

SENSOR ULTRASÓNICO ROTATIVO PARA EL LEVANTAMIENTO DE ENTORNOS UTILIZANDO LA TÉCNICA DE TIEMPO DE VUELO (T of F)

RESUMEN

El presente trabajo describe las diferentes técnicas de construcción de mapas de entorno, para aplicaciones en robótica móvil; Muestra los mapas de entornos típicos obtenidos por un módulo de sensor ultrasónico rotativo, diseñado y construido, el cual será utilizado por una plataforma móvil.

PALABRAS CLAVES: Mapas de entorno, sensor ultrasónico rotativo, plataforma móvil.

ABSTRACT

The present work describes different methods of map building of environments for mobile robot navigation; show maps of typical environments obtained for the rotating sonar module designed, which, to be used in a mobile platform.

KEYWORDS: Environment, mobile platform, rotating sonar module.

RODRIGO MEJÍA

Ingeniero Electricista
Universidad Tecnológica de Pereira
Mejia2001@hotmail.com

LUIS HERNANDO RÍOS

Ingeniero Electrónico, MsC.
Profesor Titular
Universidad Tecnológica de Pereira
lhgonza@utp.edu.co

GERMÁN ANDRÉS HOLGUÍN

Ingeniero Electricista
Profesor Asistente
Universidad Tecnológica de Pereira
gahol@utp.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

Un modelo del mundo, es una representación simbólica basada en un mapa de entorno, a partir de la información suministrada por los sensores; Dicho modelo está lleno de incertidumbre y su cálculo requiere una gran cantidad de tiempo y de recursos, independientemente de la tarea que se vaya a realizar.

Históricamente, la construcción de un mapa del entorno se había considerado una de las labores básicas que un robot debía llevar a cabo dada su necesidad de tener un modelo del entorno. De esa forma había un bucle de control básico consistente en utilizar los sensores para percibir el entorno, y posteriormente utilizar dicho modelo para planificar las acciones.

En Investigaciones en robótica móvil se plantean algunos interrogantes como:

- Cuál es el grado de necesidad de un modelo del entorno para un robot?
- Cuál es el mejor modelo?

La tarea a realizar por el robot es decisiva a la hora de utilizar un modelo del mundo o no. Así, se tienen situaciones donde es necesario un sistema reactivo, otras en el que se requiere un sistema deliberativo, pero ambas son situaciones extremas, ya que será más habitual encontrarse con situaciones o problemas donde se requiera un sistema híbrido reactivo-deliberativo. En este caso el problema a definir es la interfaz de comunicación entre un sistema reactivo y un sistema deliberativo.

Hasta ahora los modelos del mundo se han utilizado generalmente en modelos deliberativos o mixtos y en muchas ocasiones son modelos heredados de otros sistemas fuertemente anclados en la representación simbólica. Pero poco a poco van surgiendo otros modelos basados en sistemas biológicos más cercanos a las sensaciones y actuaciones.

La clasificación que se ha realizado clásicamente de los distintos tipos de mapas de representación del entorno viene dada en función de la cantidad de información geométrica entre los elementos que forman dicho mapa. En cualquier caso esta clasificación no es estricta y puede ocurrir que determinadas implementaciones recaigan en más de una clase.

2. MAPAS DE ENTORNO

2.1 Mapas de Localizaciones (Marcas)

Los mapas de localizaciones son aquellos donde no existe información geométrica entre los elementos del mismo, sino una lista de localizaciones o lugares (marcas) que pueden ser reconocidas por el robot. Kuipers y Byun utilizan en [2], el concepto de “*distinctive places*”, en el cual, determinadas propiedades de las medidas son definidas como medidas diferenciadoras, de forma que se trata de maximizar esta característica entre los “*distinctive places*”. En general esta es la estrategia adoptada en estos mapas. Donnett [3], en su trabajo utiliza una combinación de datos provenientes de distintos sensores (ultrasonidos, infrarrojos, sonido) midiendo intensidad, dirección y distancia. Con lo cual el robot es capaz de identificar los lugares en los que ya ha estado mediante las medidas almacenadas y las que

percibe. Este proceso de *matching* tiene lugar mediante la utilización de probabilidad Bayesiana.

Otra aproximación es aquella en que se incluyen como fuente de información para la localización los movimientos del robot. Nehmzow y Smithers en [4] describen este método, donde la respuesta de los sensores de distancia se utilizan para el reconocimiento por ejemplo, llevando a cabo un movimiento de seguir un muro y midiendo el tiempo transcurrido entre giros, se presenta esta información a una red neuronal. Otro trabajo en el que se utilizan redes neuronales para el proceso de identificación de lugares es el de Kurz [5]. En este se utiliza el termino “situation areas” para referirse a lugares del espacio donde la entrada de los sensores tiene valores similares.

Mataric en [6] muestra los resultados de un trabajo donde se combina la información del movimiento con la de sensores. Por ejemplo: un pasillo es una combinación de movimiento hacia delante e información de sensores de proximidad por los lados de cercanía de pared. También en este caso se utiliza una brújula para orientar los lugares que son marcas (pasillo orientado al norte).

Como se observa, estos mapas son adecuados cuando la capacidad sensorial del robot le permite identificar las marcas, si estas son diferenciables y visibles en el espacio de trabajo.

2.2 Mapas Topológicos

Dado que la condición de visibilidad no suele cumplirse en un entorno más o menos real, muchos de los trabajos comentados anteriormente son ampliados para incluir la información de adyacencia entre marcas.

Un enlace entre dos marcas supone que el robot puede ir de una marca a otra. Este enlace se puede añadir sólo si el robot lo ha realizado previamente. En muchas ocasiones el proceso de establecer los enlaces entre marcas es paralelo al de identificación de las mismas. En [6], al mismo tiempo que se recorren los pasillos identificando marcas, éstas se enlazan en un mapa topológico.

En el trabajo de Kurz [5], el mapa topológico se construye en dos pasos. En primer lugar se identifican las “situation areas” y posteriormente se busca un camino entre ellas explorando el entorno. Si se encuentra se añade el enlace en el mapa topológico.

2.3 Mapas Topológicos con Métrica

Son una extensión de los anteriores añadiendo información métrica, normalmente longitud de los caminos entre marcas y orientación de dichos caminos. Con esta información es posible llevar cabo una planificación de trayectorias más eficiente. Además si la

información de conexión entre marcas no había eliminado toda posibilidad de ambigüedad, con la información métrica esta posibilidad queda prácticamente descartada.

2.4 Mapas de Métrica Completa

Los mapas de métrica completa se subdividen en:

- De Características: El mapa es una lista de características básicas (esquina, muro, cilindro), así como sus propiedades (localización, orientación, tamaño).

- De Área o Rejillas: El entorno se divide en un número de regiones, normalmente cuadradas y de igual dimensión. A dicha región se le atribuye una o varias propiedades. Normalmente, si está ocupada o no.

La elección de que tipo de mapa utilizar no es sencilla y en ambos casos hay mucha investigación realizada. Pero hay algunas características que deben ser tenidas en cuenta:

En entornos densos con muchos obstáculos las representaciones orientadas al área son más compactas que las de características. Sin embargo en entornos con mucho espacio libre las representaciones de características son más eficientes.

Las aproximaciones orientadas al área se enfocan hacia la representación del espacio libre. Por este motivo la planificación de trayectorias para evitar obstáculos es más eficiente.

Por contraste, los mapas de características ponen más atención en los obstáculos, haciendo así más difícil la tarea de planificar trayectorias. Estos últimos también son más utilizados para localización en el entorno.

2.4.1 Mapas de Características (Feature Maps)

Normalmente los mapas asumen que el mundo puede ser modelado en 2D. Esto suele ser suficiente sobre todo cuando el entorno a modelar es construido por los humanos. Al mismo tiempo se consigue una simplificación enorme con esta suposición a nivel de sensores y a nivel de complejidad de representación y cómputo.

Crowley en [7] asume esta representación 2D y modela el mundo como una colección de líneas con la información obtenida de un sensor de sonar. Posteriormente se aplicaba un algoritmo de extracción de segmentos recursivo, teniendo cada segmento un valor de certidumbre.

Cox en [8] también asume el mundo formado por líneas, aunque su robot partía de un mapa del entorno previamente conocido. Su misión era identificar las líneas que aparecían en el mismo mediante un sensor de

infrarrojos, y de esta forma estimar su posición. En ningún caso se añadían al mapa nuevas líneas.

En [8] bajo la misma premisa de un mundo representable en 2D, se construye un mapa pero con líneas, puntos y arcos. Dado que el trabajo en sí se centra en la localización del robot, estos elementos son tratados como marcas que el robot puede detectar y utilizar para la navegación.

2.4.2 Mapas de Rejilla (Grid Maps)

Bajo esta denominación encontramos un conjunto de trabajos cada uno con una denominación distinta como "Occupancy grids", "Certainty grids", "Probability Maps", "Histogramic grids" y "Inference grids" [10], [11], [12]. Todos ellos tienen en común que se divide el espacio en una retícula, donde cada elemento de la misma (celda) tiene asociado uno o varios valores que representan una propiedad, normalmente ocupación. Las diferencias se basan en:

- Qué forma deben tener las celdas.
- Qué valor numérico (propiedad) debe almacenarse.
- Cómo deben actualizarse estos valores, conforme el robot explora el entorno.

La mayoría de los mapas de "grid" utilizan representaciones con celdas de igual tamaño, con una localización basada en coordenadas cartesianas. El valor a almacenar en cada celda es también un elemento diferenciador. En sus primeros trabajos, Elfes utilizaba valores de ocupación discretos (ocupado, libre, desconocido) y un valor de certidumbre en la característica variable de 0 a 1. En los últimos trabajos los valores de certidumbre son tratados más como valores de probabilidad que miden la ocupación de la celda. Lim sigue una línea similar pero añadiendo también un valor de probabilidad de orientación, dada la dependencia del comportamiento respecto a la señal de ultrasonidos de la orientación respecto al emisor. Borenstein en su trabajo [9] se centra en la tarea de evitar obstáculos con restricciones temporales estrictas. Por este motivo utiliza un grid con valores enteros llamados "certainty values" que pueden ir de 0 a 15.

La actualización de los "grids" se lleva a cabo con la fusión de la última información recibida de los sensores y la existente en el mapa. Si en el mapa se representan probabilidades de ocupación es importante tener un modelo probabilístico del sensor.

Normalmente todos los modelos utilizados en la literatura asumen una confianza en la medida mayor cuanto más próxima al centro del cono del sensor.

3. SENSOR ULTRASÓNICO ROTATIVO PARA EL LEVANTAMIENTO DE ENTORNOS

UTILIZANDO LA TÉCNICA DE TIEMPO DE VUELO (T OF F)

El sensor rotativo se compone de las siguientes etapas de hardware.

- Control de motores encargado de la orientación de sensores
- Tarjeta de emisión y recepción encargada de la generación de señales y la adecuación de las mismas
- Tarjeta LAB PC 1200 encargada de la emisión de señales digitales provenientes del PC, así como de la recepción de señales análogas
- Software desarrollado en **LabView**, el cual es capaz de controlar el movimiento de la cabeza ultrasónica para realizar la exploración, así como de recibir mensajes, interpretarlos y a partir de ellos sacar respuestas visuales y numéricas.

3.1 Descripción del Funcionamiento

La cabeza sensora gira 360°, en 200 pasos de 1.8°. El movimiento de la cabeza es realizado por un motor paso a paso Motor PAP.

La rutina inicial posiciona el transductor en la posición cero, e inicia la emisión. La forma de la señal que se emite, está supeditada a las características de los transductores emisor y receptor, la precisión deseada, y los algoritmos aplicados.

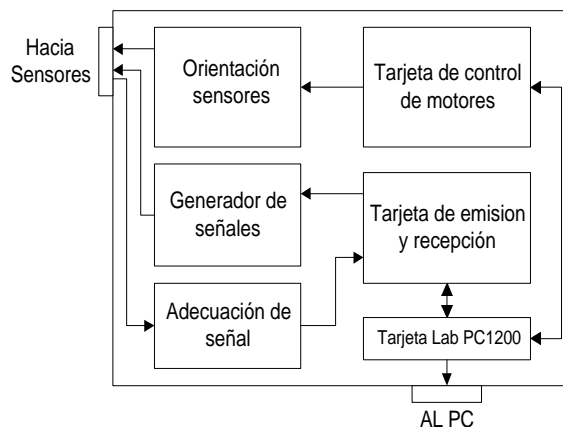


Figura 1. Esquema general de funcionamiento

La señal emitida será una serie de trenes de pulsos senoidales modulados en amplitud, que siguen la ecuación.

$$v(t) = V_0 t^m e^{-\frac{t}{h}} \cos(\omega_c t + \Theta) \tag{3.1}$$

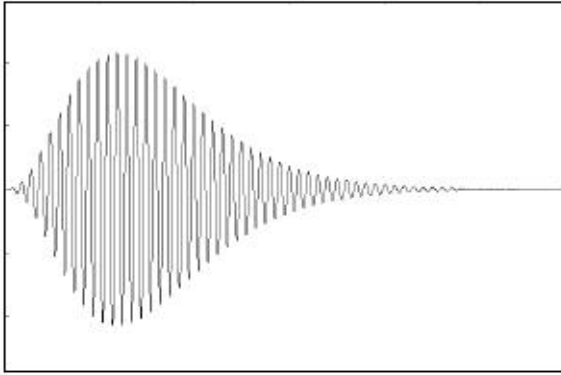


Figura 2. Tren de pulsos mecánicos emitidos para el transductor

La forma de onda mostrada en la figura 2 es la idónea para trabajar con algoritmos basados en técnica de umbral, ya que la señal va de un valor mínimo, hasta alcanzar un máximo.

Una vez emitido el tren de pulsos, éste se propaga por el aire de forma similar a como lo hace el sonido. En una primera aproximación, se considera como válido decir que el valor de la velocidad de propagación es independiente de la frecuencia, y su valor en el aire es de 331,4 m/s. Sin embargo este valor de la velocidad no es cierto para cualquier condición del medio, sino que depende de la temperatura y de la presión mediante la relación.

$$c = \sqrt{\frac{gr}{r}} = \sqrt{\frac{Vgr}{M}} = \sqrt{\frac{RTg}{M}} \quad (3.2)$$

Expresión que se puede linealizar como:

$$C = 167.2 + 0.6T \quad (3.3)$$

Para un rango de temperaturas de $[-10^{\circ}\text{C}, 40^{\circ}\text{C}]$.

Otro aspecto a tener en cuenta es la atenuación de los ultrasonidos. La atenuación es el resultado de absorción de energía por el medio, y de la pérdida de energía durante el trayecto de la onda, por reflexión, refracción, difracción y dispersión. Esto implica que la señal se atenúa en función de la distancia que tenga que recorrer, por lo tanto hay que tenerlo en cuenta a la hora de recuperar la señal.

Por lo que respecta a la potencia de la señal ultrasónica que llega al receptor, dependerá entre otras cosas de la configuración geométrica empleada en el sistema. Los dos casos extremos son la "fuente puntual" que transmite o radia la potencia uniformemente en todas direcciones, y la "onda plana" o rayo ultrasónico generado por el transmisor. En la práctica no existe ninguna de las dos situaciones.

Si se trata de una fuente puntual, la cantidad de potencia que llega al receptor por unidad de área es mostrada en la ecuación 3.4 y se corresponde con la ecuación del radar. De esta ecuación se deduce que para duplicar el alcance, hay que aumentar 16 veces la potencia transmitida, es decir un incremento de 12 dB.

$$P_r = \frac{SP_t}{16p^2 r^4} \quad (3.4)$$

El eco al viajar por el entorno próximo habrá chocado contra multitud de objetos, si estos tienen una impedancia acústica lo suficientemente alta como para que su eco llegue al receptor en condiciones, este será identificado. Ahora bien nos interesará normalmente el primer eco, ya sea para el cálculo de la distancia como para la identificación del entorno, esto es así, puesto que para el cálculo de la distancia, deseamos la distancia del primer objeto, y no al resto, y en la identificación del entorno, el primer objeto si es lo suficientemente duro reflejará la mayor parte de la energía emitida.

El bloque de recepción posee dos etapas de amplificación, la primera ganancia aplicada es -100 complementado después con una ganancia de -10 para finalmente obtener una ganancia global de 1000.

Esta señal amplificada es aplicada a un demodulador coherente, que nos permite, por una parte submuestrear la señal pudiendo recuperarla posteriormente, y por otra impide que el ruido tenga componente continua. Este modulador divide la señal en sus componentes real e imaginaria que después de filtrarse por medio de dos filtros pasa-bajo son aplicadas a los convertidores A/D que discretizan la señal para su posterior tratamiento digital.

La etapa de conversión la forma la tarjeta de adquisición de datos LAB PC 1200 de la *Nacional Instrument* encargada de la captura simultánea de los dos canales. Tras la captura, en la memoria del sistema se almacenan las 512 muestras (256 por cada canal), que se corresponden, a una frecuencia de muestreo de 10457.516 Hz, con un tiempo de vuelo de 24.48 ms, que equivale en longitud a 7.8336 metros, considerando la velocidad del ultrasonido en 320 m/s. Hay que tener en cuenta que el tiempo de vuelo incluye la ida y vuelta, y que esos 7.8336 metros nos permiten detectar objetos a una distancia de hasta 3.9 metros.

Una vez la señal ha sido capturada, el sistema debe tratar digitalmente esta señal en función de la operación programada. A esta señal se le calcula su módulo y se filtra, se detecta la posición de primer eco y su valor, a continuación se toman diez valores hacia delante y atrás del primer eco, valores que son linealizados.

Este punto se corresponde, en muestras, con el tiempo de vuelo de la señal. El cálculo de la distancia, en metros, se simplifica a sustituir en la siguiente ecuación las variables por sus valores correspondientes

$$d = \frac{c * P}{2 * f} \tag{3.5}$$

siendo:

c, la velocidad del sonido en metros.

P, el número de muestra del principio del eco.

f, frecuencia de muestreo.

4. SOFTWARE

El software desarrollado para la cabeza ultrasónica fue desarrollado en **LabView**, dicho software permite trabajar con la tarjeta de adquisición Lab PC 1200.

La tarjeta de adquisición Lab PC 1200 tiene las siguientes características: tres puertos digitales cada uno de 8 bits los cuales pueden programarse como entrada o salida, y ocho puertos A/D.

El programa realizado presenta un panel de control versátil, el cual le permite al usuario interactuar con el sistema accediendo al control de los procesos allí ejecutados.

El programa principal se divide en diferentes subprogramas los cuales a su vez contienen programas individuales, estos programas son:

- Calibración de motor.
- Toma de muestras, tablas, etc
- Mapa de entorno.

5. RESULTADOS

El software desarrollado grafica el mapa de entorno de la exploración realizada y regresa la cabeza ultrasónica a su posición inicial, en esta etapa se tienen tres formas distintas de ver el mapa de entorno obtenido:

- Mapa de entorno 1: muestra la vista superior del entorno, en el cual podemos apreciar las distancias de los objetos o paredes circundantes a la cabeza ultrasónica, en un mapa métrico. Ver figura 3.

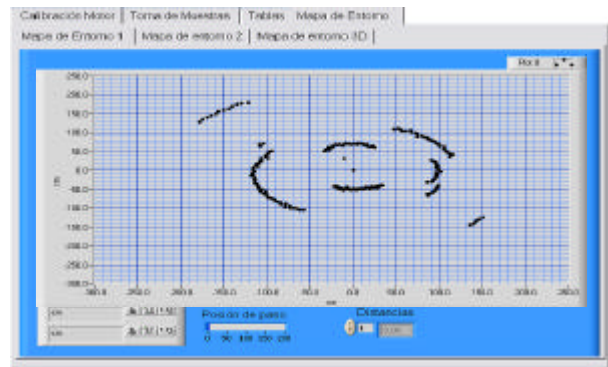


Figura 3. Mapa de entorno 1

- Mapa de entorno 2: Muestra la grafica de amplitud vs. posición mostrando la vista lateral del entorno, la cual da la idea del centro de los objetos o paredes detectados en la exploración de acuerdo a su amplitud. Ver figura 4.

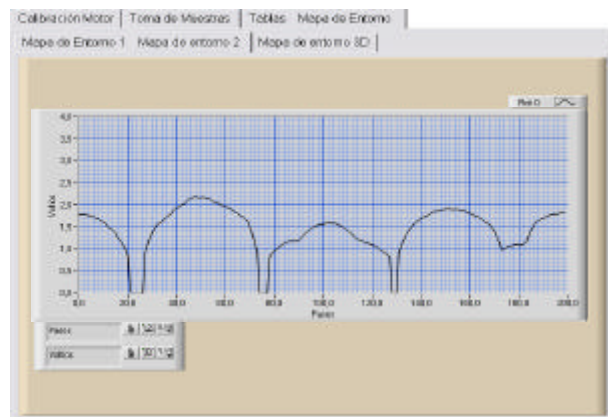


Figura 4. Mapa de entorno 2

- Mapa de entorno 3D: como su nombre lo indica se trata de un mapa del entorno en tercera dimensión, el cual presenta una idea mas clara del entorno explorado. Ver figura 5.

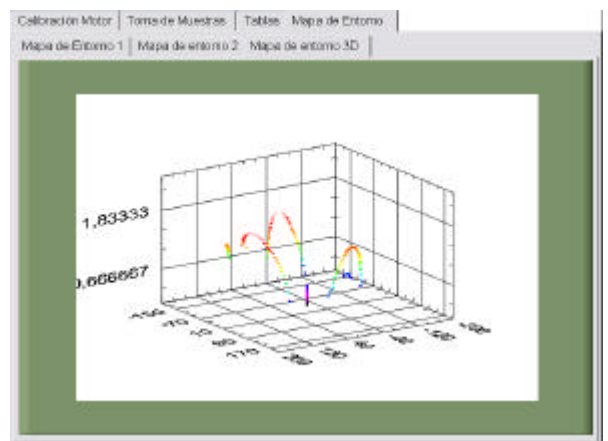


Figura 5. Mapa de entorno 3D

La construcción de cada uno de estos mapas se hace basados en los datos de una matriz de datos llamada *matriz final*, de la cual se toma el máximo presente en cada fila, este máximo puede representar un objeto.

El cálculo de la distancia, en metros, se simplifica a sustituir en la siguiente ecuación las variables por sus valores correspondientes

$$d = \frac{c * P}{2 * f} \quad (5)$$

siendo:

c, la velocidad del sonido en metros.

P, el número de muestra del principio del eco.

f, frecuencia de muestreo.

Con el valor de distancia encontrado para cada paso, se prosigue a representar el mapa de entorno del respectivo escenario explorado.

Los resultados obtenidos se desarrollaron a partir de la creación de un escenario, con las siguientes características: Eje X, largo: 210cm; Eje Y ancho: 120cm. El escenario se encuentra rodeado de paredes en diferentes materiales: Una en concreto, dos de madera y una en madera e icopor, material que compone una pequeña parte de esta pared.

El escenario se divide en rejillas de 10 x 10cm. La figura 6 muestra el escenario descrito.

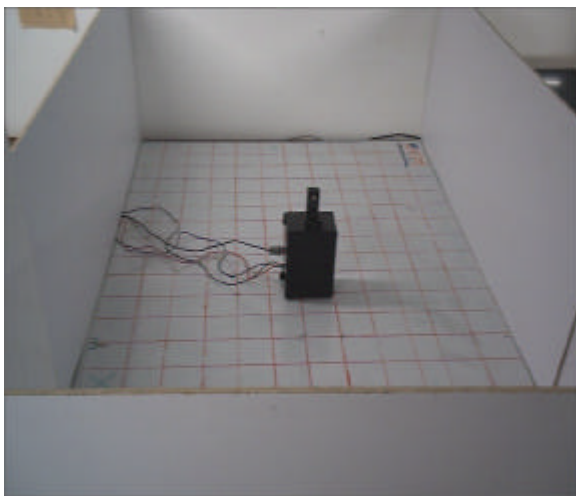


Figura 6. Escenario real explorado

El programa finaliza colocando la cabeza ultrasónica en la posición cero para lo cual se basara en el programa mencionado anteriormente de *calibración de motor*.

6. CONCLUSIONES

Se diseñó la base experimental para el levantamiento de mapas de entorno, a partir de la información proporcionada por un sensor de ultrasonido.

Se obtuvo la información necesaria del entorno a través de una matriz de datos de 200x256, la cual se utilizará en procesos posteriores, para el levantamiento de mapas del entorno explorado.

Se utilizó la técnica tiempo de vuelo (T of F) y se aplicó un algoritmo de promedio para medición de distancias con sensores de ultrasonido, con la cual se obtuvieron muy buenos resultados, lo cual va a permitir el procesamiento en tiempo real de la señal obtenida del entorno.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] BENET Gines; BLANES. "Map building intelligent sensor for an autonomous vehicle". Departamento de ingeniería de sistemas, universidad politécnica de valencia. 1996.
- [2] KUIPERS, Benjamin and BYUN, Yung-Tai. A robot exploration and mapping strategy based on a semantic hierarchy of spatial representations. *En* : Journal of Robotics and Autonomous Systems. No. 8 (1991); p. 47-63.
- [3] DONNET, J.G. Analisis and synthesis in the design of locomotor and spatial competences for a multisensory mobile robot. 1992. Dissertation (Ph.D). University of Edinburgh.
- [4] NEHMZOW, Ulrich and SMITHERS, Tim. Map building using Self-organising networks in really useful robots. *En* : Internal Report. Dep. Art. Intelligence. University of Edinburgh.
- [5] KURZ Andreas. "Constructing maps for mobile robot navigation based on ultrasonic range data" IEEE Transactions on systems, man and cybernetics. Vol 26, n° 2, April 1996.
- [6] MATARIC Maja. Interaction and intelligent behavior. Technical Report AI-TR-1495, MIT Artificial Intelligence Laboratory, 1994.
- [7] CROWLEY, James L. Dynamic modeling of free space for a mobile robot. *En* : Proc IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and systems. (1989).
- [8] COX, I.J. An experiment in guidance and navigation of an autonomous robot vehicle. *En* : IEEE Transactions on Robotics and automation. Vol. 2, No. 7 (1991); p. 193-204.
- [9] BORENSTEIN Johann and KOREN, Y. Error eliminating rapid ultrasonic firing for mobile robot obstacle avoidance. *En* : IEEE Transactions on robotics and automation. Vol. 11, No. 1 (Febrero 1995).
- [10] THRUN Sebastian, BUCKEN Arno, BURGARD : Map Learning and HighSpeed Navigation in RHINO. AIbased Mobile Robots: Case studies of successful robot systems. MIT Press, D. Kortenkamp, R.P. Bonasso, and R.R. Murphy(eds), 1997.
- [11] THRUN Sebastian : Learning occupancy grids with forward models. In Proceedings of the Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'2001), Hawaii, 2001.
- [12] ELFES A. : "Sonar Based Real World Mapping and Navigation". IEEE Journal of Robotics and Automation. Vol 3, n° 3. 1987.