

MÉTODOS EMPLEADOS EN LA SOLUCIÓN DEL PROBLEMA DE EVASIÓN DE OBSTÁCULOS EN RMR

Rodolfo Morales-Guerrero¹, Ramón Silva-Ortigoza¹, Martín Ramón Cordero-Ocampo¹ y María Aurora Molina-Vilchis²

¹CIDETEC-IPN. Departamento de Posgrado. Área de Mecatrónica.

Av. Juan de Dios Bátiz s/n, Esq. Miguel Othón de Mendizábal, «Unidad Profesional Adolfo López Mateos». C.P. 07700, México, D.F.

²CIDETEC-IPN. Departamento de Posgrado. Área de Telemática.

Av. Juan de Dios Bátiz s/n, Esq. Miguel Othón de Mendizábal, «Unidad Profesional Adolfo López Mateos». C.P. 07700, México, D.F.

Resumen

La robótica es una de las tecnologías más importantes en la nueva era de la sociedad. En este trabajo se presenta de manera general el concepto y la composición de un Robot Móvil de Ruedas (RMR); además se reportan los métodos más representativos para dar solución al problema de evasión de obstáculos, entre los cuales se encuentra el método de campos potenciales artificiales y su combinación con otros métodos en aras de brindar mayor autonomía a los RMR.

Palabras Clave: Robots Móviles, Evasión de obstáculos, Campos potenciales artificiales.

I. Introducción

La robótica es una de las tecnologías más importantes en la nueva era de la sociedad; hablar de robótica es hablar de un proceso complejo que se ha ido compaginando con la evolución humana.

Con el desarrollo de la robótica, los seres humanos pueden cubrir necesidades y al mismo tiempo obtener beneficios que permitan un progreso y desarrollo tecnológico; los países y las empresas que cuentan con una fuerte presencia de robots no solamente consiguen una extraordinaria competitividad, sino también transmiten una imagen de modernidad. Esto implicará un importante cambio en el modo y calidad de vida de los ciudadanos. Con la finalidad de conseguir productos inteligentes, en la robótica convergen la ingeniería mecánica, la electrónica, la teoría de control y la informática, entre otras.

La robótica nace gracias a la necesidad de facilitar las tareas del hombre; desde hace varios siglos se sabe del desarrollo de autómatas con el fin de realizar tareas de manera independiente de la mano del hombre. La palabra *robot* surge en el año de 1920 y se atribuye al escritor checo Karel Čapek al introducir el término dentro de su obra «*Rossum's Universal Robots/R.U.R.*» [?]; la palabra robot viene del vocablo checo «robot», que significa trabajo forzado. Años más tarde, Asimov introduce el término robótica haciendo referencia a la ciencia que estudia a los robots; desde este enfoque empieza a tomar un gran auge esta rama de estudio, imaginando un mundo de ciencia ficción o simplemente como una forma de crear máquinas que ayuden a contrarrestar las necesidades de las personas.

Debido a la amplia gama de evolución en la robótica, hacer una clasificación exacta de los robots no es sencillo, tomando en cuenta las diferentes consideraciones bajo las cuales es posible delimitar los diversos grupos que existen [?]. De acuerdo a su función los robots se clasifican en [?]: manipuladores, generadores de movimiento, acuáticos, aéreos y los móviles. En este trabajo nos enfocaremos en la robótica móvil.

El trabajo está dividido de la siguiente manera: en la Sección II se presenta una breve reseña acerca de las generalidades de los RMR; en la Sección III se presentan los métodos utilizados para solucionar el problema de evasión de obstáculos, en particular el método de campos potenciales artificiales y sus variantes; y finalmente en la Sección IV se presentan las conclusiones del trabajo.

II. Robots Móviles de Ruedas

Hablar de robótica móvil nos hace pensar en robots capaces de dirigirse por sí mismos en un entorno desconocido, dotados de «inteligencia» que les permite llevar a cabo múltiples tareas. Hoy en día esto es una realidad: existen robots que llevan a cabo tareas de manera autónoma y dan pauta para nuevos temas de investigación.

Los robots móviles se pueden clasificar de acuerdo al tipo de locomoción que utilizan; entre los más ampliamente empleados están: por patas [?, ?], por ruedas [?, ?, ?, ?] y por orugas [?, ?]. A pesar del amplio estudio de la movilidad de robots por patas y de orugas, el desarrollo más significativo se ha dado en la locomoción por ruedas. Una ventaja principal por la que es más conveniente utilizar ruedas como medio locomotor es la facilidad para construirlas; otras ventajas son que solo es necesario suministrar energía al eje de las ruedas motrices, se puede desplazar un peso mayor que usando patas, requieren menor cantidad de partes, etc. Pero cabe mencionar que los Robots Móviles con Ruedas (RMR) también presentan un problema a enfrentar: las ruedas no pueden salvar grandes obstáculos; para esto se debe tener en cuenta en el diseño el radio de las llantas, su disposición en el móvil y la parte que proporcionará el movimiento, es decir, cuáles van a ser las llantas motrices.

Lo anterior resume a un RMR en dos partes fundamentales para su composición: un arreglo cinemático y un sistema de actuadores. Entendiendo por arreglo cinemático al análisis del movimiento sin tener en cuenta las fuerzas que lo producen, ni las que se generan; y por actuadores, aquellos recursos que proporcionan el movimiento. En los RMR se encuentran diversas configuraciones [?, ?, ?] que han sido de interés en múltiples estudios, de las cuales se encuentran la configuración Ackerman, triciclo, *skid steer*, síncrona, tracción omnidireccional y tracción diferencial, siendo esta última la más común; véase la Figura 1.

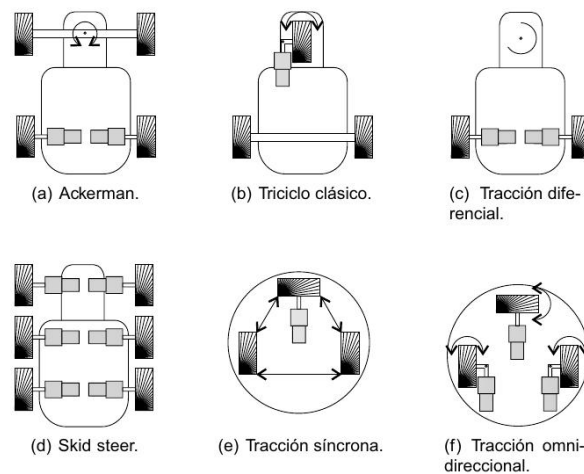


Figura 1 Configuraciones de los RMR: (a) Ackerman, (b) Triciclo clásico, (c) Tracción diferencial, (d) *Skid steer*, (e) Tracción síncrona, (f) Tracción omnidireccional.

La configuración por tracción diferencial se caracteriza porque el movimiento se consigue con dos ruedas, acopladas cada una a su propio motor, teniendo normalmente una o dos ruedas de apoyo. De esta forma se puede hacer que el robot avance en línea recta fijando ambos motores a la misma velocidad, puede girar en una u otra dirección aplicando velocidades diferentes, y haciéndolas girar en sentido inverso, el robot girará sobre su eje.

Para hacer más tratable el problema de modelado, en la obtención de los modelos cinemáticos de RMR, es común introducir suposiciones de diseño y operación [?, ?]. Dentro de las suposiciones de diseño se consideran generalmente tres puntos: 1) el RMR no contiene partes flexibles; 2) las ruedas cuando más tienen un eslabón de dirección; 3) todos los ejes de dirección son perpendiculares a la superficie. Dentro de las suposiciones de operación, al igual que en las de diseño, se toman tres: 1) los RMR se mueven sobre

una superficie plana; 2) la fricción de traslación en el punto de contacto de la rueda con la superficie es lo suficientemente grande para que no exista deslizamiento; 3) la fricción rotacional en el punto de contacto de la rueda con la superficie es lo suficientemente pequeña para que exista un desplazamiento rotatorio.

Aunque estas suposiciones son realistas, el deslizamiento que ocurre en el punto de contacto de las ruedas con la superficie de movimiento se ha convertido en un tópico importante [?]. Principalmente, el deslizamiento se presenta debido a las irregularidades del terreno e influye al sistema esencialmente en dos factores: a) ocasiona errores de posicionamiento en los RMR que utilizan odometría para su localización [?], y b) provoca desperdicio de energía, aspecto fundamental en algunas aplicaciones.

En un RMR, existe una amplia gama referente al tipo de ruedas a emplear, entre las que destacan cuatro [?, ?]: las ruedas convencionales, las tipo castor, las de bola y las omnidireccionales.

En lo referente a la parte de actuadores o motores, esta se encarga del estudio de la relación entre fuerzas y movimiento. Particularmente los motores de corriente directa (CD) poseen un modelo lineal y son los más usados en la actualidad debido a su facilidad de control. Por otro lado, hablar de un RMR implica considerar la parte de sensores, los cuales proporcionan autonomía al robot para llevar a cabo su desplazamiento en un determinado espacio de trabajo [?]. El uso de sensores permite al robot percibir el espacio de trabajo de manera autónoma, a diferencia de seguir una secuencia de instrucciones predeterminadas. Entre los sensores más utilizados en RMR podemos mencionar: sensores de posicionamiento [?], que ayudan a determinar la posición exacta del robot en su espacio de trabajo, y sensores de orientación, que determinan la dirección a la que el móvil debe dirigirse. Con el procesamiento de las señales adquiridas por los sensores, el robot se convierte en un sistema autónomo.

Con todas estas consideraciones, podemos definir a un RMR como *un sistema electromecánico capaz de desplazarse de manera autónoma y que está constituido por un arreglo cinemático, una parte de actuadores y sensores y una unidad de control que gobierna al sistema; su movimiento es a través de medios de locomoción como ruedas, patas, orugas, etc.*

En los últimos tiempos, el estudio de la robótica móvil ha sido objeto de interés para una gran cantidad de investigadores, en lo relativo a lograr una total autonomía en los robots móviles. Dentro de la robótica móvil, los factores más importantes a considerar son los problemas referentes a la regulación o estabilización a un punto de equilibrio del móvil, el seguimiento de trayectorias, el posicionamiento y la evasión de obstáculos; siendo este último problema nuestro interés.

III. Evasión de Obstáculos

Hablando de RMR, la principal tarea a desarrollar es la evasión de obstáculos; su importancia ha trascendido dentro de los más variados aspectos de la vida cotidiana, permitiéndonos desde explorar territorios que por su naturaleza son imposibles de ser sujetos a investigación, asistencia médica, entretenimiento, etc. Para ello se han desarrollado series de algoritmos con la finalidad de minimizar errores y proporcionar una mayor autonomía cada vez más certera en la trayectoria del RMR.

En las investigaciones referentes a la evasión de obstáculos se han obtenido avances significativos. 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 [?] que detienen el tránsito del robot al momento de detectar un obstáculo; continúa con algoritmos sofisticados con capacidad de predecir la trayectoria del móvil al detectar un objeto; y finaliza con algoritmos complejos con base en múltiples mediciones de sensores que detectan la dimensión y ubicación del obstáculo y logran planificar rutas hasta la meta. Del conjunto de estos algoritmos se identifican [?] las siguientes tendencias:

1. Control Reflexivo. Tiene como característica la ausencia de algún método cognoscitivo, es decir, no existe alguna metodología que planifique el tránsito. Con base en 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. Está basado en el modelo tradicional de inteligencia artificial de la cognición humana; son típicos los métodos que 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.

Dentro de la evasión por control reactivo, en la literatura se encuentran reportadas diversas técnicas: por detección de bordes [?], por descomposición en celdas [?], por construcción de mapas [?] y por campos potenciales artificiales [?]. En el método de detección de bordes se emplean sensores que detectan los bordes verticales de un obstáculo; sin embargo, es necesario que el robot se detenga cuando detecte el borde del obstáculo y procese la información necesaria para evadirlo, lo cual implica tiempos muertos en la navegación. El método por descomposición de celdas divide en celdas artificiales al espacio de trabajo, asignando un valor a cada celda que permite conocer, por medio de múltiples sensores, si en ella existe un obstáculo. En el método por construcción de mapas también es necesario conocer la posición de los obstáculos a través de un sistema de detección; así el algoritmo implementado permite crear un grafo que conecta cada punto del espacio de trabajo libre.

Sin embargo, la mayor parte de la literatura sobre evasión de obstáculos se refiere al método de campos potenciales artificiales, el cual consiste en aplicar una función de campo potencial artificial en algoritmos de evasión de obstáculos en 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 promueve la navegación del móvil. Este método fue desarrollado por Khatib y supone al móvil como una partícula; de igual forma, los obstáculos que lo rodean se consideran como partículas que ejercen una fuerza de repulsión sobre el móvil, mientras que su punto de arribo o meta es una fuerza atractiva, consiguiéndose de esta forma establecer un campo potencial que representa el ambiente en el que debe seguir su trayectoria el robot. Es un método elegante y su implementación no presenta una complejidad computacional considerable.

III.1 Campos Potenciales Artificiales en combinación con otros métodos

Desde la formulación del método de campos potenciales artificiales se han realizado distintas modificaciones e implementaciones en combinación con otros métodos. En [?] se expone una metodología para la evasión de obstáculos en tiempo real a través de la integración de dos modelos (campos potenciales para la generación de la trayectoria y enrejado bidimensional para la representación de los obstáculos), a la cual se le llama campo de fuerzas virtuales (VFF, por sus siglas en inglés). Con ayuda de este método se logra la detección de mínimos locales, evitando así la incidencia del móvil en un mínimo local y restableciendo la trayectoria del robot hacia su punto final.

El método de campos potenciales tiene ciertas limitaciones inherentes para la navegación de robots móviles: la existencia de mínimos locales es un problema, ya que estos puntos pueden provocar que el robot se detenga o quede inactivo; puede existir oscilación y metas no alcanzables. En [?] se hace un análisis del método de campos potenciales para ver sus limitaciones. En [?] se incluyen funciones de navegación para eliminar los mínimos locales; la idea es diseñar una función de navegación y seguir su gradiente dependiendo de la inercia del sistema.

En [?] se utiliza el concepto de campos potenciales con la utilización del gradiente como un vector de velocidades deseadas para el robot. El control torque/fuerzas son empleados para orientar el vector de velocidad del robot al gradiente, dando como resultado el seguimiento exacto de las trayectorias deseadas delineadas por las líneas del gradiente. A lo largo de las líneas del gradiente no deben existir variaciones, y esto se soluciona mediante un control de modos deslizantes, requiriendo únicamente el conocimiento del gradiente y de los límites del sistema.

Por otro lado, en [?] se proporciona una alternativa de evasión de obstáculos mediante campos potenciales generalizados que permiten la generación de trayectorias tanto globales como locales, al considerar la velocidad y la posición del móvil. Para el caso de obstáculos locales, se basa en la implementación de sensores

para su detección; para el caso de obstáculos globales, propone que los obstáculos se conozcan a priori y que dependan únicamente de la posición del móvil y del objeto.

Otra técnica, mencionada en [?], es mediante el uso de dos *scanners* montados en el robot móvil. El concepto principal es la carta polar de objetos (POC) y se utiliza para definir trayectorias posibles, detección de obstáculos, modos de desvío, etc. Esta técnica fue probada por simulación y experimentación, y se aplica en la evasión de obstáculos para navegación subterránea. Constituye un nuevo esquema para evasión de obstáculos dinámicos que imita el comportamiento humano: el robot automáticamente encuentra caminos posibles en situaciones de bloqueo. El POC es construido usando datos de rango dinámico obtenidos mediante un *scanner*; se introduce el concepto de «ancla» para recordar la posición de los obstáculos y prevenir colisiones.

El problema de evasión de obstáculos en [?] se propone solucionar mediante un plano en 2D para navegación de móviles, usando un campo potencial electrostático (EPF), diseñado a través de una red de resistencias que representan el entorno del móvil, la cual varía su valor dependiendo de la proximidad o posición respecto a los obstáculos. Este método no necesita tener conocimiento de los obstáculos a priori.

En [?] se plantea la navegación visual de un móvil para la evasión de obstáculos usando una función potencial de gobierno. El robot no utiliza sensores de detección ni *scanners*; la contribución es la aplicación de un sistema visual constituido por cámaras, que aunque implica un costo computacional alto, presenta las ventajas de calcular distancias y posición de una manera fácil y exacta. Se basa en un modelo de navegación humano que toma la distancia a la meta y a los obstáculos y calcula una aceleración angular que gobierna el movimiento del robot.

También el uso de sensores ha sido de gran ayuda para solucionar el problema de evasión de obstáculos. En [?] se muestra la implementación de sensores ultrasónicos, donde éstos llevan a cabo la detección y el mapeo del entorno. Además de los sensores, el prototipo lleva implementada una cámara que también permite la detección de objetos, así como *encoders* para monitorear la posición del vehículo.

En [?, ?] se formuló una función potencial que contempla los problemas inherentes al método de campos potenciales aplicados a la navegación de robots móviles, y un problema que no había sido abordado anteriormente: el referido a un obstáculo posicionado cerca del punto de arribo del robot móvil. La presencia de este obstáculo impide que el móvil llegue al mínimo global (meta), ocasionado por la consideración de que las fuerzas repulsivas inducidas por los obstáculos en la función potencial son mayores que la fuerza atractiva inducida por la meta. Se plantea una solución tomando en cuenta la distancia relativa entre el robot y su punto de arribo, lo que asegura que dicho punto es el mínimo global de la función potencial. Asimismo, en [?] se propone un control basado en modos deslizantes para realizar el seguimiento del gradiente de un campo potencial artificial en el problema de evasión de obstáculos.

IV. Conclusiones

En los trabajos mencionados anteriormente se muestra un panorama de lo ya realizado referente a evasión de obstáculos vía campos potenciales artificiales y su combinación con otros métodos en busca de mayor autonomía, aplicado a robots móviles. Sin embargo, cabe mencionar que si bien estas investigaciones han aportado soluciones al problema, no han sido de manera total. Los problemas que aún no han podido resolverse de forma integral son: la detección de los obstáculos en tiempo real, la aparición de mínimos locales, más aún cuando la posición de los obstáculos es desconocida para el RMR, lo que aumenta la probabilidad de que existan trayectorias con estos problemas.

Es conveniente mencionar que en varias de las referencias expuestas en el estado del arte, los trabajos se presentan a nivel simulación o desarrollan sus métodos de control en proyectos comerciales, sin que exista una relación mecatrónica como tal.

Referencias

- [1] K. Čapek. *R.U.R. (Rossum's Universal Robots)*. New York: Dover Publications Inc., 2001.
- [2] J. R. García Sánchez. «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, CIDETEC, Instituto Politécnico Nacional, México, dic. 2008.
- [3] J. Angeles. *Fundamentals of Robotic Mechanical Systems. Theory, Methods and Algorithms*, 3rd ed. Springer, 2007.
- [4] D. Tood. *Walking Machines: An introduction to legged robotics*. Kogan-Page, London, 1985.
- [5] M. H. Raibert et al. «Dynamically stable legged locomotion». Robotics Institute Technical Report CMU-RI-TR-83-20, Carnegie-Mellon University, Pittsburgh, PA, 1983.
- [6] P. F. Muir. «Modeling and control of wheeled mobile robots». Ph.D. dissertation, The Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, agosto 1988.
- [7] P. F. Muir y C. P. Neuman. «Kinematic modeling of wheeled mobile robots». Robotics Institute Technical Report CMU-RI-TR-86-12, Carnegie-Mellon University, Pittsburgh, PA, 1986.
- [8] J. C. Alexander y J. H. Maddocks. «On the kinematics of wheeled mobile robots». *Int. J. Robotics Res.*, vol. 8, pp. 15-27, 1989.
- [9] G. Campion, G. Bastin y B. D'Andréa-Novel. «Structural properties and classification of kinematic and dynamic models of wheeled mobile robots». *IEEE Trans. Robot. Automat.*, vol. 12, pp. 47--62, 1996.
- [10] T. Iwamoto, H. Yamamoto y K. Honma. «Transformable Crawler mechanism with adaptability to terrain variations». *Int. Conf. on Advanced Robotics*, Tokyo, Japan, septiembre 1983, pp. 285--292.
- [11] G. Granosik y J. Borenstein. «Integrated joint actuator for serpentine robots». *IEEE/ASME Trans. on Mechatronics*, vol. 10, pp. 473--481, 2005.
- [12] T. Bräunl. *Embedded robotics: Mobile robot design and applications with embedded systems*, pp. 97--121. New York: Springer-Verlag, 2006.
- [13] J. Borenstein, H. R. Everett y L. Feng. «Where am I?, sensors and methods for mobile robot positioning». The University of Michigan, abril 1996.
- [14] R. Siegwart y R. Nourbakhsh. «Introduction to Autonomous Mobile Robots». MIT, 2004.
- [15] F. Tang. «Kinematics and design of a wheeled mobile robot». Center for Intelligent Machines, McGill University, Montreal, Canada, dic. 2002.
- [16] N. Chakraborty y A. Ghosal. «Dynamic modeling and simulation of a wheeled mobile robot for traversing uneven terrain without slip». Dept. of Mechanical Engineering, Indian Institute of Science, 2003.
- [17] J. Borenstein y L. Feng. «Measurement and correction of systematic odometry errors in mobile robots». *IEEE Trans. Robot Automat.*, vol. 12, pp. 869--880, 1996.
- [18] J. Borenstein y Y. Koren. «Real-Time obstacle avoidance for fast mobile robots». *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 19, no. 5, pp. 1179--1187, sept.--oct. 1989.
- [19] J. Borenstein y Y. Koren. «The vector field histogram-fast obstacle avoidance for mobile robots». *IEEE Journal of Robotics and Automat.*, vol. 7, no. 3, pp. 278--288, jun. 1991.
- [20] J. L. Crowley. «World modeling and position estimation for a mobile robot using ultrasonic ranging». *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Scottsdale, Arizona, pp. 674--680, mayo 1989.
- [21] J. T. Schwartz y M. Sharir. «On the piano movers problem: II. General technique for computing topological properties of real algebraic manifolds». *Advanced in Applied Mathematics*, vol. 1, no. 4, pp. 293--351, 1983.
- [22] N. J. Nilsson. «A mobile automaton: an application of artificial intelligence techniques». *Proc. Int. Joint Conf. on Artificial Intelligence*, pp. 509--520, 1969.
- [23] O. Khatib. «Real-Time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots». *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 500--505, 1985.
- [24] Y. Koren y J. Borenstein. «Potential field methods and their inherent limitations for mobile robot navigation». *Proc.*

- 1991 *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automat.*, Sacramento, California, abril 1991.
- [25] E. Rimon y D. E. Koditschek. «Exact Robot Navigation using Artificial Potential Functions». *IEEE Trans. Robotics and Automat.*, vol. 8, pp. 501--518, 1992.
- [26] J. Guldner y V. I. Utkin. «Sliding Mode Control for Gradient Tracking and Robot Navigation Using Artificial Potential Field». *IEEE Trans. Robotics and Automat.*, vol. 11, no. 2, pp. 247--254, 1995.
- [27] R. Tilove. «Local Obstacles Avoidance for Mobile Robots based on the Method of Artificial Potentials». *IEEE Int. Conf. Robotics and Automat.*, Cincinnati, OH, pp. 566--571, 1990.
- [28] F. Xu, H. Van Brussel, M. Nuttin y R. Moreas. «Concepts for dynamic obstacle avoidance and their extended application in underground navigation». *ELSEVIER, Robotics and Autonomous Systems*, pp. 1--15, 2003.
- [29] K. Valanavis, T. Hebert, R. Kolluru y N. Tsourveloudis. «Mobile Robots Navigation in 2-D Dynamic Environments using an Electrostatic Potential Field». *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 30, no. 2, pp. 187--196, 2000.
- [30] W. Huang, B. Fajen, J. Fink y W. Warren. «Visual Navigation and obstacle avoidance using a Steering Potential Function». *ELSEVIER, Robotics and Autonomous Systems*, pp. 288--299, 2006.
- [31] J. Borenstein y Y. Koren. «Obstacle Avoidance with Ultrasonic Sensors». *IEEE Journal Robotics and Automat.*, pp. 213--218, 1988.
- [32] S. S. Ge y Y. J. Cui. «New potential functions for mobile robot path planning». *IEEE Trans. on Robotics and Automat.*, vol. 16, no. 5, pp. 615--620, oct. 2000.
- [33] J. Guldner y V. I. Utkin. «Sliding mode control for gradient tracking and robot navigation using artificial potential fields». *IEEE Trans. Robot. Automat.*, vol. 11, pp. 247--254, 1995.