

Wheeled Mobile Robots: A Review

R. S. Ortigoza, M. M. Aranda, G. S. Ortigoza, V. M. H. Guzmán,
M. A. M. Vilchis, G. S. González, J. C. H. Lozada and M. O. Carbajal

Abstract— Robotics is a fast developing and exciting field with multiple applications which span from robot manipulators to mobile robots. This paper presents an introductory study of wheeled mobile robots through a literature review of the main contributions to this subject. We include the main aspects to be taken into account when designing wheeled mobile robots, control problems and the corresponding solutions and, finally, the approaches proposed to render them autonomous.

Keywords— Literature Review, Robotics, Wheeled Mobile Robots.

I. INTRODUCCIÓN

LA ROBÓTICA, en las últimas cinco décadas, ha impactado en varios aspectos de la vida cotidiana. Su importancia ha trascendido notoriamente en la percepción actual del mundo, permitiendo explorar territorios que por su naturaleza son difíciles de ser estudiados, experimentar en ambientes que ponen en riesgo la integridad física del ser humano, facilitar el manejo de materiales de alto riesgo, realizar tareas repetitivas que en una persona pueden resultar en lesiones a largo plazo, entretener, divertir, etc.

El desarrollo de la robótica, inicialmente, se enfocó al análisis, diseño, construcción y control de robots de tipo manipulador, a causa de sus múltiples y variadas aplicaciones en la industria, y en menor medida a otros tipos de robots. Los robots móviles durante las últimas tres décadas han recibido mayor atención por parte de la comunidad científica, siendo los Robots Móviles de Ruedas (RMR) los más reportados, en trabajos de investigación, construidos y evaluados (por encima de los robots móviles de patas o de orugas). Derivado de sus crecientes aplicaciones en la exploración planetaria, la minería, la inspección y vigilancia, el rescate de personas, la limpieza de desechos peligrosos, la asistencia médica, entre otras. Por lo anterior, este trabajo se centra en la revisión de los RMR.

La organización de este trabajo es la siguiente. En la sección II se presenta la evolución de la robótica y su clasificación de acuerdo a la función que realiza un robot. En la sección III se hace énfasis en los RMR, desde sus múltiples

aplicaciones, evolución, definición, clasificación hasta los sistemas de los cuales se conforma. En la sección IV se hace una revisión de los problemas de control asociados al posicionamiento, regulación o estabilización, seguimiento de trayectorias y evasión de obstáculos en los RMR. Mientras que en la sección V se exhiben otros factores relativos a la operación de los RMR. Finalmente, en la sección VI se presentan las conclusiones del trabajo.

II. ROBÓTICA

La robótica ha jugado un papel preponderante durante el desarrollo de la humanidad, su evolución ha ido de la mano con la construcción de artefactos que materializan el deseo de crear entes que faciliten el trabajo. En la civilización griega se hablaba de seres mecánicos con vida que eran movidos por mecanismos contruidos con poleas y bombas hidráulicas. Sin embargo, el concepto de robot como tal comenzó a gestarse en la civilización árabe, donde se le dio sentido a dichos mecanismos para bienestar del ser humano.

La robótica surge en la década de los cuarenta del siglo XX como un área de la ingeniería. Pero sus orígenes datan del siglo XVIII con la construcción de autómatas humanoides por Vaucanson [1] y los Jaquet-Droz [2]. A partir de ese momento, surge el interés de construir mecanismos dotados de una cierta autonomía. Autonomía que si bien en su momento resultaba eficaz, era bastante limitada por razones propias a la época en cuestión. Durante los años subsecuentes, se fueron desarrollando autómatas que permitieron definir las bases actuales de la robótica. Un ejemplo relevante fue en la industria textil del siglo XIX con la construcción de mecanismos más complejos y la utilización de tarjetas perforadas [3].

A finales de la Revolución industrial se desarrollaron nuevas tecnologías que impulsaron el crecimiento de las diferentes áreas científicas y la creación de nuevos dispositivos aplicables a distintos rubros i.e., construcción, milicia, aeronáutica, transporte, etc., que posteriormente convergieron en la concepción de la robótica.

Wiener acuñó el término cibernética en 1948 [4], para designar el estudio unificado del control y la comunicación en sistemas mecánicos y sistemas biológicos, siendo la Tortuga de Walter [5] uno de los primeros mecanismos en utilizar esta tecnología. Casi al mismo tiempo, el Massachusetts Institute of Technology (MIT) en 1952 crea la primera máquina de control numérico para automatizar algunas tareas en la industria. Una década más tarde Unimation, primera empresa productora de robots, instaló su primer robot en el sistema de producción de General Motors.

R. Silva-Ortigoza, J. C. Herrera-Lozada and M. Olguín-Carbajal. CIDETEC-IPN, Departamento de Posgrado, Área de Mecatrónica. México, DF, México. rsilvao@ipn.mx

M. Marcelino-Aranda. UPIICSA-IPN. México, DF, México.

G. Silva-Ortigoza. BUAP, Facultad de Ciencias Físico Matemáticas. Puebla, Pue., México.

V. M. Hernández-Guzmán. UAQ, Facultad de Ingeniería. Querétaro, Qro., México.

M. A. Molina-Vilchis. ESIME-IPN, Culhuacán. México, DF, México.

G. Saldaña-González. UTP, División de Automatización y Energías, Puebla, Pue., México.

El término *robot* fue introducido por el escritor checoslovaco Capek en 1920 en su obra *Rossum's Universal Robots* [6]; etimológicamente deriva de la palabra eslava *robot*, cuyo significado es “labor forzada”, “servicio” o “esclavo”. Años más tarde Asimov, escritor y científico ruso-estadounidense, retoma el concepto en su obra “*I, Robot*” [7], estableciendo las tres leyes bajo las cuales se rigen los robots cuasi-inteligentes. Hollywood, como industria cinematográfica, ha hecho una gran labor en cuanto a la divulgación de lo que es un robot, pero aún éste es lejano a lo existente. Por todo lo anterior, la robótica acaparó la atención no sólo de aficionados a la ciencia ficción sino también de mayor cantidad de investigadores. Basta observar la gran cantidad de información a la que se tiene acceso al teclear la palabra *robot* en un buscador de Internet y obtener más de 85 millones de enlaces para corroborar el crecimiento de esta área.

Así, resulta importante determinar lo que se debe entender por el término *robot*. En su concepto actual se denota como *un sistema electromecánico reprogramable que permite realizar diferentes tareas repetitivas que requieren un grado elevado de precisión*.

Las aplicaciones de los robots varían en función directa con la actividad para la cual se pretende incorporar un sistema robótico y de la flexibilidad que sea capaz de brindar al proceso en cuestión. Así, se pueden mencionar ejemplos de sus aplicaciones en diversos sectores, tales como: industrial, militar, educativo, agrícola, espacial, entretenimiento, salud, seguridad, etc.

Establecer una clasificación general de los robots no es sencillo, tomando en cuenta las diferentes consideraciones bajo las cuales es posible delimitar los diversos grupos que existen, ya que su investigación, diseño e innovación brindan nuevas pautas para redefinir su clasificación. Sin embargo, de acuerdo a la función que realizan, los robots se dividen en [8]: manipuladores, generadores de movimiento, móviles, acuáticos y aéreos. Es importante comentar que desde los inicios de la robótica, gran parte de su desarrollo se ha enfocado en los robots de tipo manipulador, ya que éstos tienen un amplio campo de aplicación, principalmente en líneas de producción robotizadas en la industria, utilizados como: soldadores, pintores, de manejo de materiales, ensambladores, etc.

III. ROBOTS MÓVILES

La robótica móvil resulta ser un tema de investigación fascinante por varias razones:

- Su implementación requiere de la sinergia de varias disciplinas (física, matemáticas, mecánica, electrónica, control automático y computación).
- Es una aproximación a la creación de un *agente inteligente* [9] (sistema capaz de procesar la información de su entorno y establecer un comportamiento similar al de un ser humano).
- Sus aplicaciones son innumerables: exploración planetaria, minera y marítima, reconocimiento de

terreno, inspección y vigilancia, misiones de búsqueda y rescate de personas, limpieza de desechos peligrosos y en ambientes diversos, asistencia médica, entretenimiento, etc. Con el objetivo de conformar una herramienta más eficaz, los robots móviles se complementan con otros robots (tal es el caso de los que incorporan un brazo manipulador), utilizados como elementos de seguridad en la inspección y manejo de paquetes sospechosos, neutralización de dispositivos explosivos, manipulación de productos químicos peligrosos o materiales radioactivos, recolección de frutos, etc.

- Al elemento estético y artístico que se le puede dar a su estructura física.

El primer robot móvil fue creado en 1951 por Walter, un sistema electromecánico que simulaba el movimiento de una tortuga, llamado de forma similar *Turtle* [5]. Años más tarde, de 1966 a 1972, Nilsson en el Stanford Research Institute (SRI) desarrolló el robot *Shakey* [10], siendo éste el primer robot en hacer uso de la inteligencia artificial para controlar sus movimientos. En la década de los setenta, la investigación y el diseño de robots móviles (que contaron con características muy diferentes entre ellos) crecieron de manera exponencial. A principios de esa década el robot *Newt* [11] fue desarrollado por Hollis. A su vez, el robot *Hilare* [12] se desarrolló en el Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes (LAAS) en Francia. En el Jet Propulsion Laboratory (JPL) se desarrolló el *Lunar Rover* [13], diseñado particularmente para la exploración planetaria. A finales de esa década, Moravec desarrolló el *Stanford Cart* [14], capaz de seguir una trayectoria delimitada por una línea establecida en una superficie, en el Stanford Artificial Intelligence Laboratory (SAIL).

En 1983, el robot *Raibert* [15], [16] fue desarrollado en el MIT, un robot de una sola pata diseñado para estudiar la estabilidad de éstos sistemas y brindar un conocimiento más profundo acerca de este tipo de locomoción. A principios de la década de los noventa, Vos y Flotow desarrollaron un robot “*uniciclo*” [17] (una sola rueda, similar a la de una bicicleta) en el MIT. Años más tarde, en 1994, el Instituto de Robótica de Carnegie Mellon University (CMU) desarrolló el robot *Dante II* [18], un sistema de seis patas cuyo propósito fue el de tomar muestras de gases en el volcán *Spurr* situado en Alaska. En 1996 también en el CMU, se desarrolló el robot *Gyrover* [19], un mecanismo ausente de ruedas y patas, basado en el funcionamiento del giroscopio, por lo que la precisión de sus movimientos y su estabilidad eran muy elevadas. Ese mismo año se desarrolló en el MIT el *Spring Flamingo* [20], un robot que emulaba el movimiento de un flamenco y fue diseñado para implementar técnicas eficaces de control en la posición de las patas, para describir el movimiento del mismo y para ejecutar diversos algoritmos desarrollados para su desplazamiento. Por su parte, la National Aeronautics and Space Administration (NASA) en 1997 envió a Marte un robot móvil tele-operado llamado *Sojourner Rover* [21], dedicado a enviar fotografías del entorno de dicho planeta. Ese mismo año, la empresa japonesa HONDA dio a conocer el robot *P3* [22], el primer humanoide capaz de imitar

movimientos humanos. Al siguiente año, se desarrolló en la universidad Waseda en Japón el WABIAN R-III [23], un robot humanoide para fines de investigación sobre el movimiento del cuerpo humano. En 1999 en el CMU, Zeglin propuso un nuevo diseño de robot con una pata llamado Bow Leg Hopper [24], un diseño que por su naturaleza permite almacenar la energía potencial de la pata, ya que es una articulación de forma curva que al dar cada paso comprime un sistema de resorte y de esta forma el consumo de energía es mínimo, permitiendo un ahorro significativo de la misma.

En 2006, Lauwers *et al.*, desarrollaron el robot Ballbot [25], un sistema holónimo cuyo movimiento es proporcionado por una esfera ubicada en la parte inferior de la estructura; el control de la esfera, es similar al de un mouse de computadora, empleando encoders para determinar cada posición de la misma. Sin embargo, el estudio de este tipo de robots con una esfera fue iniciado por Koshiyama y Yamafuji [26] en 1991, y diversas investigaciones han sido efectuadas sobre este tipo de robots en [27]-[30]. Actualmente los robots teleoperados Spirit Rover y Opportunity Rover [31], se encuentran explorando la superficie del planeta Marte en busca de mantos acuíferos.

Los robots aquí mencionados, son únicamente una porción de los tantos que se han diseñado, sin embargo, es posible notar que las aplicaciones de éstos son vastas e ilimitadas debido al desarrollo cada vez más vertiginoso de la tecnología.

Un robot móvil se define como *un sistema electromecánico capaz de desplazarse de forma autónoma de un punto a otro en un determinado espacio de trabajo* (nave industrial, laboratorio, hogar, corredor, etc.). Se entiende como autonomía de un robot móvil, al dominio que tiene éste para determinar su curso de acción, mediante su propio proceso de razonamiento (basado en sensores que le permiten percibir el espacio de trabajo), en lugar de seguir una secuencia fija de instrucciones. En la mayoría de los casos su control se lleva a cabo en lazo cerrado.

Los robots móviles, de acuerdo al tipo de locomoción que emplean para desplazarse, se clasifican en tres categorías: de ruedas [32]-[35], de patas [36], [37] y de orugas [38], [39]. Aunque, la locomoción por patas u orugas han sido ampliamente estudiadas, la mayoría de los robots móviles que se han reportado, construido y evaluado en trabajos de investigación, utilizan ruedas para desplazarse. Esto se debe a que los RMR son: 1) Más eficientes en energía, debido a que generalmente se desplazan en superficies lisas y firmes [40]-[42]. 2) A sus múltiples aplicaciones en la industria. 3) Requieren menor número de partes y menos complejas, haciendo más fácil su construcción. 4) El control de las ruedas es menos complejo. 5) Ocasionalmente menor desgaste en la superficie donde se mueven en comparación con las bandas de las orugas [43]. 6) Los problemas de balance no presentan gran dificultad, ya que el robot siempre está en contacto con una superficie.

Las ruedas que se emplean en el diseño de un RMR se clasifican en cuatro tipos [32], [44]: omnidireccional, convencional, castor y bola. En [45] se presenta un estudio

sobre sus rendimientos, realizando un análisis exhaustivo acerca de las variables más recurrentes en el desplazamiento del robot. Dentro de la clasificación de las ruedas es posible encontrar otras variantes, por ejemplo [46], [47] presentan un análisis de las ruedas tipo Spoke.

Un RMR, en forma general, está conformado por tres sistemas: 1) *Arreglo cinemático*, el cual se genera de las configuraciones relativas a la disposición de las ruedas en la estructura del robot. 2) *Sistema de actuadores*, los cuales permiten el movimiento de la estructura cinemática. 3) *Convertidor de potencia*, que permite el accionamiento de los actuadores. Aunque, estos tres sistemas debieran estudiarse de forma unificada, su separación ha contribuido a su avance dada la complejidad que conlleva el estudiarlos en conjunto. Hasta ahora, el *convertidor de potencia* no ha sido considerado como un sistema dinámico dentro del control de un RMR, sino sólo como parte secundaria. Sin embargo, debido a la importancia que el suministro de energía viene tomando, es seguro que lo integrarán las investigaciones futuras.

Los arreglos cinemáticos de los RMR, respecto a la disposición de las ruedas en la estructura de un móvil son [48]-[50]: síncrona, triciclo, Ackerman, diferencial, omnidireccional y skid steer. Además, se han diseñado otros tipos de estructuras, por ejemplo: unicycle [17], esfera [25] o giroscopio [50]. La derivación de los modelos matemáticos asociados a la cinemática y dinámica de las diferentes estructuras de los RMR se han llevado a cabo en [32]-[35]. Para hacer más tratable el problema de modelado, en la obtención de modelos cinemáticos de RMR, es común introducir suposiciones de diseño y de operación [32], [51]. Es importante decir que éstas no consideran el deslizamiento, el cual se presenta debido a las irregularidades del terreno, que ocurre en el punto de contacto entre la rueda y la superficie de movimiento. El deslizamiento afecta al robot esencialmente en dos factores [52]: 1) Ocasionalmente errores de posicionamiento en RMR que utilizan odometría [53]. 2) Provoca desperdicio de energía, aspecto fundamental en la exploración planetaria. Así, se han desarrollado modelos matemáticos, donde se considera el deslizamiento, para RMR convencionales en [54]-[58] y para omnidireccionales en [59].

Respecto a otras estructuras de móviles en [60], se presenta el estudio de cuatro modelos matemáticos asociados a la dinámica del frenado de una motocicleta.

El dispositivo de actuación básico, en la generación de movimiento de un RMR, en la mayoría de los casos es el motor de corriente directa (CD). Una introducción de cómo trabaja un motor de CD se encuentra en [61] y [62], y en [63]-[66] se proporciona información acerca de sus diferentes tipos y control. Una característica que ha hecho del motor de CD el actuador preferido en robótica es que su modelo es lineal, lo que facilita su control; lo cual requiere que el voltaje de entrada sea aplicado al circuito de armadura y el circuito de campo esté excitado de manera independiente. Esto se cumple de manera natural si el motor es de imán permanente. Al momento de modelar un motor de CD se supone que la única

fricción presente es la viscosa, aunque en la práctica se tiene el efecto de otros tipos de fricción no lineal (que son más apreciables cuando se trabaja con velocidades pequeñas), lo cual se resuelve seleccionando un motor tal que el efecto de cualquier fricción no lineal sea muy pequeño. Con la intención de hacer más sencillo el diseño del control de un motor de CD, es común suponer que su dinámica eléctrica es más rápida comparada con su dinámica mecánica [67]. Es de mencionar que en la mayoría de los trabajos reportados sobre el control de RMR no se estudia el control de los motores, debido a que se trabaja con robots comerciales que incluyen su control y sólo basta con programar los perfiles de velocidad deseados.

IV. CONTROL EN RMR

Los RMR se enmarcan dentro de la teoría de control en el área sistemas no-holónomos, los cuales se caracterizan por estar sujetos a restricciones no integrables en las velocidades, es decir su plano de velocidades está restringido [68]. Otros ejemplos de sistemas no-holónomos son los satélites y las manos actuadas.

Los problemas de control más importantes en los RMR son los asociados al posicionamiento, regulación o estabilización, seguimiento de trayectorias y evasión de obstáculos. Al respecto, se han realizado diversas investigaciones que han permitido su avance significativo pero no total en los cuatro problemas.

A. Posicionamiento

En [69] se presenta un análisis de la navegación del robot Hilare, el cual emplea sensores ultrasónicos. En [70] se exponen el problema de posicionamiento en forma general y los métodos para la implementación de sensores que permiten a un robot móvil conocer su posición en un ambiente de trabajo. Se describe en [71] la estimación en la posición de un robot móvil empleando un escáner de láser y filtros lineales, obteniendo una precisión elevada y reducción en términos de tiempo computacional. En [72] y [73] se plantea un estudio acerca del control en el movimiento de un robot móvil para aplicaciones médicas asistiendo a pacientes discapacitados. En [74] se aborda el problema de estimación del posicionamiento de un robot móvil, mediante la cuantificación de errores de odometría de tipo sistemáticos. Larsen et al., en [75] y [76] proponen un algoritmo para calibrar automáticamente un robot móvil durante su trayectoria a través de sus sensores. En [77] se propone un método que permite simultáneamente estimar la configuración de un robot móvil y los errores de odometría sistemáticos y no sistemáticos. En [78] se integran el mapeo enrejado bidimensional y topológico para la navegación de un robot dentro de un ambiente cerrado y estructurado, logrando una mayor precisión y eficiencia en su desplazamiento.

B. Estabilización y seguimiento de trayectorias

En el problema de estabilización, de acuerdo a [79], se sabe que un sistema no-holónomo no puede ser estabilizado asintóticamente a un punto de equilibrio por medio de una ley de control diferenciable, a pesar de que el sistema sea completamente controlable. En consecuencia, la estabilización

de sistemas no-holónomos sólo puede lograrse mediante leyes de control no diferenciables [80] o dependientes del tiempo [81]-[85].

Por otro lado, el problema de seguimiento de trayectorias de sistemas no-holónomos puede realizarse por medio de leyes de control diferenciables. Así, en [86] se presentan resultados experimentales del control de un robot móvil tipo tráiler proponiendo un esquema de control jerarquizado de dos niveles; el nivel alto se encarga de generar los perfiles de velocidad deseados, para el control de nivel bajo, a través de un control LQR y el nivel bajo consiste en dos sistemas de control, uno para el motor de tracción y otro para el motor de dirección, utilizando controladores PID. En [87] se presenta el control de un RMR diferencial, proponiendo un esquema de control de estructura variable, mediante un control externo y un control interno; el primero, se asocia al modelo cinemático del móvil que se encarga de generar los perfiles de velocidad angular deseados por los motores, a través de un esquema de linealización entrada-salida; el segundo, compuesto de dos controles PID para los motores, se encarga de reproducir las velocidades impuestas por el control externo. Explotando la propiedad de planitud diferencial [88] que satisface el modelo cinemático del RMR diferencial, en [89] se presenta el diseño un controlador dinámico para la tarea de seguimiento de trayectoria. Asimismo, en [90] se propone un control basado en modos deslizantes en combinación con planitud diferencial. En [91], linealizando el modelo dinámico de un RMR por medio del método de par calculado [92], se realiza el control de seguimiento de trayectoria a través de un control basado en modos deslizantes. En [93], para el modelo cinemático de un robot diferencial, se presenta el diseño de un control mediante linealización entrada-salida y respecto a sus actuadores se diseña un controlador que no requiere la medición de variables mecánicas. En [94], se presenta una justificación formal del uso lazos de velocidad y corriente internos en el control de un RMR, que considera la dinámica de los actuadores, para el seguimiento de trayectorias. En [95], se presenta un controlador difuso para el seguimiento de trayectorias de un tractor con cinco trailers, mientras que para la evasión de obstáculos se diseña un controlador basado en un algoritmo genético. En [96], se presenta un compensador neuronal dinámico adaptable para robots móviles en el control de seguimiento de trayectorias. En [97] se aborda el problema de conseguir la trayectoria mínima que ha de recorrer un robot móvil (planteado inicialmente por Dubins en [98] y por Reeds y Sheep en [99]), al optimizar la cantidad de giro de las ruedas motrices. Mientras que, en [100] se realiza un análisis del modelo de la velocidad angular de las ruedas de un robot móvil, lo que deriva directamente en la optimización del tiempo que emplea para desplazarse.

C. Evasión de obstáculos

Para el problema de evasión de obstáculos existen distintos métodos, los más relevantes son: detección de bordes [101], descomposición en celdas [102], construcción de mapas [103] y campos potenciales artificiales [104].

En el método por detección de bordes, el algoritmo implementado permite que el robot detecte los bordes

verticales de un posible obstáculo; sin embargo, dependiendo de los sensores que realizan esta detección, es necesario que el robot se detenga cuando detecte dicho borde y compute la información necesaria para confirmar la presencia del obstáculo, lo que produce tiempos muertos en la navegación del móvil. Además, tiene el problema de la precisión de los sensores, ya que errores como una limitada direccionabilidad, lecturas erróneas o una distancia considerable entre el sensor y la superficie detectada dan origen a que el algoritmo detecte un obstáculo donde no existe.

El método por descomposición en celdas, divide en celdas el espacio de trabajo del robot en un plano bidimensional y a cada celda le asigna un valor que permite saber si existe dentro de la misma algún obstáculo. La desventaja de este algoritmo es el tiempo computacional requerido para dividir el espacio de trabajo en celdas, aunado al requerimiento excesivo de sensores para brindar una considerable precisión al dividir el espacio de trabajo.

En el método por construcción de mapas, el algoritmo implementado permite crear un grafo que conecta cada punto del espacio de trabajo libre (espacio de trabajo en el que la incidencia de obstáculos es nula), facilitando la generación de un camino que permite al robot navegar desde su punto inicial a su punto final eliminando la incertidumbre de posibles obstáculos. El tiempo computacional para la creación del grafo es bastante elevado.

El método de campos potenciales artificiales, desarrollado por Khatib, considera al móvil y los obstáculos como partículas que ejercen una fuerza de repulsión entre ellos, mientras que en su punto de arribo, el móvil y la meta ejercen una fuerza atractiva; lográndose de esta manera establecer un campo potencial que representa la trayectoria que debe seguir el robot. Esta trayectoria es generada a partir del mismo método, en donde los obstáculos pueden previamente considerarse en el algoritmo o bien detectarse mediante algún tipo de sensor. Su implementación no presenta una complejidad computacional.

La mayor parte de la literatura sobre evasión de obstáculos es referida al método de campos potenciales artificiales, a partir del cual, se han realizado distintas modificaciones e implementaciones en combinación con otros métodos que varían en función directa con el espacio de trabajo. A continuación, se presentan algunas variantes de este método.

En [105] se expone el método VFF (Virtual Force Field) para la evasión de obstáculos en tiempo real, a través de la integración de dos métodos (campos potenciales [104] para la generación de la trayectoria y enrejado bidimensional [106] para la representación de los obstáculos), que logra la detección de mínimos locales, evitando de esta forma la incidencia del móvil en un mínimo local y restableciendo el desplazamiento del robot hacia su punto final. En [107] se da una alternativa mediante campos potenciales generalizados que permiten la generación de trayectorias tanto globales como locales, al considerar la velocidad del robot en la periferia cercana a algún obstáculo. En [108] se logra una mejora de los esquemas de campos potenciales tradicionales

empleando funciones cuadráticas, que evitan la aparición de mínimos locales y la colisión de obstáculos estacionarios y en movimiento.

En [109] y [110], se propone una ley de control para la evasión de obstáculos de un RMR articulado en tiempo real, que considera la posición de los obstáculos y la ubicación de mínimos locales que pueden aparecer en el campo potencial artificial. En [111] se diseña un control que permite guiar a un robot móvil hacia la meta, en un ambiente de trabajo con obstáculos dispersos, combinando técnicas de control basadas en servos visuales [112] con una función potencial rotativa. En [113] se propone una función potencial que contempla los problemas inherentes al método de campos potenciales aplicados a la navegación de robots móviles [114] y el referido a un obstáculo posicionado cerca de la meta. En [115] se diseña un control basado en modos deslizantes para realizar el seguimiento del gradiente de un campo potencial artificial.

V. OTROS FACTORES DE IMPORTANCIA

Otros factores de no menor importancia en los RMR son el deslizamiento, el terreno en el que se desempeña y la autonomía.

En lo referente al deslizamiento, en [116] se presenta un método de detección de deslizamiento y corrección, basado en las mediciones de corriente en los motores acoplados a las ruedas motrices, proponiendo técnicas para determinar parámetros relevantes acerca del terreno en tiempo real y la optimización del desplazamiento del robot. En [117] se exponen los efectos del deslizamiento sobre las restricciones consideradas en los modelos cinemáticos.

Los trabajos más relevantes sobre el tipo de terreno y las condiciones necesarias para un desplazamiento eficaz del robot, son los efectuados por Bekker [40]-[42] y por Wong [118]. En [119]-[121] se realizan estudios sobre robots diseñados con cuatro o más ruedas para maximizar su movilidad en terrenos poco homogéneos.

Se mencionó dentro de la definición de robot móvil la autonomía, es decir, la capacidad que posee el robot de desplazarse de un punto a otro sin necesidad de que un operario manipule sus parámetros, tales como dirección, velocidad, aceleración, etc. Asimismo, un robot móvil debe ser flexible, capaz de aprender de su entorno, adquirir comportamientos basados en su propia experiencia y con base a esto tomar decisiones, es decir evolucionar [122], [123]. En [124] se presenta un estudio acerca del aprendizaje a partir de la demostración en un robot móvil, logrando que el robot adquiera nuevos comportamientos con base a las conductas de personas u otros robots que actúan en su espacio de trabajo. En [125] se propone una técnica para la planeación de la trayectoria en un robot móvil, a través de la experiencia que va adquiriendo durante el desplazamiento que efectúa hacia su meta. En [126] se desarrolló un algoritmo genético [127], que permite al robot aprender con base a la experiencia derivada de interactuar con su medio ambiente; emplea un control basado en lógica difusa [128] para el comportamiento del

robot, i.e., el aprendizaje adquirido por el robot es automático a través de la interacción del algoritmo genético y el control.

VI. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado el desarrollo de la robótica, con particular atención en los RMR. Asimismo, se realizó una revisión de los problemas de control asociados al posicionamiento, regulación, seguimiento de trayectorias y evasión de obstáculos. Además, de otros factores de importancia como son: deslizamiento, terreno en que se desempeña y autonomía de los RMR.

A nivel internacional los logros han sido impresionantes, teniendo como principal exponente a Japón, país donde se encuentran diversos tipos de robots incorporados a la vida cotidiana, como androides con capacidades de movimiento y comportamiento inimaginables, robots de servicio y soporte a personas discapacitadas. Además, plantas industriales automatizadas en donde la intervención humana es casi nula. A su vez, en este trabajo se han mencionado institutos de investigación como el CMU, MIT, NASA, SRI, LAAS, SAIL, etc., que han logrado avances significativos en los RMR y en configuraciones alternas como los robots de péndulo invertido, con una sola rueda, balanceados en una esfera, con patas, modulares, entre otros.

Finalmente, es importante remarcar que en los últimos años el desarrollo de los robots móviles ha permitido avances significativos en distintas áreas del quehacer humano, debido a la amplia gama de aplicaciones en que es posible hacer uso de éstos. Y si bien, las investigaciones realizadas hasta hoy han hecho aportaciones significativas en el desarrollo y concepción de un robot móvil, su futuro aún se vislumbra un poco lejano.

AGRADECIMIENTOS

RS-O y MM-A agradecen el apoyo económico recibido por el SNI, México. Asimismo, RS-O, MM-A, MAM-V, JCH-L y MO-C agradecen el soporte económico recibido de la Secretaría de Investigación y Posgrado del IPN (SIP-IPN), y de los programas EDI, EDD y COFAA del IPN. GS-O agradece por el apoyo económico del SNI, y del soporte parcial de la VIEP-BUAP. También, MM-A y GS-O agradecen el apoyo económico a través de los *Proyectos de Investigación en Apoyo a la Consolidación de Profesores del IPN, México*, cuyos resultados son en beneficio del IPN y la BUAP.

Los autores agradecen a V. R. Barrientos-Sotelo y J. R. García-Sánchez por su apoyo en la elaboración de una versión inicial de este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] D. M. Fryer and J. C. Marshall, "The motives of Jacques de Vaucanson", *Technology and Culture*, Vol. 20, No. 2, pp. 257-269, 1979.
- [2] R. Carrera, D. Loiseau and O. Roux, *Androids, the Jaquet-Droz automatons*, Lausanne: Scriptor-F.M. Ricci, 1979.
- [3] J. Essinger, *Jacquard's Web: how a hand-loom led to the birth of the Information age*, Oxford University Press, 2004.
- [4] N. Wiener, *Cybernetics or control and communication in the animal and the machine*, 2nd Edn, The MIT Press, 1965.
- [5] W. G. Walter, "An imitation of life", *Scientific American*, Vol. 182, No. 5, pp. 42-45, May 1950.
- [6] K. Čapek, *R.U.R. (Rossum's Universal Robots)*, Penguin Classics, 2004.
- [7] I. Asimov, *I, Robot*, Gnome Press, New York, 1950.
- [8] J. Angeles, *Fundamentals of robotic mechanical systems: theory, methods and algorithms*, 3rd Edn, Springer-Verlag, New York, 2007.
- [9] S. J. Russell and P. Norvig, *Artificial intelligence: a modern approach*, 3rd Edn, Prentice Hall, 2009.
- [10] N. J. Nilsson, "Shakey the Robot", Technical Note 323, Artificial Intelligence Center, Computer Science and Technology Division, SRI International, Menlo Park, CA, 1984.
- [11] R. Hollis, "Newt: a mobile, cognitive robot", *Byte Magazine*, Vol. 2, No. 6, pp. 30-45, 1977.
- [12] G. Giralt, R. Sobek and R. Chatila, "A multi-level planning and navigation system for a mobile robot: a first approach to Hilaré", in *Proc. of the 6th IJCAI*, pp. 335-337, Tokyo, 1979.
- [13] A. M. Thompson, "The navigation system of the JPL robot", in *Proc. of the 5th IJCAI*, pp. 749-757, Cambridge, 1977.
- [14] H. P. Moravec, "Visual mapping by a robot rover", in *Proc. of the 6th IJCAI*, pp. 598-600, Tokyo, 1979.
- [15] M. H. Raibert, *Legged robots that balance*, MIT Press, Massachusetts, 1986.
- [16] M. H. Raibert, H. B. Brown and M. Chepponis, "Experiments in balance with a 3D one-legged hopping machine", *International Journal of Robotics Research*, Vol. 3, pp. 75-92, 1984.
- [17] D. W. Vos and A. H. Von Flotow, "Dynamics and nonlinear adaptive control of an autonomous unicycle: theory and experiment", in *Proc. of the 29th IEEE Conference on Decision and Control*, Honolulu, December 1990.
- [18] J. Bares and D. Wettergreen, "Dante II: technical description, results and lessons learned", *International Journal of Robotics Research*, Vol. 18, No. 7, pp. 621-649, July 1999.
- [19] H. B. Brown and Y. Xu, "A single-wheel gyroscopically stabilized robot", in *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 4, pp. 3658-3663, Pittsburgh, April 1996.
- [20] J. Pratt and G. Pratt, "Intuitive control of a planar bipedal walking robot", in *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Leuven, May 1998.
- [21] B. K. Muirhead, "Mars pathfinder flight system integration and test", in *Proc. of the IEEE Aerospace Conference*, Vol. 4, pp. 191-205, Snowmass at Aspen, February 1997.
- [22] K. Tanie, "Humanoid robot and its application possibility", in *Proc. of the IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems*, Ibaraki, July 2003.
- [23] S. Hashimoto, "Humanoid robots in Waseda University Hadalay-2 and WABIAN", *IARP First International Workshop on Humanoid and Human Friendly Robotics*, Tsukuba, October 1998.
- [24] G. Zeglin, "The bow leg hopping robot", Ph. D. dissertation, The Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, 1999.
- [25] T. B. Lauwers, G. A. Kantor and R. L. Hollis, "A dynamically stable single-wheeled mobile robot with inverse mouse-ball drive", in *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Orlando, May 2006.
- [26] A. Koshiyama and K. Yamafuji, "Development and motion control of the all direction steering-type robot (1st report: a concept of spherical shaped robot, roll and running control)", in *Proc. of the 9th Japanese Robotics Conference*, Tokyo, 1991.
- [27] A. Meghdari, M. Rajaei, A. Tadayon and Y. Radparvar, "Geometric and control of a spherical mobile robot", in *Proc. of the 2nd. WSEAS International Conference on Applied and Theoretical Mechanics*, Venice, November 2006.
- [28] A. Halme, T. Schönberg and Y. Wang, "Motion control of a spherical mobile robot", in *Proc. of the 4th International Workshop on Advanced Motion Control*, Vol. 1, pp. 259-264, Espoo, March 1996.
- [29] S. Bhattacharya and S. K. Agrawal, "Design, experiments and motion planning of a spherical rolling robot", in *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 2, pp. 1207-1212, San Francisco, April 2000.

- [30] A. Halme, J. Suomela, T. Schönberg and Y. Wang, "A spherical mobile micro-robot for scientific applications", in *ASTRA 96: Proc. 4th ESA Workshop*, Noordwijk, Netherlands, 1996.
- [31] Z. H. Aronson, T. Lechler, R. R. Reilly and A. J. Shenhar, "Project spirit, a strategic concept", in *Proc. of the Portland International Conference on Management of Engineering and Technology*, Vol. 1, Hoboken, 2001.
- [32] P. F. Muir and C. P. Neuman, "Kinematic modeling of wheeled mobile robots", Technical Report No. CMU-RI-TR-86-12, The Robotics Institute and The Department of Electrical and Computer Engineering, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, June 1986.
- [33] P. F. Muir and C. P. Neuman, "Kinematic modeling of wheeled mobile robots", *Journal of Robotic Systems*, Vol. 4, No. 2, pp. 281-340, 1987.
- [34] J. C. Alexander and J. H. Maddocks, "On the kinematics of wheeled mobile robots", *Int. J. Robotics Res.*, Vol. 8, pp. 15-27, 1989.
- [35] G. Campion, G. Bastin and 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.
- [36] M. H. Raibert, H. B. Brown, M. Chepponis, E. Hastings, J. Koechling, K. N. Murphy, S. S. Murthy and A. J. Stentz, "Dynamically stable legged locomotion", Technical Report No. CMU-RI-TR-83-20, The Robotics Institute and Department of Computer Science, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, December 1983.
- [37] D. J. Todd, *Walking machines: an introduction to legged robots*, Kogan Page, London, 1985.
- [38] T. Iwamoto, H. Yamamoto and K. Honma, "Transformable crawler mechanism with adaptability to terrain variations", in *Proc. of the International Conference on Advanced Robotics*, pp. 285-292, Tokyo, 1983.
- [39] G. Granosik and J. Borenstein, "Integrated joint actuator for serpentine robots", *IEEE/ASME Trans. on Mechatronics*, Vol. 10, pp. 473-481, 2005.
- [40] M. G. Bekker, *Theory of land locomotion*, University of Michigan Press, Michigan, 1956.
- [41] M. G. Bekker, *Off-The-Road locomotion, research and development in terramechanics*, University of Michigan Press, Michigan, 1960.
- [42] M. G. Bekker, *Introduction to Terrain-Vehicle Systems*, University of Michigan Press, Michigan, 1969.
- [43] J. M. Holland, *Basic Robotics Concepts*. Howard W. Sams & Co., Inc. Indianapolis, IN, 1983.
- [44] P. F. Muir, "Modeling and control of wheeled mobile robots", Ph.D. dissertation, The Robotics Institute Carnegie Mellon University, Pittsburgh, August 1988.
- [45] L. Ferrière, B. Raucant and G. Campion, "Design of omnimobile robot wheels", in *Proc. of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Minneapolis, April 1996.
- [46] D. Laney and D. Hong, "Three-Dimensional kinematic analysis of the actuated spoke wheeled robot", in *Proc. of the IDETC/CIE*, Philadelphia, September 2006.
- [47] D. Laney and D. Hong, "Kinematic analysis of a novel rimless wheel with independently actuated spokes", in *Proc. of the IDETC/CIE*, Long Beach, September 2005.
- [48] A. Bañó Azcón, "Análisis y diseño del control de posición de un robot móvil con tracción diferencial", Tesis profesional, L'Escola Tècnica Superior d'Enginyeria (ETSE) de la Universitat de València, 2003.
- [49] T. Bräunl, *Embedded robotics: Mobile robot design and applications with embedded systems*, Springer-Verlag, New York, 2006.
- [50] X. Yangsheng and O. Yongsheng, *Control of single wheel robots*, Springer-Verlag, New York, 2005.
- [51] F. Tang, "Kinematics and design of a wheeled mobile robot", *Centre for Intelligent Machines*, McGill University, Montreal, December 2002.
- [52] N. Chakraborty and A. Ghosal, "Dynamic modeling and simulation of a wheeled mobile robot for traversing uneven terrain without slip," Department of Mechanical Engineering, Indian Institute of Science, 2003.
- [53] J. Borenstein and L. Feng, "Measurement and correction of systematic odometry errors in mobile robots," *IEEE Trans. Robot. Automat.*, Vol. 12, pp. 869-880, 1996.
- [54] A. Hamdy and E. Badreddin, "Dynamic modeling of a wheeled mobile robot for identification, navigation and control", in *Proc. of the IMACS Conf. Modeling and Control of Technol. Syst.*, pp. 119-128, 1992.
- [55] R. Rajagopalan, "A generic kinematic formulation for wheeled mobile robots", *Journal of Robotic Systems*, Vol. 14, pp. 77-91, 1997.
- [56] S. Shekhar, "Wheel rolling constraints and slip in mobile robots", in *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 3, pp. 2601-2607, April 1997.
- [57] R. Balakrishna and A. Ghosal, "Modeling of slip for wheeled mobile robots", *IEEE Trans. Robot. Automat.*, Vol. 11, pp. 126-132, 1995.
- [58] S. Scheding, G. Dissanayake, E. M. Nebot, and H. Durrant-Whyte, "Experiment in autonomous navigation of an underground mining vehicle", *IEEE Trans. Robot. Automat.*, Vol. 15, pp. 85-95, 1999.
- [59] R. L. Williams, II, B. E. Carter, P. Gallina and G. Rosati, "Dynamic model with slip for wheeled omnidirectional robots", *IEEE Trans. Robot. Automat.*, Vol. 18, pp. 285-293, 2002.
- [60] J. J. Rubio, C. Torres, R. Rivera and C. A. Hernández, "Comparison of four mathematical models for braking of a motorcycle", *IEEE Latin America Transactions*, Vol. 9, No. 5, pp. 630-637, 2011.
- [61] J. L. Jones, B. A. Seiger, A. M. Flynn, *Mobile Robots: Inspiration to Implementation*, 2nd Edn, A. K. Peters/CRC Press, 1998.
- [62] B. C. Kuo and F. Golnaraghi, *Automatic Control Systems*, 8th Edn, John Wiley & Sons, 2003.
- [63] I. Boldea and S. A. Nasar, *Electric Drives*, 2nd Edn, CRC Press, 2005.
- [64] M. F. Rahman, D. Patterson, A. Cheok, and R. Betts, *Motor Drives. Power Electronics Handbook*, Academic Press, 2001.
- [65] P. C. Krause, O. Wasynczuk and S. D. Sudhoff, *Analysis of electric machinery and drive systems*, 2nd Edn, IEEE Press Series on Power Engineering, 2002.
- [66] T. J. Maloney, *Electrónica Industrial Moderna*, 5th Edn, Pearson Educación, México, 2006.
- [67] A. Ailon, R. Lozano and M. I. Gil, "Iterative Regulation of an Electrically Driven Flexible-Joint Robot with Model Uncertainty", *IEEE Trans. Robot. Automat.*, Vol. 16, pp. 863-870, 2000.
- [68] R. M. Murray, S. S. Sastry, "Nonholonomic motion planning: steering using sinusoids", *IEEE Trans. Autom. Control*, Vol. 38, pp. 700-716, 1993.
- [69] G. Bauzil, M. Briot and P. Ribes, "A navigation sub-system using ultrasonic sensors for the mobile robot Hilare", in *Proc. of the First International Conference on Robot Vision and Sensory Controls*, pp. 47-58, Stratford-upon-Avon, April 1981.
- [70] J. Borenstein, H. R. Everett and L. Feng, "Where am I?, sensors and methods for mobile robot positioning", *The University of Michigan*, April 1996.
- [71] K. Lingemann, H. Surmann, A. Nu"chter and J. Hertzberg, "Indoor and outdoor localization for fast-mobile robots", *Fraunhofer Institute for Autonomous and Intelligent Systems*, Germany, 2004.
- [72] J. Borenstein and Y. Koren, "Motion control analysis of a mobile robot", *Transactions of ASME, Journal of Dynamics, Measurement and Control*, Vol. 109, No. 2, pp. 73-79, 1987.
- [73] J. Borenstein, "The nursing robot system", Ph. D. dissertation, Technion, Haifa, Israel, 1987.
- [74] J. Borenstein and L. Feng, "UMBmark: A benchmark test for measuring odometry errors in mobile robots", in *Proc. of the SPIE Conference on Mobile Robots*, Philadelphia, October 1995.
- [75] T. D. Larsen, "Optimal fusion of sensors", Ph. D. dissertation, Department of Automation, Technical University of Denmark, September 1998.
- [76] T. D. Larsen, M. Bak, N. A. Andersen and O. Ravn, "Location and estimation for autonomously guided vehicle using an augmented kalman filter to autocalibrate the odometry", in *Proc. of the FUSION SPIE Conference*, Las Vegas, July 1998.
- [77] A. Martinelli, N. Tomatis, A. Tapus and R. Siegwart, "Simultaneous localization and odometry calibration for mobile robots", in *Proc. of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Las Vegas, October 2003.
- [78] S. Thrun and A. Bücken, "Learning maps for indoor mobile robot navigation", *Carnegie Mellon University*, Pittsburgh, April 1996.
- [79] R. W. Brockett, *Asymptotic stability and feedback stabilization*, In *Differential Geometric Control Theory*, R. W. Brockett, R. S. Millmann and H. J. Sussmann, Birkhauser, Massachusetts, 1983, pp. 181-191.
- [80] C. Canudas de Wit and O. J. Sordalen, "Exponential stabilization of mobile robots with nonholonomic constraints", *IEEE Trans. Autom. Control*, Vol. 37, pp. 1791-1797, 1992.
- [81] C. Samson, *Velocity and torque feedback control of a nonholonomic cart*, In *Advanced Robot Control*, C. Canudas de Wit, Ed., Vol. 162 of *Lecture Notes in Control and Information Sciences* Springer-Verlag, New York, 1991, pp. 125-151.

- [82] C. Samson, "Control of chained systems Applications to path following and time-varying point-stabilization of mobile robots", *IEEE Trans. Autom. Control*, Vol. 40, pp. 64-77, 1995.
- [83] J. M. Coron, "Global asymptotic stabilization for controllable systems without drift", *Mathematics of Control, Signals, and Systems (MCSS)*, Vol. 5, pp. 295-312, 1992.
- [84] J. M. Coron and B. D'Andréa-Novel, "Smooth stabilizing time-varying control laws for a class of nonlinear systems Application to mobile robots", in *Proc. of the IFAC Nonlinear Control Systems Design Conference*, pp. 649-654, Bordeaux, 1992.
- [85] J. B. Pomet, "Explicit design of time-varying stabilizing control laws for a class of controllable systems without drift", *Systems & Control Letters*, Vol. 18, pp. 147-158, 1992.
- [86] A. W. Divilbiss and J. T. Wen, "Trajectory tracking control of a car-trailer system", *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, Vol. 5, No. 3, pp. 269-278, 1997.
- [87] E. Aranda-Bricaire, T. Salgado-Jiménez y M. Velasco-Villa, "Control no lineal discontinuo de un robot móvil", *Computación y Sistemas*, Número Especial, pp. 42-49, 2002.
- [88] M. Fliess, J. Lévine, P. Martin and P. Rouchon, "Flatness and defect of non-linear systems: introductory theory and examples", *International Journal of Control*, Vol. 61, No. 6, pp. 1327-1361, 1995.
- [89] H. Sira-Ramírez and S. K. Agrawal, *Differentially Flat Systems*, Marcel Dekker, New York, 2004.
- [90] J. A. Chacal B. and H. Sira-Ramírez, "On the sliding mode control of wheeled mobile robots", in *Proc. of the IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, pp. 1938-1943, San Antonio, 1994.
- [91] J. M. Yang, I. H. Choi and J. H. Kim, "Sliding mode control of a nonholonomic wheeled mobile robot for trajectory tracking", in *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 4, pp. 2983-2988, Leuven, May 1998.
- [92] F. L. Lewis, C. T. Abdallah and D. M. Dawson, *Control of robot manipulators*, Macmillan, New York, 1993.
- [93] R. Silva-Ortigoza, G. Silva-Ortigoza, V. M. Hernández-Guzmán, V. R. Barrientos-Sotelo, J. M. Albarrán-Jiménez and V. M. Silva-García, "Trajectory tracking in a mobile robot without using velocity measurements for Control of wheels", *IEEE Latin America Transactions*, Vol. 6, No. 7, pp. 598-607, 2008.
- [94] J. L. Avendaño-Juárez, V. M. Hernández-Guzmán and R. Silva-Ortigoza, "Velocity and current inner loops in a wheeled mobile robot", *Advanced Robotics*, Vol. 24, No. 8-9, pp. 1385-1404, 2010.
- [95] K. Tanaka and K. Yoshioka, "Fuzzy trajectory control and GA-based obstacle avoidance of a truck with five trailers", in *Proc. of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, Vancouver, October 1995.
- [96] F. G. Rossomando, C. Soria and R. Carelli, "Adaptive neural dynamic compensator for mobile robots in trajectory tracking control", *IEEE Latin America Transactions*, Vol. 9, No. 5, pp. 593-602, 2011.
- [97] H. Chitsaz, S. M. LaValle, D. J. Balkcom and M. T. Mason, "Minimum wheel-rotation paths for differential-drive mobile robots", in *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Orlando, May 2006.
- [98] L. E. Dubins, "On curves of minimal length with a constraint on average curvature, and with prescribed initial and terminal positions and tangents", *American Journal of Mathematics*, Vol. 79, No. 3, pp. 497-516, 1957.
- [99] J. A. Reeds and L. A. Shepp, "Optimal paths for a car that goes both, forwards and backwards", *Pacific J. Math.*, Vol. 145, No. 2, pp. 367-393, 1990.
- [100] D. J. Balkcom and M. T. Mason, "Time optimal trajectories for bounded velocity differential robots", in *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 3, pp. 2499-2504, San Francisco, April 2000.
- [101] J. L. Crowley, "World modeling and position estimation for a mobile robot using ultrasonic ranging", in *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 2, pp. 674-680, Scottsdale, May 1989.
- [102] J. T. Schwartz and M. Sharir, "On the 'piano movers' problem. II. General techniques for computing topological properties of real algebraic manifolds", *Advances in Applied Mathematics*, Vol. 4, No. 3, pp. 298-351, 1983.
- [103] N. J. Nilsson, "A mobile automaton: an application of artificial intelligence techniques", in *Proc. of the International Joint Conference on Artificial Intelligence*, pp. 509-520, Washington, January 1969.
- [104] O. Khatib, "Real-Time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots", in *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 500-505, St. Louis, March 1985.
- [105] J. Borenstein and Y. Koren, "Real-Time obstacle avoidance for fast mobile Robots", *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern.*, Vol. 19, No. 5, pp. 1179-1187, 1989.
- [106] A. Elfes, "A sonar-based mapping and navigation system", in *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 3, pp. 1151-1156, April 1986.
- [107] B. H. Krogh, "A generalized potential field approach to obstacle avoidance control", in *Proc. of the International Robotics Research Conference*, Bethlehem, August 1984.
- [108] R. Volpe and P. Khosla, "Manipulator control with superquadric artificial potential functions: theory and experiments", *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern.*, Vol. 20, No. 6, pp. 1423-1436, 1990.
- [109] T. A. Vidal Calleja, "Generalización del método de campos potenciales artificiales para un vehículo articulado", Tesis de Maestría, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Sección de Mecatrónica, CINVESTAV, México, Junio 2002.
- [110] T. A. Vidal Calleja, M. Velasco Villa and E. Aranda Bricaire, "Real-time obstacle avoidance for trailer-like systems", in *Proc. of the International Symposium on Robotics and Automation*, Toluca, September 2002.
- [111] V. Cadenat, R. Swain, P. Souères and M. Devy, "A controller to perform a visually guided tracking task in a cluttered environment", in *Proc. of the IEEE/RSJ international Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 775-780, Kyongju, October 1999.
- [112] S. Hutchinson, G. D. Hager and P. I. Corke, "A tutorial on visual servo control", *IEEE Trans. Robot. Autom.*, Vol. 12, No. 5, pp. 651-670, 1996.
- [113] S. S. Ge and Y. J. Cui, "New potential functions for mobile robot path planning", *IEEE Trans. Robot. Autom.*, Vol. 16, No. 5, pp. 615-620, 2000.
- [114] Y. Koren and J. Borenstein, "Potential field methods and their inherent limitations for mobile robot navigation", in *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Sacramento, April 1991.
- [115] J. Guldner and V. I. Utkin, "Sliding mode control for gradient tracking and robot navigation using artificial potential fields", *IEEE Trans. Robot. Autom.*, Vol. 11, No. 2, pp. 247-254, 1995.
- [116] L. Ojeda, D. Cruz, G. Reina and J. Borenstein, "Current-based slippage detection and odometry correction for mobile robots and planetary rovers", *IEEE Trans. Robot.*, Vol. 22, No. 2, pp. 366-378, 2006.
- [117] I. Motte and G. Campion, "A slow approach for the control of mobile robots not satisfying the kinematic constraints", *IEEE Trans. Robot. Autom.*, Vol. 16, No. 6, pp. 875-880, 2000.
- [118] J. Wong, *Theory of ground vehicles*, Wiley-Interscience, New York, 2001.
- [119] M. G. Bekker, "Accomplishments and future tasks in off-road transportation", *Journal of Terramechanics*, Vol. 11, No. 2, pp. 11-30, 1974.
- [120] D. R. Freitag, "History of wheels for off-road transport", *Journal of Terramechanics*, Vol. 16, No. 2, pp. 49-68, 1979.
- [121] P. R. Klarer, "Recent developments in the Robotic All Terrain Lunar Exploration Rover (RATLER) program", in *Proc. of the ASCE Specialty Conference on Robotics for Challenging Environments*, pp. 202-209, Albuquerque, 1994.
- [122] N. Jackobi, "Minimal simulations for evolutionary robotics", Ph. D. dissertation, University of Sussex, England, May 1998.
- [123] J. A. Fernández León, "Robótica evolutiva: la próxima generación de robots autónomos", in *Proc. of the I Workshop en Inteligencia Artificial Aplicada a Robótica Móvil*, Buenos Aires, June 2004.
- [124] M. Kasper, G. Fricke, K. Steuernagel and E. Von Puttkamer, "A behavior-based mobile robot architecture for learning from demonstration", *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 34, No. 2, pp. 153-164, 2001.
- [125] A. R. Diéguez, R. Sanz and J. L. Fernández, "A global motion planner that learns from experience for autonomous mobile robots", *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 23, No. 5, pp. 544-552, 2007.

- [126] G. Dongbing, H. Huosheng, J. Reynolds and E. Tsang, "GA-based learning in behaviour based robotics", in Proc. of the IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation, Vol. 3, pp. 1521-1526, Kobe, July 2003.
- [127] R. Pfeifer and C. Scheier, *Understanding intelligence*, MIT Press, Massachusetts, 1999.
- [128] L. A. Zadeh, "Fuzzy logic", *Computer*, Vol. 21, No. 4, pp. 83-93, 1988.



R. Silva-Ortigoza. Recibió el título de Licenciado en Electrónica por Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP), México, en 1999, y los grados de Maestro y Doctor en Ciencias en Ingeniería Eléctrica (Mecatrónica) del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN (CINVESTAV-IPN), en 2002 y 2006, respectivamente. Actualmente es investigador del Departamento de Posgrado del Centro de Innovación y Desarrollo Tecnológico en Cómputo del IPN (CIDETEC-IPN) y miembro del Sistema Nacional de Investigadores (SNI), México. Es co-autor del libro: *Control Design Techniques in Power Electronics Devices* (Springer-Verlag, London, 2006). Las áreas de interés del Dr. Silva-Ortigoza son el control de sistemas mecatrónicos, la robótica móvil y el diseño de técnicas de control aplicadas a sistemas electrónicos de potencia, así como la óptica geométrica.



M. Marcelino-Aranda. Es Doctora en Ciencias Administrativas y Maestra en Administración de Negocios por el IPN y Candidata a Investigadora Nacional por el SNI, México. Profesora-investigadora de la Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería y Ciencias Sociales y Administrativas del IPN (UPIICSA-IPN). Actualmente es Coordinadora de la Línea de Investigación en Gestión de Pequeñas y Medianas Empresas de la Red de Desarrollo Económico del IPN.



G. Silva-Ortigoza. Recibió el título de Licenciado en Física de la UAP, México, en 1988, y los grados de Maestro y Doctor en Ciencias en Física del CINVESTAV-IPN, México, en 1991 y 1995, respectivamente. Actualmente es profesor investigador titular de la Facultad de Ciencias Físico Matemáticas de la BUAP y miembro del SNI, Nivel II, México. Ha publicado más de 40 artículos de investigación en revistas indexadas en el JCR. Las áreas de interés del Dr. Silva-Ortigoza son: relatividad general, óptica geométrica y modelado matemático de sistemas dinámicos.



V. M. Hernández-Guzmán. Recibió el título de Ingeniero Industrial en Eléctrica por parte del Instituto Tecnológico de Querétaro en 1988, el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería Eléctrica (Control) por parte del Instituto Tecnológico de la Laguna, en Torreón, Coah., en 1991 y el grado de Doctor en Ciencias en Ingeniería Eléctrica (Mecatrónica) por parte del CINVESTAV-IPN, en México, D.F., en 2003. Actualmente es Profesor en el programa de Licenciatura y Maestría en Instrumentación y Control de la Universidad Autónoma de Querétaro. Su trabajo de investigación trata sobre el control de robots manipuladores y sistemas electromecánicos. Tiene particular interés en construcción de prototipos didácticos para la enseñanza de técnicas de control clásicas y modernas (no lineales).



M. A. Molina-Vilchis. Es Ingeniera en Comunicaciones y Electrónica por la ESIME-IPN y Maestra en Ciencias de la Computación por parte de la Fundación Arturo Rosenblueth. Se ha desempeñado como docente e investigadora en los programas de posgrado de la especialidad de Seguridad Informática de la ESIME y el CIDETEC-IPN. Actualmente, labora en la ESIME Culhuacán del IPN. Tiene particular interés en los algoritmos y protocolos de comunicación de sensores en las WSN y WSN implementadas en robots móviles, seguridad criptográfica en redes y de aplicaciones.



G. Saldaña-González. Estudió la licenciatura en Ciencias de la Electrónica en la BUAP, la maestría en Ciencias en Ing. Electrónica en la Universidad de las Américas, donde se especializó en el área de diseño digital. Realizó estudios de Doctorado en Ciencias de la Computación en el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE) en México. Ha desarrollado proyectos en las áreas de Control y Automatización, Procesamiento de Imágenes, Redes Neuronales y Telecomunicaciones realizando diseño a nivel transistor, microcontrolador y FPGA. Actualmente pertenece al SNI.



J. C. Herrera-Lozada. Es Ingeniero en Comunicaciones y Electrónica por la ESIME-IPN en 1996. En 2002 obtuvo el grado de Maestría en Ingeniería de Cómputo con especialidad en Sistemas Digitales y en 2011 obtuvo el grado de Doctorado en Ciencias de la Computación, ambos en el Centro de Investigación en Computación del IPN (CIC-IPN). Actualmente se desempeña como investigador en el programa de Maestría en Tecnología de Cómputo del CIDETEC-IPN. Ha sido autor de diversos artículos de divulgación y ponente en congresos nacionales e internacionales; también ha participado en diferentes proyectos de investigación y desarrollo tecnológico. Sus áreas de interés son el diseño con dispositivos de lógica reconfigurable, los sistemas embebidos y los algoritmos bioinspirados.



M. Olgún-Carbajal. Graduado por la ESIME Unidad Culhuacán del IPN como ingeniero en comunicaciones y electrónica en 1995. Maestro y Doctor en Ciencias por el CIC en 2000 y 2011, respectivamente. Trabajó en la industria eléctrica en el área de comunicaciones de sistemas dedicados hasta 2002. Asimismo, trabajó en el diseño de protocolos de comunicación para sistemas dedicados. Actualmente, es profesor e investigador del CIDETEC-IPN desde 2005. Ha publicado diversos artículos relacionados con gráficas por computadoras, realidad virtual, y aplicaciones electrónicas en el campo de la medicina.