

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA SENSORIAL BASEADO EM  
ULTRA-SOM PARA AUXILIAR O SISTEMA DE NAVEGAÇÃO DE  
ROBÓS-MÓVEIS**

**Fabio de Sales Guerra Tsuzuki**

**Julio Cesar Adamowski**

**Lucas Antonio Moscato**

**Escola Politécnica da USP**

**PMC - Mecatrônica**

**Caixa Postal 8174**

**05508 - São Paulo - BRASIL**

**Serviço de Bibliotecas**  
**Biblioteca de Engenharia Mecânica, Naval e Oceânica**

**RESUMO**

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema sensorial baseado em ultra-som para ser utilizado em robôs-móveis. O sistema sensorial localiza e identifica pontos de referência como cantos, quinas e paredes. A sequência de sucessão desses elementos é utilizada para localizar o robô dentro do ambiente. A identificação dos pontos de referência é feito por software através do processamento de um conjunto de amostras fornecidas pelo sistema sensorial. O sistema é baseado em estéreo acústica e possui três transdutores alinhados horizontalmente. O transdutor central opera como transmissor/receptor e os transdutores laterais operam apenas como receptor. A posição e a orientação das fontes de eco são obtidas através de uma triangulação utilizando as medidas de tempo de trânsito do primeiro eco recebido em cada transdutor do sistema.

**ABSTRACT**

This paper introduces the development of a sensorial system for mobile robot, based in airborne ultrasonics. This sensorial system provides reference points from the environment such as edges, corners and walls. The sequence of succession of these elements is used for the robot localization. The recognition of the reference points is processed by software algorithm. The reference points are obtained by processing the time-of-flight (TOF) and the intensity of the first received echo provided from the sensorial system. The system is based in stereo acoustics and has three transducers. The position and orientation of echo sources is calculated by processing time differences and intensity differences. This system is a result from the study of the bats echolocation system.

**Keywords:** ultra-som, robôs-móveis, sensores, exploração de ambientes.

**1. Introdução**

A evolução da robótica está impulsionando bastante a construção de robôs-móveis. Especialmente devido ao desafio que representa construir máquinas com capacidade de realizar viagens sem a intervenção do homem. Este é um indicativo do impacto que estes robôs causarão no futuro.

Normalmente a palavra robô-móvel designa robôs capazes de realizarem viagens de forma autônoma. Os robôs-móveis recebem informações e comandos e um nível relativamente alto convertendo-os em ações de baixo nível. Eles precisam ser capazes de adquirir informações a respeito do ambiente de trabalho para desenvolver as ações necessárias que completam o comando pedido, sem a necessidade da intervenção humana. O robô deve ser capaz de planejar os seus próprios movimentos sendo necessária

uma interação efetiva com o meio ambiente, como uma realimentação em alto nível. Por definição um robô-móvel exclui teleoperadores, e a capacidade de raciocínio (decisão) tem sido uma característica destes robôs.

Os avanços nesta área de pesquisa estão muito relacionados com o desenvolvimento de sistemas sensoriais. Existem muitos tipos de sistemas sensoriais em utilização, entre eles, os sistemas baseados em ultra-som têm se destacado bastante. Sistemas sensoriais ultra-sônicos podem ser explorados de diversas formas, como por exemplo através da configuração dos transdutores, da sua implementação, do processamento de sinais, das características dos transdutores, etc.

Este trabalho apresenta o sistema sensorial que está sendo implementado para ser colocado no robô-móvel em fase de desenvolvimento em nosso

**Departamento.** O robô deve operar em ambientes fabris no transporte automático de materiais. A seguir são apresentadas duas diferentes abordagens que exploram a utilização do ultra-som no sistema sensorial de robôs-móveis.

## 2. Fundamentos do Sistema Sensorial

Conforme a abordagem de Drumheller (1987), o contorno do sonar é definido como o contorno fechado obtido com uma varredura de 360° do sonar, e os raios do sonar são as linhas que partem da posição do robô e terminam nos pontos correspondentes às leituras do sonar. Miler (1984) descreve uma abordagem para localizar o robô utilizando apenas os raios do sonar, essa abordagem segue o método de Gaston, Grimson e Lozano-Pérez (1984, 1985).

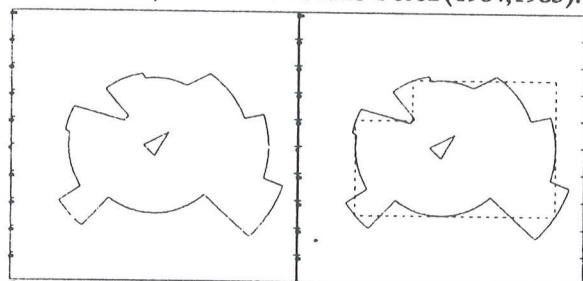


Fig1: O contorno do sonar

Fig2: A abordagem de Drumheller

Drumheller apresentou em seu artigo uma nova idéia, que foi designada por teste da barreira do sonar ("sonar barrier test"). O teste da barreira do sonar faz uma consistência física verificando se o perfil do contorno do sonar não penetra em objetos sólidos. Caso uma inconsistência seja encontrada a posição que está sendo conferida é descartada. Esta abordagem também segue o método de Gaston, Grimson e Lozano-Pérez, e a principal diferença em relação à abordagem de Miler está na utilização dos segmentos do sonar, que são linhas retas extraídas a partir do contorno do sonar.

A configuração do robô em relação ao contorno do sonar sempre é conhecida, desta forma se uma possível configuração para o contorno do sonar em relação ao ambiente é determinada, então, pela reciprocidade, uma possível configuração para o robô em relação ao ambiente é encontrada. O processo de localização segue quatro passos:

- 1) Extrair segmentos do sonar das leituras fornecidas pelo sonar.
- 2) Utilizando os algoritmos de Grimson e Lozano-Pérez combinar o contorno do sonar com o mapa do ambiente, conhecido a priori. Os algoritmos fornecem um conjunto de interpretações onde cada interpretação corresponde a uma lista de pares ordenados segmento do sonar - parede. Cada interpretação implica em uma diferente configuração do robô.
- 3) Seleção das configurações plausíveis através do teste da barreira do sonar. Toda configuração

plausível implica que qualquer raio do sonar não penetra em um objeto sólido conhecido.

- 4) Caso persistir múltiplas interpretações a heurística de contato máximo escolhe a interpretação que coloca o contorno do sonar em máximo contato com as paredes.

Esta abordagem não localiza objetos no ambiente nem identifica-os, uma abordagem que resolveria problemas desse tipo foi proposta por Elfes (1987).

Elfes desenvolveu um sistema baseado em sonar para mapear o mundo real. O sistema processa o TOF da onda ultra-sônica. Esta abordagem pode ser utilizada para localizar o robô no ambiente entretanto ela foi desenvolvida objetivando a exploração de ambientes.

As medidas fornecidas pelo sonar a partir de diversos pontos de vista, possível através do uso de múltiplos sensores e das diferentes posições ocupadas pelo robô com o decorrer do tempo, são integradas no mapa do sonar. É utilizado um modelo probabilístico para o sensor. As equações de estimativa bayesiana fornecem uma atualização incremental do mapa do sonar.

O mapa resultante apresenta regiões provavelmente ocupadas, provavelmente vazias, e regiões desconhecidas. Ele pode ser usado em planejamento de trajetórias, estimativa da posição do robô, reconhecimento de acidentes, navegação, etc.

Este sistema necessita de muitas amostras para determinar a posição efetiva dos objetos (região ocupada) pois ele é baseado em processos estocásticos.

### 2.1 Sistema Sensorial

O sistema sensorial deve ser capaz de detetar a existência de paredes, cantos (ângulo reto côncavo entre paredes) e quinas (ângulo reto convexo entre paredes). Kuc (1987) desenvolveu um sistema para simulação de sonares baseado em teoria de sistemas lineares e acústica. Os fenômenos que participam da geração do eco e que influenciam a medida do tempo de trânsito ficam bastante claros conforme a exposição feita por Kuc. Da teoria de sistemas lineares é utilizado o conceito de resposta ao impulso e o princípio de superposição. Da acústica é utilizado o princípio de Huygens e a aproximação para campo distante para determinar reflexões de cantos, quinas e paredes.

A onda ultra-sônica sofre essencialmente o fenômeno de reflexão especular. Desta forma, um elemento que esteja isolado, gera um arco cuja extensão é definida por dois parâmetros, um parâmetro é a frequência de operação do transdutor e o outro parâmetro é a tensão de referência que determina o cruzamento com zero de forma a definir o instante de chegada do primeiro eco. A porção refletora de um elemento isolado está no centro do arco, uma posição bastante definida. Quando o elemento não está isolado os arcos associados a cada elemento superpõem-se e a tensão de referência define os saltos de um arco para o outro.

A simulação do modelo de Kuc mostra que elementos como paredes, cantos e quinas não podem ser identificados utilizando apenas a medida do tempo de trânsito obtida com um único transdutor, apenas a sua posição pode ser determinada.

O sistema sensorial a ser apresentado é resultado do estudo do sistema de ecolocalização dos morcegos. Como os pássaros os morcegos também voam com bastante destreza. Apesar dos pássaros nunca terem desenvolvido um substituto adequado para a visão, os morcegos utilizam sua laringe e seus ouvidos para a produção de som e sua detecção subsequente discriminando objetos satisfatoriamente na mais completa escuridão. Os morcegos emitem pulsos ultra-sônicos através da boca aberta ou através das narinas e aguardam o retorno do eco proveniente do mundo que os rodeia.

Desta maneira os morcegos detetam movimentos, distâncias, posições, e algumas características dos objetos que refletiram a onda ultra-sônica como sua forma, tamanho e textura. O estudo do sistema de ecolocalização dos morcegos é bastante interessante e fundamenta a utilização de algumas idéias possibilitando o desenvolvimento de novos sistemas sensoriais.

Os morcegos medem distâncias através do tempo de trânsito da onda ultra-sônica, que corresponde ao intervalo de tempo que inicia com a emissão do pulso e termina com a recepção do primeiro eco. Já foi verificado que os morcegos diferenciam intervalos de tempo menores que 60 microsegundos, o que corresponde a distâncias de 10 mm entre dois objetos (Simmons 1973).

A localização de uma fonte de eco é feita provavelmente através da interação biauricular e do posicionamento dos pavilhões do ouvido que possuem alto grau de mobilidade. É aceito que a posição no plano horizontal é codificada através das diferenças entre os tempos de trânsito e das diferenças entre intensidades recebidos em cada ouvido (Neuweiler 1980).

Animais com cabeças grandes e consequentemente grande distância interauricular parecem analisar a diferença entre os tempos de trânsito, enquanto que pequenos animais como os morcegos que possuem distância interauricular da ordem de 15 a 20 mm parecem analisar a diferença entre as intensidades recebidas em cada ouvido.

### 3. Descrição do Sistema Sensorial

O sistema sensorial é composto por três transdutores montados sobre um dispositivo para varredura angular conforme mostrado na figura 3. Os transdutores estão alinhados horizontalmente; o transdutor central opera como emissor e receptor, e os transdutores laterais operam como receptor apenas (Mariolli 1988). Existe uma analogia desse sistema sensorial com o sistema sensorial dos morcegos, pois o transdutor central desempenha a função da boca do morcego e os transdutores laterais desempenham a função dos ouvidos.

Esse sistema sensorial processará basicamente a diferença entre os tempos de trânsito, que corresponde a uma triangulação.

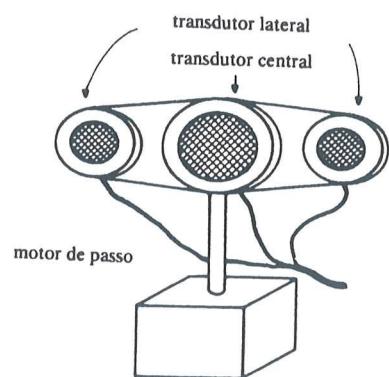


Fig3: Sistema Sensorial

### 4. Modelo para Simulação do Sistema Sensorial

O fenômeno de reflexão desempenha uma função importante na geração do eco. Quando o sistema sensorial está de frente a uma parede rígida então os TOF's medidos pelos transdutores laterais são iguais. Observe que neste caso as intensidades máxima medidas pelos mesmos também são iguais.

Caso o sistema sensorial tenha um ângulo  $\theta$  em relação à parede rígida então os TOF's e as intensidades medidos pelos transdutores laterais são diferentes, esta diferença deve permitir a determinação da configuração, posição e orientação, da fonte do eco.

#### 4.1. Análise Temporal

Para cada transdutor o TOF é proporcional à distância da fonte do eco até o transdutor receptor.

De acordo com o esquema mostrado na figura 4: sendo a distância entre os transdutores laterais  $2m$ , e sendo  $d$  a distância entre o transdutor central e a fonte do eco, então pode-se equacionar as distâncias  $d_1$  e  $d_2$ , correspondentes a distância entre cada transdutor lateral e a fonte do eco, pela lei dos cossenos. Observe que a distância do transdutor central à parede é  $d/2$ .

$$d_1 = \sqrt{d^2 + m^2 - 2.d.m.\cos(\pi/2 - \theta)} \quad (1)$$

$$d_2 = \sqrt{d^2 + m^2 - 2.d.m.\cos(\pi/2 + \theta)} \quad (2)$$

$$f(d,m,\theta) = d_1 - d_2 \quad (3)$$

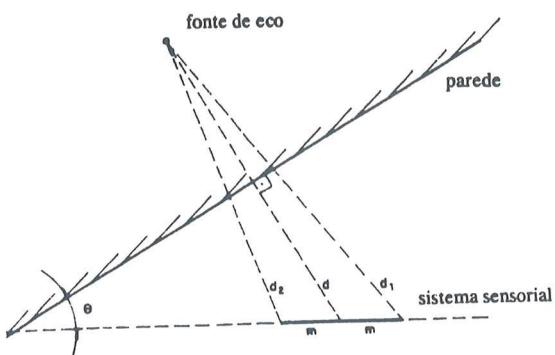
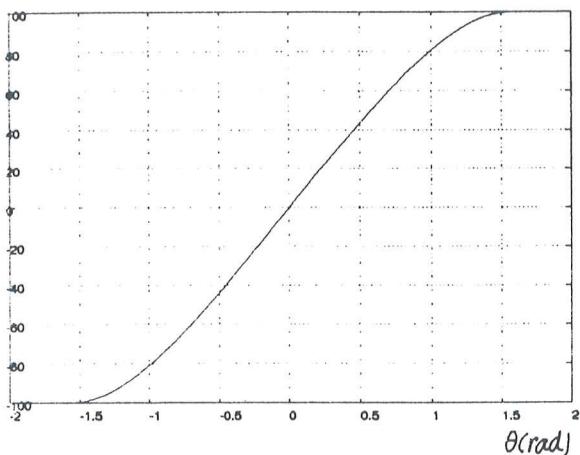


Fig4: Esquema para análise temporal

$$\sqrt{1 + \frac{x}{2}} = 1 + \frac{1}{2}x \quad (4)$$

Fig5: Gráfico da função  $f(m, \theta)$ 

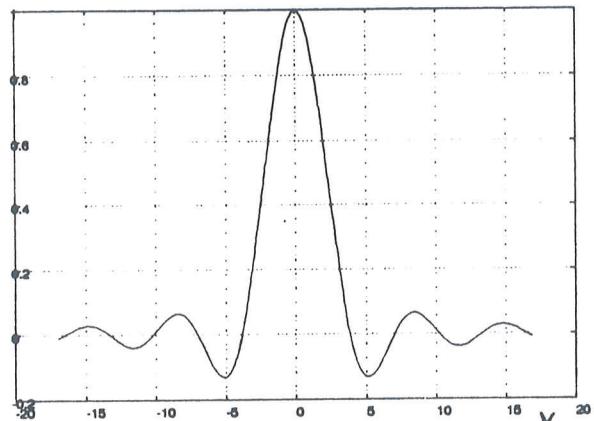
$$f(m, \theta) = -2m \cdot \sin\theta \quad d \gg m \quad (5)$$

A função  $f(d, m, \theta)$  está apresentada no gráfico da figura 5 ( $m = 50$  mm). O gráfico mostra que a função  $f$  não depende de  $d$ , e o mais interessante é que  $f$  possui uma dependência linear em relação a  $\theta$ , na faixa de  $-60^\circ$  a  $60^\circ$ . Os resultados mostram que é possível obter  $\theta$  de uma maneira bastante simples. Observe que quanto maior a distância entre os transdutores laterais maior é a sensibilidade do sistema sensorial. Estes resultados podem ser obtidos mais diretamente utilizando a simplificação da equação 4, resultando a equação 5.

Para esta análise foi suposto que o transdutor central emite som em todas direções do espaço.

#### 4.2. Análise de Intensidade

Nesta análise apenas os aspectos relacionados com o padrão de radiação do transdutor central são estudados. A intensidade medida em cada transdutor lateral é dada pela equação 6, que está traçada no gráfico da figura 6, fundamentada no padrão de radiação do pistão plano circular (Kinsler 1982).

Fig6: Gráfico da função  $J_1(v)/v$ 

$$I(\theta) = \frac{J_1(ka \cdot \sin\theta)}{ka \cdot \sin\theta} \quad (6)$$

$$g(d, m, \theta) = I(\theta - \theta_1) - I(\theta + \theta_2) \quad (7)$$

Conforme o esquema mostrado na figura 7, os transdutores laterais recebem  $I(\theta - \theta_1)$  e  $I(\theta + \theta_2)$ . Esta análise pode ser simplificada considerando  $\theta_1 = \theta_2 = \phi$ , onde:

$$\tan\phi = \frac{m \cdot \cos\theta}{d} \quad (8)$$

Resultando:

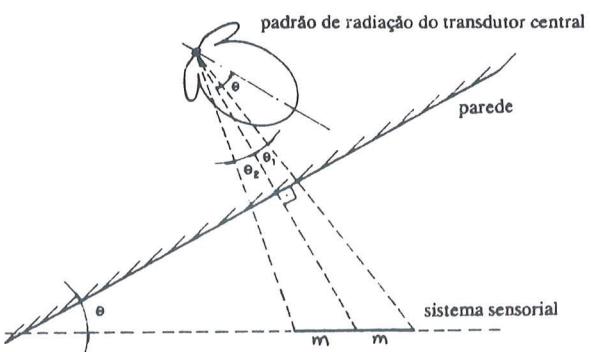


Fig7: Esquema para análise de intensidade

$$g(d,m,\theta) = I(\theta - \phi) - I(\theta + \phi) \quad (9)$$

Fazendo a simulação da função intensidade foi observado que ela é diferente para cada distância  $d$ . Para distâncias muito grandes a função se aproxima da função nula, e para distâncias pequenas é verificado uma interferência entre os lóbulos laterais.

Por esta análise uma informação que é obtida facilmente com aplicações interessantes corresponde ao ponto em que o sistema sensorial está bem de frente à parede rígida, quando as intensidades medidas em cada transdutor lateral são iguais. Esta informação também pode ser obtida medindo a intensidade no transdutor central pois corresponde ao ponto em que a intensidade medida nesse é máxima. O fato de obter essa informação através do transdutor central apresenta uma vantagem pois mesmo para distâncias pequenas é possível de obtê-la enquanto que através dos transdutores laterais devido à interferência dos lóbulos laterais é impossível de obtê-la de uma maneira mais simples.

Através do modelo elaborado pode-se verificar qual a influência da diretividade do transdutor central sobre a análise de intensidade mas os resultados obtidos não serão utilizados neste sistema, eles são interessantes, por exemplo, para esclarecer alguns aspectos relacionados com o sistema de ecolocalização dos morcegos (Tsuzuki89).

O sistema utilizado obtém as medidas de TOF para cada transdutor e a medida da intensidade do primeiro eco para o transdutor central. Caso seja necessário um processamento mais minucioso então é interessante considerar as medidas de intensidade do primeiro eco nos transdutores laterais, o que não é tratado neste trabalho.

A medida de TOF obtida no transdutor central fornece a distância da fonte do eco ao sistema sensorial. A função  $f$  (análise temporal) fornece a orientação da fonte do eco. E a medida de intensidade fornecida pelo transdutor central é utilizada para consistência determinando o ponto em que o sistema sensorial está bem de frente à fonte do eco.

## 5. Algoritmo para Mapear o Ambiente

O objetivo deste algoritmo está em mapear o ambiente de forma que seja possível combinar o mapa resultante com o mapa global conhecido a priori que está armazenado na memória do robô, desta forma pode-se determinar a posição do robô no mapa global a partir das informações fornecidas pelo sistema sensorial.

### 5.1. Descrição do Algoritmo

Inicialmente é feito uma varredura angular com o sistema sensorial. Em cada posição do motor de passo é obtida uma amostra constituída pelas medidas de TOF para cada transdutor e pela medida de

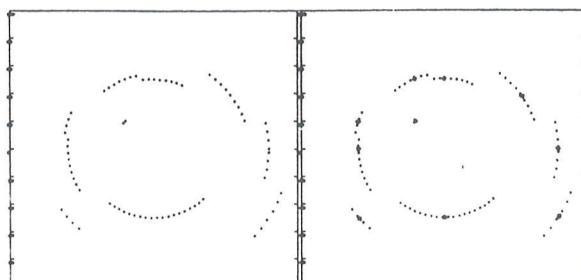


Fig8: Varredura angular com o sistema sensorial

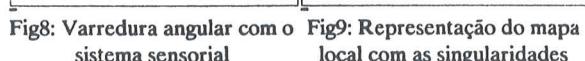


Fig9: Representação do mapa local com as singularidades

intensidade do primeiro eco detetado no transdutor central.

Os dados obtidos são processados obtendo a inclinação relativa da fonte do eco em relação ao sistema sensorial. A partir do ângulo que a fonte do eco forma com o sistema sensorial é possível calcular o ângulo que a fonte do eco forma com o robô propriamente dito (coordenadas absolutas). As amostras que fornecerem a mesma medida de ângulo são ditas correlacionadas e estão associadas a apenas um acidente físico (parede, quina, canto, etc), neste caso a medida de TOF fornecida pelo transdutor central deve ser igual para todas amostras enquanto que a medida de intensidade deve variar passando por um máximo.

Esta é a situação mais comum, o ponto de máxima intensidade corresponde ao ponto em que a função  $f$  (análise temporal) fornece resultado nulo, este ponto é definido como ponto singular. Cada ponto singular está associado diretamente com um ponto de referência (acidente físico) e a sua localização é direta pois a configuração já está totalmente definida a partir da medida do TOF do transdutor central e da função  $f$  de análise temporal.

Os pontos singulares relacionados com os cantos e as quinas são obtidos diretamente do mapa global, esses pontos são designados por pontos singulares fixos pois independentemente da posição do robô estão sempre na mesma posição, diferentemente de uma parede cuja posição obtida varia conforme a posição do robô. A localização do robô no mapa global é feito combinando os pontos singulares fornecidos pelo sistema sensorial com os pontos fornecidos pelo mapa global.

Para combinar os dois mapas é necessário extrair algumas características usando a informação adicional a respeito da sucessão dos pontos singulares dentro de uma varredura. Calculam-se todas as distâncias e ângulos entre dois pontos singulares consecutivos. Os ângulos são utilizados para identificar pontos singulares como uma parede, um canto, ou uma quina. Para as paredes o ângulo é  $180^\circ$ . Os pontos singulares associados às paredes são eliminados e então as distâncias entre pontos singulares precisam ser atualizadas. Assim restam apenas os pontos singulares associados a cantos, quinas, e objetos não identificados.

Agora calculam-se as distâncias entre cantos e quinas sucessivos representados no mapa global. Co-

rrelacionando a sequência de distâncias obtida a partir do sistema sensorial com a sequência obtida a partir do mapa global localiza-se o robô neste último. O processo de correlação consiste em localizar uma palavra dentro de um texto. Dependendo do tipo de ambiente de trabalho, estruturado ou desestruturado, o algoritmo de correlação será mais ou menos complexo. A princípio o robô trabalha em ambientes estruturados necessitando de algoritmos de correlação mais simples. Caso o ambiente não seja estruturado o sistema sensorial fornecerá pontos singulares que não estão associados a nenhum acidente do mapa global, quando isto acontecer esses pontos singulares são mapeados, colocados no mapa global, e marcados como objetos inesperados.

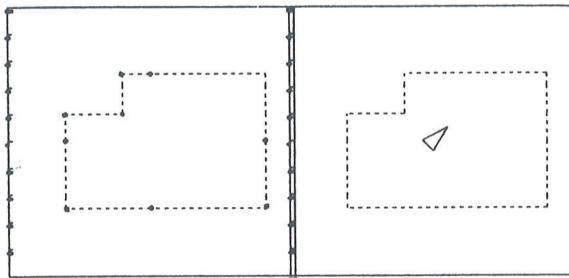


Fig10: Combinando mapa local

Fig11: Mapa de ocupação e a localização do robô

Quando o ambiente possuir a forma retangular ou tiver alguma simetria o algoritmo não é capaz de decidir entre as possíveis posições de forma que é necessário alguma informação adicional para decidir entre elas. Neste caso, para eliminar as ambiguidades, utiliza-se a posição aproximada do robô fornecida por seus sensores internos. Também pode-se utilizar essa medida e então elaborar algoritmos de correlação mais simples utilizando as distâncias do robô aos pontos singulares, neste caso o algoritmo é mais eficiente pois a distância em questão é fornecida diretamente pelo sistema sensorial.

Os objetos inesperados são mapeados em relação à posição do robô e o posicionamento do robô no mapa global é feito utilizando as distâncias do robô aos pontos singulares que possuem correspondência no mapa global.

## 6. Conclusão

O sistema proposto oferece bastante flexibilidade podendo-se adaptar a diversos ambientes. A simulação do sistema oferece resultados encorajadores. O processamento dos dados fornecidos pelo sistema sensorial está bem definido até o momento da obtenção dos pontos singulares. Os pontos singulares podem ser utilizados de diversas formas. Foi apresentado um algoritmo bastante simples colmando as idéias principais de forma a mostrar o potencial do sistema sensorial apresentado.

## 7. Agradecimentos

Este trabalho possui suporte financeiro do CNPq para a formação de recursos humanos. Os projetos

para execução do sistema sensorial e outras atividades relacionadas com o seu desenvolvimento estão recebendo suporte financeiro do PADCT, FINEP e FAPESP.

## Referências

- Drumheller M., "Mobile robot localization using sonar", IEEE Transactions PAMI, Vol.PAMI-9 No.2 March 1987
- Elfes A., "Sonar based real world mapping and navigation", IEEE Journal of RA, Vol.RA-3 No.3 June 1987 pp249-265
- Gaston P.C., Lozano-Pérez T., "Tactile recognition and localization using object models: the case of polyhedra on a plane", IEEE Transactions PAMI Vol.PAMI-6 No.3 May 1984 pp257-266
- Grinsom W.E.L., Lozano-Pérez T., "Recognition and localization of overlapping parts from sparse data in two and three dimensions", Proceedings 1985 International Conference Robotic and Automation March 1985 pp61-66
- Kinsler L.E., Frey A.R., Coppens A.B., Sanders J.V., "Fundamentals of Acoustics", Third edition 1982 John Wiley & Sons Inc
- Kuc R., Siegel M.W., "Physically based simulation model for acoustic sensor robot navigation", IEEE Transactions PAMI Vol.PAMI-9 No.6 November 1987 pp766-778
- Marioli D., Sardini E., Taroni A., "Ultrasonic distance measurement for linear and angular position control", IEEE Transactions IM Vol.IM-37 No.4 December 1988 pp578-581
- Miler D., "Two dimensional mobile robot positioning using inboard sonar", Proceedings 9th William Pecora Memorial Remote Sensing Symposium IEEE USGS NASA ASP October 1984 pp362-369
- Neuweiler G., Bruns v., Schuller G., "Ears adapted for the detection of motion, or how echolocating bats have exploited the capacities of the mammalian auditory system", J.Acoust.Soc.Am. Vol.68 No.3 September 1980 pp741-753
- Simmons J.A., "The resolution of target range by echolocating bats", J.Acoust.Soc.Am. Vol.54 1973 pp157-173
- Souza B.J., Adamowski J.C., Barreto M.R.P., Ferraz C.A.M., Tsuzuki F.S.G., Morita F.O., "Desenvolvimento de Sensores de Ultra-Som para Controle de Robôs", Relatório Técnico FAPESP No. 88/2687-0 Maio 1989
- Tsuzuki F.S.G., Moscato L.A., Adamowski J.C., "A Sonar Based Environmental Sensory System for Mobile Robots", Proceedings International Workshop on Sensorial Integration for Industrial Robots: Architectures & Applications IEEE IES November 1989