

Los ultrasonidos aplicados en el guiado de vehículos autónomos



□ Eduardo F. Caicedo B, Ph.D.
Profesor Titular
Departamento de Electricidad
Universidad del Valle

RESUMEN

En este artículo se plantea la aplicación de los ultrasonidos en la navegación de robots móviles, en entornos no estructurados y semiestructurados, centrándose en el sistema sensorial, haciendo una breve referencia al modelo del entorno y dejando como un problema aparte el razonamiento o toma de decisiones en el guiado de robots móviles.

ABSTRACT

The goal of this paper is to present the ultrasonic sensors applied to mobile robot guided. The paper consider structured and semi-structured environments, the sensorial model and the uncertainty level.

1. INTRODUCCION

La utilización de robots en entornos industriales comenzó a ser significativa a finales de la década de los setenta, creciendo continuamente su uso en los países industrializados. Entre las principales áreas de aplicación de la robótica pueden citarse la soldadura por puntos y la soldadura continua, la manipulación de materiales y la pintura de superficies.

En el campo de los robots móviles su utilización se centró, principalmente, en el transporte de piezas dentro de un almacén y en la supervisión de labores en entornos considerados nocivos o peligrosos para el hombre.

En los países con mayor nivel de industrialización, a mediados de la década de los ochenta, se produjo una estabilización y posterior reducción en el mercado de la venta de robots [Albus, 90]. La saturación del mercado de aplicaciones "sencillas" y el no haber alcanzado el desarrollo técnico suficiente para

resolver aplicaciones más complejas, centraron las investigaciones en aplicaciones para entornos completamente estructurados, en los cuales se conoce con precisión la ubicación y características de todos los objetos.

Sin embargo, no siempre es factible trabajar en ambientes totalmente conocidos para el robot, por ejemplo en la limpieza de vertederos industriales y en el mantenimiento de centrales nucleares. En este artículo se plantea la aplicación de los ultrasonidos al guiado de robots móviles, centrándose en el tema sensorial y dejando para un futuro artículo el razonamiento o toma de decisiones en el guiado.

2. ENTORNOS NO ESTRUCTURADOS

En las aplicaciones de la robótica, uno de los principales problemas a investigar es el tratamiento de la incertidumbre en tres niveles: el nivel de los modelos, el nivel sensorial y el de los actuadores. La incertidumbre se produce cuando:

- No se conoce la posición e identidad de los objetos del mundo.
- Los sensores no aportan información suficiente sobre el estado del robot y del entorno.
- No se conoce con precisión el resultado de aplicar un conjunto de acciones sobre el robot.

La solución que se utilizó en las aplicaciones industriales fue estructurar el entorno, de forma que se redujera la incertidumbre a un nivel mínimo. Así, cuanto mayor sea el conocimiento del entorno de trabajo, menos necesarias serán las capacidades sensoriales y de toma de decisión del robot. De hecho, la gran mayoría de los robots industriales trabajan en entornos tan estructurados que apenas requieren sensores externos, pues su principal función es repetir a alta velocidad determinada secuencia de movimientos.

En el área de los robots móviles, un ejemplo de este enfoque lo constituyen los AGV (Automated Guided Vehicles) [Maravall, 87]. En el suelo de la fábrica se marcan los recorridos permitidos para el vehículo, dibujando una serie de líneas o, bien, situando emisores eléctricos o magnéticos de forma que el desplazamiento del vehículo de un punto a otro se efectúe siguiendo estas referencias.

Con este planteamiento, las regiones en las que está permitido el acceso del robot móvil se reducen a aquellas zonas en las que se está seguro de que el movimiento es posible, y la trayectoria a seguir por el vehículo queda previamente definida al fijar las referencias sobre el suelo.

El modelo del entorno se reduce al conjunto de puntos destino a los que interesa que acceda el vehículo y a las líneas que recorren la fábrica enlazando estos puntos. Tan solo se incorporan los sensores necesarios para seguir las trayectorias marcadas en el suelo y, en entornos en los que puede aparecer algún objeto imprevisto, se utilizan sensores que permitan detectar que el camino está bloqueado. En este sistema, la capacidad de razonamiento y de toma de decisiones es limitada.

La amplia difusión de los AGV se debe, principalmente, a que son sistemas muy seguros y fiables que, en entornos estructurados y para tareas específicas, realizan su trabajo de forma satisfactoria.

Su mayor desventaja es la falta de flexibilidad para poder alterar su trayectoria o comportamiento, imprescindible cuando existe incertidumbre en el ambiente de trabajo. Sin embargo, no siempre es posible trabajar en un entorno totalmente conocido. Por ejemplo, al considerar el tamaño del medio en el que se mueve el vehículo, es factible eliminar la incertidumbre en la posición de los objetos y además identificarlos cuando se encuentran dentro de una misma cé-

lula de trabajo; pero intentar eliminar la incertidumbre en toda la fábrica o en espacios abiertos resulta demasiado costoso y, muchas veces, imposible. Además, existe una gran variedad de aplicaciones potenciales en las cuales el robot se ve irremediablemente obligado a trabajar en entornos sin estructurar, por ejemplo, para citar algunos casos, la limpieza de vertederos industriales y el mantenimiento de centrales nucleares.

Por tanto, resulta inevitable afrontar el problema de los entornos parcialmente conocidos. Al intentar superar las principales restricciones inherentes a los AGV, la necesidad de seguir las referencias en el suelo y no encontrar obstáculos en el camino, se ha observado que las técnicas desarrolladas para estos vehículos eran de poca utilidad al aplicarlas en entornos no estructurados. En la investigación en robótica se ha encontrado con que una tarea trivial en un entorno estructurado: pasar de la posición A a la posición B, puede convertirse en un reto para un robot móvil cuando existe incertidumbre en la posición y en la identidad de los objetos que lo rodean. En compensación, no se exige que el robot móvil siga los caminos o alcance los destinos con la misma precisión que cabría esperar en un robot industrial del tipo AGV.

Puede considerarse que las funciones más importantes a realizar por un vehículo que se mueve en entornos no estructurados son:

- Percibir el entorno a través de los sensores.
- Interpretar esta información para mejorar el conocimiento de su posición y de la estructura del entorno.
- Planificar un camino desde una posición inicial a una posición final, en presencia de obstáculos tanto conocidos como desconocidos.

Estas funciones generan un nuevo conjunto de prioridades en la inves-

... ..

tigación sobre vehículos autónomos, que se centran en las áreas de: los sensores, los modelos y los procesos de razonamiento. En este artículo, se pretende hacer una aproximación al problema de los ultrasonidos aplicados al guiado de robots móviles, por lo que se centrará en el tema sensorial, haciendo una breve referencia al modelo del entorno y dejando como un problema aparte al razonamiento o toma de decisiones en el guiado de robots móviles.

2.1 Sistema sensorial

En aquellas aplicaciones en las que la posición del vehículo y el entorno en el que se mueve no se conocen con precisión, el sistema sensorial pasa a ser un requisito indispensable para la navegación. Los sensores que se incorporan a los vehículos se pueden clasificar en dos categorías:

- Sensores para la estimación de la posición y
- Sensores para el reconocimiento del entorno

La estimación de la posición se realiza normalmente con odómetros o con sensores inerciales de guiado. Los odómetros son muy comunes en aquellos robots móviles que se mueven en fábricas u oficinas. Sin embargo, en terrenos abiertos o escabrosos, y en zonas donde es frecuente el deslizamiento de las ruedas, conviene utilizar sensores inerciales de guiado, basados en la medida de aceleraciones mediante acelerómetros. Sin embargo, estos dos tipos de sensores plantean un problema: los errores en la posición se acumulan y crecen sin que se pueda determinar su límite.

Este hecho plantea la necesidad de utilizar métodos que permitan actualizar la posición del vehículo. En algunas aplicaciones se incorporan sensores que reconocen características del entorno y, a partir de ellas, se estima su posición. En aquellas aplicaciones, en que es importante conocer con preci-

sión la posición del robot móvil, se utiliza un sistema basado en un conjunto de balizas que se sitúan en determinados puntos de la fábrica, de forma que conociendo la situación del coche, con respecto a las balizas, y por triangulación, es posible conocer con bastante precisión la posición del vehículo.

Los sensores externos se utilizan para reconocer el entorno del robot móvil: localizar puntos de referencia conocidos, encontrar las zonas con espacios libres y detectar la presencia de objetos tanto conocidos como inesperados. Los dos tipos de sensores externos más utilizados en los robots móviles son los sensores de ultrasonidos y las cámaras de visión.

Los sensores de ultrasonidos se utilizan para detectar obstáculos y medir su distancia. Emiten un pulso ultrasónico cuyo eco reciben al reflejarse en algún obstáculo, pudiendo estimar su distancia al objeto, a partir del tiempo transcurrido entre la emisión y la recepción.

Con estos sensores se obtienen medidas aceptables de la distancia, pero su resolución angular es muy pobre, por lo que la posición del objeto solo se puede conocer de forma aproximada. Cuando el entorno es desconocido, la interpretación de la información proveniente de los sensores de ultrasonidos es particularmente difícil [Anaya, 90] por lo que se utilizan en combinación con otro tipo de sensores, como por ejemplo un sistema de visión.

Las cámaras de visión fueron los primeros sistemas sensoriales con los que se esperaba resolver la mayor parte de los problemas de reconocimiento del entorno. En el ámbito académico hacía ya tiempo que se trabajaba en el tema, y se habían conseguido buenos resultados en el procesamiento de imágenes en medicina, meteorología y reconocimiento de caracteres. Sus resultados no se pudieron transferir directamente al área de los robots móviles, porque en este cam-

po se buscaban algoritmos simples y robustos que se pudiesen utilizar en tiempo real.

El sistema tradicional de fijar cámaras en el área de trabajo se sustituyó por un sistema de cámaras situadas sobre el vehículo autónomo. Este cambio, dotó de mayor flexibilidad y autonomía al robot móvil, pero a la vez planteó el problema de las condiciones luminosas del medio.

Como los sistemas de visión necesitan incorporar algún tipo de iluminación artificial, al desplazarse las cámaras junto al vehículo resulta difícil asegurar que las condiciones luminosas del entorno son siempre las adecuadas.

Independientemente del tipo de sensores externos utilizados, una vez que se han conseguido ciertas medidas sobre el estado del entorno, el problema clave se encuentra en la "percepción", esto es, en relacionar la señal de salida de los sensores con conceptos de alto nivel de abstracción acerca del mundo exterior. Por ejemplo, al considerar un acelerómetro instalado en un motor, este sensor genera continuamente una señal de vibración cuyo análisis puede determinar el estado del sistema: funcionamiento correcto, detenido, distintos tipos de avería, etc.

Los diferentes estados del sistema son los conceptos que es preciso percibir mediante la información sensorial. Con ellos será posible planificar las acciones que permitan alcanzar un determinado objetivo [Ruiz, 90].

La interpretación de datos sensoriales puede expresarse en términos de un problema de reconocimiento: consiste en asignar correctamente el estado, o clase asociada, a un conjunto de datos. El reconocimiento se efectúa en dos pasos: extracción de características y clasificación.

La extracción de características realiza un procesamiento previo de la información, necesario cuando se trabaja con sistemas de sensores

que generan una gran cantidad de datos, o cuando la información que permite determinar el estado del sistema no se encuentra directamente accesible en los datos sensoriales. [Calcedo, 94] [Guinea, 90]. Finalmente, hay que mencionar dos conceptos que son fundamentales en el diseño de sistemas sensoriales: el sensor lógico y la fiabilidad del sistema sensorial. El aporte más innovador, en el campo de los sensores, ha sido la introducción del concepto de sensor lógico realizada por Henderson [Henderson, 94], ya que permite abstraer la información suministrada por el sensor del proceso físico de la medición.

Un sensor lógico es un módulo que transforma las señales de datos que provienen de los sensores en información de salida útil para el control. Este planteamiento permite aplicar distintas estrategias de procesamiento a datos que pueden haberse adquirido con cualquier tipo de sensor. En definitiva, el concepto de sensor lógico incluye la adquisición de los datos sensoriales, su posterior procesamiento y su análisis e interpretación. La fiabilidad del sistema sensorial es de gran importancia porque las acciones del vehículo estarán basadas en la información adquirida e interpretada por el sistema sensorial. Las técnicas para mejorar la fiabilidad combinan las salidas de múltiples sensores o combinan varias observaciones del mismo sensor, siguiendo, en ambos casos, criterios estadísticos.

2.2 Modelos del entorno

Para eliminar la restricción de los AGV, relativa a que las trayectorias del vehículo estén previamente definidas mediante referencias en el suelo, se necesita un modelo del mundo que permita planificar el camino a seguir en función de los objetivos de la misión y de la configuración del entorno.

Los modelos se generan a partir de un conjunto de datos y un formato

de representación. La información que se incluye en el modelo varía considerablemente con el tipo de aplicación. Normalmente contiene información geométrica como las formas y posiciones de los objetos, datos no geométricos que representan características como el tipo de material o el color, e información sobre los movimientos permitidos o las posibles restricciones en los mismos. El nivel de detalle, a incluir en el modelo, es un compromiso entre suministrar información suficiente para que el vehículo pueda llevar a cabo su tarea y que el volumen de datos a procesar no haga los cálculos interminables.

En la mayor parte de las aplicaciones el modelo del mundo que se utiliza es estático y cuando los objetos cambian de lugar se actualizan sus nuevas posiciones. Sin embargo, cuando el vehículo se mueve en entornos parcialmente conocidos, el modelo del mundo normalmente no está completo ni actualizado. En estos casos, cuando aparece un obstáculo desconocido en el camino, es necesario interpretar la información de los sensores para reconocer la forma del objeto y su posición, y así poder incorporarlo al modelo del mundo. Por otra parte, el modelo puede incluir objetos que ya han desaparecido del entorno y que, al considerarlos en la planificación de caminos, generan recorridos que no son óptimos. Por tanto, es conveniente que mientras el vehículo recorre su camino, compruebe que los objetos que se encuentran dentro del alcance de los sensores permanecen en sus posiciones. En aquellas aplicaciones en las que el entorno sufre muchas modificaciones, se incluye entre las misiones del vehículo la exploración del área de trabajo para conseguir un modelo del mundo actualizado.

3. LOS ULTRASONIDOS APLICADOS EN LA NAVEGACION DE ROBOTS MOVILES

En robots móviles los ultrasonidos se aplican, principalmente, para localizar referencias de ambientes, con el fin de ubicar un vehículo en un sistema de coordenadas fijo, con base en la medida de la distancia desde un sensor hasta un objeto determinado.

El procedimiento de medida de distancias con ultrasonidos es bastante conocido y sencillo. Se emite una onda ultrasónica y se mide el tiempo recorrido desde este instante hasta la llegada del primer eco. Este tiempo es conocido como tiempo de vuelo t_v . Si se conoce la velocidad del sonido en el medio (c), la distancia entre el emisor y el objeto, considerado obstáculo, se determina por medio de la siguiente expresión:

$$d = 1/2 (c \cdot t_v)$$

Los sensores de ultrasonidos son adecuados para este tipo de aplicaciones, debido a dos características principales. La primera de ellas se refiere a la forma cuasi-especular como se reflejan. Más exactamente, la onda reflejada sufre una baja dispersión en superficies cuyas irregularidades sean mucho menores que una vez la longitud de onda de la señal ultrasónica, a 50 kHz de frecuencia de resonancia, por ejemplo, la longitud de onda es de 7 mm, para propagación en el ambiente, adoptando una velocidad aproximada para la velocidad del sonido de 348 m/s. Debido a este factor, una gran parte de la señal que incide sobre el obstáculo, retorna hacia la fuente de emisión.

La otra característica, es la direccionalidad de la señal de ultrasonido. Estos transductores son capaces de emitir una energía sonora concentrada en los llamados **lóbulos**

o conos de radiación. De la misma manera, cuando actúan como receptores, presentan una sensibilidad que depende de la dirección de incidencia de la señal ultrasónica. La direccionalidad determina una región en frente del transductor, en la cual puede detectarse un objeto. Esta característica puede modelarse utilizando lentes ópticas que aumentan o disminuyen la direccionalidad, según se requiera en la aplicación, pues una direccionalidad baja, hace que objetos localizados en la región lateral del sensor se ubiquen como obstáculo, mientras si se tiene una alta direccionalidad, el sensor sólo es capaz de detectar superficies localizadas perpendicularmente a él.

3.1 Localización de referencias por ultrasonidos

La forma convencional de aplicación de los ultrasonidos solamente permite determinar la distancia entre el vehículo y los obstáculos que existan en su campo de acción. Sin embargo, es factible utilizarlo para localizar elementos del ambiente, por ejemplo, si se tiene un transductor colocado frente a un obstáculo plano, el transductor puede girar en torno a su eje vertical, en tanto el obstáculo se mantiene fijo. La amplitud del eco recibido tiene un valor máximo cuando el transductor se encuentra orientado perpendicularmente al obstáculo

[Billur, 90]. En esta situación, se tiene un máximo de energía recibida por el transductor, tal como se ilustra en la figura 1.

Si se tiene, ahora, un obstáculo formado por dos planos concurrentes que conforma una esquina cerrada, se notará que la amplitud del eco también pasa por un máximo, cuando el transductor pasa directamente por la esquina [Billur, 90]. Obsérvese, en la figura 2, que la energía acústica retornada por el transductor también pasa por un valor máximo.

Con base en este procedimiento para localizar referencias geométricas del ambiente, se realiza un barrido angular con el sensor de ultrasonido, y se determina la distancia y la amplitud de cada eco. La amplitud puede medirse, por ejemplo, determinando el valor

máximo de pico del eco recibido. Las direcciones para las cuales identifiquen máximos de amplitud, corresponderán a esquinas o paredes, constituyéndose en referencias geométricas del medio. De la misma manera, representando una de estas referencias por un punto P, se puede determinar la distancia d y el ángulo de orientación entre el vehículo y P, como se indica en la figura 3.

3.2 Validez de la medida de α y d

En la figura 4, se observa una manera de obtener la confiabilidad de la medida de distancia d a una referencia geométrica. Supóngase que se mide una distancia, en una cierta dirección α , obteniéndose un valor d_m . Si el valor está únicamente afectado por ruido gaussiano de

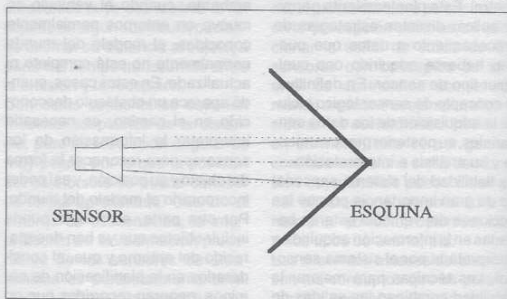


Figura 2. Eco generado por una esquina.

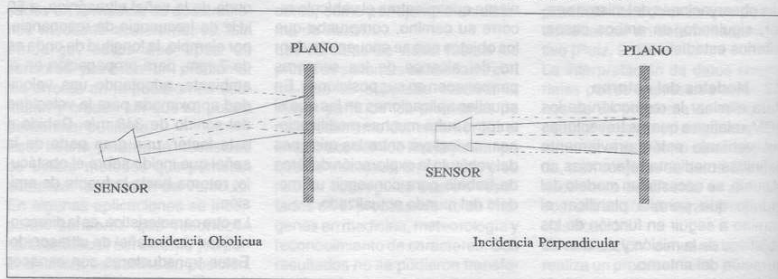


Figura 1. Eco generado por un obstáculo plano.

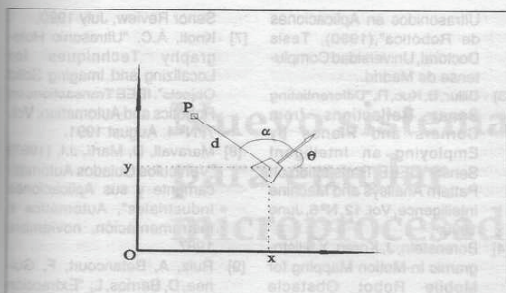


Figura 3. Localización de un punto P a partir del vehículo.

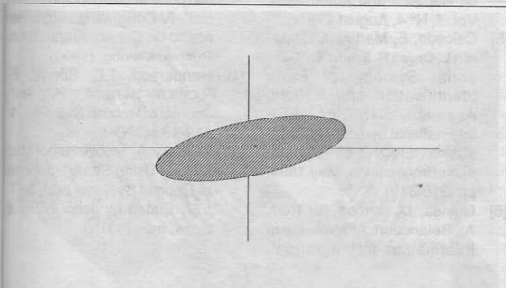


Figura 4. Márgenes de error par localizar una referencia.

medida, la probabilidad de que el punto que representa las medidas caiga por fuera de la elipse será apenas del 0.3%. Cuando esto no ocurre, se puede afirmar con un 99.7% de certeza que d_m fue afectado por otros errores y no corresponde a la distancia d . De esta forma, esta elipse se constituye en una **área de confiabilidad**, y se puede adoptar como un criterio para rechazar medidas efectuadas por los ultrasonidos.

3.3 Incertidumbre en la medida de la distancia d y el ángulo α

Es inevitable la incertidumbre que cualquier tipo de medida de un parámetro del entorno, a partir de la señal de ultrasonido, dada su "fragilidad" ante la temperatura,

humedad y corrientes de aire. En consecuencia, asumiendo esta situación, se debe tratar de discernir un modelo para los errores involucrados en las medidas de y y d . La experiencia en diferentes trabajos de laboratorio muestran que los errores son gaussianos y no correlacionados, por lo que es fundamental obtener las varianzas S_y y S_d . Una distancia obtenida por el método del tiempo de vuelo, en donde el tiempo de vuelo es cronometrado por el sistema de medición ultrasónico, que determina la llegada del eco por un circuito detector, puede modelarse con buena precisión por una distribución gaussiana normal. Es este modelo, la varianza del error en la medida puede obtenerse aplicando procedimiento estadísticos convencionales. Básicamente,

se toman varias medidas con un transductor posicionado frente de un obstáculo, a una distancia fija, de este conjunto de valores se toma su valor medio y su correspondiente desviación estándar.

El error en el ángulo puede medirse con la misma simplicidad, una vez que se ha determinado de forma indirecta, a partir de las amplitudes de los ecos. Inicialmente se determina estadísticamente la dispersión de las medidas de amplitud realizadas por el sistema de ultrasonidos. En este caso, también se posiciona un transductor a una distancia fija del obstáculo y se realizan varias medidas. Se determina la desviación estándar para los valores de amplitud del sistema sensor, demarcándose una franja de error para la medida de la orientación del ángulo de orientación.

4. CONCLUSIONES

Las diferentes experiencias, citadas en la realización de este trabajo, muestran que es posible localizar referencias geométricas con uno o un grupo de sensores de ultrasonidos en ambientes no completamente estructurados. Trabajos de laboratorio muestran que se pueden alcanzar buenas precisiones: desviaciones en la medida de la distancia del orden de 4 mm. y en el ángulo de dirección de 1.5° .

Bajo las condiciones de realización de las diferentes experiencias, se ha demostrado que las paredes son más fáciles de localizar que las esquinas y los obstáculos cilíndricos. Esto se explica porque estas dos últimas referencias geométricas generan ecos más dispersos y por tanto retornan menos energía al transductor.

Dependiendo del tipo de transductor que se utilice, y sobretodo de la frecuencia de resonancia, se puede obtener un buen alcance para la medida de la distancia d de referencia (del orden de 6 metros para paredes y 4 para esquinas). Incluso en condiciones ideales de labo-

ratorio y con transductores de 40 kHz, se ha logrado obtener un alcance del orden de 10 metros. Las experiencias realizadas con las esquinas evidencian problemas con los lóbulos laterales de radiación del transductor. Cuando el sensor está colocado muy próximo a la esquina, el eco proveniente a los lóbulos laterales (reflejado por las paredes que forman la esquina) puede tener la suficiente amplitud como para que se mida la distancia a las paredes laterales y no la distancia a la esquina. La solución a este problema es aumentar la "directividad" del sensor utilizando lentes acústicas que concentran la energía acústica, estrechando el lóbulo de emisión y recepción.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] Albus, J.S., "Robotics: Where has it been. Where is it going?", Robotics and Autonomous Systems, 6,(1990).
- [2] Anaya, J.J., "Utilización de la Respuesta al Impulso para Identificación y Visión por

Ultrasonidos en Aplicaciones de Robótica", (1990), Tesis Doctoral, Universidad Complutense de Madrid.

- [3] Billur, B, Kuc, R, "Differentiating Sonar Reflections from Corners and Planes by Employing an Intelligent Sensor". IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 12, Nº 6, June 1990.
- [4] Borenstein, J, Koren, Y "Histogramic In-Motion Mapping for Mobile Robot Obstacle Avoidance". IEEE Transaction on Robotics and Automation, Vol. 7, Nº 4, August 1991.
- [5] Caicedo, E, Martín, J, Calderón L, Ceres R, Freire T, "Sensorial System for Parts Identification and Robotic Assembly", ISIE'94 IEEE International Symposium on Industrial Electronics. Symposium Proceedings, May 1994, pp. 316-319.
- [6] Guinea, D, Barrios, L., Ruiz, A., Betancourt, f, "Multisensor Information Int™egration",

Senor Review, July 1990.

- [7] Knoll, A.C. "Ultrasonic Holography Techniques for Localizing and Imaging Solid Objects". IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 7, Nº 4, August 1991.
- [8] Maravall, D, Martí, J.I, (1987) "Vehículos Guiados Automáticamente y sus Aplicaciones Industriales", Automática e Instrumentación, noviembre 1987.
- [9] Ruiz, A, Betancourt, F, Guinea, D, Barrios, L, "Extracción de Características Sensoriales para la Percepción Artificial", IV Congreso Latinoamericano de Control Automático, Puebla, México. (1990).
- [10] Henderson, T.C, Silerat, E. "Logical Sensor Systems", Journal of Robotic Systems, 1, 169-193.(1984).
- [11] Zelinsky, A "Mobile Robot Map Making Using Sonar", Journal of Robotic Systems 8(5), 557-577. Edited by John Wiley & Sons, Inc.(1991)



SEMINARIO INTERNACIONAL SOBRE TRANSITORIOS Y ALTA TENSIÓN Abril 24 - 27 de 1996

CONFERENCISTAS:

Dr. K.J. Cornick

Umist - Inglaterra

Dr. Pawel Sowwa

Universidad Técnica de Gliwice

Polonia

Dr. M. Rubinstein

Epfl - Suiza

Grupo de Investigación

en Alta Tensión

Univalle - Colombia

Temas: Análisis y simulación de transitorios en sistemas de potencia, pruebas en alta tensión, experiencias en diseño y construcción de equipos de alta tensión.

Informes: Laboratorios de Alta Tensión - Univalle

Tels: 3321948 - 33342252

E-mail: alta@maxwell.univalle.edu.co

Posgrado en Ing. Eléctrica, Electrónica y Computación.

Tel: 3392140 **Fax:** 33923361