O’Keeffe, 1999), transporte y asistencia de personas (Simon *et al.*, 1999), (Borenstein y Koren, 1985), exploración de tuberías, suministro de componentes en líneas de producción, exploración planetaria (Muirhead, 1997) y prototipos de investigación (Borenstein y Hansen, 2007).
- En su construcción requieren un número menor de partes, menos complejas de fácil manufactura y mantenimiento en comparación con otros robots.
- Las variables de posición y orientación de su modelo cinemático son susceptibles de ser controladas por medio de diferentes técnicas de control retroalimentado.

Para su estudio e instrumentación existen trabajos que hacen referencia a los modelos cinemáticos (Duan *et al.*, 2006) y dinámicos de robots móviles que usan técnicas de control automático para desarrollar tareas relativas al posicionamiento o localización (Thrun y Bucken, 1996), a la regulación o estabilización a un punto de equilibrio, al seguimiento de trayectorias (Barrientos, 2008) y a la evasión de obstáculos (García, 2008).

En particular prestaremos atención a las soluciones que resuelven el problema de la evasión de obstáculos con robots móviles, inmersos en escenarios de trabajo poblados de obstáculos, distribuidos a lo largo de un punto inicial hasta un punto final, para ello se han generado métodos globales y locales que emplean sensores de posición relativos y absolutos (Borenstein *et al.*, 1997), así como combinaciones de estos, los cuales exportan información del medio ambiente hacia el método de campos potenciales artificiales del cual profundizaremos en detalle. Inicialmente, este método se diseñó para robots manipuladores (Khatib, 1985), y posteriormente se ha aplicado ampliamente para robots móviles (Vidal, 2002), (Laude, 2005) y (García, 2008) debido a que este método es analítico, sencillo, elegante y fácil de instrumentar en móviles. Éste método tiene como principio el concepto físico del seguimiento de la fuerza resultante asociado a un campo potencial (Khatib, 1985), (Vidal, 2002) entre una carga atractiva identificada como meta y varias cargas repulsivas reconocidas como obstáculos, las cuales en combinación aditiva pueden provocar el fenómeno de mínimos locales capaces de detener el tránsito del móvil o provocar un tránsito oscilatorio (Koren y Borenstein, 1991). La magnitud de ésta fuerza resultante determina proporcionalmente la velocidad de tránsito del robot móvil. Además éste método puede combinarse con otros métodos reactivos instrumentados con



sistemas de hardware dedicado.

Este trabajo está organizado como sigue: en la sección II se presenta una clasificación de los métodos que hacen uso de la evasión de obstáculos en robótica móvil. En la sección III aborda el método de campos potenciales artificiales desarrollado para robots móviles, enumerando sus ventajas y desventajas. En la sección IV se muestra la combinación del método de campos potenciales con otros métodos, y al final de la misma se presentan algunos resultados experimentales donde se muestra la eficacia de este método. Finalmente en la sección V se presentan las conclusiones del trabajo.

II. CLASIFICACIÓN DE MÉTODOS DE EVASIÓN DE OBSTÁCULOS

Dentro de la categoría de robots móviles de ruedas, la principal tarea a desarrollar es evadir obstáculos durante su tránsito hacia la meta, para ello se han desarrollado series de algoritmos con la finalidad de minimizar errores y proporcionar una mayor *autonomía* cada vez más certera en el tránsito del robot móvil. Ante tal finalidad las referencias que se citan a continuación son las más representativas sobre robots móviles. En particular nos enfocaremos al problema de la evasión de obstáculos empleando campos potenciales con robots móviles cuya tracción principal son ruedas.

La teoría de control moderno circunscribe al robot móvil de ruedas convencionales como un sistema no-holónimo (Novel *et al.*, 1991), cuando desarrolla la tarea de evasión de obstáculos, debido a la restricción que impone el elemento motriz convencional en el desplazamiento en dirección paralela al eje de rotación, (Divelbiss, 1997) considera que el movimiento se realiza sin deslizamiento.

El problema a solucionar consiste en evadir obstáculos en espacios de trabajo desconocidos o parcialmente conocidos, respetando las restricciones cinemáticas inherentes al modelo hasta que el móvil arribe a la meta, la diversidad de técnicas para lograr esto comienza con el desarrollo de *algoritmos primitivos* (Borenstein y Koren, 1989) que detienen el tránsito del robot al momento de detectar un obstáculo; continuando con *algoritmos sofisticados* con capacidad de predecir la trayectoria del móvil al detectar un objeto y finaliza con *algoritmos complejos* con base a múltiples mediciones de sensores que detectan la dimensión y ubicación del obstáculo y logran planificar rutas hasta la meta. Del conjunto de estos algoritmos en la tarea de evasión de obstáculos, se identifican las siguientes tendencias (Borenstein y Koren, 1991):

- 1.- **CONTROL REFLEXIVO.** Tiene como característica la ausencia de algún método cognoscitivo, es decir, no existe alguna metodología que planifique el tránsito. Con base a simples funciones detectan el obstáculo mediante algún tipo de sensor y ejecutan acciones básicas de evasión o seguimiento predefinido. La magnitud de respuesta depende de la magnitud del estímulo y se caracteriza por tiempos de respuesta rápidos.

- 2.- **CONTROL REACTIVO.** Esta basado en el modelo tradicional de inteligencia artificial de la cognición humana; siendo típicos algoritmos sofisticados y complejos que generalmente inician con la percepción del medio ambiente por algún tipo de sensor que provee la información al procesador digital, el cual generalmente construye un modelo del medio ambiente, tomando decisiones para la planificación del siguiente tránsito. Posee un nivel jerárquico de control. Son necesarios grandes recursos de cómputo que trabajen en tiempo real, estimulando un sistema electromecánico con tiempo de respuesta relativamente lento.

II-A. Métodos de control reflexivo

Ejemplos de algunos métodos de control reflexivo:

- **Método de seguimiento planeado.** Se caracteriza por hacer uso de infraestructura especializada en pisos lisos, que en conjunto definen la trayectoria y orientación del móvil; en un principio eran controlados con algoritmos primitivos, cuando se detectaba el campo magnético generado por conductores eléctricos inmersos en el concreto, ahora estos son sustituidos por tapetes magnéticos adheridos al piso, siendo detectado el campo magnético por sensores del tipo magnético montados en la estructura mecánica del móvil, y con la incorporación de sensores láser y ultrasónicos facilitan la orientación y navegación del robot, el tipo más común de robot móvil es el vehículo guiado automáticamente, gobernados llevan a cabo tareas de transporte de abastecimiento de materias primas y de productos terminados (SavantCart, 2006).
- **Método de comparación indirecta.** En (Borenstein y Everett, 1997) enumera siete tecnologías de sensores de *posición relativa*, de la misma forma detalla sensores que describen la *posición absoluta*, ambos tipos de sensores son usados con métodos que estiman la posición en robots móviles dentro de un escenario de trabajo. Ejemplo de ello, es la plataforma móvil omnidireccional OmniMate (Borenstein, 2000), dotada con estos tipos de sensores, al móvil se le dirige remotamente y éste registra en formato digital la trayectoria que posteriormente reproduce.
- **Método de teleoperación asistida.** Se caracteriza en robots que actúan en dependencia de un agente controlador externo vinculado por algún canal de comunicación electrónica, el robot responde a comandos preestablecidos transmitiendo en todo momento hacia el controlador externo la información del medio ambiente y de la respuesta obtenida, ejemplo de esto (Sanchez *et al.*, 2007) es el robot de asistencia quirúrgica da Vinci SiTM System.
- **Método inspirado en sistemas biológicos.** BEAM (BEAMrobotics, 2009) Mecanismo electromecánico robótico inspirado en comportamientos neuronales de tipo biológico, cuyo funcionamiento radica en el estímulo-respuesta. Este comportamiento neuronal fue

investigado por Rodney Allen Brooks y Ed Rietman y posteriormente es desarrollado experimentalmente por Mark W. Tilden con circuitos analógicos que emulan dichos comportamientos. Tales mecanismos están compuestos por sensores y electrónica analógica y estructuralmente, por materiales reciclados de aparatos electrodomésticos y de oficina. Una derivación es el *BEAM Robot*, el cual combina la tecnología BEAM con electrónica digital programable, influenciado con un comportamiento *horse-rider*, la parte BEAM asume el papel de *horse* y cuando se presenten situaciones confusas, la parte de electrónica digital *rider* sugiere que se debe hacer.

II-B. Métodos de control reactivo

Ejemplos de algunos métodos de control reactivo:

- *Método de curvatura de velocidad* (Simmons, 1996). Desarrollado por Reid G. Simmons. Es un método de evasión de obstáculos en robots móviles para superficies interiores, tiene como base la restricción en la optimización del espacio y la velocidad. Las restricciones físicas de la velocidad y aceleración así como, la configuración de los obstáculos en el medio ambiente influyen en la velocidad de traslación y rotación del robot móvil en tiempo real.
- *Método de detección de bordes* (Borenstein y Koren, 1991). Para éste método el algoritmo intenta determinar la existencia del borde vertical del obstáculo, permitiéndole navegar al robot móvil alrededor del obstáculo. Tiene la desventaja de detener el tránsito del robot frente al obstáculo y que continúe entorno a él, depende de la precisión en las lecturas de los bordes verticales del obstáculo que son detectadas por los sensores ultrasónicos, siendo probable que el algoritmo registre obstáculos donde no existen, debido a las siguientes causas: la limitada dirección del eje acústico entre el sensor y el borde vertical del objeto, interpretaciones erróneas (alias) debidas a la retroalimentación sonora de sensores vecinos y ruidos.
- *Método de cartografía de obstáculos* (Borenstein y Koren, 1991). Es un método de evasión que aprovecha la representación de probabilidad de obstáculos en un medio ambiente cartesiano cuadrículado artificialmente por el robot móvil, donde cada celda contiene un valor de certeza que indica la existencia de un obstáculo. El robot móvil permanece estacionado en postura panorámica y con sus múltiples sensores ultrasónicos, actualiza su cartografía de obstáculos y finalmente transita hacia la siguiente localidad.
- *Método de Aproximación de Ventana Dinámica para la Evasión de Colisiones* (Quasny *et al.*, 1991). Emplea un algoritmo en tiempo real, basado en la interacción de las velocidades de traslación y de rotación en un tiempo muy corto. Emplea comandos cuya composición dependen de las mediciones del progreso del

robot móvil hacia la meta y la distancia relativa al próximo obstáculo.

- *Método de esquemas de motores*. Desarrollado por R. C. Arkin (Arkin, 1987). Según el texto citado en (Gallardo *et al.*, 1998) el enfoque de esquemas motores, pese a ser el más genérico, es muy complejo de llevar a la práctica por el gran número de parámetros que deben ser ajustados en las ecuaciones de control del robot. Un problema añadido es que obtiene los comandos del robot en dos fases separadas. En la primera fase se obtiene la dirección objetivo en la que debe moverse el robot. En la segunda fase se generan los comandos de modificación de las velocidades lineales y angulares necesarias para conducir al robot en la dirección deseada. Este enfoque sólo es factible si consideramos que las aceleraciones aplicables al robot son infinitas y el robot puede realizar de forma instantánea los incrementos de velocidades. Sin embargo, la realidad es que las aceleraciones usadas en la navegación de robots móviles debe ser baja para obtener trayectorias suaves y no forzar a la estructura mecánica del robot a tensión mecánica excesiva.
- *Método de campos potenciales artificiales*. Consiste en aplicar una función de campo potencial artificial en algoritmos de evasión de obstáculos en tiempo real para la navegación de robots móviles y planificación de trayectorias en robots articulados. Supone que la función potencial artificial está compuesta por un potencial atractivo y un potencial repulsivo y la combinación de éstas promueven la navegación del móvil, el cual parte del inicio y transita hacia la meta.

III. MÉTODO DE CAMPOS POTENCIALES ARTIFICIALES

En (Tilove, 1990) señala que este método fue desarrollado por B. H. Krogh en 1984 y por O. Khatib en el año 1985. B. H. Krogh (Krogh, 1984) formula el problema de evasión de obstáculos como una transición de estados del sistema dinámico, dado un estado inicial cambia hacia un estado final mientras se evaden regiones prohibidas en el espacio. B. H. Krogh introduce la idea de una *generalidad de campo potencial* como una función dependiente de la posición y de la velocidad.

O. Khatib (Khatib, 1985) presenta a éste método como una aproximación en la evasión de obstáculos en tiempo real tanto para robots manipuladores como para robots móviles. Aplica este esquema de evasión de obstáculos en la reformulación del problema de control de movimiento en un robot manipulador en su espacio de trabajo. La filosofía clásica del campo potencial artificial en la evasión de obstáculos consiste en (Khatib, 1985):

El manipulador se mueve en un campo de fuerza. La posición deseada es alcanzada si es un potencial atractivo para el efector final y los obstáculos son considerados como potenciales repulsivos para las partes del manipulador.



La evasión de obstáculos aplicada a la robótica móvil, es un problema propicio a ser tratado con el método de campos potenciales artificiales ya que permite de manera sencilla y elegante la evasión de obstáculos bajo sus formas *global* y *local* con base a los siguientes principios:

- Proponer una función de campo potencial artificial compuesta por un potencial atractivo producido por un *mínimo global* señalado como la meta y más de un potencial repulsivo identificados como los obstáculos.
- El robot móvil transita por el campo potencial artificial y es asistido en la navegación local por el negativo del gradiente del potencial evadiendo los obstáculos hasta arribar a la meta.
- Perspectivas global y local. La *perspectiva global* considera previamente el conocimiento de las coordenadas cartesianas de la meta y de los obstáculos. Mientras que la *perspectiva local* hace uso de la información proporcionada por algún tipo de sensor y en tiempo real navega hacia la meta.
- La ubicación de la meta se encuentra fuera de la zona de influencia de cualquier obstáculo.
- El escenario de trabajo del móvil es paralelo a la superficie del suelo y tiene una pendiente cercana a cero.

Las ventajas que presenta este método radican en que:

- Se puede combinar fácilmente con otras estrategias de control.
- Es un algoritmo simple obtenido de un método analítico, propicio en tareas de evasión de obstáculos en tiempo real para obstáculos tanto fijos como móviles.
- La resultante de fuerza entre el potencial atractivo y repulsivo es continua, promoviendo así la navegación del robot móvil.
- La resultante de fuerza es directamente proporcional a la velocidad, de forma que el gradiente se toma como el campo vectorial de velocidades del robot y la fuerza se emplea para orientar el vector de velocidad del robot colineal al gradiente (Vidal, 2002).

Sus principales desventajas son:

- La combinación de potenciales repulsivos y su vecindad, provoca *mínimos locales* que pueden detener el tránsito del robot. En (Borenstein y Koren, 1991) se propone el método Campos Potenciales Virtuales para la detección de mínimos locales, evitando de esta forma la incidencia del móvil en un mínimo local, facilitando el tránsito del móvil de forma suave y continua.
- La combinación de potenciales repulsivos paralelos al tránsito del robot puede provocar oscilaciones (Koren y Borenstein, 1991).
- No pueden cohabitar varios potenciales atractivos con la misma magnitud potencial.

IV. MÉTODO DE CAMPOS POTENCIALES EN COMBINACIÓN CON OTROS MÉTODOS

En la filosofía clásica de evasión de obstáculos propuesta por O. Khatib es común emplear la información del modelo cinemático del robot móvil, para obtener una trayectoria de evasión aproximada. En (Vidal, 2002) se aborda el tránsito de un vehículo multiactuado 1-trailer pretendiendo que avance de una posición inicial a un punto final sin colisionar con obstáculos, propone una estrategia de control desarrollada en dos pasos, el primero utiliza a la función potencial artificial para que el tractor siga la dirección del gradiente a velocidad uniforme y la segunda emplea la dirección del tractor como referencia para el remolque. En (Gulden y Utkin, 1995) se diseña un controlador con modo deslizante que impulsa al sistema mecánico a seguir suavemente el gradiente de un campo potencial artificial, asimismo emplea el control de fuerza artificial para orientar al vector de velocidad del robot colinealmente al mismo gradiente. El *Método Campos Potenciales Virtuales* (Borenstein y Koren, 1991) desarrollado por J. Borenstein y Y. Koren, conjuga la representación de probabilidad de obstáculos en un medio ambiente cartesiano cuadrículado artificialmente y campos potenciales en la navegación libre de colisiones del robot móvil en tiempo real. Esto permite que el móvil detecte y evada obstáculos desconocidos durante su tránsito hasta la meta. El *Método Histograma de Campos Potenciales VFH+* (Ulrich y Borenstein, 1998) es un método que emplea un algoritmo de procesamiento de cuatro estados para computar óptimamente la navegación del móvil. Los tres primeros estados del algoritmo procesan la información del medio ambiente cartesiano cuadrículado artificialmente produciendo un histograma polar en una dimensión, el último estado del algoritmo filtra el histograma polar y selecciona la ruta óptima de navegación para el móvil.

También existen métodos que diseñan una función de navegación que promueven el seguimiento del gradiente, estando implícita la inercia del sistema y consideran a las limitantes del sistema mecánico que impone restricción a los cambios instantáneos de velocidad en trayectorias circulares con radios menores al radio del robot móvil. En (Li y Zielinska, 2002) propone consideraciones en el modelado dinámico de un robot móvil con interacción entre la llanta y la superficie de contacto. De forma similar (Williams y Carter, 2002) presenta un modelo dinámico de un robot omnidireccional, que considera los deslizamientos de las llantas, y en (Pathak y Agrawal, 2005) describe la unificación entre el potencial artificial local y la dinámica del robot unicycle sin considerar el tiempo de parametrización en la navegación.

Otros métodos empleados frecuentemente por investigadores en algoritmos especializados, ignoran la dinámica del robot móvil, pero hacen uso del potencial artificial para generar secuencias de navegación. En (Gallardo *et al.*, 1998) se emplean *algoritmos genéticos* en la búsqueda y

optimización de trayectorias, aplicables a comportamientos de evasión de obstáculos en espacios de dimensión elevada, considerando representar cada trayectoria que puede seguir el robot mediante una cadena de símbolos equivalentes a un cromosoma en términos de algoritmos genéticos. En (Tanaka y Yoshioka, 1995) se realiza la simulación de un *algoritmo genético* y un *controlador difuso* para encontrar el camino de navegación óptimo y estable para un robot vehículo multiactuado, a partir de un punto inicial hasta un punto final con la tarea de evasión de obstáculos estáticos.

Las *técnicas morfológicas del procesamiento digital de imágenes* contribuyen en la retroalimentación de la posición cartesiana de los obstáculos y de la meta, la retroalimentación visual es del tipo global, es decir, la cámara digital se encuentra colocada en posición ortogonal al escenario del robot móvil, siendo posible tener una imagen de planta donde navegara el móvil. El procesamiento digital de la imagen del escenario del robot se lleva en dos etapas; la primera es un *procesamiento a nivel bajo* (Gonzalez y Woods, 2002), ésta comienza a partir de la captura de la imagen a color y aplicando funciones de software se obtiene una imagen binaria. La segunda y última etapa es un *procesamiento a nivel medio* (Gonzalez y Woods, 2002), donde a partir de la imagen binaria y mediante funciones de software se obtienen las coordenadas de los centros de gravedad de los objetos contenidos en la imagen, pudiendo ésta información ser exportada para el método de campos potenciales artificiales y junto con una técnica de control permita una solución alterna en el problema de evasión de obstáculos.

IV-A. Algunos resultados experimentales obtenidos

En el Área de Mecatrónica del CIDETEC-IPN se ha dado solución al problema de evasión de obstáculos empleando el método de campos potenciales artificiales. En (García, 2008) se implementó la evasión de obstáculos estáticos en combinación con un esquema de control jerarquizado basado en linealización de entrada-salida y un controlador PI. Para lograrlo se enumeran tres etapas:

- *Parámetros del sistema.* Se refieren a las dimensiones físicas del robot, coordenadas del obstáculo $q_{o1}(x_{o1}, y_{o1})$, radio de influencia del obstáculo ρ_{o1} , coordenadas del punto referencia del móvil $q(x_1, y_1)$ y de la meta $q_m(x_m, y_m)$.
- *Control del móvil.* Involucra la programación de las leyes de control que rigen el comportamiento del móvil, basado en la asociación de los siguientes bloques:
 - *Control por linealización entrada-salida* en este bloque se programa el esquema de linealización entrada-salida por retroalimentación estática, siendo necesario como entrada la posición (x_1, y_1) y orientación (φ) del móvil, generando como salidas los perfiles de velocidad angular deseado para el actuador derecho (ϖ_d^*) e izquierdo (ϖ_i^*) .

- *Control PI* en este se toman como entradas las velocidades angulares deseadas y reales de los actuadores derecho (ϖ_d) e izquierdo (ϖ_i) , generándose la señal de voltaje promedio para los manejadores de corriente de los actuadores derecho (v_d) e izquierdo (v_i) .
- *Modelo Cinemático del RMR* en este último bloque se programa, el modelo cinemático del móvil, el cual depende de las velocidades angulares deseadas derecha (ϖ_d^*) e izquierda (ϖ_i^*) , determinando la localización y posición del móvil (x_1, y_1, φ) .
- *Gráficas de resultados.* En este caso, se implementan dos obstáculos en la trayectoria del robot, la Tabla I muestra los parámetros del sistema, mientras que la Figura 1, se muestran los siguientes resultados: trayectoria generada desde el punto inicial a la meta, evolución del ángulo (φ) , velocidad angular izquierda deseada (ϖ_i^*) y real (ϖ_i) y finalmente velocidad derecha angular deseada (ϖ_d^*) y real (ϖ_d) . De estas gráficas, producto de resultados experimentales con el robot móvil RENA, se observa como los resultados son satisfactorios, al mostrar como se logra el objetivo de evadir los dos obstáculos en tiempo real.

TABLA I
Parámetros del sistema.

$q(x_1, y_1)$	$q_m(x_m, y_m)$	$q_{o1}(x_{o1}, y_{o1})$	$q_{o2}(x_{o2}, y_{o2})$
$x_1 = 0m$	$x_m = 2,2m$	$x_{o1} = 0,7m$	$x_{o2} = 1,5m$
$y_1 = 0m$	$y_m = 1,7m$	$y_{o1} = 0,4m$	$y_{o2} = 1,5m$
		$\rho_{o1} = 0,5m$	$\rho_{o2} = 0,5m$

V. CONCLUSIONES

Como ha quedado de manifiesto en este trabajo, se ha mostrado la importancia del estudio del problema de la evasión de obstáculos con robots móviles, se han citado y clasificado diferentes trabajos que dan solución al problema y se ha señalado particular interés en el método de campos potenciales artificiales, ya que por su elegancia y sencillez es posible combinarlo con otros métodos con la finalidad de proporcionar mayor autonomía a la navegación del robot móvil, asimismo se mostraron algunos resultados empleando este método de evasión de obstáculos.

AGRADECIMIENTOS

M. R. Cordero-Ocampo agradece el apoyo económico a la Secretaría de Investigación y Posgrado del IPN (SIP-IPN) mediante el otorgamiento de la Beca PIFI 2009. R. Silva-Ortigoza agradece el soporte económico recibido por la SIP-IPN, a través del proyecto 20090075 y del programa EDI, así como del Sistema Nacional de Investigadores (SNI-México). M. Marciano-Melchor agradece el apoyo recibido por la SIP-IPN, y del programa EDI, así como al SNI-México.

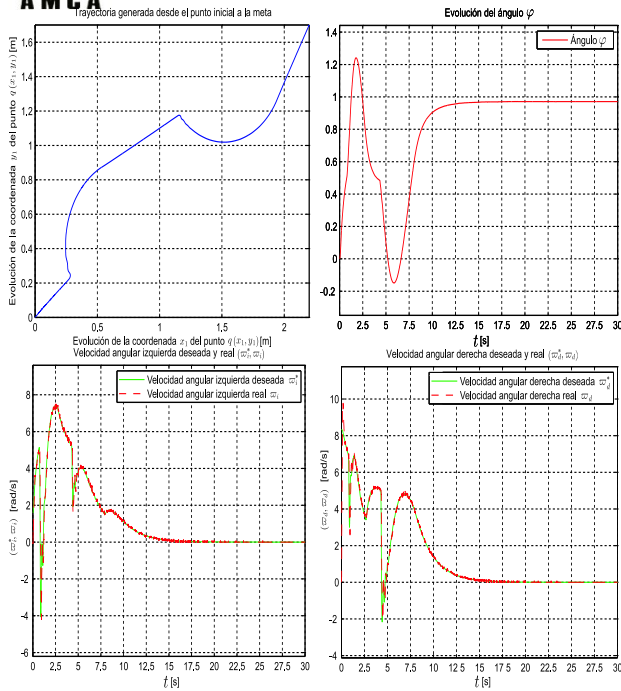


Figura 1. Resultados experimentales.

REFERENCIAS

Behan J. y O'Keefe D., (2007). The development of an autonomous service robot. Implementation: "Lucas"- The library assistant robot. Received: 16 August 2006 / Accepted: 26 June 2007/ Published online: 10 August 2007, Springer-Verlag.

Simon P., Bell A. D., Lincoln J. A., Simpson C. R., Koren Y., Borenstein J., (1999). The NavChair Assistive Wheelchair Navigation System. IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering, vol.7, no.4. Dec.

Borenstein J. y Koren Y., (1985). A Mobile Platform for Nursing Robots. IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 32, No.2, pp. 158-165.

Muirhead K. B., (1997). Mars pathfinder flight system integration and test. Aerospace Conference, Proceedings, IEEE, Vol. 4, February 1-8.

Borenstein J. y Hansen M., (2007). OmniTread OT-4 Serpentine Robot-new Features and Experiments. SPIE Defense and Security Conference, Unmanned Technology IX, Orlando, Florida, April 9-13.

Duan X., Huang Q., Rehman N., Li J. y Qinjun Du., (2006). Kinematic Modeling of a Small Mobile Robot with Multi-Locomotion Modes. Proceedings of the 2006. IEEE/RSJ. International Conference on Intelligent Robotics and Systems. October 9-15. Beijing, China.

Thrun S. y Bucken A., (1996). Learning maps for indoor mobile robot navigation. Carnegie Mellon University, Pittsburgh, April.

Barrientos Sotelo V. R., (2008). Análisis, Diseño, Construcción y Control en tiempo real de un robot móvil tipo shakey en el seguimiento de trayectoria. Tesis de Maestría dirigida por R. Silva-Ortigoza y J. M. Albarran-Jimenez, Sección Mecatrónica, CIDETEC-IPN, México.

García-Sánchez R. J., Barrientos-Sotelo V. R., (2008). Diseño y construcción de un robot móvil aplicando el método de campos potenciales en la evasión de obstáculos. Tesis de Maestría dirigida por R. Silva-Ortigoza y V. M. Hernández-Guzmán, Sección Mecatrónica, CIDETEC-IPN, México.

Borenstein J., Everett R. H., Feng L., y Wehe D., (1997). Mobile Robot Positioning-Sensors and Techniques. Robotic System, Special Issue on Mobile Robots. Vol.14. No.4, pp.231-249.

Khatib O., (1985). Real-Time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots. IEEE International Conference on Robotics and Automation, St. Louis, pp. 500-505 March 25-28.

Vidal-Calleja A. T., (2002). Generalización del método de campos potenciales artificiales para un vehículo articulado. Tesis de Maestría dirigida por E. Aranda-Bricaire y M. Velasco-Villa, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Sección Mecatrónica, CINVESTAV, México.

Laude T. y Rofer T., (2005). A Behavior Architecture for Autonomous Mobile Robots Based on Potential Fields. In 8th International Workshop on RoboCup 2004 (Robot World Cup Soccer Games and Conferences), Lecture Notes in Artificial Intelligence. Springer.

Koren Y. y Borenstein J., (1991). Potential Field Methods and Their Inherent Limitations for Mobile Robot Navigation. Proceedings of the 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation Sacramento, California - April.

Novel d'Andréa B., Bastin G. y Campion G., (1991). Modelling and Control of Non Holonomic Wheeled Mobile Robots. Proceedings of the 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation Sacramento, California - April.

Divelbiss W. A., (1997). A Path Space Approach to Nonholonomic Motion Planning in the Presence of Obstacles. IEEE Transactions on robotics and automation, Vol. 13, No. 3, June.

Borenstein J. y Koren Y., (1989). Real-Time Obstacle Avoidance for fast Mobile Robots. IEEE Transactions on System, Man, and Cybernetics, Vol. 19, No.5, September/October.

Borenstein J. y Koren Y., (1991). The vector field histogram-fast obstacle avoidance for mobile robots. IEEE. Reprinted with permission, from IEEE Journal of Robotics and Automation. Vol.7.No.3,June.,pp.278.

SavantAutomation, Inc., (2006). Product DataSheet. Disponible en: <http://www.agvsystems.com/pdfs/SavantCart.pdf>, consultado: 01/Julio/2009.

Borenstein J., (2000). The OmniMate: A Guidewire-free AGV for Highly Flexible Automation. Japan-USA Symposium on Flexible Automation July 23-26, Ann Arbor, at the University of Michigan.

Sánchez-Martín F. Jiménez-Schlegl P., Millán-Rodríguez F., Salvador-Bayarri J., Monllau-Font V., Palou-Redorta J., Villavicencio-Mavrich H., (2007). Historia de la robótica: de Arquitas de Tarento al robot da Vinci. Parte II. Servicio de Urología.Fundació Puigvert.Barcelona. Institut de Robòtica Industrial (IRI) UPC. CSIC.

BEAMrobotics (2009). <http://www.http://en.wikipedia.org/wiki/BEAMrobotics>. Consultado: 01/Julio/2009.

Simmons R., (1996). The Curvature-Velocity Method for Local Obstacle Avoidance. School of Computer Science. Carnegie Mellon University. Tech. Rep. Pittsburg.

Quasny M. T., Pyeatt D. y Moore J. L., (1991). Curvature-Velocity Method for Differentially Steered Robots. AI Robotics Lab. Computer Science Department Texas Tech University Lubbock. Tech. Rep. TX.

Arkin C. R., (1987). Motor schema-based mobile robot navigation. The international Journal of Robotics Research, pp.: 92-112.

Gallardo D., Colomina O., Arques P., Company P., Rizo R., Flórez F., (1998). Control local de robots móviles basado en métodos estadísticos y algoritmos genéticos. Departamento de Tecnología Informática y Computación. Universidad de Alicante. Reporte Técnico. España.

Tilove B. R., (1990). Local Obstacle Avoidance for Mobile Robots Based on the Method of Artificial Potentials. Robotics and Automation Proceedings IEEE International Conference on Volume, Issue, 13-18 May. Page(s): 556-571 vol. 1.

Krogh H. B., (1984). A Generalized Potential Field Approach to Obstacle Avoidance Control. Robotics Research: The Next Five Years and Beyond, SME Conference Proceedings, Bethlehem, Pennsylvania.

Guldner J. y Utkin I. V., (1995). Sliding Mode Control for Gradient Tracking and Robot Navigation Using Artificial Potentials. IEEE Trans. Robotics and Automat., Vol. 11 (No.2), pp. 247-254.

Ulrich I. y Borenstein J., (1998). VFH+: Reliable Obstacle Avoidance for Fast Mobile Robots. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Leuven, Belgium, May 16-21, pp 1572-1577.

Li P. Y., Zielinska Teresa H. M. y Lin W., (2002). Vehicle Dynamics of Redundant Mobile Robots with Powered Caster Wheels. Proceedings of the Sixteenth CIEM IFToMM Symposium, Romansy 16.

Williams L. R., Carter E. B., Gallina P. y Rosati G., (2002). Dynamic Model With Slip for Wheeled Omnidirectional Robots. IEEE Trans. Robotics and Automat. Vol. 18, No. 3, June.

Pathak K. y Agrawal K. S., (2005). An Integrated Path-Planning and Control Approach for Nonholonomic Unicycles Using Switched Local Potentials. IEEE Transactions on Robotics, Vol.21, No.6, Dec.

Tanaka K. y Yoshioka K., (1995). Fuzzy Trajectory Control and GA-based Obstacle Avoidance of a Truck with Five Trailers. Department of Mechanical Systems Engineering. Kanazawa University. Japón.

Gonzalez C. R. y Woods E. R., (2002). Digital Image Processing. Second Edition. New Jersey. Prentice Hall. ISBN 0-20-118075-8.