

## DESENVOLVIMENTO DE UM ROBÔ MÓVEL

Julio Cezar Adamowski  
Marcelo Godoy Simões  
Fábio Gagliardi Cozman

Escola Politécnica da USP  
Departamento de Engenharia Mecânica  
Caixa Postal 8174  
01000 São Paulo - SP

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

### RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um robô móvel para operar num ambiente fabril como um veículo autônomo de transporte. Este robô móvel é um veículo sobre rodas com capacidade para se deslocar tanto no plano, com pequenas irregularidades, como também em rampas pouco inclinadas. O veículo é alimentado por baterias, tem tração independente em duas rodas traseiras através de servo-motores CC, e um sistema eletro-mecânico de direção na roda dianteira. Tem um controlador embarcado do tipo multiprocessador que executa o controle da trajetória, previne colisões e suporta um sistema de navegação. Possui uma plataforma de transporte de carga constituída por uma pequena esteira rolante, montada num mecanismo que pode transladá-la na direção do seu movimento e girá-la em torno do eixo perpendicular localizado em seu centro. A interface com a central de controle fixa é feita por um canal de comunicação através de rádio. A navegação será feita através de mapas locais, com a monitoração contínua das posições das rodas, e as possíveis correções, devido a deslizamentos, serão feitas com o auxílio de um sistema sensorial baseado em ultra-som, que também atua para prevenir colisões com objetos não mapeados.

### ABSTRACT

This paper presents the development of a mobile robot for operating in an industrial environment as an automatically guided vehicle. This mobile robot is a three wheeled vehicle with the capacity to move in flat plane and small slopes. The vehicle is powered by batteries, it has two independent rear driving wheels and a frontal steering wheel. It has an on-board multiprocessor controller which calculates the trajectory, avoids collision and performs navigation procedures. On the upper part of the vehicle there is a belt conveyor for handling workpieces. There is a mechanism for aiding the positioning at load/unload stations which can rotate and translate the conveyor belt. The communication between a central control station and the vehicle is performed by a radio link. The navigation will be done with local maps, combined with the continuous monitoring of the position of the wheels. Corrections of wheels slipping will be done using the feedback of an ultrasonic based sensory system which also is used in collision avoidance procedures.

**Keywords:** robô móvel, AGV, veículo autônomo de transporte, navegação

### 1. INTRODUÇÃO

Os robôs móveis estão se tornando uma realidade. Eles podem ir a lugares onde o homem não pode ou não gosta muito de ir. Os robôs podem mecanizar tarefas que são repetitivas ou exigem trabalho intensivo, operando seguramente em ambientes agressivos e contaminados. A aplicação mais conhecida deste tipo de robô é a de movimentação de materiais dentro de ambientes industriais. Aplicações na área espacial, militar, e na agricultura estão sendo estudadas. Assim, as pesquisas direcionadas ao desenvolvimento de robôs móveis autônomos e semi-autônomos têm atraído o interesse de muitos pesquisadores.

Para atestar a evolução na área de robôs móveis, já se pode citar dezenas deles implementados com sucesso em instituições de pesquisa (Steele, 1986), sendo que o primeiro robô nesta categoria teve a sua primeira fase concluída a mais de duas décadas atrás pelo SRI (Stanford Research Institute).

Este trabalho apresenta a primeira fase do desenvolvimento de um robô móvel para operar num ambiente fabril, no transporte automático de materiais. Este desenvolvimento está sendo realizado no Laboratório de Automação e Sistemas do Departamento de Engenharia Mecânica da EPUSP, e tem como objetivo a implementação de um sistema modular, de forma a viabilizar futuras expansões, que permitirão a execução de experiências relativas a

máquinas inteligentes. Esta primeira fase do desenvolvimento corresponde à implementação da mecânica, da eletrônica de controle, e do software necessário para que o robô possa realizar as tarefas mais básicas como, por exemplo, ir de um ponto a outro segundo uma dada trajetória.

Como primeira aplicação para este robô, foi escolhido um sistema automático de transporte e armazenamento de materiais. Este sistema é composto por: estantes automatizadas, plataformas de carregamento e descarregamento de materiais, veículo autônomo de transporte, estação de recarga de baterias e unidade central de controle. Neste artigo será abordado apenas o robô móvel, que está sendo denominado por veículo autônomo de transporte (VAT).

## 2. CONSTRUÇÃO DO ROBÔ

### 2.1. Projeto Mecânico do Veículo

O veículo tem uma estrutura tubular de aço que agrega os seguintes elementos: duas unidades de tração, mecanismo de direção, plataforma de transporte de carga, controlador multi-processado, eletrônica de potência, baterias de alimentação, sistema de navegação, e um sistema para prevenir colisões. A figura 1 mostra a estrutura interna e a figura 2 mostra o veículo completo.

O veículo tem a configuração de um triciclo (Iijima, 1981; Tsumura, 1981) e foi projetado para se deslocar em pisos planos e rampas suaves. A tração é executada por duas rodas traseiras que são acionadas independentemente por servomotores de corrente contínua munidos de redutores, tacho-geradores, e sensores ópticos de posição angular ("encoders"). A direção é dada pela ação combinada dos movimentos das rodas traseiras, seguida pela roda dianteira através de um mecanismo de direcionamento. Este mecanismo é constituído por um fuso com castanha de esferas recirculantes, acionado por um motor de passo. A castanha movimenta uma pequena alavanca engastada no eixo de direcionamento da roda dianteira.

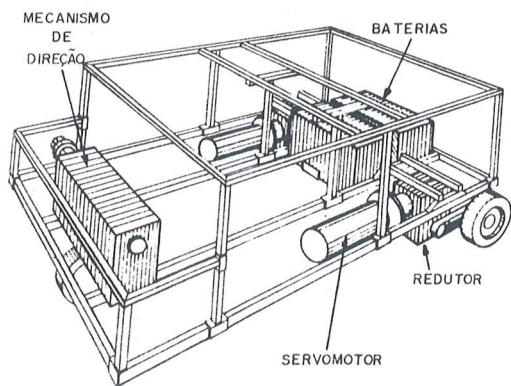


Figura 1: Estrutura mecânica do veículo

A alimentação do veículo é feita por duas baterias, fornecendo uma tensão de alimentação de 24 V, com capacidade total de 50 A.h.

As características de desempenho do veículo são: velocidade de operação de 0.5 m/s, aceleração máxima de 2 m/s<sup>2</sup>, peso do veículo em torno de 90 kgf,

capacidade de carga de 50 kgf, carga máxima suportada de 100 kgf, e autonomia de 4 horas de operação.

A plataforma de transporte (figura 2) é constituída por uma pequena esteira rolante (correia transportadora), montada num mecanismo que pode transladá-la na direção do seu movimento e girá-la em torno do eixo perpendicular localizado em seu centro. Estes movimentos são executados por motores de passo, e são travados por freios atuados por um sistema eletromagnético combinado com mola. Em condições normais de operação, a plataforma de transporte permanece parada durante a locomoção do veículo de um ponto a outro, e só é movimentada próximo aos locais de carga e descarga de materiais. Para economizar energia, quando a plataforma está parada os motores de passo permanecem desenergizados e os freios atuados por molas. Este conjunto possibilita um posicionamento rápido e preciso da plataforma de transporte em relação às plataformas de carregamento e descarregamento de cargas, pois minimiza as manobras do veículo.

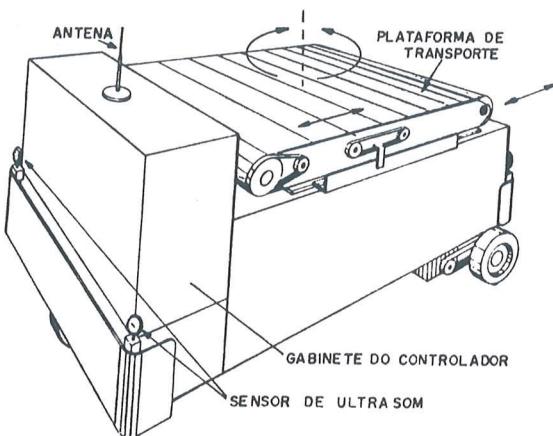


Figura 2: Veículo autônomo de transporte

### 2.2. Controlador

O controle do robô é executado por um unidade central (estação fixa) desempenhada por um computador do porte de um supermicro e computador instalado a bordo do veículo. A comunicação entre a estação fixa e o robô é feita através de uma interface serial via rádio.

O computador de bordo é baseado num sistema multiprocessador com barramento VME composto por: controlador central, sistema sensorial, canal de comunicação, e acionamento. O controlador central executará a função de supervisor do sistema e será implementado por um microprocessador MC68000. O sistema sensorial terá dois níveis, um mais elevado responsável pela combinação das informações dos sensores com as informações de um mapa, implementado por um microprocessador MC68000. O nível mais baixo tratará do controle e processamento dos sinais dos sensores e também será implementado por um MC68000. O controle dos motores de tração e direção será executado por um Z80. O controle da plataforma de transporte será implementado por um Z80. O diagrama de blocos do sistema multiprocessador é mostrado na figura 3.

O computador de bordo foi implementado, nesta primeira fase, por um microcomputador do tipo PC XT, montado no gabinete do veículo, composto de: placa mãe, fonte, controladora de disco flexível, e interface serial. No barramento da placa do PC estão conectadas mais três placas processadoras, dedicadas, baseadas no Z80. Uma controla os motores de tração e direção, outra controla o sistema sensorial, e outra controla a plataforma de transporte. A comunicação com a estaçao fixa é executada por uma interface serial via rádio. Este hardware foi implementado provisoriamente para testar todos os subsistemas do robô, e oferece muitas restrições à implementação de controle em tempo real.

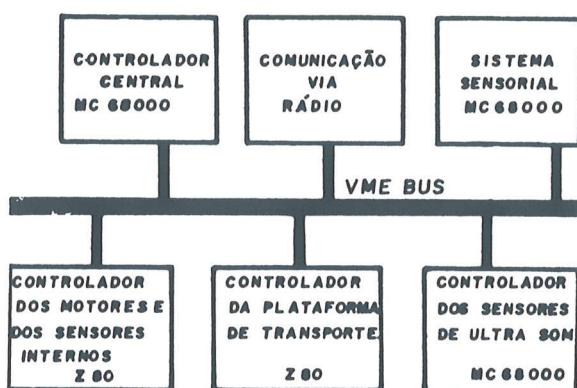


Figura 3: Hardware do controlador de bordo

A estaçao fixa foi implementada por um computador do tipo PC AT munido de um canal de comunicação serial via rádio.

### 2.3. Sistema Sensorial

Os sensores de um robô podem ser enquadrados em dois grandes grupos: o dos sensores internos que estão relacionados com o sensoriamento do funcionamento dos mecanismos do robô, como por exemplo, os sensores de velocidade, posição, torque, etc, e o dos sensores externos que estão relacionados com a interação do robô com o ambiente. O sistema sensorial do robô móvel é composto por sensores externos combinados com informações de posição e orientação do veículo, processadas a partir de dados dos sensores internos.

A parte principal do sistema sensorial implementado é composto por 4 unidades sensores de ultra-som montados em dispositivos de varredura angular. Cada dispositivo de varredura é composto por um pequeno motor de passo com um transdutor de ultra-som preso ao seu eixo e uma chave óptica que fornece uma posição de referência do eixo. A varredura é executada emitindo-se um trem de pulsos de ultra-som a cada posição angular do eixo do motor e medindo-se o tempo de trânsito da onda acústica, isto é, o tempo que a frente de onda leva para ir do transdutor até o obstáculo e a parte refletida retornar ao transdutor. O motor utilizado fornece uma resolução angular de 0.9 graus. O transdutor de ultra som é do tipo eletrostático (Adamowski, 1989) com frequência de operação em torno de 40 kHz, lóbulo de radiação estreito (aproximadamente 8 graus em -3 dB) e um alcance em torno de 3 metros, operando como emissor e receptor

em modo pulsado. No modo pulsado o transdutor é excitado por um trem de pulsos de alta tensão através de um circuito de excitação. O sinal do eco proveniente do obstáculo mais próximo é recebido, amplificado e transformado em sinal digital por um circuito de conformação de sinais. Este sinal digital é introduzido num contador que funciona como cronômetro que mede o tempo de trânsito da onda acústica referente ao trem de pulsos emitido que corresponde a duas vezes a distância (ir e voltar) do transdutor ao obstáculo. Esta medida é convertida em distância a partir da velocidade de propagação do som. Como a velocidade do som no ar varia com a temperatura, utiliza-se uma compensação de temperatura.

O sensoriamento é feito em dois níveis, um inferior utilizado na detecção de obstáculos e na prevenção de colisões, e um superior, utilizado na navegação do robô.

### 2.4. Canal de Comunicação Via Rádio

Para possibilitar a troca de parâmetros entre a estaçao fixa e o robô é implementada uma comunicação do tipo "Half-Duplex" por canal de rádio. Observa-se na figura 4 que a saída serial do microcomputador se comunica com um MODEM, possibilitando uma modulação FSK, padrão CCITT V.24. O sinal de saída do MODEM é transmitido através da entrada de áudio, pelo rádio em VHF. Analogamente, na recepção o rádio entrega o sinal FSK, sendo demodulado pelo MODEM, que entrega os dados ao canal serial do outro microcomputador.

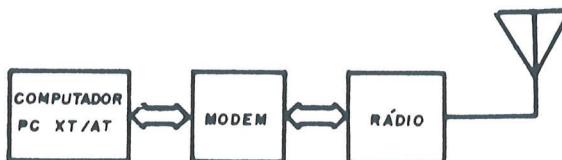


Figura 4: Canal de comunicação via rádio

### 2.5. Acionamento dos Servomotores

Os servomotores das rodas traseiras são controlados independentemente por um microprocessador Z80 através de drivers PWM. A realimentação é provida por um tacho-gerador, montado no eixo do motor, que fornece sinal correspondente à velocidade para o Z80 (Simões, 1989).

## 3. CONTROLE DO ROBÔ

Está sendo implementado um sistema de controle hierárquico baseado na proposta de Isik (1988), como mostrado no diagrama de blocos da figura 5. O sistema de controle tem basicamente quatro níveis: planejador, navegador, piloto e atuador.

O planejador recebe um mapa global e mapas locais do ambiente, que podem ser fornecidos, por exemplo, através de um sistema de CAD e, dado um ponto inicial e um ponto final determina o caminho, em segmentos de retas, entre estes dois pontos, levando-se em consideração as restrições geométricas impostas tanto pelo ambiente como pelo veículo. O planejador será instalado na estaçao fixa.

O sistema de navegação que implementará o navegador será do tipo caminho indefinido (Fujiwara, 1981; Miyagi, 1988), isto é, sem o uso de guias fixas. A navegação será feita pela monitoração da posição das rodas, através de "encoders" ópticos, combinada com o mapeamento do ambiente, através do sistema sensorial baseado em sensores de ultra-som. Serão utilizadas também correções mais finas nos pontos de carga e descarga de materiais. O navegador efetua correções na trajetória e gera os vetores de deslocamentos acompanhados das velocidades que são entregues ao piloto. O piloto, por sua vez, prepara os valores de referência para os motores de tração e direção, levando-se em consideração as restrições de acelerações, e os envia para o atuador (Ferraz, 1989). Qualquer aviso de colisão eminentes faz com que o piloto pare a movimentação do veículo com o menor deslocamento possível. O atuador coleta os sinais dos "encoders" e calcula a posição e orientação do veículo. O erro entre a posição corrente e a referência é corrigido pela atuação dos motores, através de um controle proporcional integral (PI).

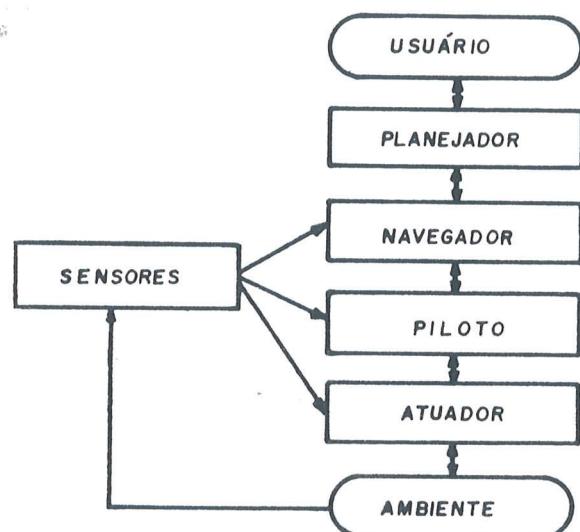


Figura 5: Arquitetura do controlador.

O posicionamento da plataforma de transporte em relação a uma plataforma fixa é executado pelo piloto em conjunto com o atuador. O piloto prepara os comandos relativos aos movimentos da plataforma para que esta se posicione corretamente em relação à plataforma fixa. Estes comandos são enviados ao atuador que cuida da execução seguido por uma monitoração constante da posição da plataforma de transporte em relação à plataforma fixa. Esta monitoração será desempenhada pela ação conjunta do sistema sensorial, baseado em ultra-som, com sensores de proximidade, por infra-vermelho, localizados na estrutura da plataforma de transporte.

#### 4. SENSORIAMENTO DO AMBIENTE

O sistema sensorial é baseado em sensores de ultra-som montados em mecanismos de varredura angular. O sistema é composto por quatro unidades de varredura localizadas uma em cada canto do veículo. Os sensores de ultra-som operam em modo pulsado, medindo a distância do ponto mais próximo do obstáculo apontado. Com o sistema de varredura mede-se a

distância do ponto mais próximo do obstáculo para cada posição angular e obtém-se uma imagem do perfil de distâncias do obstáculo (Drumheler, 1987).

O mapa do local do ambiente é armazenado na memória do computador de bordo. Este mapa é enviado pela estação fixa e contém informações tais como, a posição, extensão e orientação de uma parede, a localização de uma porta, a localização de uma mesa, etc. Estas informações são transformadas em segmentos de retas delimitando as áreas de ocupação. Então o robô, através do sistema sensorial, obtém a imagem de perfil do ambiente e constrói o mapa de ocupação do ambiente, naquele instante, composto de segmentos de retas delimitando as áreas de ocupação. Usando as informações de posição e orientação do robô, calculam-se os eixos de referência do mapa de ocupação que é comparado com o mapa armazenado na memória. A partir desta comparação o navegador pode detalhar os caminhos de acordo com a situação do ambiente bem como alterar caminhos de forma a desviar de obstáculos não mapeados. Ao se detectar um objeto muito próximo, o robô pára no menor tempo possível, através da ação do piloto, para evitar uma colisão. Também está em estudo a implementação de uma rede de transdutores com a finalidade de se obter mais informações do eco (Tsuzuki, 1989).

#### 5. COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES

A estrutura mecânica do robô foi construída e seus elementos principais foram testados. Os redutores usados nas rodas traseiras são do tipo rosca sem fim e têm baixo rendimento. Prevê-se a implementação futura de redutores do tipo "harmonic driver" que apresentam alto rendimento. O mecanismo utilizado na direção restringe o raio mínimo de curva que o veículo pode executar. Este problema pode ser solucionado com o acionamento direto do eixo de direcionamento da roda através de um servomotor com redutor. Está sendo utilizada uma fonte externa de energia, durante a realização dos testes, devido à baixa capacidade das baterias.

A utilização da plataforma de transporte com movimento de translação e rotação no plano horizontal facilita o posicionamento preciso em relação à plataforma fixa.

O controle de posição e orientação do robô através da monitoração das rotações das rodas traseiras fornece uma precisão razoável no deslocamento em curtas distâncias, num piso com boa regularidade.

O sistema sensorial baseado em ultra-som está sendo utilizado, até o momento, na prevenção de colisão e a parte referente à obtenção do mapa de ocupação está em fase de implementação. Os transdutores de ultra-som utilizados foram construídos em nossos laboratórios e apresentaram um bom resultado.

O controlador de bordo baseado no microcomputador PC XT, que foi implementado, impõe muitas restrições à execução de controle em tempo real. Este controlador será substituído pelo controlador com processadores MC 68000 e o barramento VME está em fase de implementação.

## **6. AGRADECIMENTOS**

Agradecemos à FAPESP (Fundação de Amparo à pesquisa do Estado de São Paulo), à FINEP, ao CNPq e à FDTE (Fundação para o Desenvolvimento Tecnológico da Engenharia) que têm dado suporte financeiro e administrativo para a execução deste trabalho.

## **7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- Adamowski,J.C., Tsuzuki,F.S.G., (1989). "Desenvolvimento de Sensores de Ultra Som para Aplicação em Automação e Robótica". Anais do X COBEM, Rio de Janeiro, RJ, Vol. 2: 427-430.
- Drumheler,M., (1987). "Mobile Robot Localization Using Sonar". IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.PAMI-9, n. 2: 325-332.
- Ferraz,C.A.M.; Barreto,M.R.P.; Cozman,F.G., (1989). "Controle de Trajetória de Veículo Autônomo de Transporte". Anais do X COBEM, Rio de Janeiro, RJ, Vol. 2: 229-232.
- Fujiwara,K.; Kawashima,Y.; Kato,H.; Watanabe,M., (1981). "Development of Guideless Robot Vehicle". Proc. 11th ISIR:203-210.
- Iijima,J.; Yuta,S.; Kanayama,Y., (1981). "Elementary Functions of a Self Contained Robot - YAMABICO 3.1". Proc. 11h ISIR:211-218.
- Isik,C.; Meystel,A.M., (1988). "Pilot Level of a Hierarchical Controller for an Unmanned Mobile Robot". IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol.RA-4, n.3: 241-255.
- Miyagi,P.E.; Adamowski,J.C.; Moscato,L.A.; Okamoto,J.Jr.; Barreto,M.P.R., (1988). "Veículos Autônomos de Transporte e seus Controles". III CONAI, São Paulo.
- Simões,M.G; Cozman,F.G.; Adamowski,J.C., (1989). "Controle e Acionamento de Motores para Veículos Autônomos de Transporte". II Seminário de Eletrônica de Potência, Florianópolis, SC: 190-197.
- Steele,J.P.; Ebrahimi,N.D., (1986). "Control of Mobile Robots". International Journal of Robotics and Automation, Vol. 1, n. 2: 40-46.
- Tsumura,T.; Fujiwara,N.; Shirakawa, T.; Hashimoto, M., (1981). "An Experimental System for Automatic Guidance of Robotic Vehicle Following the Route Stored in Memory". Proc. 11th ISIR: 187-194.
- Tsuzuki,F.S.G.; Moscato,L.A.; Adamowski,J.C., (1989). "A sonar Based Environmental Sensory System for Mobile Robots". Proc. International Workshop on Sensorial Integration for Industrial Robots: Architecture & Applications, Zaragoza, Espanha.