

ROBOTS AUTÓNOMOS: ARQUITECTURAS Y CONTROL

José Manuel Molina López, Vicente Matellán Olivera

Entre los diferentes tipos de arquitecturas de control propuestas a lo largo de los últimos años existen dos perspectivas mayoritarias: aquellas que mantienen la posibilidad de alcanzar la consecución de objetivos complejos basándose únicamente en un conjunto de reacciones simples, denominándose instintos, módulos, agentes, agencias, controladores o comportamientos, y aquellas que necesitan tener un modelo interno del mundo sobre el que razonar. La segunda de estas arquitecturas obliga a una representación fehaciente del mundo. Únicamente, a partir de resultados intermedios de razonamiento sobre dicha representación será posible la resolución de problemas complejos.

En ambos casos es necesario de tener un conjunto de acciones básicas que permitan al robot interactuar con el entorno en el que se encuentra inmerso. Los controladores desarrollados para dar respuesta a esta necesidad han sido desarrollados por personas provenientes del campo del control clásico o por aquellos cuya base se centra en el campo de la inteligencia artificial. Ambos enfoques difieren en la definición de las especificaciones de control, en un caso se busca la región espacial de control definida a través de

una fórmula matemática que liga las entradas con las salidas y en el otro las entradas se traducen en conceptos semánticos que forman parte de un sistema de reglas mediante las cuales se toma la decisión del tipo de movimiento a ejecutar. Aunque la perspectiva en principio parece diametralmente opuesta, estudiando detenidamente los distintos sistemas de razonamiento mediante reglas, en particular aquellos basados en lógica borrosa, se pueden extraer conclusiones muy similares a las obtenidas mediante los sistemas clásicos de control.

A la hora de integrar todas las acciones básicas para dar respuesta a problemas complejos el investigador debe decidir si en realidad deben o no existir niveles jerárquicos en la estructura de control. Para evaluar esta necesidad es necesario comprender las distintas clases de representación del mundo haciendo especial hincapié en la aplicación última del robot desarrollado. Cuando el entorno en que se desarrollan las pruebas está perfectamente definido (bien porque sea una simulación bien porque el entorno es constante y definido a priori) se puede obtener una alta precisión en la representación interna del mundo sobre la que trabajará el robot, pero si el entorno es real y no constante se debe proveer al robot de la capacidad de generar su propia representación a partir de los valores que obtiene de los sensores. Este problema no es fácilmente abordable debido a los problemas de ruido en la medida e indeterminación de las posiciones por las que va pasando el robot, en estos casos la representación del entorno es en muchos casos aproxi-

mada y el razonamiento sobre ella no produce los resultados que se obtienen en simulación.

Por último, deben analizarse los distintos modelos de razonamiento que se pueden aplicar, por un lado aquellas técnicas basadas en planificadores, que presentan una clara limitación en la realización secuencial de tareas, y por otro aquellas basadas en sistemas multiagente, que permiten explotar al máximo las particularidades distribuidas de muchos de las tareas encomendadas a grupos de robots.

1. Niveles de Control

La definición de los distintos niveles de control se basa en las características de las tareas que se desean realizar sobre la plataforma de la que se dispone. Una tarea puede, en términos coloquiales, definirse como sencilla o compleja, en función de la capacidad del robot para realizarla. Por ejemplo, al pedir a un robot ejecutar un giro de 90° sobre si mismo, si es cilíndrico con dos ruedas motrices la tarea resulta muy sencilla pero si consideramos un robot con patas ese mismo giro necesita de una composición de movimientos compleja que no es realizable mediante sencillos algoritmos de control.

Siguiendo este razonamiento se pueden distinguir dos niveles de control (Figura 1). El nivel más alto realiza el razonamiento a largo plazo, describiendo un plan para alcanzar la tarea compleja que se desea realizar a base de ir dividiéndola en sub-acciones más sencillas, y se encarga de que cada una de estas sub-acciones alcanza el sub-objetivo que se ha dispuesto, es

JOSÉ MANUEL MOLINA LÓPEZ y VICENTE MATELLÁN OLIVERA
Laboratorio de Agentes Inteligentes (LAI)
Departamento de Informática
Universidad Carlos III de Madrid
C/Butarque 15, 28911 Leganés
Tfño: 6249431 Fax:6249430
E-mail: {molina, vmate}@ia.uc3m.es



decir, realiza la monitorización de la ejecución del plan. El nivel más bajo se encargará de la realización de las tareas más sencillas, resolviendo los problemas más inmediatos con los que se puede encontrar el robot y que no requieren de una planificación.

Las distintas arquitecturas de control desarrolladas difieren en el peso específico dado a cada uno de los niveles en los casos más extremos constan de un único nivel. El alto nivel para poder razonar necesita de una representación detallada del entorno en el que se va a mover. A partir de dicha representación utilizando árboles de

2. Funciones de Control

En cualquiera de las arquitecturas se debe llegar a la implementación de controladores eficientes para la realización de las tareas sencillas que en última instancia debe ejecutar el robot. Para la realización de estos controladores vamos a tener en cuenta dos perspectivas distintas:

- .Teoría clásica de Control
- .Sistemas basados en Reglas

La teoría clásica de control define la función de control en base al valor de una variable de estado que

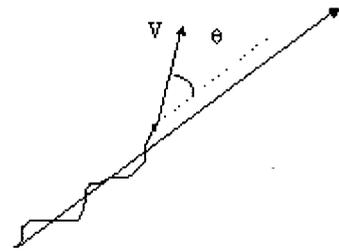


Figura 2.- Definición del problema: Seguir una línea recta.

El problema de estos sistemas es la imposibilidad de obtener un único sistema que pueda responder automáticamente a las dos situaciones. La única solución es utilizar varios sistemas que se activen cuando se encuentra en un modo u otro.

Este problema puede ser resuelto utilizando sistemas basados en reglas que permitan subdividir el espacio de control en tantas partes como intervalos hayamos definido en los espacios de entrada, el formato de las reglas será de la forma:

SI <los valores de entrada se encuentran en este rango>

ENTONCES <los valores de salida se ponen a este valor>



Figura 1.- Niveles de control

búsqueda, encuentra un plan para salvar los problemas que plantea el entorno. Esta representación es el mayor problema al que se enfrenta pues, si sólo se considera la existencia del alto nivel, es necesario recurrir a la replanificación cada vez que el entorno se ha modificado y difiere de la representación interna del robot.

Desde la otra perspectiva el robot es más robusto pues sólo necesita de un conjunto de acciones básicas, a veces denominadas instintos, que componen el bajo nivel y únicamente hay que decidir cuál de esas acciones es la que debe ejecutarse en la situación actual. El problema aparece al considerar problemas complejos, donde el espacio de búsqueda de la solución es tan amplio que resulta imposible, en la práctica, alcanzar la solución mediante la ejecución, sin un plan previo, de distintas acciones básicas.

define la situación actual del sistema y de su evolución temporal a través de los conceptos de la derivada y la integral. Por ejemplo, el comportamiento básico: «Seguir una Línea Recta», puede estudiarse a través de la variable de estado «Ángulo con la Dirección Deseada», Figura 2.

Este problema se resolvería mediante una función de control que combina de manera lineal la variable de estado y su derivada de la forma: $F = K_1 q + K_2 dq/dt$. Si se representa la superficie generada por dicha función se obtiene un plano. Mediante la variación del valor que tienen las constantes se pueden obtener distintos planos de control. Interesa un plano más pendiente en el caso de situaciones alejadas de la situación de equilibrio (régimen transitorio) y menos pendiente cuando nos encontramos cerca de la situación estable (régimen permanente), Figura 3.

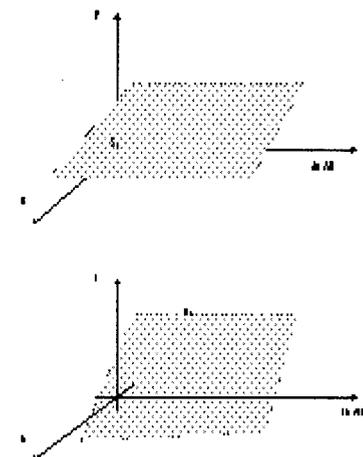


Figura 3.- Superficies de Control en un controlador clásico.

En este caso la superficie de control resulta fraccionada (Figura 4) en distintas partes, una para cada situación. Así se pueden realizar distintos controles en función de la situación, aunque aparece el problema de las discontinuidades, que provocan una ejecución brusca al ir saltando el controlador entre las distintas estados de salida definidos por las distintas configuraciones de las entradas.

El problema de las discontinuidades puede resolverse utilizando un sistema borroso para la ejecución del control. En este caso la pertenencia a los rangos de las situaciones de entrada no son VERDADE-ROS o FALSOS, sino que existe una gradación en los valores de verdad o de posibilidad de pertenencia (Figura 5), lo que provoca la ejecución en paralelo de un conjunto de reglas que producen una salida promedio en función, dados distintos grados de activación generados por las entradas, de todas las salidas posibles.

Los procesos involucrados en la ejecución de un sistema borroso son (Figura 6): la fuzzificación, la evaluación de las reglas y la defuzzificación. El primero de ellos consiste en la obtención de variables borrosas que definen las entradas a partir de los datos numéricos suministrados por los sensores. La segunda propaga el grado de verdad de las premisas a las salidas. La última permite obtener un valor numérico a partir de la variable borrosa que se obtuvo en el punto anterior.

Para cada uno de estos pasos existen distintas formas de

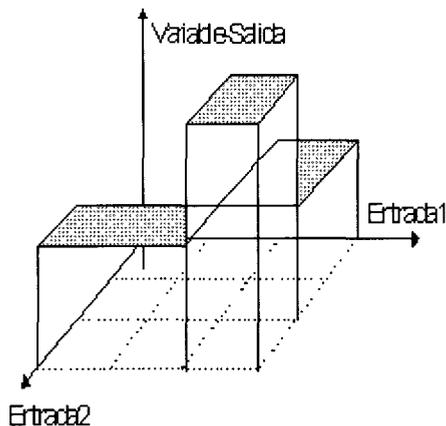
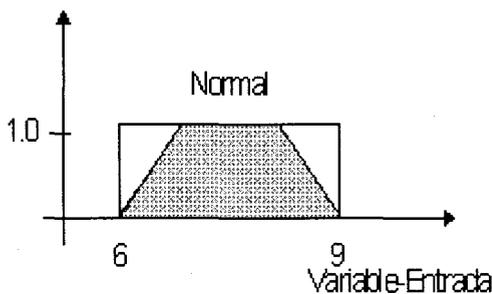


Figura 4.- Superficie de Control en un Controlador basado en Reglas.

CONJUNTO CLASICO



CONJUNTO DIFUSO

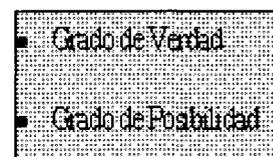


Figura 5.- Definición de un Concepto Borroso.

implementación. En cualquier caso, la superficie de control que resulta (Figura 7) está fraccionada en distintas partes, existiendo superficies continuas que evitan los saltos del controlador. La superficie de control presenta más o menos zonas suaves en función del número de particiones que realicemos en las variables de entrada y salida, y en función de los métodos de evaluación de reglas y de defuzzificación que se hayan elegido.

Mediante la modificación de las reglas se puede lograr el ajuste de las distintas situaciones, transitoria y permanente, con un único sistema, haciendo que el sistema funcione sin brusquedades.

3. Arquitecturas de Control

Una vez desarrolladas las funciones de control el problema aparece en cómo integrar todas esas funciones en un único robot. La arquitectura

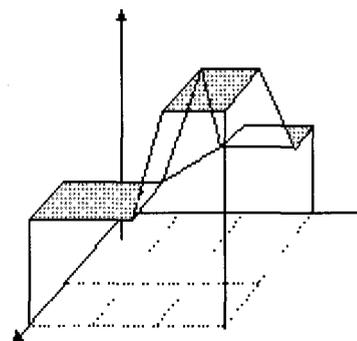


Figura 7.- Superficie de Control de un Sistema Borroso.

puramente reactiva no necesita de ningún otro nivel y la actuación final del robot se basa en la importancia para cada situación de la función que se puede ejecutar. Existe una relación dada entre las acciones básicas de modo que una acción puede bloquear a otra e impedir su ejecución. Por ejemplo (Figura 8), si consideramos un robot móvil que tiene dos acciones posibles:

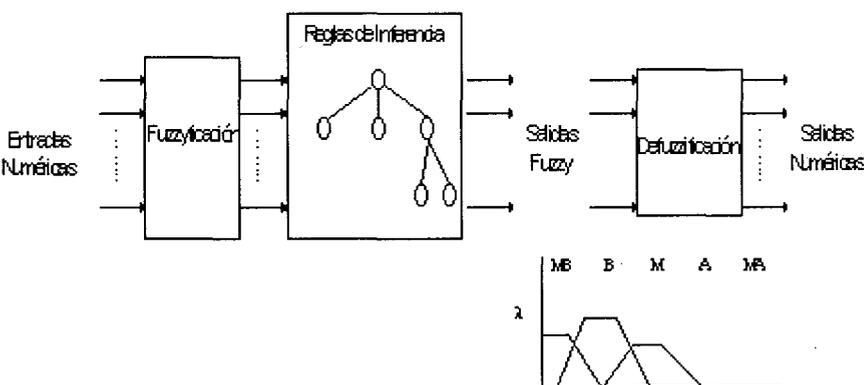


Figura 6.- Definición de un Sistema Borroso.

evitar obstáculos y seguir un objeto, cuando la situación del entorno es tal que la función de evitar tiene que ser ejecutada, ésta bloquea automáticamente la acción de seguir.

Para problemas sencillos esta arquitectura es válida pero no es así en situaciones donde la acción a desarrollar es muy compleja y necesita de una secuencia de acciones concreta que no se puede alcanzar mediante la ejecución de la acción básica que mejor se adapte a la situación presente. Para la realización de un alto nivel es necesario tener una representación del mundo y un modo de razonamiento sobre ese mundo.

La representación del mundo puede darse a priori o bien puede construirse a partir de la información sensorial, como por ejemplo mediante el algoritmo QUADTREE (Figura 9). Este método parte de la división del mundo en celdas y en la agregación de estas para tener una visión más global del espacio sobre el que se mueve el robot.

Cualquier método de obtención de la representación del mundo llevado a una ejecución en un medio real se encuentra con dos problemas: la incertidumbre de los sensores que están explorando dicho mundo y la imposibilidad de localizar al robot dentro del mundo con unas coordenadas precisas si no se cuenta con una referencia externa.

Para razonar sobre esa representación se utilizan planificadores. Un planificador genera de forma automática y gestiona un plan, que no es más que la secuencia de acciones necesaria

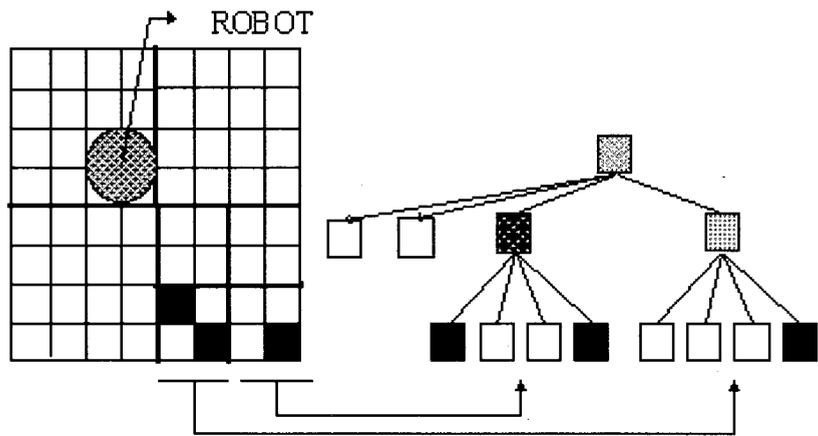


Figura 9.- Representación del mundo mediante un Quadtree.

para la consecución de una meta. Este problema se puede visualizar representando el espacio de búsqueda en forma de árbol (Figura 10), de tal manera que el plan es el camino óptimo dentro del árbol para alcanzar la meta propuesta.

Este procedimiento presenta una serie de limitaciones cuando consideramos la posibilidad de realizar acciones concurrentemente. Además es necesario que se ejecuten los pasos anteriores con el efecto deseado para poder realizar el siguiente paso, cuando esto no ocurre es necesaria la replanificación de toda la solución. En estos casos se debe abordar el problema desde una perspectiva distinta basada en técnicas multiagente.

4. Robots Existentes

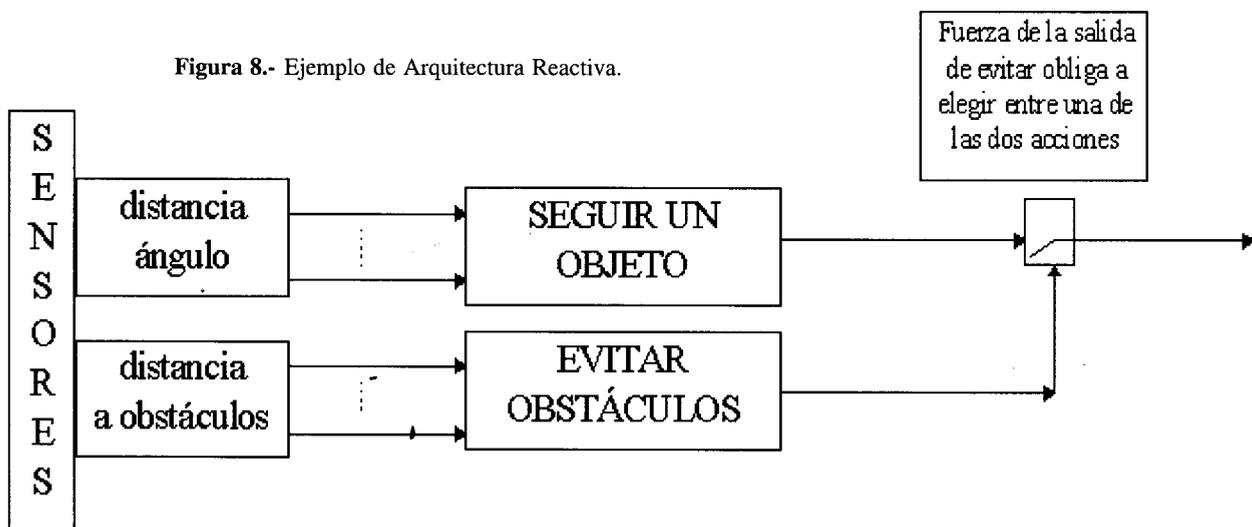
Las arquitecturas de control que se presentan en las secciones anterior-

es se implementan sobre un soporte hardware, es decir, un robot físico. Dentro del mundo de los robots autónomos y dejando de lado los robots industriales, existen en la actualidad multitud de robots autónomos. Muchos de ellos en los centros de investigación, pero también existen empresas, desde las grandes multinacionales a las de aficionados, que fabrican y comercializan robots autónomos. De entre ambos mundos hemos seleccionado los siguientes ejemplos para dar una visión del estado actual en la fabricación de robots:

4.1. Empresas

Cybermotion: Empresa americana dedicada desde 1984 a la construcción de robots móviles autónomos. Su producto estrella es el robot SR2. Un robot de vigilancia para entornos industriales y de oficinas, capaz de

Figura 8.- Ejemplo de Arquitectura Reactiva.



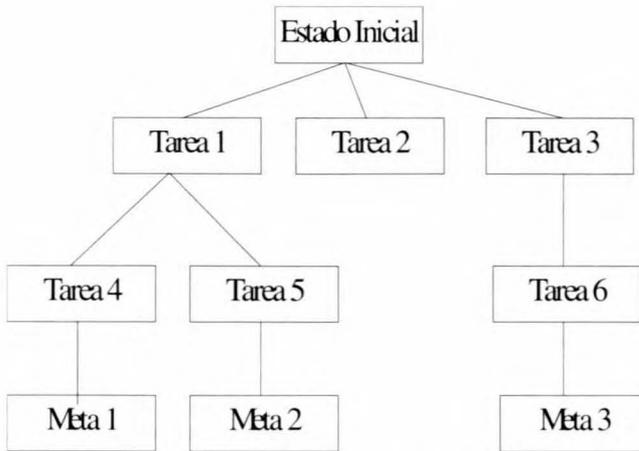


Figura 10.- Representación de la búsqueda de un plan.

patrullar 12 h. sin recargar baterías. Es capaz de detectar fugas de gases, incendios, intrusos, etc.

· *Nomadic Technologies*: Una de las empresas líderes en la fabricación de robots para la investigación. Su **Nomad 200** ha ganado el concurso del AAI en 1995. En España hay varios ejemplares, por ejemplo, en la Facultad de Informática de la U.P.M. y en la E.T.S.I. de Telecomunicación.

· *Arrick Robotics*: Es una empresa tejana que se dedica fundamentalmente a la fabricación de robots

siendo su producto estrella el **B21** (Figura 11) Además de esta plataforma dispone de multitud de periféricos como manipuladores, cámaras, etc. En España también se pueden encontrar, por ejemplo en la Universidad Carlos III o en el Instituto de Automática Industrial del C.S.I.C..

· *Ublige Software y Robotics*: Es una empresa dedicada al desarrollo de conchas de software para el control de robots autónomos de tipo insecto con múltiples patas.



Figura 11.- El robot B21

modulares de bajo coste para la investigación. Un ejemplo es el **Trilobot**.

· *Real World Interface*: Fabrica robots mayoritariamente para los centros de investigación. Su diseño es similar al de *Nomadic*,

ca se están utilizando en el estudio comportamientos colectivos.

· *Universidad Libre de Bruselas*: Es el centro europeo que ha seguido más de cerca el trabajo del MIT americano. Su enfoque tradicional se ha basado en robots con capacidades de aprendizaje, aunque actualmente están muy volcados hacia los agentes software.

· *Ecole Polytechnique Federal de Lausanne (EPFL)*: Centro suizo dedicado a la fabricación de robots autónomos, en la mejor tradición de la mecánica suiza de precisión. Entre ellos destaca el mini-robot **Khepera** (Figura 13) que el Laboratorio de Agentes Inteligentes presenta en la demostración práctica.

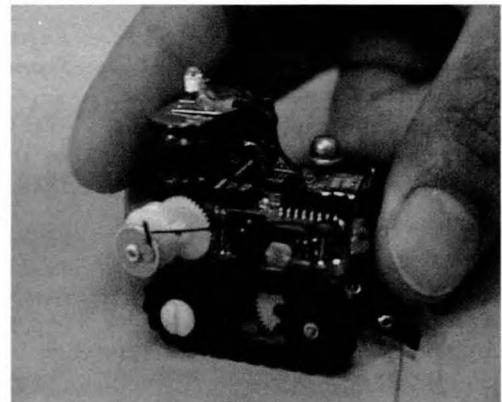


Figura 12: Micro-Robot Hormiga (Ants)

4.2. Universidades

· *Massachusetts Institute of Technology*: Es el centro que revolucionó, de la mano de Rodney Brooks, la forma de abordar los problemas del control de robots autónomos, pasando del control clásico basado en el razonamiento sobre un modelo interno del mundo, a un control reactivo. En la actualidad dentro de MIT existen varios grupos trabajando con robots autónomos, quizá uno de los robots más espectaculares por su reducido tamaño sea el robot hormiga (Figura 12). Estos robots de una pulgada cúbica

4.3. Dónde encontrarlos

La siguiente pregunta que se debe formular es donde se puede encontrar más información acerca de estos robots. La mejor fuente de información, en especial sobre tecnología es la internet, y dentro de internet el World Wide Web. Algunas URLs interesantes sobre robótica son:

· <http://www.robotstore.com>:

Una empresa que se dedica a vender productos de robótica para aficionados, desde partes a robots completos a muy buen precio.

· <http://www.cs.indiana.edu/robotics/world.html>: Es el lugar donde se puede encontrar prácticamente todo lo relacionado con robótica: Centros de investigación, empresas, etc.



Photo Alain Herzog

Figura 13.- Mini-Robot Khepera

• <http://www.sm.luth.se/csee/ra/sm-roa/Robotics/WhoSWho/>: Listado de estudiantes interesada en temas de robótica.

• <http://www.robotic.com/robonews.html>: RoboNews! Las últimas informaciones sobre robots móviles y sobre la industria de la robótica. La mantiene la empresa Robotic Systems, Inc.

• <http://www.fr.ri.cmu.edu:80/robotics-faq>: La FAQ del grupo de news comp.robotics en versión HTML.

• <http://www.fwi.uva.nl/research/neuro/ias-ras/ias.html>: La página de la Intelligent Autonomous Systems (IAS) Society.

• <http://www.robotics.com>: Arrick Robotics, empresa ya comentada anteriormente.

• <http://www.cybermotion.com/~cyberdog>: Cybermotion. La empresa fabricante del robot vigilante.

• <http://isr.com/~isr>: IS Robotics Corporation. La empresa fabricante de muchos de los robots que utilizan en los experimentos del MIT.

• <http://www.rwii.com>: Real World Interface, fabrica el B21, presentado anteriormente..

• <http://www.essi.fr/robosoft>: Robosoft es una empresa francesa clásica en la fabricación de plataformas robóticas para la experimentación.

• <http://www.traveller.com/~insecta>: Ublige Software & Robotics

fabrica y comercializa robots tipo insecto.

• <http://hp1.essex.ac.uk/Eurobots>: Archivo con robots europeos.

• <http://hyp.jsk.t.u-tokyo.ac.jp/~tom/rsj.html>: Archivo con robots japoneses.

Por supuesto existen muchas otras URL tan interesantes o más que éstas, pero ese es uno de los muchos encantos de Internet, navegar y encontrar. Happy Surfing.

5. Bibliografía Relacionada

• INTELIGENCIA ARTIFICIAL
G. F. LUGER, W. A. STUBBLEFIELD, *Artificial Intelligence. Structures and Strategies for Complex Problem Solving*, The Benjamin/Cummings Publ., 1993.

A. J. GONZALEZ, D. D. DANKEL, *The Engineering of Knowledge-Based Systems*, Prentice Hall, 1993.

R. M. HARALICK, L. G. SHAPIRO, «The Consistent labeling Problem: Part I», Trans. on PAMI, vol. 1, nº 2, Apr. 1979.

K. B. IRANI, S. I. YOO, «A methodology for Solving Problems: Problem Modeling and Heuristic Generation», Trans. on PAMI, vol. 10, nº 5, Sep. 1988.

• LÓGICA BORROSA

L. A. ZADEH, «Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes», Trans. on SMC, vol. 3, nº 1, Jan. 1973.

L. A. ZADEH, «Fuzzy Logic», IEE Trans on Computers, Apr. 1988.

L. A. ZADEH, «The Role of Fuzzy Logic in the Management of Uncertainty in Expert Systems», Fuzzy Sets and Systems 11, 1983.

H. MAMDANI, «Application of Fuzzy Logic to Approximate Reasoning Using Linguistic Synthesis», IEE Trans on Computers, vol. 26, nº 12, Dec. 1977.

I. B. TURKSEN, Z. ZHONG, «An Approximate Analogical Reasoning Approach Based on Similarity Measures», Trans. on SMC, vol. 18, nº 6, Nov/Dec 1988.

E. BINAGHET AL, «Fuzzy Reasoning Approach to Similarity Evaluation in Image Analysis», International Journal of Intelligent Systems, vol. 8, 749-769(1993), John Wiley&Sons.

KLIR & FOLGER, *Fuzzy Sets, Uncertainty and Information*, Prentice Hall. 1992.

H. J. ZIMMERMANN, *Fuzzy Sets,*

Theory and its Applications, Kluwer 1985.

D. DUBOIS & H. PRADE, *Fuzzy Sets and Systems, theory and applications*, Academic Press 1980.

• WANG & KLIR *Fuzzy Measure Theory*, Plenum Press 1992.

• ARQUITECTURAS DE CONTROL

BADREDDIN, E., *Fuzzy Relations for Behavior-Fusion of Mobile Robots*. Proceedings of IEEE Int. Conference on Robotics and Automation, 3278-3283, 1994.

BRAITENBERG, V., *Vehicles. Experiments in Synthetic Psychology*. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1984.

BROOKS, R. A., *A Robust Layered Control System for a Mobile Robot*. IEEE Journal of Robotics and Automation RA-2, 14-23, 1986.

BROOKS, R. A., *Intelligence without representation*. Artificial Intelligence, 47, 139-159, 1991.

CONNELL J. H. *Minimalist Mobile Robotics: A Colony-Style Architecture for an Artificial Creature*. Academic Press. Boston, MA, 1990.

GOODRIDGE, S. G., LUO, R. C. *Fuzzy Behavior Fusion for Reactive Control of an Autonomous Mobile Robot: MARGE* Proceedings of IEEE Int. Conference on Robotics and Automation, 1622-1627, 1994.

ISHIKAWA, S. *A method of autonomous mobile robot navigation by using fuzzy control*. Advanced Robotics, Vol. 9, No. 1, pp. 29-52, 1995.

JONES L. J., FLYNN A. M. *Mobile Robots: Inspiration to Implementation*. Ed. A. K. Peters, Wellesley, Massachusetts, 1993.

MINSKY M. *The Society of Mind*. Simon and Schuster. New York, NY. 1986.

MONDADA, F., FRANZI, P. I., *Mobile Robot miniaturisation: A tool for investigation in control algorithms*. Proceedings of the third International Symposium on Experimental Robotics. Kyoto, Japan, 1993.

NILSSON, N. J. (ED.), *Shakey the robot*. SRI A.I. Center Technical Note 323, April, 1984.

PIN, F. G., WATANABE, Y., *Driving a Car using Reflexive Fuzzy Behaviors*. Proceedings of the Second International Conference on Fuzzy Systems, pag. 1425-1430, San Francisco, 1993.

REIGNIER, P., *Fuzzy logic techniques for mobile robot obstacle avoidance*. Robotics and Autonomous Systems, 12, pag. 143-153, 1994.