



UNA PANORÁMICA DE LOS ROBOTS MÓVILES

(State-of-the-art of the movable wheels robots)

R. Silva Ortigoza; J. R. García Sánchez; V. R. Barrientos Sotelo; M. A. Molina Vilchis

CIDETEC-IPN. Departamento de Postgrado. Unidad Adolfo López Mateos. C.P. 07700, México, D.F., MÉXICO. Correo electrónico: rsilvao@ipn.mx; jrgs_ipn@hotmail.com; vrbs11@yahoo.com; mamolnav@ipn.mx

V. M. Hernández Guzmán

Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Ingeniería. Ap. Postal 3-24. C.P. 76150, Querétaro, Qro., MÉXICO. Correo electrónico: vmhg@uaq.mx

G. Silva Ortigoza

Universidad Autónoma de Puebla. Facultad de Ciencias Físico Matemáticas. Ap. Postal 1152, Puebla, Pue., MÉXICO. Correo electrónico: gsilva@cfm.buap.mx

RESUMEN

Aunque existe una amplia gama de robots y cada uno de ellos es digno de estudio, este trabajo aborda el área de la robótica móvil, específicamente los robots que utilizan como medio de locomoción ruedas. Se presenta una revisión en el estado del arte de los robots móviles desde su evolución pasando por las configuraciones más empleadas, los actuadores comúnmente utilizados y algunas técnicas de control que se han aplicado con el objetivo de conseguir cada vez mayor autonomía en los problemas de seguimiento de trayectoria y en la evasión de obstáculos.

Palabras clave: evasión de obstáculos, configuraciones cinemáticas, motor CD, robots móviles, seguimiento de trayectoria, tracción diferencial.

ABSTRACT

Although a wide range of robots exist and each one of them is worthy of study, this work approaches the mobile robotics area, specifically robots which used wheels for locomotion. A revision on the state of the art of mobile robots is presented, from its evolution through its configurations, the actuators commonly used and some control techniques that have been applied in order to get every time greater autonomy on the path following and obstacle avoidance problems.

Key words: DC motor, differential drive, history, kinematics configurations, mobile robots, obstacle avoidance, path following.



I. INTRODUCCIÓN

La robótica ha jugado un papel preponderante durante el desarrollo de la humanidad y su evolución ha ido siempre de la mano con la construcción de artefactos que materialicen el deseo de crear entes que faciliten el trabajo. En antiguas civilizaciones, como la 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 hilvanarse en la civilización árabe, donde se le dio sentido a dichos mecanismos para confort del ser humano, es así como da inicio la sorprendente evolución de la robótica.

Aunque con el paso del tiempo fueron desarrolladas un gran número de figuras dotadas de partes móviles, no se tenía un concepto general de cómo definir las, en 1920 el escritor checo Capek, en su obra dramática Rossum's Universal Robots (R.U.R.) [Capek, 2001], acuñó el término *robot*, a partir de la palabra checa *robota*, que significa servidumbre o trabajo forzado. Por su parte, Asimov, introdujo, por primera vez, el término *robótica*, en la historia Runaround de su obra I, Robot [Asimov, 1961], incluyendo en ese mismo trabajo, las tres leyes de la robótica. Los robots en la actualidad, no sólo se limitan a asemejar a los seres humanos, sino que han tomado formas diversas para satisfacer ciertas necesidades de la mejor manera.

A consecuencia de la aparición de la computadora y de los cada vez mayores volúmenes de integración de circuitos, se pudieron desarrollar los primeros intentos de un verdadero robot en la década del cuarenta. En el MIT en 1952, aparece la primera máquina de control numérico para automatizar algunas tareas industriales. Por su parte, la compañía Unimates, introdujo el primer robot industrial en la General Motors en 1961.

Este documento está dividido en cuatro secciones, en la sección II se realiza una revisión de la evolución y estado del arte de los robots móviles, en la sección III se presentan los métodos comúnmente empleados para el seguimiento de trayectoria y la evasión de obstáculos. Finalmente en la sección IV se exponen las conclusiones del documento.

II. ROBOTS MÓVILES, EVOLUCIÓN Y ESTADO DEL ARTE

Con la venida de nuevas tecnologías de planificación y razonamiento automático, de 1966 a 1972 se desarrolló en el SRI el primer robot móvil llamado Shakey [Nilsson, 1984], que era una plataforma móvil independiente controlada por visión mediante una cámara y dotada con un detector táctil. A partir de ese momento, la investigación y diseño de robots móviles (que contaron con características muy diferentes entre ellos) creció de manera exponencial.

A principios de la década del setenta, el robot Newt [Hollis, 1977] fue desarrollado por Hollis. El robot Hilare [Giralt, 1979] desarrollado en el LAAS en



Francia. En el Jet Propulsion Laboratory (JPL) se desarrolló el Lunar rover [Thompson, 1977], diseñado particularmente para la exploración planetaria. A finales de esa década, Moravec desarrolló el robot Stanford cart [Moravec, 1979], capaz de seguir una trayectoria delimitada por una línea establecida en una superficie, en el SAIL. En 1983, el robot Raibert [Raibert, 1986], fue desarrollado en el MIT, un robot de una sola pata diseñado para estudiar la estabilidad de éstos sistemas. A principios de la década del noventa, Vos *et al.* desarrollaron un robot "uniciclo" [Vos et al., 1990] (una sola rueda, similar a la de una bicicleta) en el MIT.

Años más tarde, en 1994, el Instituto de robótica CMU desarrolló el robot Dante II [Bares et al., 1999], un sistema de seis patas. En 1996 también en el CMU, se desarrolló el robot Gyrover [Brown et al., 1997], un mecanismo ausente de ruedas y patas basado en el funcionamiento del giroscopio. Ese mismo año se desarrolló en el MIT el Spring Flamingo [Pratt et al., 1998], un robot que emulaba el movimiento de un flamingo. Por su parte, la NASA en 1997 envi  a Marte un robot móvil teleoperado llamado Sojourner rover [Muirhead, 1997], dedicado a enviar fotografías del entorno de dicho planeta. Ese mismo año, la empresa japonesa HONDA, dio a conocer el robot P3 [Tanie, 2003], el primer humanoide capaz de imitar movimientos del cuerpo humano. Al siguiente año, se desarrolla en la universidad Waseda en Japón, el WABIAN R-III [Hashimoto, 1998], un robot humanoide. En 1999 en el CMU, Zeglin propuso un nuevo diseño de robot con una pata llamado Bow Leg Hopper [Zeglin, 1999], un diseño que permite almacenar la energía potencial de la pata.

En 2006, Hollis *et al.* desarrollaron el robot Ballbot [Lauwers, 2006], un sistema hol nomo cuyo movimiento es proporcionado por una sola esfera ubicada en la parte inferior de la estructura. Sin embargo, el estudio de este tipo de robots con una esfera, fue iniciado por Koshiyama y Yamafuji [Koshiyama et al., 1991] en 1991. Actualmente los robots teleoperados Spirit rover y Opportunity rover, [Aronson et al., 2001], 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 estos son vastas y que las mismas son ilimitadas debido al desarrollo cada vez más vertiginoso de la tecnología.

Los robots móviles brindan la posibilidad de navegar en distintos terrenos y tienen aplicaciones como: exploración minera, exploración planetaria, misiones de búsqueda y rescate de personas, limpieza de desechos peligrosos, automatización de procesos, vigilancia, reconocimiento de terreno, y también son utilizados como plataformas móviles que incorporan un brazo manipulador.

Los robots móviles se pueden clasificar por el tipo de locomoción utilizado, en general, los tres medios de movimiento son: por ruedas [Muir et al., 1992], por patas [Todd, 1985] y orugas [Grasnoik et al., 2005]. Cabe señalar que aunque la locomoción por patas y orugas han sido ampliamente estudiadas, el mayor desarrollo se presenta en los Robots Móviles con Ruedas (RMR). Dentro de los



atributos más relevantes de los RMR, destacan su eficiencia en cuanto a energía en superficies lisas y firmes, a la vez que no causan desgaste en la superficie donde se mueven y requieren un número menor de partes y menos complejas, en comparación con los robots de patas y de orugas, lo que permite que su construcción sea más sencilla.

Son precisamente estos argumentos los que motivan el análisis de este tipo de robots, y surge la necesidad, en primera instancia, de tener una definición que satisfaga el contexto de los RMR. De esta manera, se puede definir un robot móvil de ruedas como un sistema electromecánico controlado, que utiliza como locomoción ruedas de algún tipo, y que es capaz de trasladarse de forma autónoma a una meta preestablecida en un determinado espacio de trabajo.

Se entiende como autonomía de un robot móvil, al dominio que tiene éste para determinar su curso de acción, mediante un proceso propio de razonamiento en base a sensores, en lugar de seguir una secuencia fija de instrucciones. En lo referente a las partes de las que se compone un RMR, se tiene un arreglo cinemático y un sistema de actuadores. Ambos sistemas est n íntimamente ligados y son dignos de estudiarse en conjunto, no obstante, se ha logrado un mayor avance, en el estado del arte, al estudiarlos por separado.

A. Configuraciones cinemáticas de los RMR

Existen diferentes configuraciones cinemáticas para los RMR [Azcon, 2003], estas dependen principalmente de la aplicación hacia donde va enfocado, no obstante, de manera general se tienen las siguientes configuraciones: Ackerman, triciclo clásico, tracción diferencial, skid steer, síncrona y tracción omnidireccional (figura 1). Dependiendo de la configuración cinemática que lo conforme, los RMR utilizan cuatro tipos de ruedas para su locomoción [Goris, 2005], estas son: convencionales, tipo castor, ruedas de bolas y omnidireccionales, se pueden observar en la figura 2.

En el marco de las configuraciones cinemáticas posibles y las ruedas que estas utilizan, los RMR documentados en la literatura utilizan comúnmente la configuración de tracción diferencial, (figura 1c), donde se utilizan ruedas convencionales (figura 2a), como ruedas motrices y una o dos ruedas tipo castor, de bola, u omnidireccionales, (figuras 2b, 2c, 2d), respectivamente, para proveer de estabilidad al móvil.

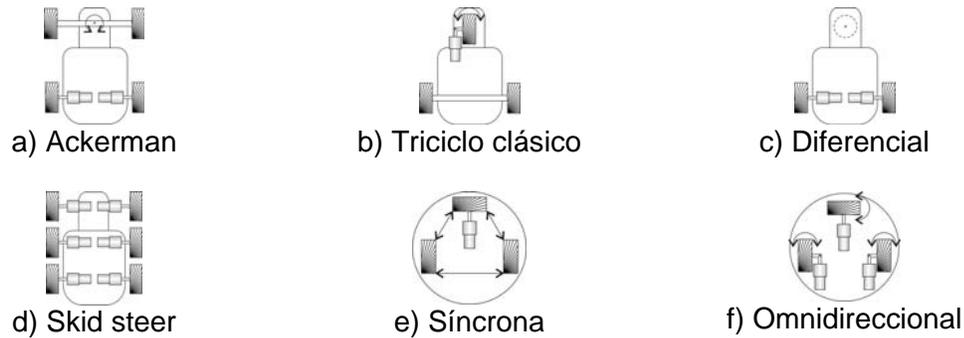


Figura 1. Configuraciones de los RMR



Figura 2. Tipos de ruedas

Una variante de la configuración de tracción diferencial muy conveniente, que utiliza el robot Shakey, es la que cuenta con dos ruedas motrices, que reduce costos de desarrollo y complejidad de control porque es suficiente un par de actuadores para lograr movimiento, también incorpora dos ruedas de bola, que se encuentran diametralmente opuestas y que además de brindar estabilidad al móvil, simplifican el movimiento de giro total a sólo invertir el sentido de giro de las ruedas motrices, por lo que no es necesaria propiamente la rotación y por lo tanto el control de ese movimiento es bastante más sencillo.

Con el objeto de hacer más tratable el problema del modelado en las configuraciones cinemáticas, se suelen establecer algunas suposiciones de diseño y de operación [Muir et al., 1992]. Por una parte, dentro de las suposiciones de diseño generalmente se toman tres. La primera va dirigida a considerar que las partes dinámicas del RMR son insignificantes i.e., que no contiene partes flexibles, de esta manera pueden aplicarse mecanismos de cuerpo rígido para el modelado cinemático. La segunda limita que la rueda tenga a lo más un eslabón de dirección, con la finalidad de reducir la complejidad del modelado. La tercera es asumir que todos los ejes de dirección son perpendiculares a la superficie, de esta manera se reducen todos los movimientos a un solo plano.



Por otra parte, respecto a las suposiciones de operación, al igual que en las de diseño, se toman tres. Una de ellas descarta toda irregularidad de la superficie donde se mueve el RMR. Otra, considera que la fricción de traslación en el punto de contacto de la rueda con la superficie donde se mueve, es lo suficientemente grande para que no exista un desplazamiento de traslación del móvil. Como complemento a lo anterior, una tercer suposición de operación establece que la fricción rotacional en el punto de contacto de la rueda con la superficie donde se mueve, es lo suficientemente pequeña para que exista un desplazamiento rotatorio. Aunque las suposiciones mencionadas son realistas, el deslizamiento que ocurre en el punto de contacto de las ruedas con la superficie se ha convertido en un tópico importante debido a las repercusiones que tiene sobre el móvil.

B. Actuadores en los RMR

Relativo a los actuadores utilizados para dotar de movimiento a los RMR, es común que se utilicen motores. Existe una gama bastante amplia dependiendo de su empleo [Sandin, 2005], los más utilizados en la robótica móvil son los de corriente directa (CD), por el argumento de que su modelo es lineal, lo que facilita enormemente su control, y específicamente los de imán permanente debido a que el voltaje de control es aplicado al circuito de armadura y el circuito de campo es excitado de manera independiente.

Hablando de motores de CD de imán permanente, se tienen dos tipos: con escobillas y sin escobillas. Ambos tipos brindan ventajas semejantes, sin embargo, los motores sin escobillas tienen algunas ventajas significativas sobre los motores con escobillas, como por ejemplo:

- a) al no contar con escobillas, no se requiere el reemplazo de éstas ni mantenimiento por residuos originados de las mismas.
- b) no presentan chispas que las escobillas generan, de esta forma se pueden considerar más seguros en ambientes con vapores o líquidos inflamables.
- c) la interferencia causada por la conmutación mecánica de las escobillas se minimiza considerablemente mediante una conmutación electrónica.
- d) los motores sin escobillas alcanzan velocidades de hasta 50,000 rpm comparadas con las 5,000 rpm aprox. máximas de los motores con escobillas.

A pesar de que estas ventajas parecieran tender la balanza a favor de los motores sin escobillas, existen desventajas cruciales que pueden cambiar la tendencia:

- a) en los motores sin escobillas no se puede invertir el sentido de giro cambiando la polaridad de sus terminales, esto agrega complejidad y costo a su manejo.



b) los motores sin escobillas son más caros.

c) se requiere un sistema adicional para la conmutación electrónica.

d) el controlador de movimiento para un motor sin escobillas es más costoso y complejo que el de su equivalente con escobillas. Al igual que en el arreglo cinemático, cuando se modela un motor de CD se asumen algunas consideraciones, de esta forma se establece que la única fricción presente es la viscosa, aunque en la práctica se involucran otros tipos de fricción no lineales, sin embargo, la suposición es válida al elegir un motor cuyo efecto de las fricciones no lineales sea muy pequeño.

C. Control de los RMR

En tiempos actuales, el tema del control de los RMR ha venido acaparando la atención de gran cantidad de investigadores. Desde el punto de vista de la teoría de control, estos se encuentran en el área que se conoce como control de sistemas no-holónomos, estos sistemas se caracterizan por tener un número menor de grados de libertad controlables respecto al número de grados de libertad totales, en el caso de un RMR de tracción diferencial, el número total de grados de libertad son 3 (posición x,y y su orientación φ) sin embargo únicamente se puede controlar el desplazamiento hacia adelante y hacia atrás así como su orientación, quedando como incontrolable el desplazamiento transversal.

Matemáticamente se dice que el sistema esta sujeto a restricciones no integrables en las velocidades, es decir, su plano de velocidades está restringido. El control del movimiento de los RMR, a grosso modo, se puede clasificar en cuatro tareas fundamentales; localización, planificación de trayectoria, seguimiento de la misma y evasión de obstáculos. Existen diversos trabajos donde se han estudiado estos t picos de manera detallada, no obstante, sólo se mencionarn los más relevantes relativos a los problemas de seguimiento de trayectoria y evasión de obstáculos.

III. SEGUIMIENTO DE TRAYECTORIA Y EVASIÓN DE OBSTÁCULOS

En relación puntual al t pico de seguimiento de trayectoria, existen diferentes métodos para lograr esta tarea, por una parte [Brea et al.] se utilizan técnicas de electrooculografía para enviar comandos que son interpretados por el móvil, en otras palabras, el control se realiza mediante la posición del ojo dentro de su órbita, así mismo, un control mediante campos adaptativos de velocidad y un controlador diferenciable se propuso en [Dixon et al., 2005], esta t cnica se basa en el control de campos de velocidad (VFC, por sus siglas en inglés) junto con un control adaptativo, aquí la trayectoria deseada se describe por un vector de velocidad tangente y las principal ventaja del VFC reside en el hecho que el error en el control del campo de velocidad impide eficientemente que el robot deje la trayectoria deseada.



En el trabajo de la Ref. [Seyr et al., 2005] se muestra un método basado en control predictivo para solucionar el problema del control no-hol nomo, se emplea un algoritmo de Gauss-Newton para el control predictivo lo que permite minimizar el error de posición. Por otro lado, en la Ref. [Gu et al., 2006] se presenta un controlador de modelo predictivo o *Receding Horizon* (RH). Este tipo de control es frecuentemente utilizado en la optimización de técnicas de control en la industria, se diseña principalmente para tratar el problema de restricciones y se trata de un algoritmo de mejora que predice las salidas del sistema en base a los estados que en ese momento est n presentes y al modelo propio del sistema.

Uno de los métodos más empleados en el seguimiento de trayectoria es el de persecución pura (*pure pursuit*), ver Amidi, [Amidi, 1990], éste genera arcos entre el punto de desplazamiento del móvil y los puntos de la trayectoria a seguir, los arcos se generan de 10 a 15 veces por segundo lo que resulta en un seguimiento suave y con muy buenos resultados. Otro método para el seguimiento de trayectoria es conocido como ajuste de polinomios de quinto orden (*Quintic Polynomial Fit*) (Amidi, 1990). Otra t cnica recientemente empleada es mediante linealización de entrada-salida (Isidoro, 1995) la cual impone que las variables de estado tiendan asintóticamente a la trayectoria deseada, generando una dinámica remanente asociada a una variable de estado, la cual resulta ser estable.

Otro trabajo interesante se encuentra en la Ref. Li et al., (2005), ahí se propuso un control lineal por retroalimentación proporcional para lograr que el móvil empujara una pelota sobre una trayectoria preestablecida. Cabe mencionar los trabajos sobre los RMR que se enfocan al control mediante Internet, i.e., RMR teleoperados, véase la Ref. [Yu et al., 2001]. Como otra vertiente y por último, un trabajo en donde se utiliza un RMR como plataforma móvil para transportar un brazo robótico se encuentra en [Holmberg et al., 2003]. Es importante de mencionar que existen muchas técnicas de control clásicas y modernas que se han aplicado a la solución del problema de seguimiento de trayectorias. Dichas técnicas se mencionan en un trabajo futuro.

En lo que respecta a la evasión de obstáculos, existen distintos métodos para llevar a cabo esta tarea. Los más relevantes son: por detección de bordes [Crowley, 1989], por descomposición en celdas [Schwartz et al., 1983], por construcción de mapas [Nilsson, 1969] y por campos potenciales artificiales [Elfes, 1985]. En el método por detección de bordes [Crowley, 1989], el algoritmo implementado, permite que el robot detecte los bordes verticales de un posible obstáculo; sin embargo, dependiendo de los sensores que hagan esta detección, es necesario que el robot se detenga cuando detecte dicho borde y compute la información necesaria para confirmar la presencia del obstáculo.

El método por descomposición en celdas [Schwartz et al. 1983], divide en celdas el espacio de trabajo del robot en un plano bidimensional, a cada celda se 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 [Nilsson, 1969], el algoritmo implementado permite crear un grafo que conecta cada punto del espacio libre de trabajo, facilitando la generación de un camino que permita al robot navegar desde su punto inicial a su punto final eliminando la incertidumbre de posibles obstáculos.

Finalmente, respecto al método de campos potenciales artificiales [Khatib, 1985], la mayor parte de la literatura sobre evasión de obstáculos es referida a este. Fue desarrollado por Khatib, y se 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, es una fuerza atractiva, consiguiéndose de esta forma establecer un campo potencial que representa el ambiente en el que debe de seguir su trayectoria el robot. Esta trayectoria es generada a partir del mismo método, donde los obstáculos pueden previamente considerarse en el algoritmo o bien detectarse mediante algún tipo de sensor.

Algunos ejemplos donde se ha empleado el método de campos potenciales se citan a continuación. En Borenstein et al. [1989] se expone una metodología para la detección y evasión de obstáculos en tiempo real a través de la integración de 2 modelos, campos potenciales [Khatib, 1985] para la generación de la trayectoria y enrejado bidimensional [Elfes, 1985] para la representación de los obstáculos, denominado VFF (Virtual Force Field), donde se consiguió desarrollar una metodología para la detección de mínimos locales, evitando de esta forma la incidencia del móvil en un mínimo local. Por otro lado, en [Krogh, 1984] 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 del robot en la periferia cercana a algún obstáculo.

En [Volpe et al., 1990], se logró una mejora sobre los esquemas de campos potenciales tradicionales empleando funciones cuadráticas, ya que el modelo computacional generado del obstáculo es muy cercano al contorno real del mismo y no sólo como un punto en el espacio; permite además evitar la aparición de mínimos locales [Khatib, 1985] y de igual forma evitar las colisiones tanto con obstáculos estacionarios como con obstáculos en movimiento. En [Vidal, 2002], se propone una ley de control para la evasión de obstáculos de un robot móvil multiarticulado, así como la obtención de la ubicación de mínimos locales que pueden aparecer en el campo potencial artificial.

En Vidal et al. [2002] se dise n  un controlador que permite generar una trayectoria en tiempo real que ha de seguir un tractor, donde dicha trayectoria sirve de referencia para el tráiler y contempla la posición de los obstáculos para impedir que el móvil colisione contra alguno de estos, ya sean de forma convexa o cóncava. En [Cadenat et al., 1999], se dise n  un controlador que permite guiar a un robot móvil hacia un punto determinado en un ambiente de trabajo dentro del cual se encuentran dispersos varios obstáculos. El método propuesto, combina técnicas de control basadas en servos visuales [Hutchinson et al., 1996] que permiten al móvil



desplazarse hasta su punto final y se propone una nueva función potencial rotativa que permite al móvil evadir obstáculos.

En [Ge et al., 2000], se formuló una función potencial que contempla los problemas inherentes al método de campos potenciales aplicados a la navegación de robots móviles [Koren et al., 1991] y un problema que no había sido abordado anteriormente, el referido a un obstáculo posicionado cerca del punto de arribo del robot móvil. 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.

IV. CONCLUSIONES

La robótica móvil tiene infinitas aplicaciones y su desarrollo continúa en pleno crecimiento, nuevos métodos para el control van surgiendo y algunos otros mejoran los actuales. Las tareas de seguimiento de trayectoria y evasión de obstáculos tienen diversas soluciones y las presentadas en este documento son sólo una porción de éstas. La continua evolución de la robótica móvil estará asegurada siempre que se cuente con mentes con imaginación suficiente para nuevos desarrollos que se vayan aproximando cada vez más a la autonomía total en los robots móviles.

AGRADECIMIENTOS

RSO agradece el soporte económico recibido por la Secretaría de Investigación y Postgrado del IPN (SIP-IPN), a través del proyecto 20071024 y del programa EDI, así como del Sistema Nacional de Investigadores (SNI-México). **MAMV** agradece el apoyo recibido por el programa EDD del IPN. **VMHG** agradece al SNI y a la UAQ. Finalmente, **GSO** agradece al SNI por el apoyo económico recibido y a la VIEP-BUAP.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMIDI O. (1990). Integrated Mobile Robot Control. Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, Tech. Rep. CMU-RI-TR-90-17.
- ARONSON Z. H., Lechler T., Reilly R. R. and Shenhar A. J., (2001). Project spirit, a strategic concept, management of engineering and technology. PICMET 2001, Portland International Conference, Vol. 1, July 29 - Aug 2.
- ASIMOV I. (1961). I Robot. Doubleday.
- AZCON B. (2003). 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 Valencia.



- BAREA R., Boquete L., Mazo M., López E. y Bergasa L. M. Guiado de robots móviles utilizando electro-oculograf a. Universidad de Alcalá, Madrid España.
- BARES J. and Wettergreen D. Dante (1999). II: technical description, results and lessons learned. International Journal of Robotics Research, Vol. 18, No. 7, pp. 621-649.
- BORENSTEIN J. and Koren Y. (1989). Real-Time obstacle avoidance for fast mobile Robots. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 19, No. 5, pp. 1179-1187, September- October.
- BROWN H. B. and Xu Y. (1997). A single wheel gyroscopically stabilized robot. Proceedings IEEE Int. Conference on Robotics and Automation, Vol. 4, pp. 39-44. September.
- CADENAT V., Swain R., Sou eres P. and Devy M. (1999). A controller to perform a visually guided tracking task in a cluttered environment. Proceedings of the 1999 IEEE/RSJ international Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS'99, Kyongju, Korea, pp. 775-780, October.
- CAPEK K. (2001). R.U.R. (Rossum's Universal Robots), New York: Dover Publications Inc..
- CROWLEY J. L. (1989). World modeling and position estimation for a mobile robot using ultrasonic rangin. IEEE International Conference on Robotics and Automation, Scottsdale, Arizona, pp. 674-680, May.
- DIXON W. E., Galluzo T., Hu G. and Crane C. (2005). Adaptive velocity field control of a wheeled mobile robot. University of Florida, Gainesville, FL.
- ELFES A. (1985). A sonar-based mapping and navigation system. Carnegie-Mellon University, The Robotics Institute, Technical Report, pp. 25-30.
- GE S. S. and Cui Y. J. (2000). New potential functions for mobile robot path planning", IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol 16, No. 5, pp. 615-620, October.
- GIRALT G., Sobek R. and Chatila R. (1979). A multi-level planning and navigation system for a mobile robot; A first approach to Hilare, Proceedings of the WCAI, Tokyo, Japan, pp. 335-338.
- GORIS K. (2005). Autonomous mobile robot mechanical design. These elektrotechnisch ingenieur, Vrije Universiteit Brussel.
- GRANOSIK G. and Borenstein J. (2005). Integrated joint actuator for serpentine robots. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 10, pp. 473-481.



- GU D. and Hu H. (2006). Receding horizon tracking control of wheeled mobile robots. IEEE Transactions on control systems technology, vol.14, No.4.
- HASHIMOTO S. (1998). Humanoid robots in Waseda University Hadalay-2 and WABIAN. IARP First International Workshop on Humanoid and Human Friendly Robotics, Tsukuba, Jap n, October.
- HOLLIS R. (1977). Newt: A mobile, cognitive robot. Byte Magazine, Vol. 2, No. 6, pp. 30-45.
- HOLMBERG R. and Khatib O. (2003). Development and control of a holonomic mobile robot for mobile manipulation tasks. International Journal of Robotics Research, vol. 19, pp. 1066-1074.
- HUTCHINSON S., Hager G. D. and Corke P. I. (1996). A tutorial on visual servo control. IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 12, No. 5, pp. 651-670, October.
- ISIDORI A. (1995). Nonlinear Control Systems (Communications and Control Engineering). Springer, 3rd edition.
- 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.
- KOREN Y. and 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.
- KOSHIYAMA A. and Yamafuji K. (1991). Development and motion control of the all direction steering-type robot (1st report: a concept of spherical shaped robot, roll and running control). Proceedings of 9th Japanese Robotics Conference, Japan.
- KROGH B. H. (1984). A generalized potential field approach to obstacle avoidance control. International Robotics Research Conference, Bethlehem, PA, August.
- LAUWERS T. B., Kantor G. A. and Hollis R. L. (2006). A dynamically stable single-wheeled mobile robot with inverse mouse-ball drive. Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, Orlando, FL, May 15-19.
- LI X. and Zell A. (2005). Path following control for a mobile robot pushing a ball. Wilhelm-Schickard-Institute, University of Tübingen, Tübingen, Germany.
- MORAVEC H. (1979). Visual mapping by a robot rover. Proc. 6th IJCAI. Tokyo.



- MUIR P. F. and Neuman C. P. (1992). Kinematic modeling of wheeled mobile robots. Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, Tech. Rep. CMU-RI-TR-86-12.
- MUIRHEAD B. K. (1997). Mars pathfinder flight system integration and test. Aerospace Conference, Proceedings, IEEE, Vol. 4, February 1-8.
- NILSSON N. J. (1969). A mobile automaton: an application of artificial intelligence techniques. Proceedings of the International Joint Conference on Artificial Intelligence, pp. 509-520.
- NILSSON N. J. (1984). Shakey the robot. SRI International, Technical Note 323, April
- PRATT J. and Pratt G. (1998). Intuitive control of a planar bipedal walking robot, Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 1998), Leuven, Belgium, May 16-21.
- RAIBERT M. H. (1986). Legged robots that balance. Cambridge, MA, MIT Press.
- SANDIN P. E. (2003). Robot mechanisms and mechanical devices illustrated. McGraw-Hill.
- SCHWARTZ J. T. and Sharir M. (1983). 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.
- Seyr M. and Jakubek S. (2005). Mobile robot predictive trajectory tracking. Institute of Mechanics and Mechatronics, Vienna University of Technology.
- TANIE K. (2003). Humanoid robot and its application possibility, multisensor fusion and integration for intelligent systems. Proceedings of IEEE International Conference, July 30-Aug 1.
- THOMPSON A. M. (1977). The navigation system of the JPL robot. Proceedings 5th IJCAI, Cambridge Massachusetts.
- TODD D. (1985). Walking machines: An introduction to legged robotics. Kogan-Page, London.
- VIDAL Calleja T. A. (2002). Generalización del método de campos potenciales artificiales para un vehículo articulado. Tesis de Maestría, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Sección Mecatrónica, CINVESTAV, México, Junio.
- VIDAL Calleja T. A., Velasco-Villa M. and Aranda-Bricaire E. (2002) Real-time obstacle avoidance for trailer-like systems. In Proceedings of the International Symposium on Robotics and Automation, Toluca, September.



- VOLPE R. and Khosla P. (1990). Manipulator control with superquadric artificial potential functions: theory and experiments. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Vol. 20, No. 6, November.
- VOS D. W. and Von Flotow A. H. (1990). Dynamics and nonlinear adaptive control of an autonomous unicycle: theory and experiment. Proceedings of the 29th IEEE Conference on Decision and Control.
- YU L., Tsui P.W., Zhou Q., Hu H. (2001). A web-based telerobotic system for research and education at Essex. Presented at IEEE/ASME International Conf. on advanced intelligent mechatronics proceedings, Como, Italy.
- ZEGLIN G. (1999). The bow leg hopping robot. Ph. D. dissertation, The Robotics Institute Carnegie Mellon University, Pittsburgh, Pennsylvania.