

DESENVOLVIMENTO DE UM ROBÔ MÓVEL AUTÔNOMO COM CONTROLE FUZZY

Francisco Arnaldo de Oliveira Rufino.
arw@oi.com.br - arw@elogica.com.br

Departamento de Engenharia Elétrica, Escola Politécnica de Pernambuco - Universidade de Pernambuco (POLI – UPE).

Rua Benfica, 455 – CEP. 57751-460, Bairro Madalena, Recife – PE – Brasil.

José Antônio Riul.
riul@ct.ufpb.br

Resumo. Neste trabalho apresenta-se o desenvolvimento de um Robô Móvel Autônomo com Controle Fuzzy, capaz de deslocar-se em ambientes estruturados e não estruturados, orientando-se através do campo magnético terrestre, detectando e desviando-se dos obstáculos encontrados no ambiente. O robô apresenta dois modos distintos de navegação: 1) Modo Autônomo e 2) Modo Manual. No modo autônomo, a detecção da direção do campo magnético terrestre e dos obstáculos nas proximidades, são feitas em tempo real por sensores embarcados no robô. Estas informações importantes para a navegação autônoma são captadas, filtradas para a eliminação de ruídos e analisadas em tempo real por um Sistema de Controle baseado em Lógica Fuzzy. O Sistema de Controle determina a direção mais adequada para um deslocamento seguro do robô no ambiente, até que ele atinja seus objetivos. Também controla todos os atuadores do robô, determinando quando ele deve seguir em frente, desviar-se para a direita ou para a esquerda, parar ou retroceder. O robô orienta-se pelo campo magnético terrestre, com informações fornecidas por uma Bússola Magnética, na qual foi instalada uma interface eletrônica desenvolvida pelo autor. No modo manual de navegação, o operador utiliza um joystick para comandar todos os movimentos do robô, determinando a melhor rota para uma navegação segura, até atingir os objetivos. Nos dois modos de funcionamento, um transmissor de sinais de TV envia ao operador informações visuais e audíveis, para que ele possa monitorar e controlar o deslocamento do robô no ambiente. Palavras Chave: Robô Autônomo, Controle Fuzzy, Bússola, Sensores, Atuadores.

1. INTRODUÇÃO

Presencia-se atualmente um grande avanço tecnológico em todas as áreas do conhecimento humano. Nesta época da informação e da automação, muitas tarefas que antes eram feitas exclusivamente por humanos, hoje são executadas, com sucesso, por máquinas sofisticadas denominadas robôs. Eles podem ser encontrados realizando tarefas nos mais diversos ambientes, tais como: nos lares, nos consultórios e hospitais, nas escolas e universidades, nas indústrias e no comércio, nos meios de transportes, nos campos de batalha em terra, na superfície e nas profundezas do mar, no ar e até no espaço interestrelar. O crescimento demográfico e o aumento da expectativa de vida da população em todo o mundo, ocorrido nos últimos anos, promoveu um forte aumento da demanda por energia, gêneros alimentícios e produtos industrializados. Para satisfazer a crescente demanda ocorrida, o homem tem que utilizar cada vez mais os recursos naturais do planeta. Muitos destes recursos encontram-se em locais de difícil acesso para os humanos. O homem tem limitações para se adaptar a determinados ambientes, especialmente onde não são encontrados os elementos básicos para sua sobrevivência, como oxigênio, nutrientes, água e luz. Além disso, o ser humano só resiste a uma estreita faixa de temperatura e pressão, e não sobrevive em ambientes com gases tóxicos ou elementos radioativos. A crescente necessidade do uso racional dos recursos naturais e a busca constante pela qualidade, produtividade e competitividade, motivam os cientistas a pesquisarem e desenvolverem máquinas, cada vez mais tecnologicamente sofisticadas, para serem utilizadas na produção de alimentos, nas plantas industriais e na busca de fontes de energia, como o petróleo e seus derivados, entre outras aplicações. A tendência atual é que os cientistas projetem e as indústrias produzam máquinas cada vez mais autônomas, dotadas de algum grau de inteligência, para serem utilizadas na exploração de recursos naturais em locais inóspitos, ou para realizar trabalhos em locais de difícil acesso ou contaminados, onde o ser humano não pode sobreviver. A necessidade de máquinas capazes de se locomoverem de forma autônoma, impulsiona o desenvolvimento de veículos robôs, capazes de realizarem tarefas em ambientes inacessíveis, insalubres ou inseguros para os humanos. O desenvolvimento destas máquinas requer o investimento de muitos recursos financeiros, o empenho das universidades e de outros centros de pesquisas, criando oportunidades para muitos pesquisadores e estudantes das áreas de tecnologia.

2. IMPLEMENTAÇÃO DE VEÍCULOS ROBÔS

A implementação de um veículo robô que apresente real possibilidade de se tornar um produto com aplicações práticas, inicia-se com a definição do ambiente de trabalho do veículo. Em seguida escolhe-se a plataforma mais adequada, os sensores a serem utilizados para percepção e orientação, a forma de propulsão, os mecanismos que a plataforma utilizará para deslocar-se no ambiente e finalmente, o sistema de controle do veículo. Os mecanismos mais utilizados para locomoção de veículos robôs na água e na atmosfera, são as hélices e as turbinas de propulsão a jato. No espaço sideral utilizam-se turbinas de propulsão a jato ou motores iônicos. Sobre a superfície da terra utilizam-se pernas, rodas, ou rodas sobre esteiras.

3. CINEMÁTICA

A cinemática é o ramo da física dedicada ao estudo dos movimentos dos corpos rígidos, relacionando posições, velocidades e acelerações, desprezando-se as forças de ação e reação envolvidas (McKERRROW, 1991). As coordenadas da posição de um corpo em movimento no espaço precisam ser atualizadas a cada instante, de acordo com sua velocidade, direção e sentido de deslocamento. A cinemática é largamente utilizada no campo da robótica, auxiliando na determinação da trajetória e da posição de manipuladores robóticos no espaço tridimensional (RIUL et al, 1991). Os braços robóticos modernos apresentam um número crescente de graus de liberdade, exigindo a utilização da cinemática de duas formas distintas na solução dos problemas: 1) a cinemática direta e 2) a cinemática reversa (ANDEEN, 1988). Na cinemática direta obtém-se a posição e a velocidade da garra de um braço robótico, quando são conhecidos a velocidade e os valores das coordenadas articulares. Na cinemática reversa fornece-se a posição e a velocidade da garra e obtém-se as posições e velocidades correspondentes das articulações.

4. A CINEMÁTICA APLICADA À ROBÓTICA MÓVEL

Os mesmos conceitos da cinemática aplicados ao estudo dos manipuladores, também são utilizados na determinação da posição e velocidade de veículos como automóveis e robôs que se deslocam sobre rodas. A determinação da posição de um veículo é complexa, uma vez que os ângulos das rodas que determinam a direção a seguir, variam tanto em relação ao tempo quanto ao próprio eixo do veículo. Esta variação dos ângulos faz com que a direção do deslocamento do veículo seja continuamente alterada. Encontram-se na literatura especializada, diversas topologias de sistemas de tração e direção aplicadas a veículos robôs. Podem ser divididas em dois grandes grupos: 1) as que se locomovem utilizando pernas e 2) as que utilizam rodas como meio de locomoção. As rodas são mais adequadas para muitas aplicações nas quais se desejam que um veículo robô locomova-se no ambiente. O veículo desenvolvido utiliza rodas como meio de locomoção. MCKERROW (1991) apresentou diversas configurações possíveis para veículos que utilizam rodas como meio de locomoção. Foram analisados veículos que se locomovem com três, quatro e seis rodas e ainda os que utilizam rodas sobre esteiras, questionando-as quanto a sua cinemática e controle. O autor utilizou neste trabalho apenas os resultados obtidos para veículos de três e quatro rodas.

5. VEÍCULO DE TRÊS RODAS COM TRAÇÃO DIFERENCIAL

Este tipo de veículo e seu modelo cinemático são muito conhecidos e utilizados no projeto e fabricação de cadeiras de rodas e veículos leves, entre outras aplicações. Também é utilizado na construção de veículos robôs que trabalham em ambientes internos, onde o piso normalmente é plano, liso e raramente apresenta grande inclinação. É o modelo mais popular entre os roboticistas, por ser de baixo custo e ainda oferecer facilidades no desenvolvimento do sistema de controle. A figura (1) mostra uma ilustração de um veículo de três rodas com tração diferencial.

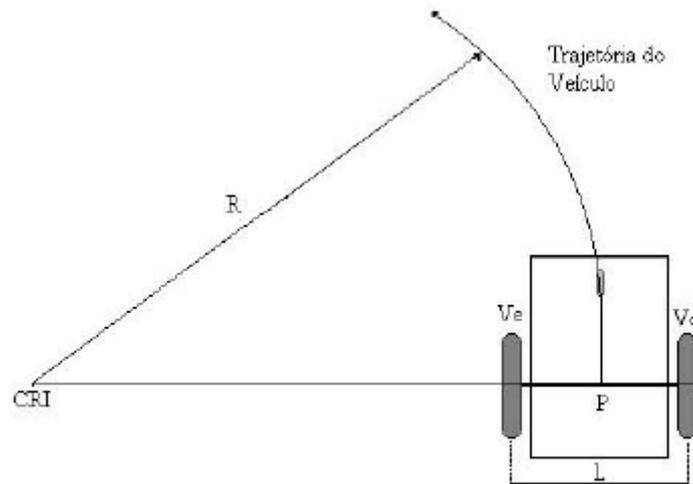


Figura 1 - Veículo de três rodas com tração diferencial.

As duas rodas motoras estão instaladas no mesmo eixo, podendo ser acionadas e controladas de modo independente, proporcionando ao veículo a capacidade de deslocamento e mudança de direção. Uma ou mais rodas passivas podem ser instaladas na plataforma, para suporte. Na figura (1), R representa o raio de curvatura da trajetória a ser percorrida pelo veículo; V_e e V_d representam respectivamente as velocidades das rodas motoras esquerda e direita; CRI é o centro de rotação instantânea do veículo; L a distância entre as duas rodas motoras e P, o ponto central do eixo entre elas. A partir da figura (1), DUDEK & JENKIN (2000) demonstraram que o raio da trajetória de um veículo de três rodas, pode ser calculado em função da velocidade das rodas de tração V_d e V_e , e da distância entre elas. O resultado é mostrado na equação (1):

$$\frac{V_d - V_e}{L} = \frac{V_d}{R + \frac{L}{2}} \Rightarrow R + \frac{L}{2} = \frac{LV_d}{V_d - V_e} \Rightarrow R = \frac{LV_d}{V_d - V_e} - \frac{L}{2} \quad (1)$$

Analisando a figura (1) e a equação (1) conclui-se que: quando $V_d = V_e$, R tende para infinito, o CRI desloca-se para o infinito e o veículo move-se em linha reta; se V_d ou V_e for nula, o CRI desloca-se para o ponto em que a roda de velocidade nula toca a superfície onde se encontra o veículo e ele gira em torno deste ponto; se $V_d = -V_e$, o CRI desloca-se para o ponto P situado no centro do eixo das rodas de tração e o veículo gira em torno do ponto P. Ajustando-se adequadamente a velocidade e o sentido de rotação de cada roda de tração, o veículo move-se de um determinado ponto a outro, deslocando-se em linha reta ou curva, até atingir o objetivo pretendido. Com relação à localização das rodas de tração, este modelo oferece duas opções: 1) tração traseira, como mostra a figura (1); e 2) tração dianteira. Nas duas opções a cinemática do modelo é idêntica, porém a dinâmica é diferente. A melhor opção é utilizar a tração dianteira, que proporciona melhor estabilidade e dirigibilidade ao veículo, e como consequência, um sistema de controle mais simples. A tração traseira torna o veículo mais instável, requer um controlador mais sensível e não apresenta boa dirigibilidade.

6. MODELAMENTO MATEMÁTICO DE UM VEÍCULO DE QUATRO RODAS

A figura (2) representa um veículo de quatro rodas posicionado em um sistema de coordenadas cartesianas. As rodas traseiras estão instaladas em um eixo fixo e as dianteiras podem ser direcionadas, através de um sistema mecânico de guiagem, permitindo ao veículo descrever trajetórias curvas no plano.

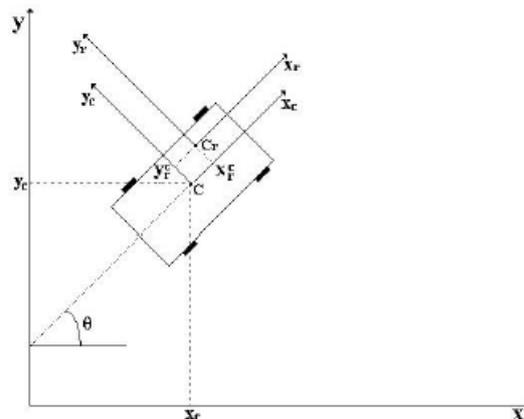


Figura 2 - Representação de um veículo de quatro rodas.

Utilizando esta representação, CAMPION et al. (1996) desenvolveram um modelo matemático para este tipo de veículo, escrito da forma mostrada na equação (2):

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_c \\ \dot{y}_c \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 \\ \sin\theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

onde x_c e y_c são as coordenadas do centro do veículo em relação ao sistema de coordenadas x_0 e y_0 ; θ é o ângulo de deslocamento do veículo em relação ao eixo coordenado x_0 ; η_1 é a velocidade linear e η_2 a velocidade angular. Imaginando o veículo afastando-se da origem em uma trajetória curva e aproximando-se do eixo coordenado y , o ponto C se deslocará para a posição C_r e as coordenadas da nova posição do veículo serão dadas pelas equações (2) e (3):

$$x_r = x_c + x_r^\circ \cos\theta - y_r^\circ \sin\theta \quad (2)$$

$$y_r = y_c + x_r^\circ \sin\theta + y_r^\circ \cos\theta \quad (3)$$

onde x_r° e y_r° são as coordenadas de C_r , descritas em relação ao sistema de eixos $x_c C y_c$ mostrado na figura (2).

7. VEÍCULO DE QUATRO RODAS COM DIREÇÃO DE ACKERMAN

O veículo de quatro rodas com sistema de direção de Ackerman foi desenvolvido para ser utilizado principalmente pela indústria automobilística. Este tipo de veículo utiliza um sistema mecânico de direção bem elaborado, capaz de proporcionar boa dirigibilidade, estabilidade e segurança ao condutor e ao veículo. Evita derrapagens e patinação das rodas de direção, desde que seja utilizado dentro dos limites de velocidade recomendado para a rodovia e para o veículo. A figura (3) mostra uma ilustração de um veículo de quatro rodas com um sistema de direção de Ackerman. Percebe-se facilmente que o ângulo de direção F_2 da roda dianteira direita, que está mais próxima do CRI, é maior que o ângulo F_1 da roda esquerda, que fica mais distante. Este ajuste faz-se necessário para que sejam evitadas derrapagens e patinação das rodas frontais do veículo, quando ele em movimento descreve uma trajetória curva. A velocidade angular da roda mais distante do CRI é maior que a da roda mais próxima a ele. Isto acontece porque em uma trajetória curvilínea, a roda externa à curva percorre uma distância maior que a interna. As equações (4), (5) e (6) relacionam os ângulos F_1 e F_2 , a distância DE entre os eixos e a distância L entre as rodas traseiras de um veículo de quatro rodas. Foram deduzidas por Ackerman a partir da figura (3) e levam seu nome.

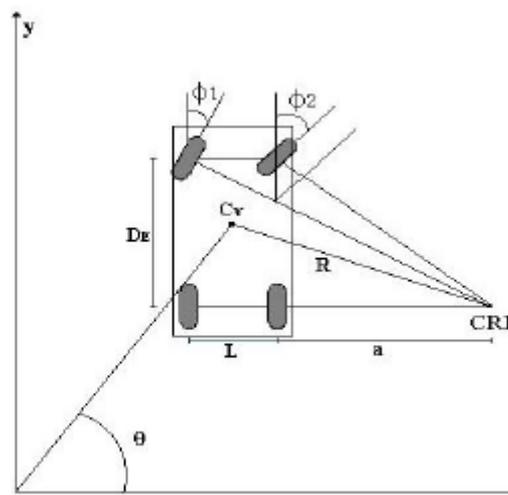


Figura 3 – Veículo de quatro rodas com direção de Ackerman.

$$\operatorname{tg}\Phi_1 = \frac{D_E}{L+a} \Rightarrow \cot g\Phi_1 = \frac{L+a}{D_E} \quad (4)$$

$$\operatorname{tg}\Phi_2 = \frac{D_E}{a} \Rightarrow \operatorname{ctg}\Phi_2 = \frac{a}{D_E} \quad (5)$$

$$\cot g\Phi_1 - \cot g\Phi_2 = \frac{L}{D_E} \quad (6)$$

DUDEK & JENKIN (2000) modelaram matematicamente um pequeno veículo de quatro rodas equipado com o sistema de direção de Ackerman. No modelamento desenvolvido algumas simplificações foram feitas: 1) a velocidade de deslocamento foi considerada constante; 2) os efeitos da aceleração foram desprezados; e 3) considerou-se os ângulo Φ_1 e Φ_2 de direção das rodas, de valor pequeno. Como a massa e a inércia da plataforma são pequenas, as mudanças na velocidade são quase instantâneas, permitindo portanto a simplificação sem que haja grande impacto negativo no resultado final. Uma roda imaginária instalada no centro do eixo dianteiro, apresenta um ângulo de direção Φ dado pela equação (7).

$$\Phi = \frac{\Phi_1 + \Phi_2}{2} \quad (7)$$

O Modelamento apresentado permite calcular a posição do centro do veículo no tempo, dada por $Cv(t) = [x(t), y(t), \theta(t)]$, cujas coordenadas sobre o plano são dadas pelas equações (8), (9) e (10):

$$x(t) = \int_0^t V(t) \cos[\Phi(t)] \cos[\theta(t)] dt \quad (8)$$

$$y(t) = \int_0^t V(t) \cos[\Phi(t)] \operatorname{sen}[\theta(t)] dt \quad (9)$$

$$\theta(t) = \int_0^t \frac{V(t)}{L} \tan[\Phi(t)] dt \quad (10)$$

onde: $V(t)$ representa a velocidade do veículo no instante t , $\Phi(t)$ representa o ângulo das rodas dianteiras em relação à plataforma no sentido longitudinal, L representa a distância entre as rodas do eixo traseiro do veículo e θ , o ângulo entre o centro de gravidade Cv do veículo e o eixo coordenado x . A partir da figura (2), GILLESPIE (1992) demonstrou que a relação existente entre os ângulos de direção de Ackerman, Φ_1 e Φ_2 , a distância D_E entre os eixos do veículo, a distância L entre as rodas traseiras e o raio R entre o CRl e o centro de gravidade do veículo Cv , pode ser calculada pelas equações (11) e (12), desde que os ângulos Φ_1 e Φ_2 medidos em radianos sejam de valores pequenos:

$$\Phi_1 = \tan^{-1} \left(\frac{D_E}{(R + L/2)} \right) \cong \frac{D_E}{(R + L/2)} \quad (11)$$

$$\Phi_2 = \tan^{-1} \left(\frac{D_E}{(R - L/2)} \right) \cong \frac{D_E}{(R - L/2)} \quad (12)$$

O raio de curvatura da trajetória para veículos de quatro rodas, pode ser calculado em metros, pela equação (13), tomando o ângulo Φ em radianos, dado pela equação (7).

$$R = D_E \tan\left(\frac{\pi}{2} - \Phi\right) \quad (13)$$

O modelo de veículo de quatro rodas com sistema de direção de Ackerman é muito utilizado na fabricação de automóveis comerciais e no desenvolvimento de veículos robôs autônomos. Estes veículos podem ser utilizados em ambientes internos e externos, sobre terrenos acidentados e não planos. Além disso, os veículos construídos a partir deste modelo, apresentam maior estabilidade, melhor dirigibilidade e maior capacidade de carga. Idealmente deslocam-se a uma distância de $2pr$ por cada giro de 360° de uma das rodas de raio r , mas apresentam dificuldades de locomoção se as ondulações do terreno apresentarem desníveis superiores ao raio r . A plataforma escolhida pelo autor para a implementação do veículo robô, é um modelo de automóvel comercial de quatro rodas em escala reduzida. As rodas propulsoras foram instaladas no eixo traseiro do veículo. São acionadas por motores elétricos individuais, dispensando assim a necessidade de um sistema mecânico diferencial de tração. As duas rodas dianteiras definem a direção do deslocamento do veículo. O ambiente de trabalho escolhido foi a superfície terrestre. A estabilidade apresentada pela plataforma quando parada ou em movimento, a mobilidade ou a capacidade de realizar manobras no ambiente de trabalho e a capacidade de transportar cargas, são três características importantes e muito desejáveis dos veículos de quatro rodas, equipados com um sistema de direção de Ackerman. Estas características foram decisivas para o autor escolher este tipo de plataforma como a mais adequada para implementar o veículo robô autônomo proposto.

8. O VEÍCULO ROBÔ IMPLEMENTADO

A figura (4) é uma fotografia do veículo robô implementado. Foi utilizado como plataforma um pequeno veículo para entretenimento de crianças. Após a instalação de todos os sensores o protótipo apresentou as seguintes dimensões: 1,23m de comprimento; 0,50m de largura; 0,54m de altura; 0,52m de distância entre eixos (DE); 0,44m de distância entre as rodas (L), com rodas de 0,20m de diâmetro. Está equipado com um sistema de direção elétrico, cujo ângulo máximo formado pelas rodas de direção em relação à plataforma no sentido longitudinal, (F_{MAX}) chega a 30° ou 0,523 radianos. As rodas traseiras do veículo são acionadas, de modo independente, por motores elétricos de corrente contínua (motor CC). Desta forma elimina-se a necessidade de um sistema de tração diferencial mecânico e de um sistema mecânico para mudança de velocidade e sentido de rotação. O eixo traseiro está equipado com um sistema de suspensão mecânica com mola espiral, proporcionando ao veículo uma boa navegabilidade em terrenos com superfícies irregulares.



Figura 4 – Fotografia do veículo robô implementado.

Com as dimensões do veículo robô acima apresentadas e utilizando a equação (13) e um ângulo F para as rodas dianteiras de 25° ($0,436\text{rd}$), calculou-se que o veículo pode se deslocar em uma trajetória circular com diâmetro de aproximadamente 3m. Observou-se que isto é possível quando o veículo move-se em um piso com boa aderência, capaz de evitar deslizamento e patinação das rodas.

9. OS SENSORES ELETRÔNICOS INSTALADOS NO VEÍCULO ROBÔ

O veículo robô implementado foi equipado com sete tipos de sensores que o auxiliam durante a navegação pelo ambiente. Quatro deles são sensores comerciais adaptados e três foram desenvolvidos pelo autor, para aplicações em robótica móvel: Os sensores são: uma bússola magnética, um inclinômetro, três sensores de ultra-som (SONAR), três sensores piroelétricos de infravermelho, quatro sensores de altitude, quatro sensores de aproximação lateral e duas câmeras CCD. A seguir serão apresentadas a descrição e fotografias de alguns destes sensores.

9.1 A bússola magnética adaptada

Uma das principais informações captadas pelo veículo robô para orientar-se ao navegar pelo ambiente de trabalho é a direção do campo magnético terrestre (CMT). Uma bússola magnética comercial foi adaptada pelo autor para ser utilizada pelo veículo robô implementado, como instrumento de navegação. É composta basicamente de uma agulha magnética à qual foi acoplado um disco, que pode girar livremente em torno de um eixo vertical. Uma interface eletrônica foi desenvolvida e instalada na bússola, cuja função é fornecer continuamente ao sistema de controle do veículo robô, uma tensão elétrica proporcional ao ângulo formado entre a direção de deslocamento e a direção do pólo norte magnético terrestre (PNM), tomado como referência. A figura (5) mostra duas fotografias da bússola magnética adaptada para ser utilizada no veículo.



Figura 5 – Fotografias da bússola magnética adaptada para o veículo robô.

9.2 O inclinômetro

Outro importante instrumento de navegação utilizado pelo veículo robô é o Inclinômetro, mostrado na figura (6). Este sensor fornece continuamente ao sistema de controle, uma tensão elétrica proporcional ao ângulo formado entre a plataforma do veículo e um plano horizontal imaginário, perpendicular ao raio da terra, tomado como referência. Durante o deslocamento, o inclinômetro informa continuamente ao sistema de controle do veículo robô se ele está na horizontal, inclinado para frente ou para trás, para a direita ou para a esquerda. Esta informação gerada pelo inclinômetro e enviada ao sistema de controle do veículo robô assemelha-se às informações fornecidas pelo labirinto humano ao cérebro, para que a pessoa saiba sua condição de inclinação em relação à horizontal.

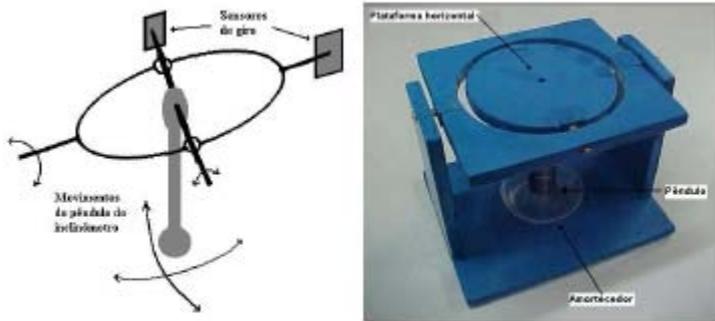


Figura 6 – Ilustração e fotografia do inclinômetro do veículo robô.

9.3 O sensor de ultra-som – SONAR

O desenvolvimento da eletrônica e o crescimento da demanda por dispositivos sensores capazes de medir distâncias ao ar livre, proporcionou o desenvolvimento de SONARES de baixo custo, que são utilizados na indústria e em muitas outras aplicações. Em robótica móvel, os sensores de ultra-som são utilizados principalmente para medição de distâncias e detecção de obstáculos no ambiente. A figura (7) é uma fotografia do SONAR utilizado no veículo robô. É um produto comercial que foi adaptado para aplicação em robótica móvel.



Figura 7 – Fotografia do SONAR adaptado utilizado no veículo robô.

9.4 O sensor piroelétrico de Infravermelho

Durante os testes de campo percebeu-se que alguns obstáculos não eram detectados pelo SONAR. Entre estes obstáculos “invisíveis” destacam-se: uma pessoa de pé ou pequenos animais, posicionados à frente do veículo robô, como mostrado na figura (8).

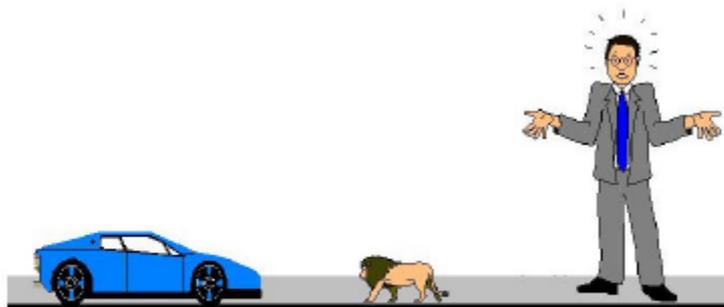


Figura 8 – O SONAR do veículo robô não detecta animais à sua frente.

Resolveu-se este problema com a instalação de três sensores piroelétricos de infravermelho no veículo robô. Dois sensores foram instalados à frente e um atrás, tornando-o capaz de detectar qualquer animal de sangue quente à frente ou atrás de si. Para serem utilizados no veículo robô, estes sensores foram adaptados para torna-los adequados a esta nova aplicação. Eles detectam a presença de seres vivos, parados ou em movimento à frente ou atrás do veículo robô, a uma distância de até 3m, através do movimento relativo entre ambos. A figura (9) é uma fotografia de um dos sensores piroelétricos de infravermelho utilizados.



Figura 9 – Fotografia do sensor piroelétrico de infravermelho.

9.5 O sensor de altitude

Durante testes de campo observou-se que um dos grandes desafios enfrentado pelo veículo robô ao se deslocar pelo ambiente, é identificar em seu caminho obstáculos como buracos, degraus a descer, final de plataformas elevadas, entre outros. Sensores capazes de monitorar continuamente a altitude dos pára-choques do veículo em relação ao solo, foram implementados e instalados nele. Estes sensores informam ao veículo, através de um sinal elétrico, qualquer mudança brusca de altitude à frente ou atrás dele, durante o deslocamento pelo ambiente, evitando que ele desça um degrau muito alto, causando-lhe danos. Quatro sensores de altitude foram utilizados, dois no pára-choques dianteiro à frente das rodas e dois no pára-choques traseiro. A figura (10) é uma ilustração do veículo robô com os sensores de altitude dianteiros (Shd) instalados, deslocando-se para frente e aproximando-se de um degrau. A grandeza h_n representa a altura normal do veículo em relação ao solo e h_g , uma grande altitude. O veículo detecta este obstáculo e pára na posição indicada, evitando o acidente.

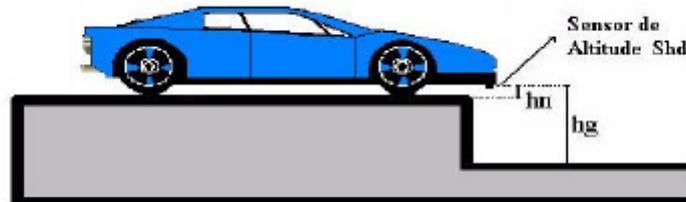


Figura 10 – Os sensores de altitude dianteiros instalados no veículo robô.

9.6 O sensor de aproximação lateral

Observou-se durante testes de campo, que os SONARES não conseguem detectar a aproximação lateral do veículo robô a obstáculos como uma parede, posicionada à sua direita ou à esquerda, conforme mostrado na figura (11). Sensores de aproximação lateral foram implementados e instalados em ambos os lados do veículo. Eles monitoram continuamente a aproximação dele a este tipo de obstáculos. Ao ser detectada a aproximação lateral à direita ou à esquerda, o sistema de controle recebe a informação e aciona o mecanismo de direção do veículo, afastando-o do obstáculo evitando colisões laterais. A figura (11) ilustra o veículo aproximando-se de um obstáculo lateral à direita, quando seguia pela trajetória (1). Após detectar o obstáculo lateral, o sistema de controle desvia o veículo pela trajetória (2). Algo semelhante acontece quando ele se aproxima de um obstáculo lateral à esquerda.

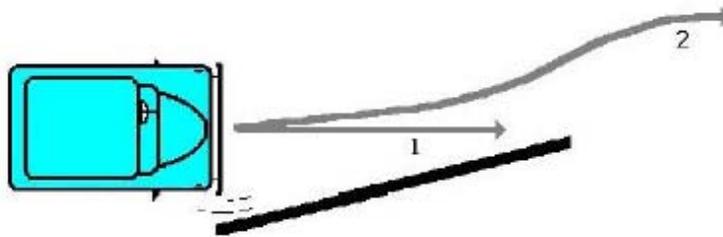


Figura 11 – Ilustração do veículo robô desviando-se de um obstáculo lateral.

9.7 A câmera CCD

Os veículos robôs muitas vezes são utilizados para executarem tarefas em ambientes inóspitos ou perigosos para o homem. Estes ambientes, na maioria dos casos, estão além do alcance visual humano ou são locais fechados não permitindo boa ou nenhuma visualização direta. Os veículos robôs mais apropriados para executarem tarefas nestas condições, são equipados com câmeras de vídeo e telecomandados por um operador abrigado em um local seguro. A câmera CCD é um importante sensor instalado no veículo. Ela proporciona ao operador a possibilidade de visualização do ambiente por onde o veículo navega. Duas câmeras semelhantes, uma apontada para a frente e outra para trás, são suficientes para que o operador tenha uma boa visualização do ambiente. Somente a câmera apontada para a direção do deslocamento do veículo permanece ligada. A comutação entre as câmeras é realizada pelo sistema de controle do veículo ou pelo operador, mas de forma sincronizada com a direção do deslocamento. Em situações especiais, podem ser instaladas câmeras capazes de girar em torno de um eixo vertical. Assim o operador poderá ter uma visão de 360 graus do ambiente onde o veículo se encontra. A figura (12) é uma fotografia de uma das câmeras utilizadas.



Figura 12 – A câmera CCD em cores utilizada pelo veículo robô.

10. O SISTEMA DE CONTROLE DO VEÍCULO ROBÔ IMPLEMENTADO

A figura (13) mostra o diagrama geral de blocos do sistema de controle do veículo robô. Foi implementado com arquitetura flexível, permitindo o acréscimo ou a remoção de módulos controladores (hardware) a qualquer tempo. O programa computacional (software) utilizado encontra-se gravado no bloco CPU do sistema de controle.

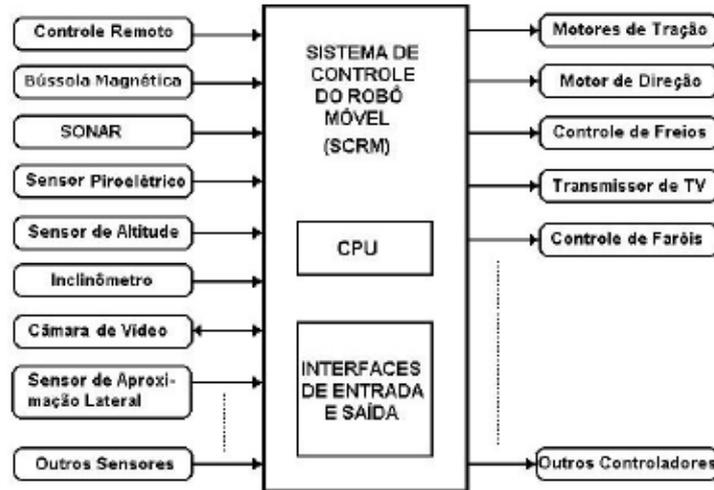


Figura 13 – Diagrama geral de blocos do sistema de controle do veículo robô.

Observa-se na figura que o sistema apresenta múltiplas entradas e saídas. Na literatura técnica, um sistema de controle com estas características é denominado de Sistema de Controle MIMO (Multiple Input - Multiple Output). É composto de vários controladores que trabalham em paralelo.

11. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Visando registrar graficamente a trajetória descrita pelo veículo robô durante seu deslocamento no ambiente, implementou-se um dispositivo traçador gráfico, o qual foi acoplado ao pára-choques traseiro do veículo. Ele registra no solo a trajetória percorrida pelo veículo nos dois modos de navegação.

11.1 Navegação no modo autônomo

A seguir são apresentados graficamente alguns resultados experimentais obtidos com o veículo robô operando no modo autônomo, em uma superfície plana horizontal, tendo como eixos de coordenadas as direções norte (N) e oeste (O). O veículo foi sempre liberado na origem do sistema de eixos e em diversas direções. Na construção dos gráficos, as coordenadas de vários pontos das trajetórias traçadas pelo veículo, foram determinadas através de medições, utilizando-se para isto uma fita métrica de aço e um esquadro. Tomando-se as coordenadas destes pontos e utilizando um computador, plotou-se trajetórias semelhantes às descritas pelo veículo. Nos gráficos dos resultados, o eixo do tempo (t) foi traçado paralelamente ao eixo norte. Em todos os testes realizados, o veículo tinha como objetivo seguir a direção norte. Esta era a direção de deslocamento mais conveniente no local disponível para a realização dos experimentos. A figura (14) mostra a trajetória experimental traçada, quando o veículo foi liberado na direção norte, com as rodas dianteiras na mesma direção, (ângulo $\theta = 0$). Observou-se que o veículo não navega em linha reta, o que seria a situação ideal, mas segue em torno do eixo de coordenadas norte, com desvio de $\pm 0,1\text{m}$, conforme registrado pelo dispositivo traçador gráfico. Observou-se também que ao ser liberado na direção norte com as rodas dianteiras na mesma direção, esta é a opção na qual o veículo apresenta os menores desvios da direção de deslocamento desejada. Este resultado será utilizado como referência para a análise dos demais e será ainda considerado o regime permanente de navegação do veículo no campo.

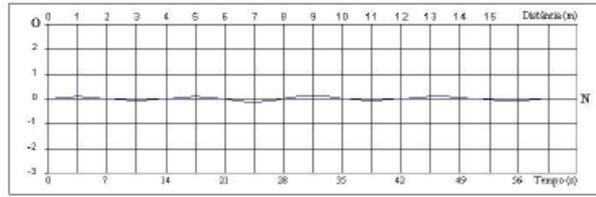


Figura 14 – Trajetória experimental do veículo, quando liberado na direção norte (N), com as rodas dianteiras na mesma direção.

A figura (15) mostra a trajetória experimental traçada, quando o veículo foi liberado na direção oeste, com as rodas dianteiras na mesma direção. Após 4 segundos ele atinge um desvio máximo de 1,7m na direção oeste. Após 56 segundos e um deslocamento de 16m na direção norte o veículo atinge um desvio de $\pm 0,4m$ em torno deste eixo. Observa-se que ao ser liberado nestas condições, o veículo navega em torno do eixo norte.

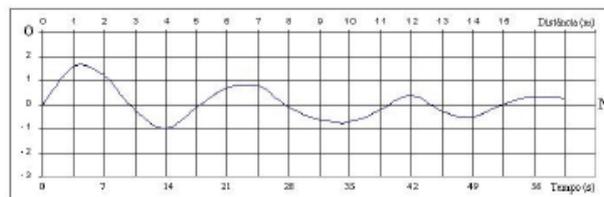


Figura 15 – Trajetória experimental do veículo, quando liberado na direção oeste (O), com as rodas dianteiras na mesma direção.

A figura (16) mostra a trajetória experimental traçada, quando o veículo foi liberado na direção sul (S), com as rodas dianteiras também voltadas para o sul, ($f = 0$). Após 8 segundos ele atingiu um deslocamento máximo de 2,2m na direção sul e encontra-se voltado para o oeste. Após 12 segundos o veículo atinge um deslocamento de 2,7m na direção oeste e encontra-se voltado para o norte, tendo girado 180 graus. A partir deste instante o veículo desloca-se para o norte, em torno de uma reta paralela a este eixo, deslocada de 2m da origem. Aos 31 segundos o veículo atinge um deslocamento máximo de 3m em relação ao eixo coordenado norte. Após 59 segundos o robô percorreu a distância de 15m a partir da origem e atingiu um desvio de $\pm 0,4m$ em torno de uma reta afastada de 2m da origem.

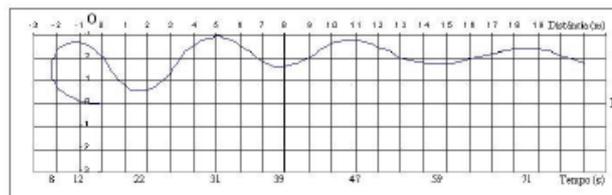


Figura 16 – Trajetória experimental do veículo, quando liberado na direção sul (S), com as rodas dianteiras na mesma direção.

A figura (17) mostra a trajetória experimental do veículo, quando liberado na direção norte e detectou um obstáculo através do sensor de aproximação lateral dianteiro esquerdo. O veículo desvia-se para a direita, evitando a colisão lateral com o obstáculo detectado. Após contornar o obstáculo, o ele volta a navegar na direção norte, porém em torno de uma reta paralela a este eixo. Trajetórias semelhantes a esta são obtidas, quando o veículo detecta obstáculos à frente e à esquerda, através do SONAR ou do sensor piroelétrico de infravermelho.

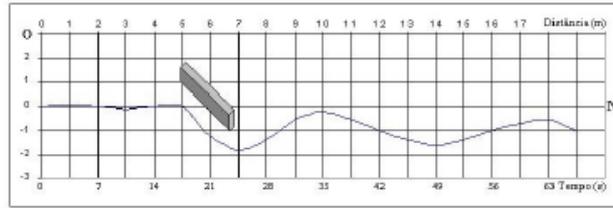


Figura 17 - Trajetória experimental do veículo, quando liberado na direção norte, com as rodas dianteiras na mesma direção e com detecção de obstáculo lateral à esquerda.

A figura (18) mostra uma trajetória experimental do veículo, quando liberado na direção norte e detectou um obstáculo através do sensor de altitude dianteiro direito. Observa-se que ao detectar este tipo obstáculo, o veículo aciona os freios interrompendo o deslocamento para frente, retorna alguns metros realizando uma manobra para desviar-se do obstáculo e depois segue em frente na direção norte.

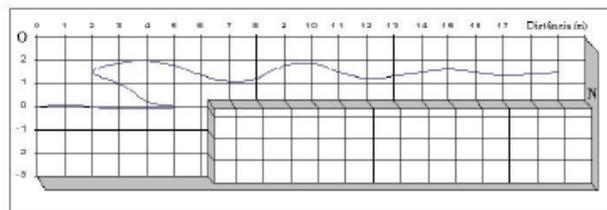


Figura 18 - Trajetória experimental do veículo, quando liberado na direção norte, com as rodas dianteiras na mesma direção e com detecção de obstáculo à direita.

11.2 Navegação no modo manual

No modo manual de navegação, o operador observa as imagens do ambiente através de um monitor de TV e dirige o veículo utilizando o controle remoto mostrado na figura (19). Ele pode enviar ao veículo oito comandos distintos: 1) veículo parado; 2) desloca-se no modo lento para frente; 3) desloca-se no modo rápido para frente; 4) desloca-se para frente e para a direita; 5) desloca-se para frente e para a esquerda; 6) desloca-se para trás; 7) desloca-se para trás e para a direita, e 8) desloca para trás e para a esquerda. Se o operador enviar ao veículo robô um comando para ele se deslocar na direção de um obstáculo já detectado, ele desobedece o comando.



Figura 19 – O controle remoto do veículo robô.

12. CONCLUSÃO

Durante o andamento deste trabalho de pesquisa, desenvolveu-se um Veículo Robô Autônomo com Controle Inteligente, capaz de navegar de modo autônomo ou manual pelo ambiente de trabalho. Nos dois modos de navegação, o veículo robô envia ao centro de controle, imagens e sons ao vivo do ambiente onde se encontra. Estas informações importantes para a navegação, são geradas em tempo real por câmeras de TV em cores instaladas no veículo, e transmitidas por um sistema de TV sem fio à mesa do operador. No modo autônomo o veículo navega pelo ambiente orientando-se pelo campo magnético terrestre (CMT), tomado como referência. O operador pode por exemplo, determinar que o veículo navegue em uma direção a 20 graus leste, 10 graus oeste, para o sul ou outra direção qualquer, simplesmente ajustando a bússola do veículo. Ao navegar de forma autônoma, se houverem obstáculos pelo caminho, o veículo detecta-os através de seus sensores e desvia-se deles evitando colisões e/ou acidentes. No modo manual de navegação, o operador observa as imagens do ambiente através de um monitor de TV e dirige o veículo utilizando um controle remoto. Durante os testes de campo observou-se que o veículo robô autônomo implementado é robusto e confiável, estando em conformidade com a proposta inicial deste trabalho. Os resultados experimentais obtidos foram satisfatórios.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDEEN, G. B., 1988, Robot Design Handbook, New York, McGraw-Hill.
- CAMPION, G., BASTIN, G., & D'ANDRÉA-NOVEL, B., 1996, "Structural Properties and Classification of Kinematic and Dynamical Models of Wheeled Mobile Robots, IEEE Trans. On Robotics and Automation, V.12(1), pp. 47-62.
- DUDEK, G. & JENKIN, M., 2000, Computational Principles of Mobile Robotics, Cambridge University Press.
- GILLESPIE, T. D., 1992, Fundamentals of Vehicle Dynamics, Society of Automotive Engineers, Inc., Warrendale, PA.
- McKERROW, P. J., 1991, Introduction to Robotics, Sydney, Addison-Wesley.
- RIUL, J. A., SILVA, V. M. C., & SILVA, J. B. A., "Análise Cinemática e Dinâmica de Robôs Manipuladores." In: XI Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, São Paulo – SP, Vol. Único, pp. 583-585.