

Robots Móviles: Evolución y Estado del Arte

Víctor Ricardo Barrientos Sotelo.
José Rafael García Sánchez.
Dr. Ramón Silva Ortigoza.♣
Profesor del CIDETEC-IPN

La robótica es una ciencia que ha acompañado al ser humano durante su evolución, compaginándose con nuestra vida cotidiana y brindando un desarrollo vertiginoso en sus distintos campos de aplicación, partiendo desde robots manipuladores, robots de entretenimiento y de servicio, hasta robots móviles. Este trabajo pretende ser una introducción a la robótica móvil. Aquí se abordan tanto una revisión del estado del arte sobre los diversos aspectos a considerar para el diseño de un robot móvil, como los desarrollos más relevantes que han ido aportando las bases del conocimiento en esta rama de la robótica, siempre en la búsqueda de una autonomía total en los robots móviles.

EVOLUCIÓN DE LA ROBÓTICA MÓVIL

En civilizaciones antiguas, tales como la griega, se hablaba de seres mecánicos con vida que eran movidos por mecanismos basados en 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

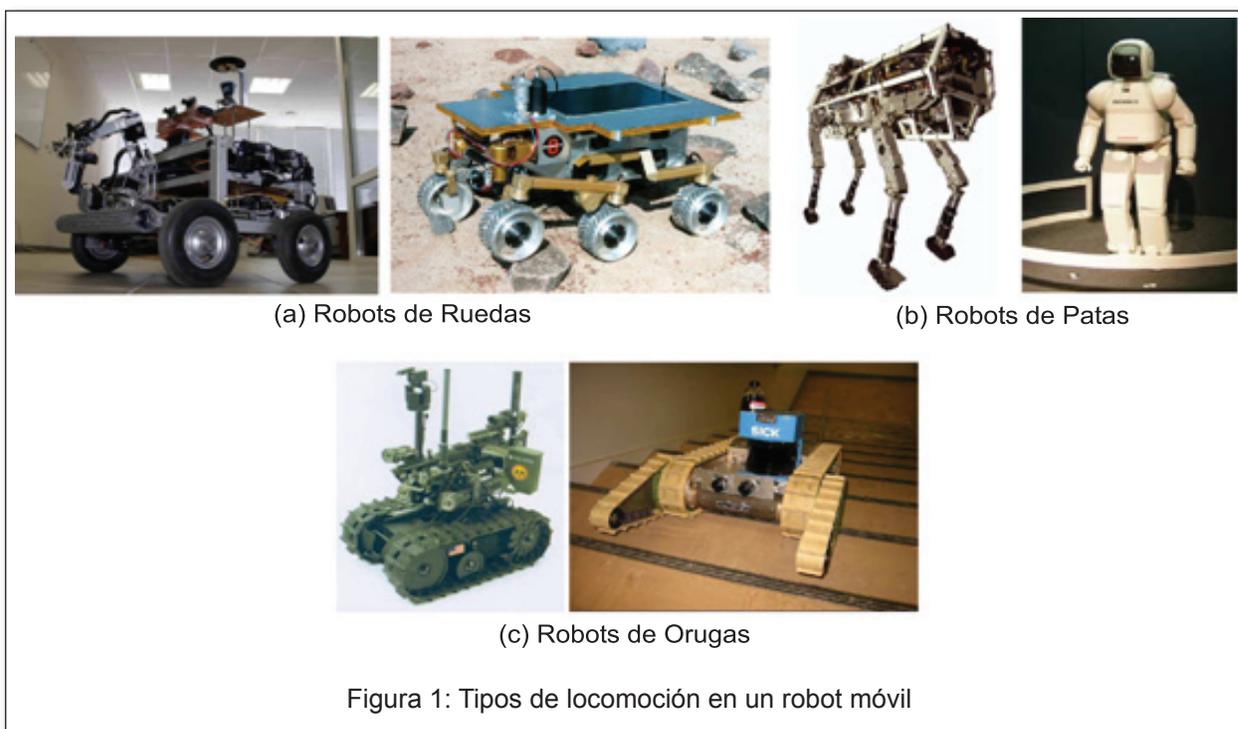
confort del ser humano. La robótica nace como ciencia a partir del siglo XX, hacia la década de los cuarenta. Los orígenes de la misma, datan del siglo XVIII con la construcción de autómatas humanoides por Vaucanson y los Jaquet-Droz. Si bien con el paso del tiempo se desarrolló un gran número de figuras dotadas de partes móviles, fue gracias a la revolución industrial en los albores del siglo XIX (históricamente el hito más importante en el desarrollo de nuevas tecnologías) que se impulsó 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. En 1921 el escritor checo Capek, en su obra dramática *Rossum's Universal Robots (R.U.R.)*, acuñó el término *robot*, a partir de la palabra checa *robot*, 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*, incluyendo en ese mismo trabajo las tres leyes de la robótica. Como consecuencia de los trabajos que hasta entonces se habían realizado, aunado al éxito de las obras mencionadas, la robótica acaparó la atención, no solo de aficionados a la ciencia ficción, sino también de mayor cantidad de investigadores que fueron adentrándose en el estudio de la misma. De esta forma, surgió la necesidad de establecer el concepto

de un robot, que puede denotarse como *un sistema electromecánico reprogramable, que permite realizar diferentes tareas repetitivas que requieren un grado elevado de precisión*. Existe toda una gama de formas y aplicaciones para los robots, dependiendo de la tarea que deban realizar; de esta forma se pueden considerar diferentes criterios para su clasificación, como son: su arquitectura, su generación, el nivel de inteligencia, el nivel de control o el nivel de su lenguaje de programación. Dentro de la clasificación por su arquitectura se encuentran los robots móviles, de los cuales a continuación se da una amplia revisión.

A partir de las década de los setenta - setenta, la investigación y diseño de robots móviles creció de manera exponencial; por ejemplo, Nilsson en el SRI desarrolló el robot *Shakey*, siendo este el primer mecanismo en hacer uso de la inteligencia artificial para controlar sus movimientos. También destacan el *Newt*, desarrollado por Hollis, y *Hilare*, desarrollado en el LAAS¹ en Francia. En el Jet Propulsion Laboratory² (JPL) se desarrolló el *Lunar Rover*, diseñado particularmente para la exploración planetaria. A finales de esa década, Moravec desarrolló el *Stanford Cart*, capaz de seguir una trayectoria delimitada por una línea

1 Acrónimo de Laboratorio de Análisis y Arquitectura de Sistemas.

2 Centro de investigación con sede en EE.UU. y actualmente perteneciente a la NASA.



establecida en una superficie, en la Universidad de Stanford. En 1983, *Raibert* fue desarrollado en el MIT³, un robot de una sola pata diseñado para estudiar la estabilidad de estos sistemas y brindar un conocimiento más profundo acerca de este tipo de locomoción. A principios de la década de los noventa, Vos et al. desarrollaron un robot "uniciclo" (una sola rueda, similar a la de una bicicleta) en el MIT. Años más tarde, en 1994, el Instituto de Robótica CMU⁴ desarrolló a *Dante II*, un sistema de seis patas cuyo propósito fue tomar muestras de gases en el volcán Spurr, situado en Alaska. En 1996, también en el CMU, se desarrolló el *Gyrover*, 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*, robot que emulaba el movimiento de un flamenco, diseñado para implementar

³ Siglas de Massachusetts Institute of Technology.

⁴ Acrónimo de Carnegie Mellon University.

técnicas eficaces de control en la posición de los actuadores (patas), para describir el movimiento del mismo y para ejecutar diversos algoritmos de desplazamiento. Por su parte, en 1997 la NASA⁵ envió a Marte un dispositivo móvil teleoperado llamado *Sojourner Rover*, dedicado a enviar fotografías del entorno de dicho planeta. Ese mismo año, la empresa japonesa HONDA, dio a conocer el robot *P3*, el primer humanoide capaz de imitar movimientos humanos. Al siguiente año, en la Universidad Waseda de Japón, se da a conocer el *WABIAR-III*, 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 llamada *Bow Leg Hopper*, 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

⁵ Siglas de National Aeronautics and Space Administration.

de la misma. En el 2006, Hollis et al. desarrollaron a *Ballbot*, 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 ratón 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 en 1991. Actualmente los robots teleoperados *Spirit Rover* *Opportunity Rover*, se encuentran explorando la superficie del planeta Marte en busca de mantos acuíferos.

ESTADO DEL ARTE

Como se ha visto hasta este punto, las aplicaciones de los robots móviles son muy amplias. Otros ejemplos son: exploración minera, exploración planetaria, misiones de búsqueda y rescate de personas, limpieza de desechos peligrosos, automatización de procesos, vigilancia, reconoci-

miento de terreno, asistencia médica, exploración marítima, entretenimiento, investigación y desarrollo, investigación militar, agricultura, inspección, transporte, etc.

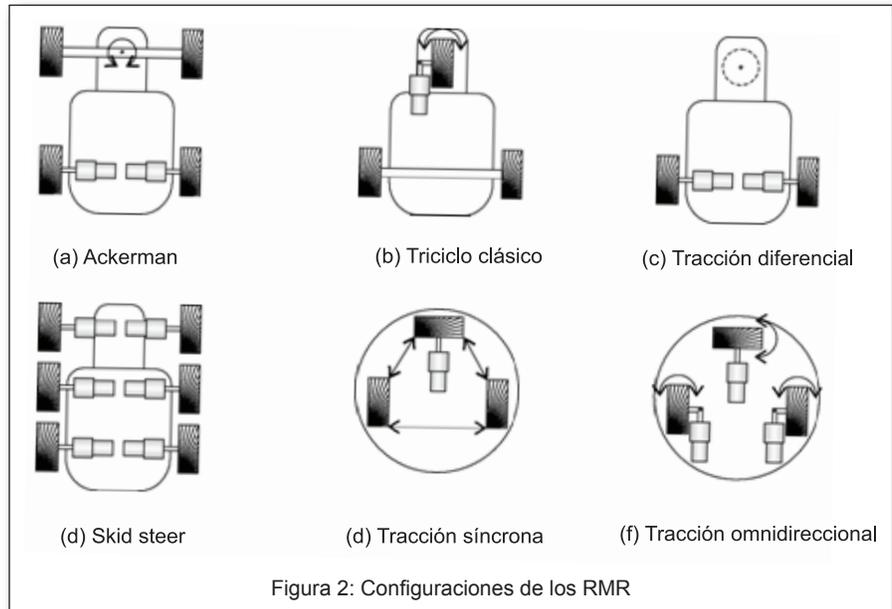
Un robot móvil se define como *un sistema electromecánico capaz de desplazarse de manera autónoma sin estar sujeto físicamente a un solo punto. Posee sensores que permiten monitorear a cada momento su posición relativa a su punto de origen y a su punto de destino. Normalmente su control es en lazo cerrado. Su desplazamiento es proporcionado mediante dispositivos de locomoción, tales como ruedas, patas, orugas, etc.*

Los robots móviles se clasifican por el tipo de locomoción utilizado; en general, los tres medios de movimiento son: por ruedas [1], por patas [2] y por orugas [3]. Si bien la locomoción por patas y orugas ha sido ampliamente estudiada, el mayor desarrollo está en los Robots Móviles con Ruedas (**RMR**), esto es debido a las ventajas que presentan las ruedas respecto a las patas y a las orugas. 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, normalmente menos complejas en comparación con los robots de patas y de orugas, lo que permite que su construcción sea más sencilla. La **Figura 1** muestra los distintos tipos de locomoción.

En lo referente a las partes de las que se compone un RMR, se tiene un arreglo cinemático y un sistema de actuadores, que dotan de movimiento a la estructura cinemática. Ambos sistemas están 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.

Existen diferentes configuraciones cinemáticas para los RMR [4], éstas dependen principalmente de la aplicación hacia donde va enfocado el RMR; no obstante, en general se tienen las siguientes configuraciones: Ackerman, triciclo clásico, tracción diferencial, skid steer, síncrona y tracción omnidireccional, véase la **Figura 2**.

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.



Dependiendo de su configuración cinemática, los RMR utilizan cuatro tipos de ruedas para locomoción [5], estas son: omnidireccionales, convencionales, tipo castor y ruedas de bolas, véase la **Figura 3**. 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. 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

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 tercera 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.

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; los más utilizados en la robótica móvil son los motores de corriente directa (CD), por el argumento de



Figura 3: Tipos de Ruedas

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 de motores 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 estas 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 máximas de los motores con escobillas. A pesar de que estas ventajas parecieran inclinar 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.

Dentro de la robótica móvil, los factores más importantes e imperativos a considerar, son los concernientes al posicionamiento, seguimiento de trayectoria y evasión de obstáculos. Respecto a esto, se han llevado a cabo diversas investigaciones cuyos resultados han permitido un avance significativo pero no total en estos 3 aspectos. Algunos trabajos que han contribuido de manera importante a estos puntos, se mencionan en los siguientes párrafos.

Acerca del posicionamiento se han llevado a cabo distintos análisis empleando sensores ultrasónicos para la navegación de los robots. Por ejemplo en [6], se presentan distintos métodos para la implementación de sensores que permitan al robot móvil conocer su posición dentro del

ambiente de trabajo, estudiando los distintos tipos de sensores y abarcando el problema de posicionamiento en forma general. De igual forma, en [7] se aborda el problema de estimación del posicionamiento de un robot móvil, mediante la cuantificación de errores de odometría⁶ de tipo sistemáticos. En [8] se integran dos métodos de mapeo para la navegación de un robot dentro de un ambiente cerrado y estructurado, mapeo enrejado bidimensional y mapeo topológico, logrando una mayor precisión y eficiencia en el desplazamiento del robot.

Respecto al seguimiento de trayectoria, se propone en [9], un esquema de control para un robot móvil tipo trailer multiarticulado para abordar el seguimiento de trayectorias, integrado por tres diferentes leyes que proporcionan al sistema la capacidad de seguir trayectorias en forma global. En [10], para el seguimiento de trayectoria, se propone una estrategia de control jerarquizada en dos niveles, un lazo interno compuesto por un controlador PID asociado a los motores del robot y

⁶ Medida de la posición de un robot móvil de forma relativa en base a un origen en el plano cartesiano, emplea encoders para calcular la rotación y orientación de las ruedas.

un lazo externo asociado al modelo cinemático del robot que se encarga de generar los perfiles de velocidad para cada motor, considerando la inductancia de cada uno igual a cero. En [11] se realiza el seguimiento guiado por los movimientos del ojo dentro de su órbita (electrooculografía) brindando la ventaja de ser fácilmente operado por personas con discapacidades físicas.

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 [12], por descomposición en celdas [13], construcción de mapas [14] y campos potenciales [15]. En el método por detección de bordes, el algoritmo implementado permite que el robot detecte los bordes verticales de un posible obstáculo. El método por descomposición en celdas, 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. En el método por construcción de mapas, el algoritmo implementado permite crear un grafo que conecta cada punto del espacio libre de trabajo (espacio libre se refiere al espacio de trabajo en el que la incidencia de obstáculos es nula), 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. Respecto al método de campos potenciales artificiales, fue desarrollado por Khatib y se supone al móvil como una partícula puntual y 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.

Los resultados que se han reportado en la literatura, sugieren un avance significativo y sólido en la búsqueda de la autonomía. No obstante, continúa latente un amplio margen en la investigación de la robótica móvil, que se ira reduciendo paulatinamente mientras nuevos estudios se vayan sucediendo.

CONCLUSIONES

Desafortunadamente en México, la investigación en robótica no ha tenido suficiente apoyo y muchos de los desarrollos se estancan tan solo en el diseño y a lo más en la construcción de prototipos. Sin embargo, a nivel internacional los logros han sido impresionantes, teniendo como principal exponente a Japón, país en donde se pueden encontrar diversos tipos de robots incorporados totalmente a la vida cotidiana, entre los que se pueden mencionar androides con capacidades de movimiento y comportamiento inimaginables, robots de servicio y soporte a personas discapacitadas, además de las plantas industriales totalmente automatizadas en donde la intervención humana es casi nula, solo por mencionar algunos. Por otro lado, no menos importantes, institutos de investigación tales como el CMU, el MIT, la NASA, etc. han logrado una importante autonomía en plataformas móviles y en configuraciones alternas como los robots de péndulo invertido, robots con una sola rueda, robots balanceados en una esfera, robots con patas y robots modulares, entre otros. De esta manera, al poseer un vasto campo de aplicación, la robótica móvil continúa en pleno desarrollo, cuya única limitante de crecimiento es la imaginación.

AGRADECIMIENTOS

♣ RSO agradece el soporte económico recibido de la Secretaría de Investigación y Posgrado del IPN (SIP-IPN), a través del proyecto 20071024 y del programa EDI, así como del Sistema Nacional de Investigadores (SNI-México).

REFERENCIAS

- [1] P. F. Muir and C. P. Neuman, "Kinematic modeling of wheeled mobile robots", *Journal of Robotic Systems*, vol. 3, pp. 281-340, 1987.
- [2] M. H. Raibert, H. Brown, M. Chepponis, E. Hastings, J. Koechling, K. N. Murphy, S. S. Murthy and A. Stentz, "Dynamically stable legged locomotion", Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, Tech. Rep. CMU-RI-TR-83-20, 1983.
- [3] T. Iwamoto, H. Yamamoto and K. Honma, "Transformable crawler mechanism with adaptability to terrain variations", in *Proc. 1983 International Conference on Advanced Robotics Conf.*, Tokyo, Japan, pp. 285-292.
- [4] A. Bano Azcon, "Análisis y diseño del control de posición de un robot móvil con tracción diferencial", Tesis profesional, LEscuela Técnica Superior dEnginyeria (ETSE) de la Universitat de Valencia, 2003.
- [5] K. Goris, "Autonomous mobile robot mechanical design", These elektrotechnisch ingenieur, Vrije Universiteit Brussel, 2005.
- [6] J. Borenstein, H. R. Everett and L. Feng, "Where am I? sensors

- and methods for mobile robot positioning", *The University of Michigan*, April 1996.
- [7] J. Borenstein and L. Feng. "UMBmark: A benchmark test for measuring odometry errors in mobile robots", *SPIE Conference on Mobile Robots*, Philadelphia, October 22-26, 1995.
- [8] A. Bucken and S. Thrun, "Learning maps for indoor mobile robot navigation", *Carnegie Mellon University*, Pittsburgh, April 1996.
- [9] J. M. Albarran Jimenez. "Diseño, construcción y control de un robot móvil multiarticulado", Tesis de Doctorado, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Sección Mecatrónica, CINVESTAV, Mexico, 2003.
- [10] T. Salgado Jimenez. "Diseño, construcción y control en tiempo real de un robot móvil", Tesis de Maestría, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Sección Mecatrónica, CINVESTAV, Mexico, 1999.
- [11] R. Barea, L. Boquete, M. Mazo, E. Lopez, L.M. Bergasa. "Guia de robots móviles utilizando electro-oculografía", Universidad de Alcalá, Madrid España.
- [12] J. L. Crowley. "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 14-198, 1989.
- [13] J. T. Schwartz and M. Sharir. "On the piano movers problem: II. General technique for computing topological properties of real algebraic manifolds", *Advanced in applied Mathematics*, Vol. 1, No. 4, pp. 293-351.
- [14] N. Nilsson. "A mobile automaton: an application of artificial intelligence techniques"., *Proceedings of the International Joint Conference on Artificial Intelligence*, pp. 509-520, 1969.
- [15] O. Khatib. "Real-Time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots", *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, St. Louis, pp. 500-505 March 25-28, 1985.