

Uma Introdução aos

Robôs Móveis

Dr. Humberto Secchi

Original:

Título: **Una Introducción a los Robots Móviles**

Autor: **Humberto Alejandro Secchi**

Instituto de Automática – INAUT

Universidade Nacional de San Juan – UNSJ – Argentina

Primeiro lugar no concurso de monografias da AAECA – Associação Argentina de Controle Automático – em 2008.

Edição: Agosto de 2008.

Tradução:

Cynthia Netto de Almeida e Felipe Nascimento Martins

Revisão técnica: **Felipe Nascimento Martins**

NERA – Núcleo de Estudos em Robótica e Automação

IFES – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo

Edição: Abril de 2012.

Prefácio da edição brasileira

Este texto foi traduzido para o português com autorização do autor, que também permitiu sua distribuição sem custo para utilização não-comercial. A tradução deste trabalho foi uma iniciativa pessoal, com o objetivo de divulgar um material introdutório sobre robótica móvel a alunos do **NERA** – Núcleo de Estudos em Robótica e Automação, e da disciplina de Robótica Industrial do curso de Engenharia de Controle e Automação do IFES.

A maioria das figuras não foi traduzida. Preferi não alterar muitas delas para evitar perda de qualidade. Assim, muitas figuras contêm texto em espanhol ou em inglês. No entanto, acredito que esse fato não crie dificuldade para entendimento do conteúdo, uma vez que as figuras são explicadas no texto.

Por seu conteúdo de alta qualidade, o presente trabalho obteve o primeiro lugar na edição de 2008 do concurso de monografias organizado pela Associação Argentina de Controle Automático – AADECA. Agradeço ao Humberto por ter aceitado que fizéssemos sua tradução e divulgação. A partir de agora, leitores de língua portuguesa interessados em iniciar seus estudos em robótica móvel também podem aproveitar esta excelente monografia como fonte de consulta.

Dr. Felipe Nascimento Martins.
Serra, ES, Brasil. Abril de 2012.

Prefácio da edição argentina

O presente trabalho está dirigido àqueles profissionais e estudantes avançados de engenharia que desejam ter um primeiro contato com a robótica móvel. O mesmo não tenta ser uma obra completa, pelo contrário, somente aborda diretrizes básicas sobre três aspectos importantes da Robótica Móvel: o projeto mecânico; o sistema sensorial; algumas estratégias de navegação para evitar obstáculos e os fundamentos matemáticos de diversos modelos matemáticos (cinemáticos e dinâmicos) dos robôs móveis tipo uniciclo, que situam o leitor na problemática da robótica móvel e nas diversas soluções possíveis que podem ser aprofundadas a partir do material bibliográfico referenciado.

A obra está organizada da seguinte maneira:

No primeiro capítulo se realiza uma breve introdução à problemática da robótica móvel desde seu início, apresentando sua evolução até os tempos atuais, situando a robótica móvel no contexto da robótica em geral. São apresentados alguns exemplos de robôs móveis comerciais que tentam motivar a imaginação do leitor.

No capítulo 2, faz-se uma análise das características mecânicas de um robô móvel com suas vantagens e desvantagens. Começando a partir dos tipos de rodas até chegar aos tipos de sistemas de tração e direção, destacando suas principais vantagens.

No terceiro capítulo se desenvolve as características sensoriais de um robô móvel a partir da problemática do posicionamento e as possíveis estratégias para resolver este problema. São apresentados desde os simples sistemas odométricos até sistemas de posicionamento mais complexos como os baseados em balizas.

No capítulo 4, são descritas diversas estratégias de navegação para se evitar obstáculos empregando sensores de ultrassom, telemetria a LASER e visão artificial. Sem entrar em aprofundamentos matemáticos sobre os algoritmos, descreve-se detalhadamente o funcionamento de cada um deles.

Finalmente, no capítulo 5, se desenvolve com certa profundidade quatro modelos matemáticos de robôs móveis (dois cinemáticos e dois dinâmicos) que serão de grande utilidade ao leitor interessado de simular alguma estratégia de controle. Cada modelo vai acompanhado de um minucioso desenvolvimento matemático para facilitar a compreensão do leitor.

Dr. Humberto Secchi.
San Juan, Argentina, 2008.

À minha esposa Cristina,
a meus filhos Massimo, Vittorio e Matteo
pelo tempo que, sob protesto, me deram.

Sumário

Prefácio da edição brasileira	iii
Prefácio da edição argentina	iv
Sumário	vi
Índice de figuras	viii
1 Introdução	1
1.1 Introdução geral	1
1.2 Breve história	1
1.3 Classificação dos robôs	3
1.4 Aplicação dos robôs móveis	7
1.5 Robôs móveis e robótica	11
2 Morfologia dos Robôs Móveis	17
2.1 Tipos de ambientes em que opera o robô móvel	17
2.2 Tipos de sistemas de locomoção	18
2.3 Tipos de rodas	19
2.4 Disposição das rodas	20
2.4.1 Robô omnidirecional	20
2.4.2 Uniciclo	22
2.4.3 Triciclo	22
2.4.4 Quadriciclo	22
2.5 Tração e direção	23
2.5.1 Tração e direção em eixos independentes	23
2.5.2 Tração e direção em um mesmo eixo (tração diferencial)	24
2.5.3 Tração e direção em todos os eixos	24
2.6 Configurações especiais	25
3 Sensores para robôs móveis	26
3.1 Estrutura dos sentidos do homem	26
3.2 Tipos de sensores em robótica	27
3.3 Descritores estáticos e dinâmicos	28
3.4 Sensores em robôs móveis	30
3.4.1 Estimadores explícitos	31
3.4.2 Estimadores baseados na percepção do ambiente	41
4 Esquemas básicos de navegação para evitar obstáculos	47
4.1 Método de detecção de bordas ou esquinas	47
4.2 A grade de certeza para representação de obstáculos	48
4.3 O método do campo de potencial	49
4.4 Método do campo de forças virtuais (VFF)	50
4.5 Método do histograma de campo vetorial (VFH)	53
4.6 Controle estável baseado em impedância	55
4.7 Controle estável baseado em fluxo óptico	56

4.8 Controle estável baseado em visão 2D½	58
5 Modelos matemáticos do robô móvel	60
5.1 Fundamentos matemáticos	60
5.2 Modelos cinemáticos	61
5.2.1 Modelo cinemático cartesiano	61
5.2.2 Modelo cinemático polar	62
5.2.3 Relação entre os modelos	63
5.3 Modelos dinâmicos	64
5.3.1 Modelo dinâmico de parâmetros conhecidos	64
5.3.2 Modelo dinâmico com incertezas para um robô móvel.	70
5.4 Avaliação dos diversos modelos	76
Referências	79

Índice de figuras

Figura 1.2.1. Três robôs que serviram de inspiração.....	2
Figura 1.3.1 Robô industrial PUMA (Unimation)	3
Figura 1.3.2. Robô industrial RX260 da Stäubli.....	3
Figura 1.3.3. Prótese robótica biônica.....	4
Figura 1.3.4. Robô cirúrgico Da Vinci.....	4
Figura 1.3.5. Robô móvel AURORA (Universidade de Málaga)	5
Figura 1.3.6. Robô AURIGA I V2R (Universidade de Málaga).....	6
Figura 1.3.7. Robô AURIGA II V0R (Universidade de Málaga).....	6
Figura 1.3.8. O robô serpente pode desenvolver tarefas de inspeção de forma individual ou em colaboração acoplado a outros tipos de robôs.....	7
Figura 1.3.9. Manipulador móvel da empresa Adept MobileRobots.....	7
Figura 1.4.1. Inspector Bot da Eventronic ES, um robô que inspeciona tubulações.....	8
Figura 1.4.2. Clean Bot da Eventronic, limpa tubulações.....	8
Figura 1.4.3. Verro da iRobot, limpa piscinas/tanques de água.....	8
Figura 1.4.4. Aspiradora doméstica autônoma, Scooba da iRobot.....	8
Figura 1.4.5. Robô enfermeiro Hospi desenvolvido pela empresa Matsushita.....	9
Figura 1.4.6. Empilhadeira laser-guiada da OCME SRL.....	9
Figura 1.4.7. Sistema de Transporte de Material Automatizado (AMTS sigla em inglês) da Carnegie Mellon University.....	9
Figura 1.4.8. A NREC (National Robotics Engineering Center) converteu o trator 6410 da John Deere em um veículo autônomo capaz de percorrer 7 km sem necessidade de um operador.....	10
Figura 1.4.9. Robô militar de vigilância e exploração desenvolvido em conjunto pela John Deer e iRobot.....	10
Figura 1.4.10. Robô militar Warrior X700 da iRobot.....	10
Figura 1.4.11. Robô soldado TALON utilizado pelo exército dos EUA no Iraque.....	11
Figura 1.4.12. Robô de vigilância urbana OFRO da empresa RobotWatch.....	11
Figura 1.5.1. Algumas das possíveis trajetórias que o robô móvel poderia seguir.....	12
Figura 1.5.2. Esquema geral do sistema de controle de um robô móvel.....	13
Figura 1.5.3. Estratégias de controle para robôs móveis.....	14
Figura 2.1.1. Robôs de interior (Amigobot) e exterior (Seekur) da empresa Adept MobileRobots.....	17
Figura 2.1.2. Ambientes estruturado (biblioteca) e não-estruturado (depósito em linha de produção).....	18
Figura 2.2.1. Robôs terrestres. (a) Hermes (Robosoft). (b) Journey (SMU). (c) Scour (USF). 18	
Figura 2.2.2. Robô aquático (NSF) e robô aéreo (TU Berlin).....	19
Figura 2.3.1. Tipos de rodas. (a) Roda fixa. (b) Roda orientável centralizada. (c) Roda louca.20	
Figura 2.3.2. Detalhe de uma roda sueca e exemplo de sua disposição sobre uma estrutura mecânica.....	20
Figura 2.4.1. Robô omnidirecional com rodas suecas. (a) Manobrabilidade. (b) Robô Uranus (Universidade de Michigan).....	21
Figura 2.4.2. Robô omnidirecional com rodas orientáveis centralizadas. (a) Disposição sobre uma estrutura mecânica. (b) Robô Seekur (Adept MobileRobots).....	21
Figura 2.4.3. Sincronismo entre o sistema de tração e direção com rodas omnidirecionais (<i>synchro drive</i>). (a) Mecânico. (b) Eletrônico.....	21
Figura 2.4.4. Uniciclo. (a) Estrutura. (b) Robô Pioneer (Adept MobileRobots).....	22
Figura 2.4.5. Triciclo. (a) Estrutura. (b) Robô Neptune (Universidade Carnegie Mellon).....	22

Figura 2.4.6. Sistema de direção Ackerman.....	23
Figura 2.5.1. Sistema de tração e direção em eixos independentes.....	24
Figura 2.5.2. Sistema de tração e direção num mesmo eixo.	24
Figura 2.5.3. Sistema de tração e direção em todos os eixos.	24
Figura 2.6.1. Robô de Múltiplos Graus de Liberdade desenvolvido na Universidade de Michigan.....	25
Figura 2.6.2. Módulos cooperativos (Universidades de Hamburgo e Beihang).....	25
Figura 2.6.3. Robô de exploração espacial PATHFINDER (JPL).	25
Figura 3.3.1. Descritores dinâmicos de um sensor.....	29
Figura 3.4.1. Sistema de referências em um robô móvel.	31
Figura 3.4.2. Odometria num robô móvel.	33
Figura 3.4.3. Sensor Doppler.....	34
Figura 3.4.4. <i>Encoder</i> óptico. (a) Princípio de funcionamento (b) Dispositivo comercial.	34
Figura 3.4.5. Acelerômetro. (a) Princípio de funcionamento. (b) Acelerômetro eletrônico. ...	35
Figura 3.4.6. Bússola eletrônica HM55B baseada em efeito Hall.....	35
Figura 3.4.7. Giroscópio de orientação desenvolvido por Herman Anschütz-Kaempfe em 1903.....	36
Figura 3.4.8. Para cada ponto sobre uma linha hiperbólica, a distância $(ABC - AC) = k$, sendo k constante.....	37
Figura 3.4.9. Cobertura do sistema LORAN.....	38
Figura 3.4.10. Esquema de funcionamento de um sistema de trilaterização.....	39
Figura 3.4.11. O Sistema de Posicionamento Global (GPS) consiste de três segmentos fundamentais: Espaço, Controle e Usuário.	40
Figura 3.4.12. Procedimento geral para posicionamento por detecção de marcas.....	42
Figura 3.4.13. Diferentes possibilidades de triangulação. a) Ângulos absolutos de referência. b) Ângulos observados entre marcas. c) Distâncias observadas das marcas. d) Ângulo e distância a uma marca.	42
Figura 3.4.14. Posicionamento baseado em mapas.....	43
Figura 3.4.15. Diferentes tipos de mapas. (a) Geométrico. (b) Topológico.....	45
Figura 4.2.1. Projeção bi-dimensional do campo de visão cônico de um sensor ultrassônico.	49
Figura 4.4.1. Grade histograma.	51
Figura 4.4.2. Conceito de campo de forças virtuais: as células ocupadas exercem forças repulsivas sobre o robô. A amplitude é proporcional ao valor de certeza da célula e da proximidade com as mesmas.	52
Figura 4.5.1. Mapeamento das células da janela ativa sobre o histograma polar.....	54
Figura 4.5.2. Densidade polar de obstáculos.....	54
Figura 4.6.1. Malha de controle baseada em impedância.....	55
Figura 4.6.2. Funcionamento do sistema de malha fechada.....	56
Figura 4.7.1. Imagem do corredor por onde navega o robô móvel e o campo de fluxo óptico resultante.	57
Figura 4.7.2. Estrutura de controle proposta para navegação mediante fluxo óptico.....	57
Figura 4.8.1. Esquema de funcionamento básico de um sistema de visão $2D\frac{1}{2}$	58
Figura 4.8.2. Estrutura de controle proposta para navegação mediante visão $2D\frac{1}{2}$	58
Figura 4.8.3. Sequência de imagens de um objeto em interação com o segmento de LASER e seus histogramas correspondentes.....	59
Figura 5.2.1. Posição e orientação do robô móvel expressas em coordenadas cartesianas.....	61
Figura 5.2.2. Posição e orientação do robô móvel expressas em coordenadas polares.....	62
Figura 5.2.3.....	63

Figura 5.3.1. Modelo dinâmico dos motores.	64
Figura 5.3.2. Descrição geométrica do veículo.	65
Figura 5.3.3. Evolução temporal da velocidade linear do robô móvel para uma entrada degrau de tensão nos motores de tração ($U_1 = U_2$ em $t = 0,1$ s).....	69
Figura 5.3.4. Evolução temporal da velocidade angular do robô móvel para uma entrada degrau de tensão nos motores de tração ($U_1 = -U_2$ em $t = 0,1$ s).	70
Figura 5.3.5. Robô móvel e seus parâmetros característicos.....	71
Figura 5.4.1. Influência da massa da estrutura mecânica sobre as trajetórias descritas pelo robô móvel.....	76
Figura 5.4.2. Influência da ordenada, δ , do centro de massa G , sobre a trajetória do robô móvel.....	77
Figura 5.4.3. Relação existente entre o raio das rodas de tração (r_r) e a velocidade linear do robô.....	77
Figura 5.4.4. Relação existente entre o raio das rodas de tração (r_r) e a velocidade angular do robô.....	78
Figura 5.4.5. Relação existente entre a separação das rodas de tração (b) e a velocidade angular do robô para $0,1 < b < 1$	78

1 Introdução

1.1 Introdução geral

O século XXI chega com grandes avanços na robótica que fazem com que ela se apresente como algo cotidiano nas vidas dessa geração. Assim, é comum ver robôs industriais que soldam, pintam e movimentam grandes peças. Robôs que atuam em laboratórios farmacêuticos, em salas de cirúrgicas ou nas atividades diárias de pessoas necessitadas de atenções especiais. Até robôs que procuram e desativam minas, procuram por sobreviventes em zonas de desastres naturais e realizam tarefas agrícolas como fumigar e realizar a colheita. Sem mencionar os robôs que adquirem fama já que são empregados em acidentes nucleares, naufrágios ou exploração extraterrestre. Definitivamente, a robótica se instala no entorno trazendo segurança e qualidade.

A robótica sempre ofereceu ao setor industrial um excelente compromisso entre produtividade e flexibilidade, uma qualidade uniforme dos produtos, uma sistematização dos processos e a possibilidade de supervisionar e/ou controlar as plantas segundo diferentes parâmetros e critérios. Pode-se destacar quatro vantagens principais dos sistemas robotizados: aumento da produtividade, alta flexibilidade, excelente qualidade e melhoria da segurança. Como resultado, a robotização permite melhorar a qualidade e as condições de trabalho, substituindo tarefas penosas por outras que se realizam em condições muito mais vantajosas. Porém, além disso, a invasão da automatização nos serviços e o ócio permitem melhorar a qualidade de vida dos cidadãos.

1.2 Breve história

Tradicionalmente as aplicações da robótica estavam centradas nos setores manufatureiros mais desenvolvidos para a produção massiva: indústria automobilística, transformações metálicas, indústria química etc. ainda que na última década o peso da indústria manufatureira tenha diminuído.

No princípio dos anos sessenta introduziu-se na indústria, de modo significativo, os **robôs manipuladores** como um elemento a mais do processo produtivo. Essa proliferação, motivada pela ampla gama de possibilidades que oferecia, levantou o interesse dos pesquisadores para conseguir manipuladores mais rápidos, precisos e fáceis de programar. A consequência direta desse avanço originou um novo passo na automação industrial, que tornou mais flexível a produção com o nascimento da noção de célula de fabricação robotizada.

O trabalho desenvolvido pelos robôs manipuladores consiste frequentemente em tarefas repetitivas, como a alimentação das diferentes máquinas componentes da célula de fabricação robotizada. Para isso, é necessário situar as máquinas no interior de uma área acessível para o manipulador, caracterizada pela máxima extensão de suas articulações, o que poderia ser impossível na medida em que as células sofriam progressivas ampliações. Uma solução para esse problema foi o desenvolvimento de um veículo móvel sobre trilhos para proporcionar um transporte eficaz dos materiais entre as diferentes zonas da cadeia de produção. Dessa forma, aparecem nos anos 80 os primeiros **Veículos Guiados Automaticamente** (AGV's). Uma melhoria com respeito à sua concepção inicial se baseia na substituição dos trilhos como referência guia na navegação pelos cabos enterrados, reduzindo, com ele, os custos de instalação.

A possibilidade de estruturar o ambiente industrial permite a navegação de veículos com capacidades sensoriais e de raciocínio mínimas. Desse modo, a tarefa se ordena em uma sequência de ações que, ao serem concluídas, o veículo supõe que alcançou o objetivo para o qual está programado. Diante de qualquer mudança inesperada na área de trabalho que afete o desenvolvimento normal da navegação, o sistema de navegação do veículo se encontrará impossibilitado para executar ações alternativas que o permitam retomar sua atividade. Por outro lado, por suas potenciais aplicações fora do âmbito industrial, onde é caro ou impossível estruturar o entorno, dotou-se os veículos de um maior grau de inteligência e percepção no intuito de obter um veículo de propósito geral apto para desenvolver-se em qualquer classe de ambiente. Assim, nos anos 90, surgem os **robôs móveis**. Uma definição correta de robô móvel propõe um conhecimento incerto, mediante a interpretação da informação fornecida através de seus sensores e do estado atual do veículo.

Esta avaliação mecânica, sensorial e racional dos robôs móveis não foi assim estrita já que, sem ter uma finalidade específica, ao longo da história existiram alguns desenvolvimentos (Figura 1.2.1) que foram fonte de inspiração para a construção dos robôs móveis atuais. Alguns deles são: o primeiro robô humanóide de Leonardo Da Vinci cerca dos anos 90 do século XV, a **Máquina Speculatrix** de W. Walter Grey nos anos 50 e **Shakey** do Instituto de pesquisa de Stanford (Stanford Research Institute) nos anos 70, ambos do século XX.

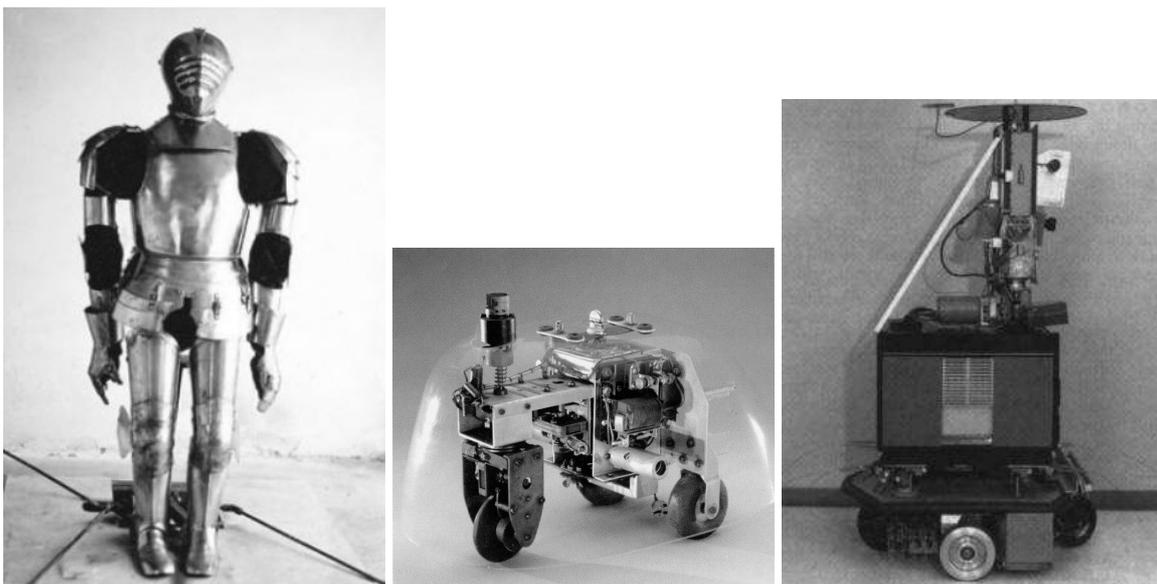


Figura 1.2.1. Três robôs que serviram de inspiração.

1.3 Classificação dos robôs

Em geral, a bibliografia considera que existem três classes de robôs [1]:

- industriais;
- médicos; e
- móveis.

Os robôs industriais (Figura 1.3.1) são os de maior difusão em tarefas de alcance econômico, formados por uma estrutura mecânica articulada, que se move adaptando diferentes configurações pelas ordens recebidas de um equipamento de controle baseado normalmente em um microprocessador.



Figura 1.3.1 Robô industrial PUMA (Unimation)

Podem mover cargas pesadas a grandes velocidades e com uma grande exatidão, como o RX260, da Stäubli (Figura 1.3.2), que tem uma capacidade máxima de carga de 150 kg e uma exatidão de $\pm 0,07\text{mm}$.



Figura 1.3.2. Robô industrial RX260 da Stäubli.

Os robôs médicos, de cooperação ou de reabilitação (Figura 1.3.3), estão concebidos como próteses inteligentes para as pessoas com necessidades físicas especiais que se diferenciam do resto em sua forma, que procura ter a aparência da correspondente extremidade humana, em

realizar as funções desta e que os sinais emitidos provenham de sinais nervosos ou musculares. Essas próteses podem dobrar o cotovelo, rodar a munheca ou mover o ombro. Elas podem imitar 25 dos 30 movimentos desenvolvidos por um braço humano permitindo à pessoa pegar objetos pequenos como uva passas e até um copo com água.

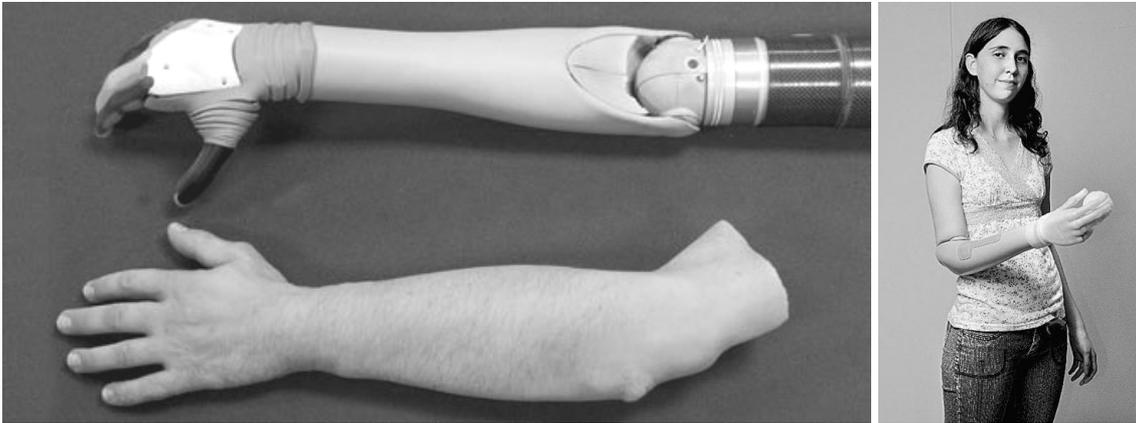


Figura 1.3.3. Prótese robótica biônica.

Também entram nessa categoria aqueles robôs desenvolvidos especificamente como assistentes em tarefas cirúrgicas de grande precisão ou alta complexidade como o robô cirúrgico Da Vinci (Figura 1.3.4) que se encontra no Hospital Saint Clare de Denville (EUA). Este sistema único no mundo permitirá importantes avanços para conseguir cirurgias menos invasivas empregando instrumentos cirúrgicos de vanguarda junto com sistemas de visualização em três dimensões (3D).



Figura 1.3.4. Robô cirúrgico Da Vinci

Os robôs móveis são dispositivos de transporte automático, ou seja, são plataformas mecânicas dotadas de um sistema de locomoção capazes de navegar através de um determinado ambiente de trabalho, dotados de certo nível de autonomia para sua locomoção, portando cargas. Suas aplicações podem ser muito variadas e estão sempre relacionadas com tarefas que normalmente são arriscadas ou nocivas para a saúde humana, em áreas como a agricultura, no transporte de cargas perigosas ou em tarefas de exploração solitárias ou cooperativas junto a outros veículos não tripulados. Exemplos clássicos são o traslado e coleta de materiais, as tarefas de manutenção de reatores nucleares, a manipulação de materiais explosivos, a exploração subterrânea etc.

É necessário esclarecer que o conceito de autonomia não se relaciona apenas com questões energéticas, mas também se refere à capacidade de perceber, modelar, planejar e atuar para alcançar determinados objetivos, sem a intervenção (ou com uma intervenção muito pequena) do operador humano, já que o robô pode se locomover em ambientes estruturados ou não estruturados, total ou parcialmente conhecidos. O papel deste deve ser desempenhado pelo próprio sistema de controle do veículo, que o deve suprir com a inteligência necessária para fazê-lo mover corretamente. A denominação do robô móvel [2] faz referência a essa capacidade para alcançar um ou vários objetivos com uma intervenção muito pequena de supervisores humanos. Por outro lado, a denominação de veículo auto-guiado faz referência às estruturas móveis que só se limitam a seguir caminhos preestabelecidos (linhas pintadas no chão, bandas magnéticas, bandas refletoras).



Figura 1.3.5. Robô móvel AURORA (Universidade de Málaga)

A Figura 1.3.5 mostra o robô AURORA, dedicado ao serviço em estufas, particularmente em tarefas de fumigação. Desenvolvido na Universidade de Málaga (UMA), incorpora uma motorização baseada em motores de corrente alternada, alimentados por um gerador de corrente alternada a 220V. Sistema de controle baseado em PC industrial. Sistema sensorial baseado em sensores de ultrassom e câmera CCD para o controle reativo e tele-operação.

A Figura 1.3.6 apresenta o robô AURIGA I V2R, robô de esteiras para carga, desenvolvido nos laboratórios da UMA. Dispõe de uma tração independente por correia com uma velocidade máxima de 3m/s. A capacidade de carga é de 400 kg a 0,75m/s. Sobe rampas com inclinação superior a 30°, inclusive em más condições de apoio (escadas de degrau padrão). Incorpora um Sistema de Planejamento e Sistema Sensorial de alto nível (escâner radial, câmeras CCD, GPS, giroscópio) baseados em PC industrial. Além disso, inclui arquitetura de controle articulador para a condução com reboque, as arquiteturas de detecção e desvio de obstáculos, assim como os módulos para a realização de manobras complexas.



Figura 1.3.6. Robô AURIGA I V2R (Universidade de Málaga)

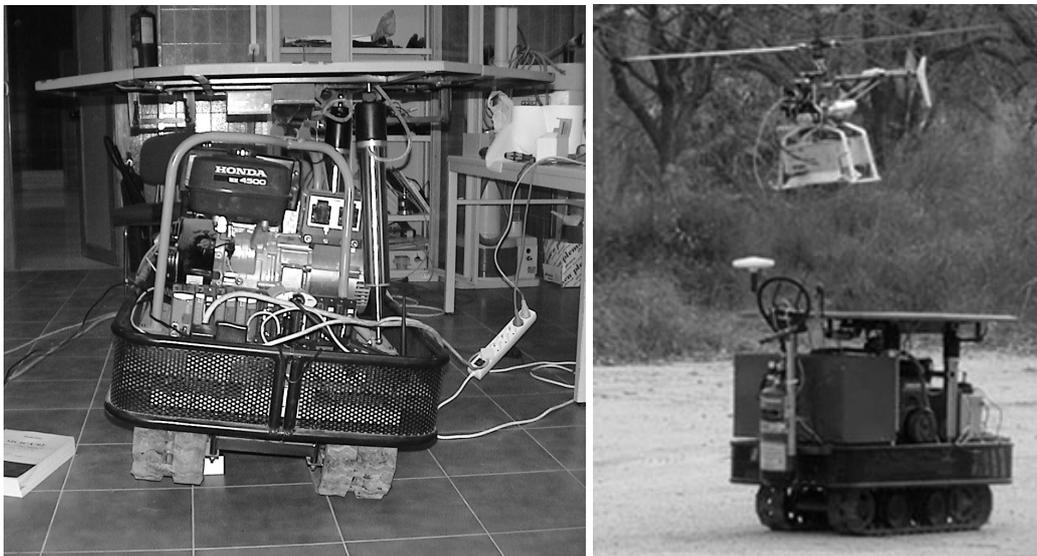


Figura 1.3.7. Robô AURIGA II V0R (Universidade de Málaga)

Na Figura 1.3.7 pode-se observar o robô Auriga II V0R que suporta uma plataforma giro estabilizada para a decolagem/aterrissagem de mini-helicópteros (até 50 kg) dotada de câmeras para ajudar nas manobras. A plataforma tem dois graus de liberdade, motorizados mediante dois êmbolos com acionamentos elétricos.

Estas classificações tão estritas foram amplamente superadas graças ao avanço da mecatrônica, que permitiu conseguir robôs mais leves e menores, e dispositivos eletrônicos mais integrados; tudo isso permitiu superar essas fronteiras teóricas e construir robôs mais

complexos como os robôs serpente (*snake robôs*) da Figura 1.3.8 e os manipuladores móveis como o da Figura 1.3.9.

Esses avanços abriram uma porta para a utilização de robôs em tarefas que eram impossíveis de serem realizadas pelo homem, e que agora são possíveis de serem realizadas pelas máquinas e, inclusive, permitiram livrar o homem de tarefas perigosas ou monótonas/repetitivas.

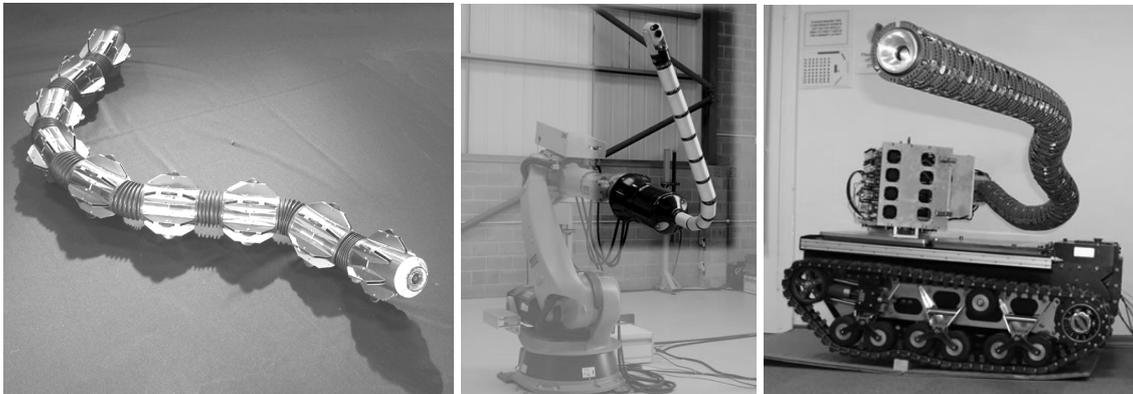


Figura 1.3.8. O robô serpente pode desenvolver tarefas de inspeção de forma individual ou em colaboração acoplado a outros tipos de robôs.



Figura 1.3.9. Manipulador móvel da empresa Adept MobileRobots¹.

1.4 Aplicação dos robôs móveis

Serão mostradas algumas aplicações de robôs móveis que vão desde aplicações domésticas e de serviços até aplicações agro-industriais, sem esquecer as aplicações de vigilância e militares - que são os setores que mais promovem este tipo de desenvolvimento.

¹ N. do T.: O texto original traz o nome antigo da empresa, que se chamava ActiveMedia. Como a empresa mudou seu nome para Adept MobileRobots, preferimos utilizar o nome atual.



Figura 1.4.1. Inspector Bot da Eventronic ES, um robô que inspeciona tubulações.

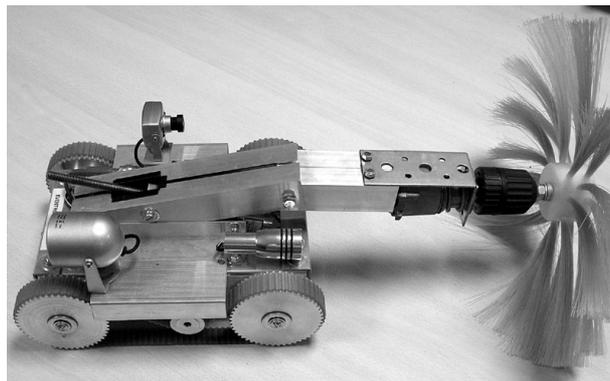


Figura 1.4.2. Clean Bot da Eventronic, limpa tubulações.



Figura 1.4.3. Verro da iRobot, limpa piscinas/tanques de água.



Figura 1.4.4. Aspiradora doméstica autônoma, Scooba da iRobot.



Figura 1.4.5. Robô enfermeiro Hospi desenvolvido pela empresa Matsushita.



Figura 1.4.6. Empilhadeira laser-guiada da OCME SRL.



Figura 1.4.7. Sistema de Transporte de Material Automatizado (AMTS sigla em inglês) da Carnegie Mellon University.



Figura 1.4.8. A NREC (National Robotics Engineering Center) converteu o trator 6410 da John Deere em um veículo autônomo capaz de percorrer 7 km sem necessidade de um operador.



Figura 1.4.9. Robô militar de vigilância e exploração desenvolvido em conjunto pela John Deere e iRobot.

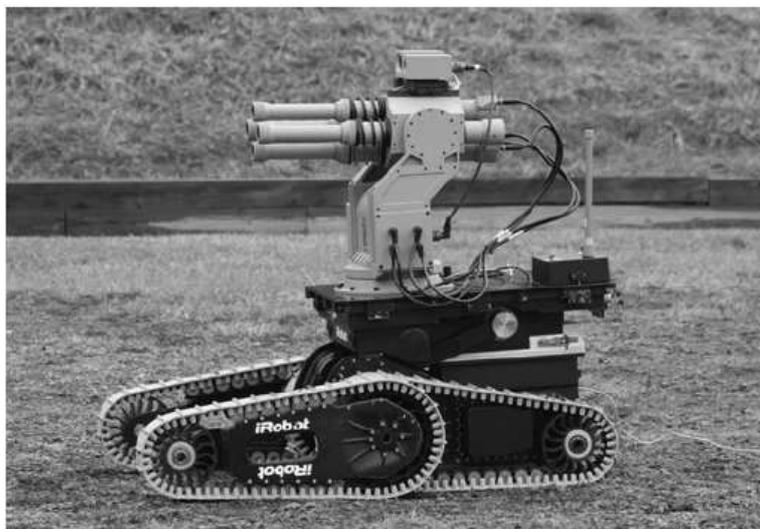


Figura 1.4.10. Robô militar Warrior X700 da iRobot.



Figura 1.4.11. Robô soldado TALON utilizado pelo exército dos EUA no Iraque.



Figura 1.4.12. Robô de vigilância urbana OFRO da empresa RobotWatch.

1.5 Robôs móveis e robótica

Os robôs móveis operando em grandes ambientes não estruturados devem deparar-se com significativas incertezas na posição e na identificação de objetos. De fato, a incerteza é tal que, mover-se de um ponto A até um ponto B é uma atividade arriscada para um robô móvel, o que é uma atividade relativamente trivial para um manipulador industrial. Em compensação, por ter de lidar com tantas incertezas do entorno, não se espera que o robô móvel siga trajetórias ou alcance seu destino final com o mesmo nível de precisão que se espera de um manipulador industrial (na ordem de centésimos de milímetros).

Os diferentes índices de operação (medidos pela incerteza e precisão necessárias) dos robôs móveis, em relação aos manipuladores industriais, deve-se à existência de um conjunto diferente de prioridades na pesquisa. As prioridades, para os robôs móveis, estão firmemente orientadas nas áreas de sensoriamento e raciocínio.

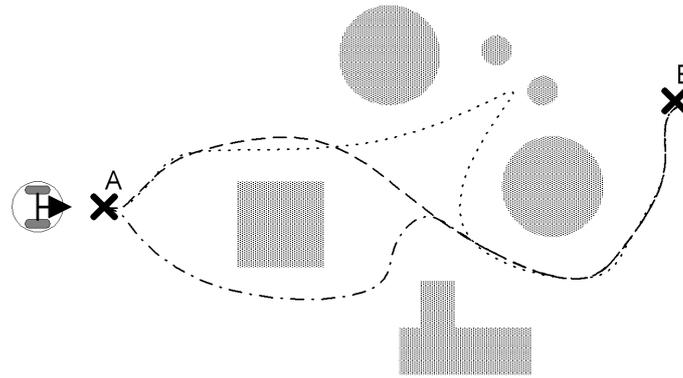


Figura 1.5.1. Algumas das possíveis trajetórias que o robô móvel poderia seguir.

Os robôs industriais podem ser mais efetivos com um mínimo de informação sensorial e sem raciocínio porque eles operam essencialmente em ambientes estáticos, estruturados e, quase sempre, conhecidos.

O principal problema a ser resolvido em um robô móvel é gerar trajetórias e guiar seu movimento segundo estas, com base na informação proveniente do sistema de sensores externos (ultrassom, LASER, visão), permitindo ao veículo mover-se entre os quaisquer pontos do ambiente de trabalho de maneira segura, sem colisão. Isso exige o projeto de sistemas de controle de trajetórias (posição, direção, velocidade) em diversos níveis hierárquicos, de maneira que o processamento da informação proveniente dos sensores externos assegure a maior autonomia possível.

O robô móvel autônomo caracteriza-se por uma conexão **inteligente** entre as operações de percepção e ação, que define seu comportamento e o permite chegar à execução dos objetivos programados sobre o ambiente com alguma incerteza. O grau de autonomia depende em grande medida da capacidade do robô para abstrair o entorno e converter a informação obtida em ordens, de tal modo que, aplicadas sobre os atuadores do sistema de locomoção, garanta a realização eficaz de sua tarefa. Desse modo, as duas grandes características que o afastam de qualquer tipo de veículo são [3]:

- **Percepção:** O robô móvel deve ser capaz de determinar a relação com seu ambiente de trabalho através do sistema sensorial a bordo. A capacidade de percepção do robô móvel se traduz na síntese de toda a informação oferecida pelos sensores, com o objetivo de gerar mapas globais e locais do ambiente de acordo aos diversos níveis de controle.
- **Raciocínio:** O robô móvel deve ser capaz de decidir que ações são solicitadas em cada momento, segundo o estado do robô e o de seu entorno, para alcançar seu(s) objetivo(s). A capacidade de raciocínio do robô móvel traduz-se no planejamento de trajetórias globais seguras e na habilidade para modificá-las no caso de obstáculos inesperados (controle local de trajetória) para permitir, ao robô, a execução dos objetivos solicitados.

A Figura 1.5.2 mostra um esquema básico geral da estrutura de controle de um robô móvel e as partes que compõem a arquitetura geral de controle.

Gerador Global de Trajetórias (GGT): É o nível hierárquico superior. Este nível é o encarregado de decidir, com base na tarefa determinada, as coordenadas do ponto de destino, de pontos intermediários na trajetória e, no caso de obstrução ao longo do caminho, redefinir a trajetória escolhida. A informação que emprega este nível hierárquico pode ser gerada *off-line* (conhecimento prévio do ambiente de trabalho) ou *on-line*, baseando-se em critérios predefinidos e utilizando a informação oferecida pelo sistema sensorial (desconhecimento parcial ou total do ambiente de trabalho) a partir da elaboração de mapas do entorno (SLAM).

Gerador Local de Trajetórias (GLT): É o nível hierárquico intermediário. Este nível hierárquico faz o papel do operador (piloto) do robô móvel, evitando os obstáculos do caminho, realizando correções na trajetória e adequando a velocidade do veículo de acordo com a manobra a ser realizada. Permite um controle dinâmico do robô móvel. Mantém informado o GGT sobre os resultados do objetivo designado, e no caso de ter um conhecimento prévio do ambiente de trabalho, gera informação para ser armazenada na memória do GGT. Está diretamente ligado com o sistema sensorial, o que lhe permite tomar decisões *on-line* e, além disso, gera os valores de referência para o Controle Local do Sistema de Tração e Direção. Desenvolvem-se GLTs tanto com algoritmos clássicos do tipo Maze-Search como com a utilização de elementos da Inteligência Artificial que emulam o comportamento do operador humano.

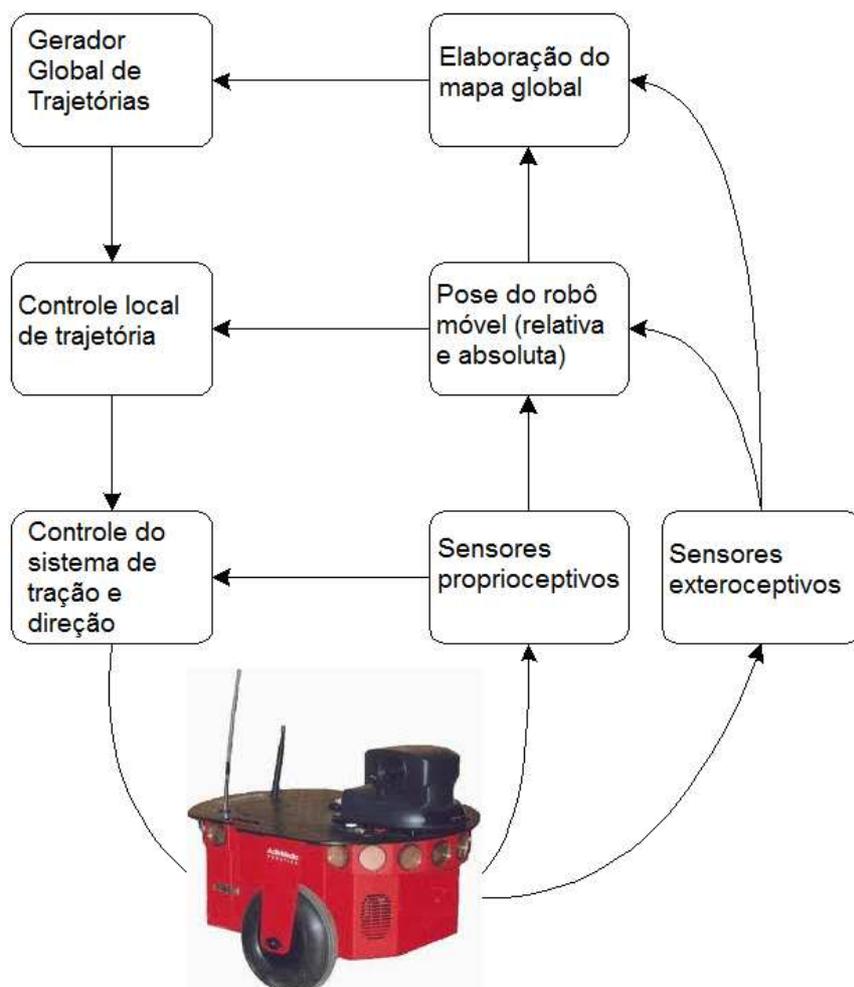


Figura 1.5.2. Esquema geral do sistema de controle de um robô móvel.

Controle Local do Sistema de Tração e Direção (CL): É o nível hierárquico inferior. Interpreta as referências enviadas pelo GLT e gera as ações de controle para que os motores de tração e direção trabalhem de forma coordenada e, dessa maneira, faz com que o robô alcance o ponto de destino seguindo trajetórias suaves, livres de oscilações e de manobras violentas para a carga. Os controladores empregados nesse nível correspondem, fundamentalmente, aos controladores desenvolvidos na teoria de controle clássica.

O planejamento de rotas em ambientes desconhecidos se realiza por meio de geradores locais de trajetórias que só consideram o ambiente próximo ao robô móvel para determinar a direção a seguir; as trajetórias obtidas não são ótimas. Em ambientes inteiramente conhecidos, o planejamento se realiza por meio dos **geradores globais de trajetórias**, que fundamentalmente levam em conta todos os caminhos possíveis e escolhem aquele que tenha um menor fator de custo (em outras palavras, o caminho ótimo). Este fator de custo estará influenciado pela transitabilidade, prioridades de circulação, densidade de obstáculos etc., nas diversas trajetórias.

As estratégias de controle empregadas são muito variadas [4] e não é o objetivo deste trabalho mencionar todas elas, porém, se mencionará que a grande variedade de estratégias de controle vai desde o controle deliberativo até o controle puramente reativo, passando pelas estratégias baseadas em comportamentos, como mostra a Figura 1.5.3, onde cada uma delas possui suas vantagens e desvantagens.

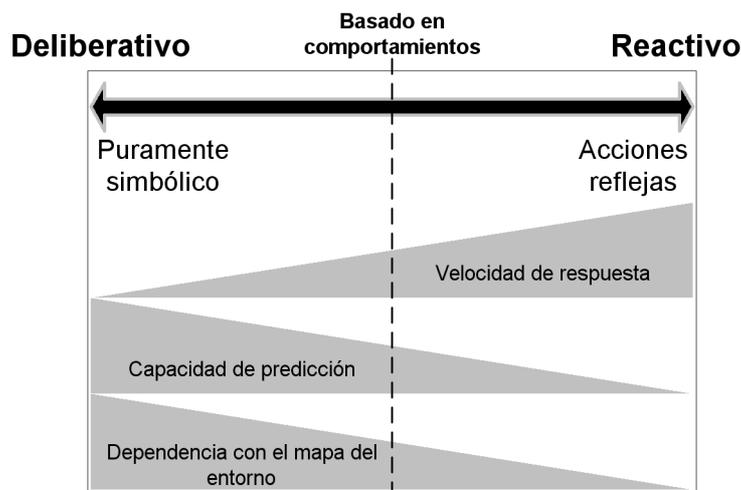


Figura 1.5.3. Estratégias de controle para robôs móveis.

As estratégias de **controle deliberativo** se baseiam em uma estratégia puramente simbólica. Isso significa que a semelhança entre o ambiente e seu modelo no robô deve ser precisa para que o comportamento do robô seja o desejado. Por exemplo, um robô móvel preparado para navegar em um ambiente estático provavelmente não saberá o que fazer quando se encontrar em um corredor pelo qual circulam pessoas; esta dependência com o entorno limita seu espectro de aplicação. Por outro lado, as estratégias deliberativas incluem uma análise de estabilidade que permite garantir, *a priori*, sob que condições do ambiente o robô móvel cumprirá com seus objetivos. Isso conduz a sistemas de controle e de processamento da informação complexos que consomem um importante custo computacional que, além disso, restringe sua velocidade de resposta.

Por outro lado, as estratégias de **controle reativo** se baseiam em um esquema de ações por reflexo, isso significa que o entorno é percebido como um estímulo (distância dos objetos, nível de luz, temperatura etc.), que geram uma ação de controle em função da intensidade do mesmo. Esta independência com o ambiente, junto com funções de controle simples do tipo “se-então” ou proporcional, é o que potencializa esse tipo de estratégia pela sua alta velocidade de resposta e seu baixo custo computacional. Contudo, a superposição de ações por reflexo termina por gerar, em muitos casos, um comportamento emergente não desejado. Por exemplo, um robô móvel projetado para buscar fontes de luz, mas que em presença de penumbra gira 180° e escapa, poderá ter um comportamento não desejado se entre a fonte de luz e o robô existir um obstáculo que projete sua sombra sobre a trajetória do robô. Na maioria dos casos, os comportamentos emergentes não são tão óbvios e só se percebem quando o sistema de controle é implantado no robô.

Em um nível mais abstrato, pode-se dizer que os algoritmos denominados deliberativos estão baseados no modelo tradicional de inteligência artificial do conhecimento humano. Os algoritmos de controle raciocinam sobre a percepção do robô (dados captados pelos sensores) enquanto constroem um modelo do ambiente (memória) e, conseqüentemente, planejam as ações do robô. Estes métodos requerem grande capacidade computacional e tomada de decisão, resultando uma resposta relativamente lenta do sistema. O controle reativo elimina completamente o conhecimento. Nesse modo de controle não existe o planejamento nem o raciocínio; não há modelos do ambiente. O simples **reflexo** vincula **ações** às **percepções**, resultando em uma resposta mais rápida do estímulo de saída.

Entre estas, existem as estratégias de **controle baseado em comportamentos**, que tratam de resgatar as vantagens do controle deliberativo e do reativo incorporando estratégias de controle híbrido para garantir a estabilidade de múltiplos controladores simples operando em paralelo, junto com técnicas de aprendizado para melhorar o desempenho do robô para conseguir torná-lo independente do modelo do ambiente.

A tendência nesse sentido é conseguir algoritmos de controle confiáveis (uma característica dos algoritmos de controle deliberativo) que tenham uma velocidade de resposta de acordo com a velocidade do robô móvel (uma característica dos algoritmos de controle reativo).

As tendências atuais apontam para maximização da independência do robô móvel em relação ao operador, ficando este a cargo de apenas vigiar o comportamento normal do robô e dando um mínimo de instruções. Isso significa que o robô móvel deve ser capaz de identificar, por si só, o ambiente no qual vai trabalhar. Na prática, isso é bastante difícil, e faz-se necessário uma série de dados para poder iniciar o sistema. Os primeiros robôs móveis deveriam conhecer totalmente o ambiente onde iriam trabalhar, ou seja, as dimensões do ambiente e a posição e forma exata de cada obstáculo. As técnicas de reconhecimento de imagens permitiram dar mais independência aos robôs móveis, necessitando apenas as dimensões do ambiente e ficando por conta própria a identificação dos obstáculos. Nessa filosofia de pensamento, o problema está em conseguir um algoritmo que identifique rapidamente os obstáculos para que o robô móvel se desloque de um ponto a outro no mínimo de tempo possível.

O uso de robôs móveis está justificado para aplicações em que se realizam tarefas incômodas ou arriscadas para o trabalhador humano. Entre elas: o transporte de material perigoso, as escavações de minas, a limpeza industrial ou a inspeção de projetos nucleares são exemplos de onde um robô móvel pode desenvolver seu trabalho, e evitando desnecessária exposição do trabalhador a riscos. Outro grupo de aplicações em que este tipo de robô complementa a

atuação do operador está composto por trabalhos de vigilância, de inspeção ou assistência às pessoas com necessidades especiais. Além disso, em aplicações de teleoperação, onde existe um atraso sensível nas comunicações, como é o caso de exploração interplanetária e submarina, o uso de robôs móveis com certo grau de autonomia se faz interessante.

2 Morfologia dos Robôs Móveis

A maioria dos robôs móveis possui características particulares que os tornam aptos para determinadas tarefas. É a própria tarefa que determina, numa primeira etapa, a estrutura particular de um robô móvel: o tipo de roda, o sistema de tração e direção e até a forma física do robô. Em uma segunda etapa, a tarefa determinará as características sensoriais do robô.

Em geral, os robôs móveis distribuem seus sistemas de tração e direção sobre os eixos de suas rodas de acordo com as exigências de velocidade, manobrabilidade e características do terreno. A precisão e rapidez com que o robô deve alcançar seu destino fazem com que determinado sistema de tração e de direção seja adotado. A confiabilidade e a manobrabilidade que deve ter um robô móvel determinam as características do sistema de tração e direção, não apenas em relação à técnica, mas também em relação ao número, ao tipo e à disposição das rodas necessárias para constituir uma estrutura mecânica estável. [5], [6].

2.1 Tipos de ambientes em que opera o robô móvel

O tipo de ambiente de trabalho é a característica que mais impõe restrições sobre um robô. Estas se agrupam segundo a área de trabalho e segundo os objetos presentes no entorno.

Segundo a área de trabalho, o ambiente pode ser **interior** ou **exterior**. É interior quando a área de trabalho está claramente definida por paredes e teto. Além disso, a iluminação é principalmente artificial. Ao contrário, o ambiente é exterior quando a área de trabalho não está claramente delimitada e a iluminação é principalmente natural. Exemplos clássicos de ambientes interiores e exteriores são os grandes edifícios públicos e os parques ou bosques, respectivamente (Figura 2.1.1).

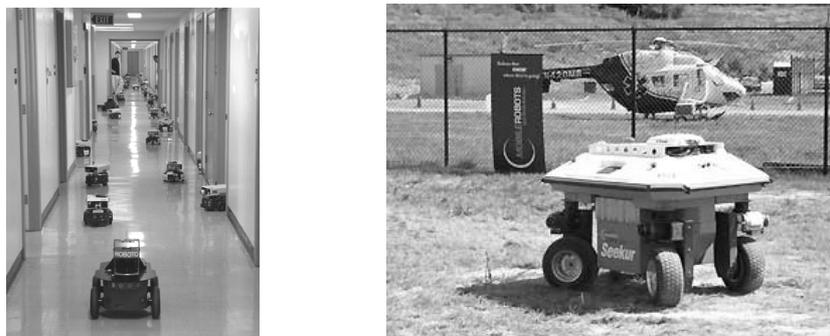


Figura 2.1.1. Robôs de interior (Amigobot) e exterior (Seekur) da empresa Adept MobileRobots.

Segundo os objetos presentes no ambiente do robô, este pode ser classificado como **estruturado** ou **não-estruturado**. É estruturado quando os objetos presentes no ambiente são estáticos (não mudam de forma nem de posição) e possuem características físicas particulares (forma, cor etc.) que permitem associá-los a formas geométricas conhecidas ou distingui-los de outros objetos (portas abertas, mesas de trabalho etc.). Por outro lado, o ambiente é não-estruturado quando o entorno é dinâmico (muda com o decorrer do tempo) e tais mudanças são imprevisíveis, ou quando a associação entre os objetos do entorno e determinadas características físicas não é viável. Por exemplo, uma biblioteca é um ambiente estruturado devido ao pouco movimento de pessoas e ao fato de que as estantes estão sempre nos mesmos lugares. Ao contrário, um depósito² numa linha de produção é um ambiente não-estruturado porque o entorno é alterado na medida em que se recebem ou enviam os *pallets*.



Figura 2.1.2. Ambientes estruturado (biblioteca) e não-estruturado (depósito em linha de produção).

2.2 Tipos de sistemas de locomoção³

O sistema de locomoção é uma das primeiras características de um robô, estando condicionada ao seu ambiente de trabalho. De acordo com o ambiente, o robô pode ser terrestre:

- com patas (Figura 2.2.1a);
- com rodas (Figura 2.2.1b); ou
- com esteiras (Figura 2.2.1c).



Figura 2.2.1. Robôs terrestres. (a) Hermes (Robosoft). (b) Journey (SMU). (c) Scour (USF).

Também pode ser:

² N. do T.: Um depósito numa linha de produção também pode ser um ambiente estruturado, dependendo de suas características.

³ N. do T.: Esta monografia aborda apenas os robôs terrestres.

- aquático (UWV):
 - flutuante; ou
 - submarino (Figura 2.2.2(a));
- aéreo (UAV) (Figura 2.2.2(b)).

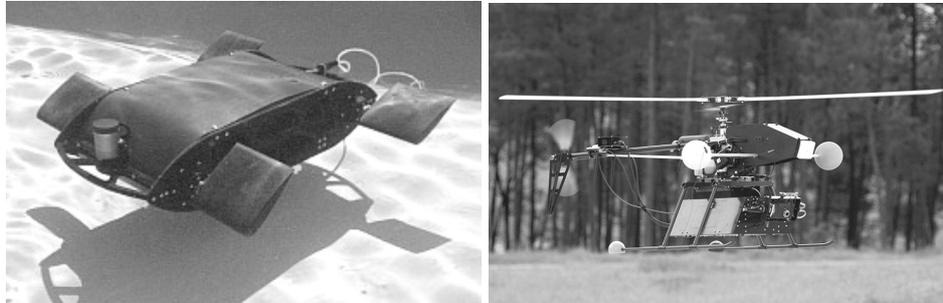


Figura 2.2.2. Robô aquático (NSF) e robô aéreo (TU Berlin).

2.3 Tipos de rodas

Entre os robôs terrestres com rodas sua mobilidade está caracterizada por dois fatores: o tipo de rodas que possuem e sua disposição sobre uma estrutura mecânica.

Assume-se que, durante o movimento, o plano da roda se mantém vertical e que as rodas giram ao redor de seus eixos (horizontais). Sua orientação em relação à estrutura pode ser fixa ou variável.

Existem basicamente duas classes de rodas: a convencional e a sueca (*swedish wheel*). Em ambas supõe-se que o contato entre a roda e o terreno se reduz a um único ponto do plano.

Para uma roda convencional, supõe-se que o contato entre a roda e o terreno satisfaz a condição de rotação pura sem deslizamento. Isso significa que a velocidade do ponto de contato é igual a zero (tanto para a componente paralela quanto para a perpendicular ao plano da roda).

Por sua vez, rodas convencionais se distinguem em três tipos:

Roda fixa: o eixo da roda é fixado na estrutura do robô (Figura 2.3.1a). Em geral este tipo está associado ao sistema de tração do robô.

Roda orientável centralizada: é aquela em que o movimento do plano da roda com respeito à estrutura é uma rotação ao redor de um eixo vertical que passa através do centro da roda (Figura 2.3.1b). Em geral é usada como roda de direção ou de tração-direção.

Roda orientável não-centralizada (roda louca): Também é conhecida como roda castor (*castor wheel*). É uma roda orientável com relação à estrutura tal que a rotação do plano da roda ocorre ao redor de um eixo vertical que não passa através do centro da roda (Figura 2.3.1c). Sua principal função é dar estabilidade à estrutura mecânica do robô como roda de direção.

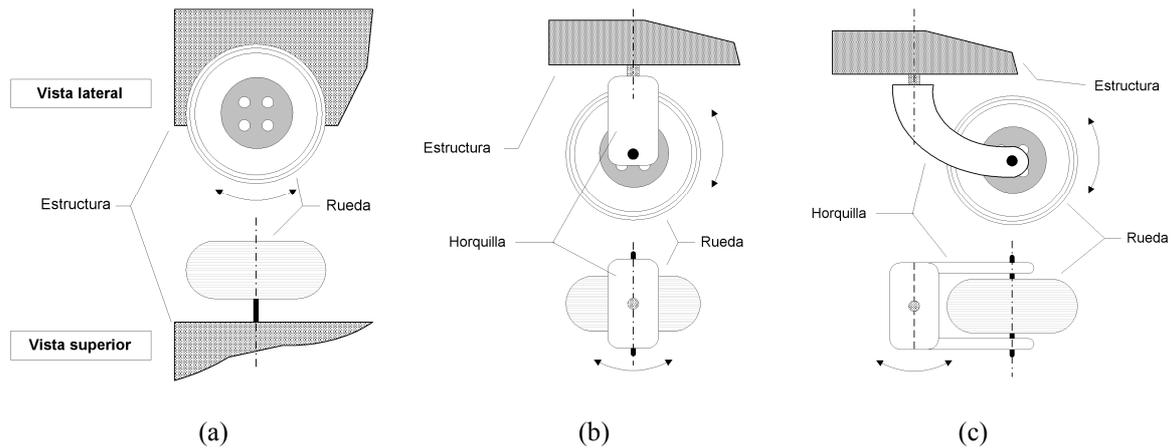


Figura 2.3.1. Tipos de rodas. (a) Roda fixa. (b) Roda orientável centralizada. (c) Roda louca.

Numa **roda sueca**⁴ (*swedish wheel*), supõe-se igual a zero apenas uma componente de velocidade do ponto de contato da roda com o terreno ao longo do movimento (Figura 2.3.2). Os rolamentos montados em sua superfície permitem que a roda se desloque numa direção perpendicular ao seu plano.

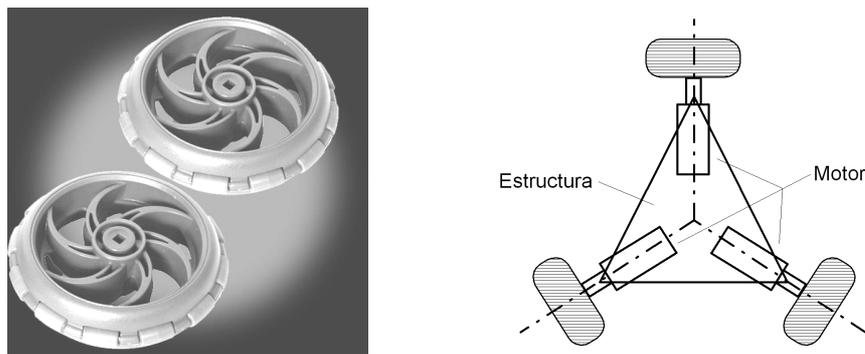


Figura 2.3.2. Detalhe de uma roda sueca e exemplo de sua disposição sobre uma estrutura mecânica.

2.4 Disposição das rodas

A combinação dos diversos tipos de rodas permite a construção de uma grande variedade de robôs móveis que se diferenciam por seu grau de manobrabilidade. A seguir são apresentadas brevemente as principais características de projeto de diversos tipos de robôs móveis. Esta descrição não pretende ser exaustiva e está limitada a exemplos concretos de estruturas não singulares e não redundantes.

2.4.1 Robô omnidirecional

Esse tipo de robô tem máxima manobrabilidade no plano, o que significa que pode se mover em qualquer direção sem necessidade de se reorientar (Figura 2.4.1 e Figura 2.4.2). Em contraste, os outros tipos de robôs apresentam alguma restrição em sua manobrabilidade.

A Figura 2.4.1 mostra o robô omnidirecional Uranus, desenvolvido na Universidade de Michigan, e o conjunto de movimentos possíveis que o mesmo pode realizar. De acordo com

⁴ N. do T.: A roda sueca também é chamada de roda omnidirecional.

a rotação de cada uma de suas rodas, o robô pode andar em linha reta, girar ou deslocar-se lateralmente, sem necessidade de mudar sua orientação.

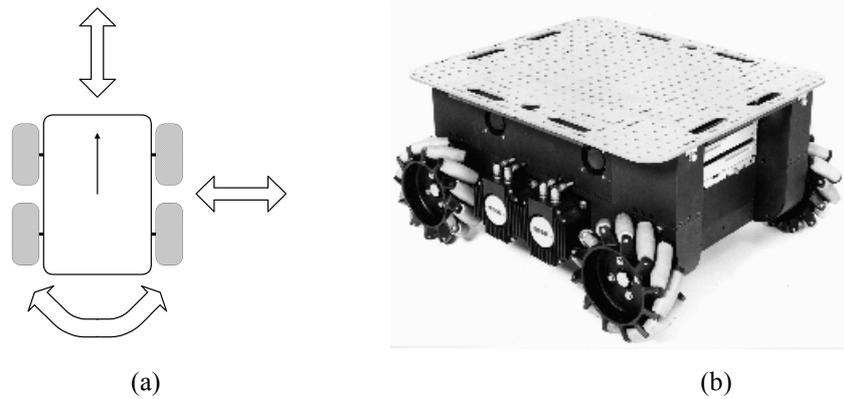


Figura 2.4.1. Robô omnidirecional com rodas suecas. (a) Manobrabilidade. (b) Robô Uranus (Universidade de Michigan).

A Figura 2.4.2 apresenta outra versão de um robô omnidirecional, este com rodas orientáveis centralizadas. Nesse caso, o robô pode mudar a direção de seu movimento simplesmente alterando a orientação de suas rodas. Este movimento sincronizado pode ser conseguido através de artifícios mecânicos (Figura 2.4.3a), empregando sistemas de tração e direção por correias, ou por meios eletrônicos (Figura 2.4.3b), através de sinais de acionamento simultâneos a partir da eletrônica que comanda cada um dos motores nas rodas.

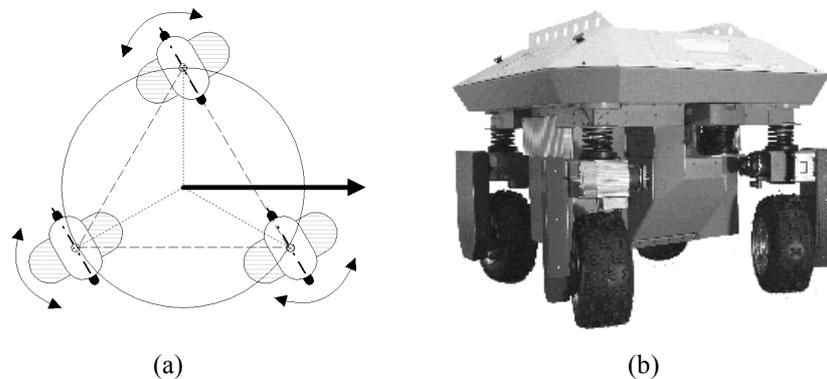


Figura 2.4.2. Robô omnidirecional com rodas orientáveis centralizadas. (a) Disposição sobre uma estrutura mecânica. (b) Robô Seekur (Adept MobileRobots).

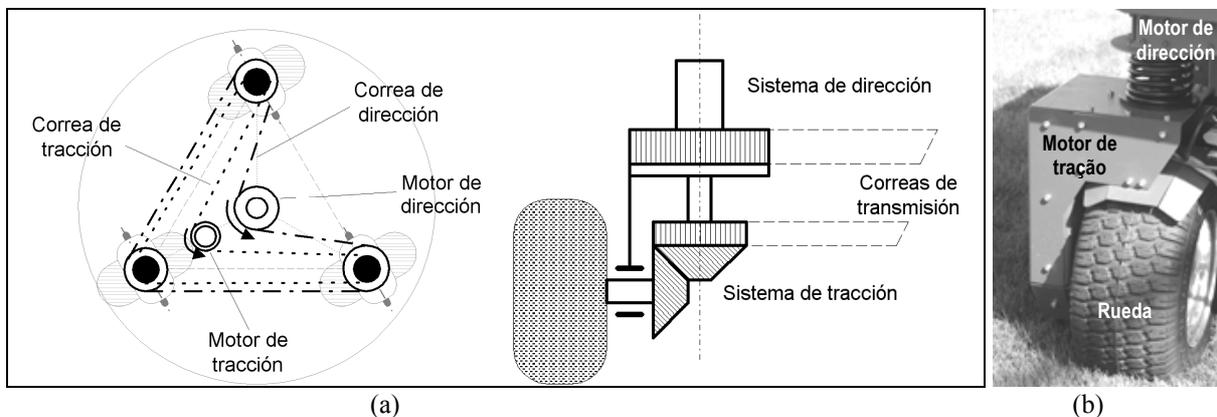


Figura 2.4.3. Sincronismo entre o sistema de tração e direção com rodas omnidirecionais (*synchro drive*). (a) Mecânico. (b) Eletrônico.

As vantagens de um robô omnidirecional são compensadas pela complexidade mecânica e/ou eletrônica necessárias para conservar uma boa coordenação entre as rodas e evitar deriva na posição e na orientação do robô.

2.4.2 Uniciclo

O robô tipo uniciclo é, em geral, o eleito por pesquisadores para experimentar novas estratégias de controle por possuir uma cinemática simples. É uma estrutura formada por duas rodas fixas convencionais, sobre um mesmo eixo, controladas de maneira independente, e por uma roda louca que lhe confere estabilidade (Figura 2.4.4).

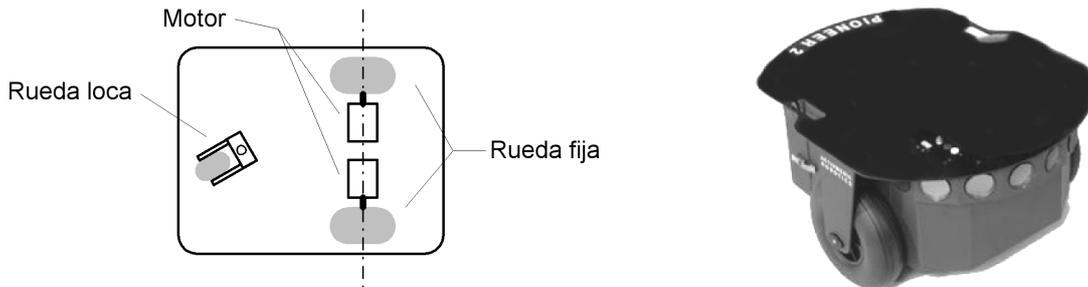


Figura 2.4.4. Uniciclo. (a) Estrutura. (b) Robô Pioneer (Adept MobileRobots).

O sistema de tração-direção associado ao robô lhe permite controlar de forma independente suas velocidades linear e angular. As vantagens que derivam de sua estrutura mecânica e da eletrônica de controle fazem desta configuração a preferida para robôs de laboratório.

2.4.3 Triciclo

O robô triciclo é formado por duas rodas convencionais fixadas sobre um mesmo eixo e por uma roda convencional centralizada orientável que concentra as funções de tração e direção (Figura 2.4.5).

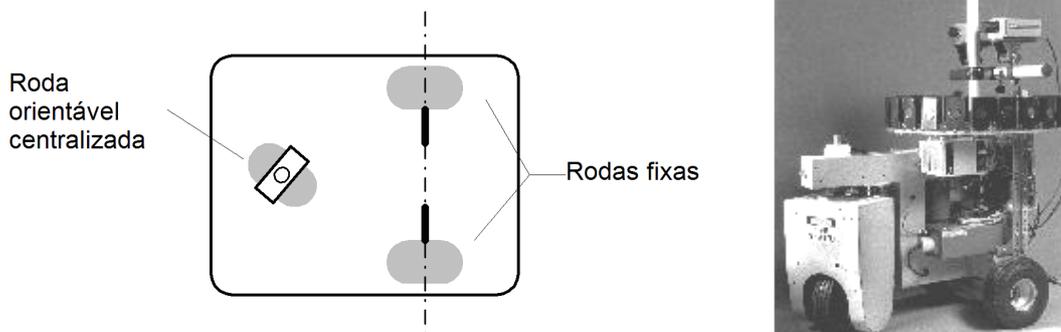


Figura 2.4.5. Triciclo. (a) Estrutura. (b) Robô Neptune (Universidade Carnegie Mellon).

Assim como no caso anterior, a estrutura mecânica e a eletrônica de controle são simples. Por isso, seu tratamento cinemático é de interesse em áreas específicas de controle de robôs móveis. Em relação a aplicações industriais, esta configuração é apta para transporte de cargas pesadas em baixa velocidade.

2.4.4 Quadriciclo

Um problema associado com a configuração tipo triciclo é que, quando em movimento, o centro de gravidade do veículo se posiciona, em alguns casos, nos limites da superfície de equilíbrio definida pelas três rodas. Tal fato pode produzir perda momentânea de tração e é

fonte de erro no momento de se estimar a posição do robô. Uma solução para este problema está presente no sistema de direção Ackerman. Como se observa na Figura 2.4.6, os eixos das duas rodas frontais se interceptam em um ponto C que pertence ao eixo comum das rodas traseiras. O lugar geométrico dos pontos no plano traçados por cada roda ao redor de C forma um conjunto de arcos concêntricos, sendo todos os vetores de velocidade instantânea tangentes a tais arcos. Esta estrutura, além de prover maior estabilidade, evita o deslizamento nas rodas e, portanto, reduz erros de odometria⁵.

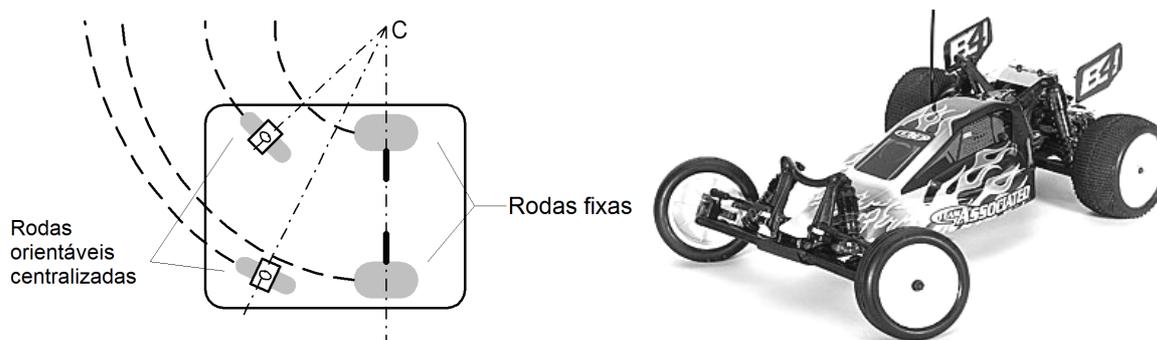


Figura 2.4.6. Sistema de direção Ackerman.

Apesar de sua cinemática, estrutura mecânica e eletrônica não serem tão simples, esta configuração é de grande interesse para os amantes de robôs *off-road*, sendo os principais desenvolvimentos produzidos nas áreas de informação sensorial e seu posterior tratamento para se conseguir reconstruir o ambiente e para realização de controle em tempo real.

2.5 Tração e direção

Outro aspecto a se considerar no projeto de um robô móvel é que tipo de sistema de tração e direção utilizar. O sistema de tração e direção não está relacionado apenas com a disposição de rodas adotada, mas também se relaciona com os algoritmos de controle local dos motores e com a mecânica a eles associada. Na medida em que se requer mais confiabilidade do robô (alta manobrabilidade, máxima tração em suas rodas motorizadas, máxima aderência de todas as suas rodas etc.), a mecânica, a eletrônica e o algoritmo associados se tornam mais complexos.

Existem três sistemas básicos a partir dos quais se pode obter diversas configurações:

- Tração e direção em eixos independentes [7];
- Tração e direção num mesmo eixo [8]; e
- Tração e direção em todos os eixos [9].

2.5.1 Tração e direção em eixos independentes

A tração é efetuada pelas rodas traseiras e o controle de direção é realizado pelas rodas dianteiras, ou vice-versa (Figura 2.5.1). Apesar do controle de direção ser simples, a precisão na direção depende da aderência das rodas correspondentes. Isso se deve, basicamente, à massa desprezível dessas rodas em relação ao restante da estrutura. Além disso, possui um

⁵ N. do T.: Odometria é um método utilizado para se estimar a posição do robô a partir da medição do giro de suas rodas.

raio de giro bastante elevado em relação a outros sistemas, razão pela qual este tipo de estrutura não permite mudanças de direção muito bruscas.

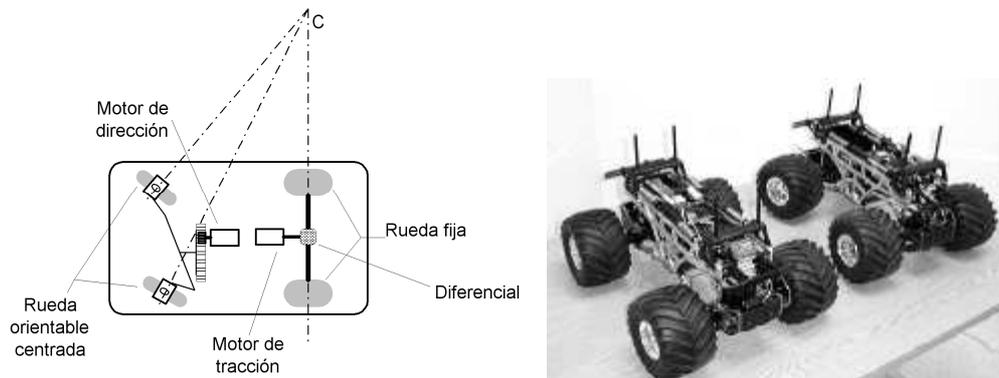


Figura 2.5.1. Sistema de tração e direção em eixos independentes.

2.5.2 Tração e direção em um mesmo eixo (tração diferencial)

Isso se consegue com motores independentes nas rodas de um mesmo eixo, além de rodas loucas para estabilização da estrutura (Figura 2.5.2). Este modelo é de construção simples e permite raios de giro da ordem do tamanho do veículo. A única desvantagem que possui é que os motores devem ter características idênticas, caso contrário seu controle não será tão simples.

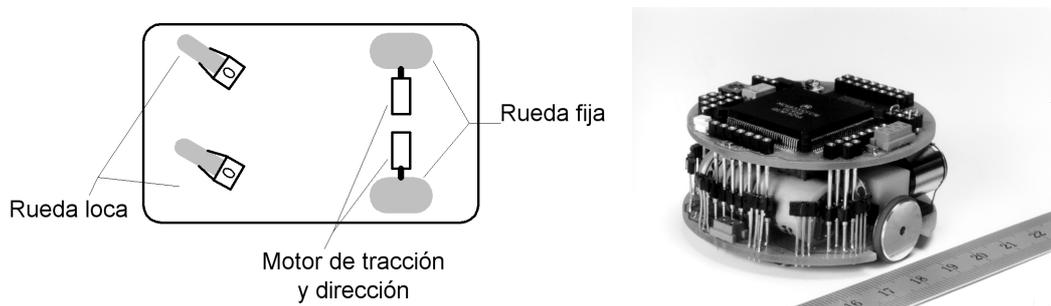


Figura 2.5.2. Sistema de tração e direção num mesmo eixo.

2.5.3 Tração e direção em todos os eixos

A Figura 2.5.3 mostra a estrutura e um modelo comercial da empresa Adept MobileRobots. Sua aplicação se dá em terrenos hostis, onde a velocidade de translação é menos importante que uma boa aderência ao terreno.

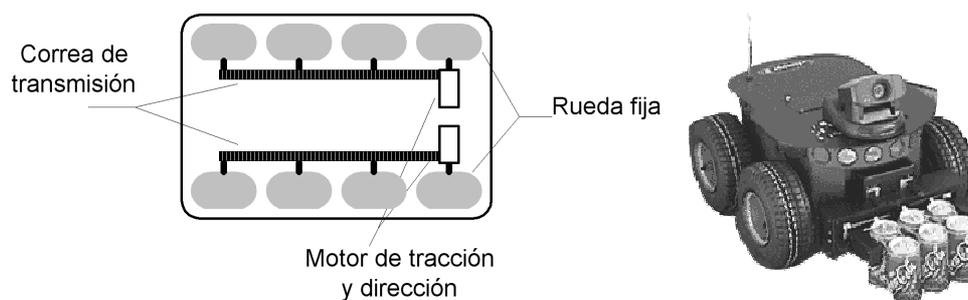


Figura 2.5.3. Sistema de tração e direção em todos os eixos.

Esta configuração necessita de um sistema odométrico complexo devido à incerteza nos raios de giro associada a este modelo de tração e direção. Existem nos robôs omnidirecionais estruturas que apresentam menor complexidade para resolver erros de odometria.

2.6 Configurações especiais

Em muitos casos o robô possui alguma característica que o torna distinto dos robôs convencionais. Algumas configurações particulares permitem reduzir consideravelmente os erros associados ao deslizamento das rodas, como é o caso do robô de múltiplos graus de liberdade com vínculo elástico (Figura 2.6.1) desenvolvido na Universidade de Michigan, que permite o estudo de veículos destinado ao transporte de cargas.

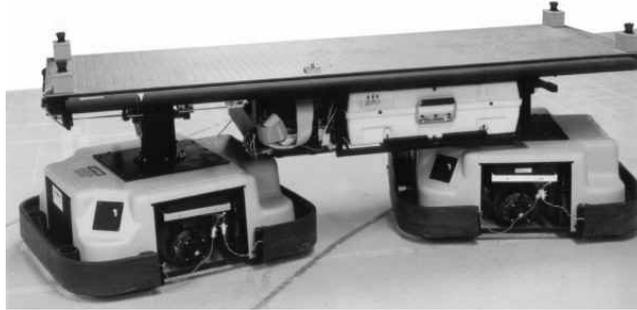


Figura 2.6.1. Robô de Múltiplos Graus de Liberdade desenvolvido na Universidade de Michigan.

Outras configurações permitem que pequenos robôs individuais se associem para realizar tarefas que estão além de sua própria capacidade. Este é o caso dos robôs colaborativos desenvolvidos por Alemanha e China.

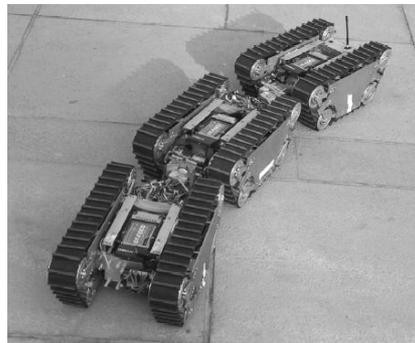


Figura 2.6.2. Módulos cooperativos (Universidades de Hamburgo e Beihang).

Outros robôs são desenvolvidos com formas especiais para realizar tarefas específicas, como é o caso dos robôs de exploração espacial (Figura 2.6.3).



Figura 2.6.3. Robô de exploração espacial PATHFINDER (JPL).

3 Sensores para robôs móveis

Já mencionamos que os robôs móveis se caracterizam por sua capacidade de se deslocarem de forma autônoma em um ambiente desconhecido, ou conhecido apenas parcialmente. Suas aplicações abrangem uma grande variedade de campos e se justificam pela dificuldade ou impossibilidade de intervenção humana, seja direta, seja na forma de teleoperação *on-line*.

O sistema de percepção de um robô móvel permite que este seja capaz de fazer frente a situações de alteração do ambiente, assim como reagir mediante eventos imprevistos enquanto navega. Isso exige a utilização de um sistema sensorial que obtenha informação do ambiente. Tal informação deve ser abundante em qualidade e quantidade, de forma que o robô móvel possa realizar a tarefa de maneira similar a um operador humano. Por isso, raramente um robô móvel é equipado com apenas um sensor para realizar todas as suas tarefas. A prática mais usual consiste em combinar, dentro do sistema sensorial, vários sensores que se complementam em maior ou menor medida.

3.1 Estrutura dos sentidos do homem

O homem, para sua atividade de interação com o ambiente, está dotado de diversos sentidos, todos complexos, que lhe permitem obter informação do mundo exterior. Ele é capaz de processar a informação que recebe de cada um de seus sentidos, assim como pode conjugar informação de vários sentidos de uma só vez e tomar decisões em função destas.

O sistema sensorial do homem está enormemente desenvolvido, a tal ponto que uma tarefa simples como tomar um copo de água na maioria das ocasiões não representa nenhum problema, sendo realizada sem que percebamos a quantidade e a complexidade da informação processada. Além de processar a informação recebida pelos sentidos, também se faz necessário coordená-la com a ação que se está realizando.

A visão é, sem dúvida, a percepção sensorial humana mais complexa, ainda que sua sensibilidade esteja limitada a um estreito espectro de comprimentos de onda (entre 4.000Å e 8.000Å) que compreende a faixa de radiação ultravioleta a infravermelha. Este sentido corporal está localizado nos olhos, que permitem a percepção da luz, das cores e das imagens dos objetos. A retina é parte fundamental do olho, e as demais estruturas estão a seu serviço. Os estímulos luminosos que chegam até ela são projetados sobre a mancha amarela (a única zona sensível a luz) e transmitidos ao cérebro pelo nervo óptico, para que tomemos consciência do ambiente. O fato de que vemos apenas um objeto, apesar de olharmos com

dois olhos, se explica pela coordenação de ambas as retinas. Os movimentos habituais dos glóbulos oculares fazem com que os eixos visuais de ambos os olhos convirjam sobre o objeto de maneira que as duas imagens incidam sobre zonas gêmeas de ambas as retinas. A visão binocular favorece a correta avaliação do tamanho, da distância e da forma dos objetos.

O ouvido é o que permite perceber as excitações sonoras. Seu campo de sensibilidade está limitado a detectar sons com frequências entre 20Hz e 20kHz. As estruturas anatômicas que compõem o aparato auditivo se encontram, em sua maioria, localizadas no interior do crânio. Externamente aparece apenas a parte cartilaginosa do ouvido. Do ponto de vista anatômico, o ouvido se divide em três partes: externo, médio e interno. As células sensíveis ao som encontram-se no ouvido interno, numa parte denominada de cóclea, enquanto os ouvidos externo e médio têm a função de amplificarem a intensidade da onda sonora. É na cóclea que o som é transformado em impulsos nervosos, e estes são recolhidos pelo nervo acústico. Como os humanos possuem dois órgãos auditivos, a audição é estereofônica, o que permite ao homem determinar a direção e a distância a que se encontra a fonte sonora.

O tato, distribuído por todo o corpo, é o sentido corporal mediante o qual se percebe o contato e a pressão dos objetos, além de características como textura, dureza, temperatura etc. A sensação tátil é provocada por ações mecânicas de choque, pressão ou tração exercidas sobre a pele ou mucosas. Sua base fisiológica reside numa complicada rede de terminações nervosas e corpúsculos táteis difusamente distribuídos por toda a superfície cutânea, em densidade variável de acordo com os níveis de sensibilidade. O tato, acompanhado do movimento, constitui a base de nossa experiência da extensão que inclui a forma e a solidez dos corpos.

O paladar e o olfato são os sentidos que permitem ao homem perceber, identificar e distinguir sabores e odores, respectivamente. Este último sentido é, de certa forma, comparável à visão por ser um sentido mais que superficial. No entanto, é mais pobre em relação à incapacidade de se poder determinar a origem da fonte de odor.

A estes cinco sentidos deve-se acrescentar os sentidos que nos fazem perceber o próprio corpo e o movimento de suas partes, além do sentido de equilíbrio. Tais sentidos permitem que o homem saiba localizar a posição e orientação das partes de seu corpo, além de conservar seu equilíbrio.

A notável qualidade das percepções humanas provém de um número considerável de sensores constituindo cada um dos órgãos sensoriais. Um dos temas de pesquisa relativa às percepções sensoriais artificiais tem como guia a criação de sensores artificiais que apresentem características comparáveis às do homem. No entanto, o estudo de sentidos mais precisos ou mais sensíveis pode ser realizado em outros seres vivos, e também é motivo de pesquisa.

3.2 Tipos de sensores em robótica

Apesar da variedade de sensores que se pode empregar em um robô móvel estar diretamente relacionada com seu campo de atuação, há uma série de sensores que se pode considerar mais ligados com as funções do robô, e a estes vamos nos referir. Para o estudo dos sensores em robótica, eles foram classificados de diversas maneiras, empregando vários critérios [10] (ver Tabela 3.2.1).

Os sensores podem ser classificados com base no critério interação sensor-objeto, considerando que a informação possa ser obtida por contato direto entre o entorno ou objeto e

a parte sensorial do robô, ou sem a ocorrência de nenhum contato físico. Dessa forma, os sensores podem ser classificados como **de contato** ou **de não-contato**.

Outra classificação para se conseguir simular os sentidos do homem se baseia na necessidade de se obter e processar informações complexas através de sensores muito desenvolvidos. Assim, poderíamos classificar os sensores em **elementares** e **complexos**. Os sensores elementares proporcionam dados digitais ou analógicos de uma única variável, enquanto os complexos nos dão informação de somente pode ser representada por vetores ou matrizes.

Tabela 3.2.1. Classificação dos sensores em robótica.

Sensores em Robótica	Segundo o meio relativo ao robô	Proprioceptivos
		Exteroceptivos
	Segundo o tipo de interação robô-objeto	De contato
		De não-contato
	Segundo o tipo de informação	Elementares
		Complexos
	Segundo o princípio de funcionamento	Carga elétrica
		Radiação luminosa
		Resistência
		Indutância
		Capacitância
		Radiação térmica
		Outros

Aqui destacamos uma última classificação baseada na relação que o robô tem com o meio. Quando este meio é interno ao robô, ou seja, faz parte de sua própria estrutura mecânica, os sensores são classificados como **proprioceptivos** ou internos. Ao contrário, toda informação proveniente do ambiente corresponde a sensores denominados **exteroceptivos**, ou externos.

Os sensores proprioceptivos, cronologicamente, foram os primeiros sensores utilizados, sendo atualmente encontrados na maioria dos robôs. Eles obtêm informação sobre o estado interno do robô: posição, direção, sentido, velocidade etc. Em contrapartida, sensores exteroceptivos determinam o estado do robô em função da percepção do ambiente.

3.3 Descritores estáticos e dinâmicos

Existem várias técnicas empregadas na medida de grandezas físicas. O universo de captação do sensor em relação ao tipo de objeto ou fenômenos a serem detectados e a extensão de seu campo de sensibilidade determinam as características do dispositivo de medida a ser empregado. A resposta do transdutor pode requerer unicamente a simples presença do objeto ou fenômeno (detecção estática) ou pode exigir a detecção de movimento ou variação do mesmo (detecção dinâmica).

É dessa forma que se pode definir o comportamento do sensor mediante descritores. Estes podem ser **estáticos**, quando definem o comportamento do sensor em regime permanente, ou

dinâmicos, quando caracterizam a resposta temporal do sensor perante determinados estímulos.

A seguir são listados descritores estáticos:

- Faixa: valores mínimos e máximos para as variáveis de entrada e saída;
- Exatidão: o desvio da leitura de um sistema de medida com respeito a uma entrada conhecida;
- Repetitividade: capacidade de reproduzir uma leitura com uma precisão dada;
- Reprodutibilidade: é o mesmo que repetitividade, mas as leituras se realizam sob condições diferentes;
- Resolução: determina o menor incremento que pode ser determinado pelo sensor;
- Erro: diferença entre o valor medido e o valor real;
- Linearidade: quando a resposta do sensor é muito semelhante $m \cdot x + h$.
- Sensibilidade: é a razão de alteração da saída (sinal) frente a alteração da entrada (grandeza);
- Excitação: é a quantidade de corrente ou de tensão necessária para o funcionamento do sensor;
- Estabilidade: medida da possibilidade de um determinado sensor de mostrar uma mesma saída em uma faixa em que a entrada permanece constante;
- Ruído: é um sinal indesejado e desconhecido que se acopla ao sinal considerado ideal: o ruído faz com que o sinal esperado seja diferente do real, podendo ocasionar problemas de interpretação da grandeza.

Os descritores dinâmicos estão ilustrados na Figura 3.3.1, e são explicados a seguir.

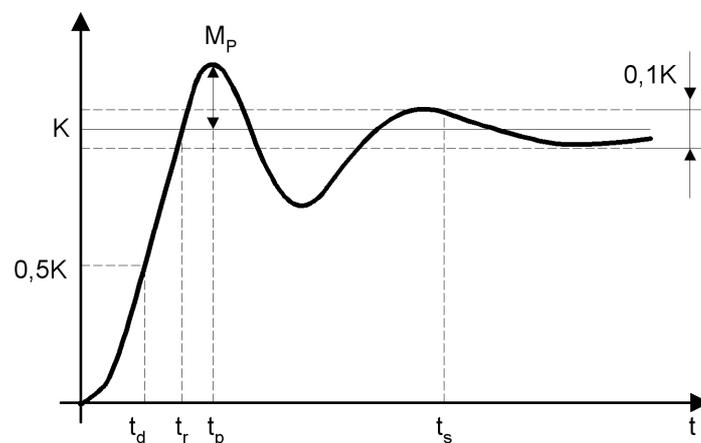


Figura 3.3.1. Descritores dinâmicos de um sensor.

- Tempo de retardo, t_d : tempo que tarda o sinal de saída do sensor em atingir 50% de seu valor final;

- Tempo de crescimento, t_r : tempo que leva o sinal de saída do sensor desde o valor original até atingir o valor final pela primeira vez;
- Tempo de pico, t_p : tempo que tarda o sinal de saída do sensor para alcançar o valor máximo (de pico);
- Pico de sobre oscilação, M_p : expressa o quanto se eleva a evolução temporal do sinal de saída do sensor em relação ao seu valor final;
- Tempo de estabelecimento, t_s : tempo que leva o sinal de saída do sensor para permanecer confinado na banda em torno de 5% do valor final.

Além dos descritores estáticos e dinâmicos, é necessário considerar outros fatores que podem chegar a afetar a resposta do sensor. Assim, por exemplo, o fabricante pode especificar condições ambientais tais como vibrações, umidade, radiação ou faixa de temperatura, nas quais se garante o correto funcionamento.

3.4 Sensores em robôs móveis

Leonard e Durrant-Whyte [11] resumiram o problema de navegação de um robô móvel mediante três perguntas:

- Onde estou?
- Para onde vou?
- Como devo chegar lá?

A informação requerida para responder a essas perguntas deve permitir ao robô móvel realizar três tarefas fundamentais: estimar sua posição e orientação (pose), manter atualizado o mapa do ambiente e detectar os possíveis obstáculos. As dificuldades para realização de tais tarefas surgem como consequência da distinta natureza dos processamentos requeridos por cada uma. Por exemplo, para a estimação de pose e a construção (ou atualização) do mapa do ambiente deve-se considerar características como precisão, resolução espacial, alcance etc. Já para a detecção de obstáculos o tempo entre observações normalmente é mais importante em detrimento das características anteriores; ou seja, é vital se dispor da informação processada o mais rapidamente possível.

A exigência de que o robô conheça seu ambiente de trabalho para adaptar seu funcionamento de acordo com o estado atual do mesmo implica em coleta e processamento de informação de diferentes tipos e sua adequada utilização no sistema de controle. Esta informação é gerada pelos sensores que, segundo a necessidade particular da tarefa a ser realizada, podem variar em número, em tipo e em complexidade [12]. A qualidade e quantidade de informação obtida permitirá controlar o veículo com trajetórias estáveis e sem oscilações, o que assegura que o robô móvel alcance o ponto de destino com mínimo erro e sem sofrer colisões ao longo do percurso.

Para que um robô móvel possa, de forma satisfatória, realizar tarefas como gerar trajetórias, evitar obstáculos, monitorar a execução da tarefa etc., ele deve ser capaz de determinar sua localização ou pose (posição e orientação) com respeito a um sistema de referência absoluto. De forma geral, determinar a pose de um robô móvel equivale a encontrar as componentes de

translação (x, y, z) e de rotação $(\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z)$ do sistema de coordenadas solidário ao robô $\{R_M\}$ (que é móvel) com relação a um sistema absoluto $\{R\}$. Neste texto se considera apenas o caso bidimensional, em que o robô se move com três possíveis graus de liberdade. Logo, o problema se reduz a encontrar os valores (x, y, φ_z) associados ao sistema móvel do veículo, onde (x, y) representam sua posição no plano e φ_z (φ) representa sua orientação, tal como se mostra na Figura 3.4.1.

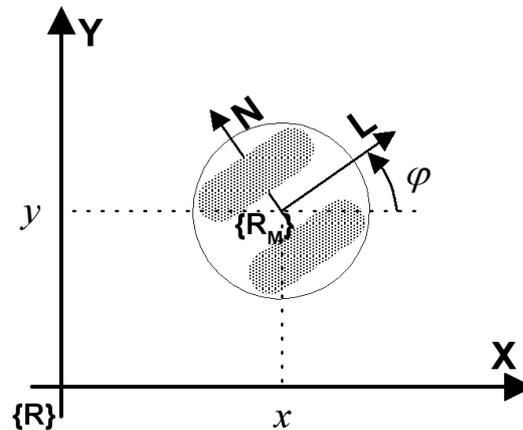


Figura 3.4.1. Sistema de referências em um robô móvel.

A maioria dos robôs móveis conta com codificadores nos eixos de movimento que permitem estimar sua localização, em cada instante, através da aplicação de um modelo de locomoção. No entanto, esta estimativa não é suficientemente precisa na maioria das aplicações. O motivo não está ligado à amplitude dos erros cometidos, mas principalmente ao fato de esses se acumularem durante a navegação. Isso origina uma incerteza crescente associada à posição e à orientação do robô móvel. Devido a tal incerteza, é necessário impor limites a tal incerteza através de um sistema de posicionamento externo. Tais limites são impostos pelo ambiente, pela tarefa a ser realizada e pela precisão desejada dos movimentos do robô. É importante destacar que, qualquer que seja o sistema de posicionamento utilizado, a incerteza sempre estará presente. A complexidade do sistema de posicionamento apenas permitirá limitar tal incerteza em maior ou menor grau.

González Jiménez e Ollero Baturone [13] apresentam uma forma resumida, mas inteligente, de apresentar os principais sensores e as técnicas associadas que se empregam na estimativa da pose de um robô móvel. A Tabela 3.4.1 apresenta esta classificação.

3.4.1 Estimadores explícitos

Os estimadores explícitos proporcionam a posição e orientação do robô diretamente a partir de medidas, sem que exista um processamento da informação para interpretar o ambiente.

Dentro dos sistemas de estimativa explícita podem destacar-se dois grupos:

- Estimativa baseada em medidas internas;
- Estimativa baseada em estações de transmissão.

O primeiro trabalha exclusivamente com sensores integrados ao veículo como *encoders*, giroscópios, bússolas, acelerômetros etc., e sem nenhum tipo de informação exterior.

O segundo, ao contrário, tem um princípio bem distinto. Engloba a existência de unidades montadas sobre o veículo ou unidades externas que devem ser colocadas em posições conhecidas do ambiente.

Tabela 3.4.1. Posicionamento de um robô móvel (Sensores e técnicas)

Estimadores Explícitos	Medidas Internas	Odometria	- Sensores Doppler - <i>Encoders</i> ópticos	
		Navegação Inercial	- Giroscópios - Acelerômetros	
	Estações de Transmissão	Fixas	Triangulação Trilateração	- Ultrassom - Infravermelho - Rádio-frequência
		Móveis		
Estimadores baseados na percepção do ambiente	Marcas	Artificiais	- Indutivos - Térmicos - Químicos - Infravermelhos - Câmeras de vídeo	
		Naturais	- Câmeras de vídeo	
	Posicionamento baseado em mapas	Construção de mapas Técnicas de comparação Mapas topológicos e geométricos	- Sistemas ultrassônicos - Sistemas LASER - Câmeras de vídeo	

a) Estimação explícita baseada em medidas internas

A forma mais simples de se estimar a posição e a orientação de um robô móvel consiste em integrar a trajetória percorrida por este a partir de uma série de medidas internas: voltas dadas pelas rodas, velocidades, acelerações, mudanças de direção e sentido etc. Em função da informação empregada, podem distinguir-se dois grupos:

- Sistemas odométricos;
- Sistemas de navegação inercial.

a.1) Sistemas odométricos

A odometria é uma antiga técnica que remonta à época de Arquimedes, que tem por objetivo estimar a posição e a orientação de um veículo a partir do número de voltas dadas por suas rodas. A ideia fundamental da odometria é a integração temporal do movimento, o que leva, inevitavelmente, a uma acumulação de erros. As vantagens da odometria vêm de em sua simplicidade, seu baixo custo e no fato de permitir uma elevada taxa de amostragem. Entretanto, além de necessitar de calibração devido ao desgaste das rodas, esta técnica é vulnerável a imprecisões originadas pelo deslizamento das rodas, irregularidades do terreno e variações na carga transportada.

A Figura 3.4.2 ilustra as trajetórias seguidas pelas rodas de um robô quando se produz um deslocamento do mesmo. A roda esquerda percorre um caminho de distância dada por

$$\Delta x_1 = r_1 \cdot \Delta \varphi .$$

Da mesma forma, a roda direita percorre uma distância dada por

$$\Delta x_2 = r_2 \cdot \Delta \varphi .$$

Assim, a distância total percorrida pelo robô (referencial $\{\mathbf{R}_M\}$) pode ser obtida através da média das distâncias percorridas por cada roda, ou seja,

$$\Delta x = \frac{\Delta x_1 + \Delta x_2}{2} .$$

A alteração na orientação se obtém a partir da razão entre a diferença da distância percorrida por cada roda e a distância entre elas:

$$\Delta \varphi \cdot (r_1 - r_2) = (\Delta x_1 - \Delta x_2),$$

$$\Rightarrow \Delta \varphi = \frac{(\Delta x_1 - \Delta x_2)}{(r_1 - r_2)} = \frac{(\Delta x_1 - \Delta x_2)}{a} .$$

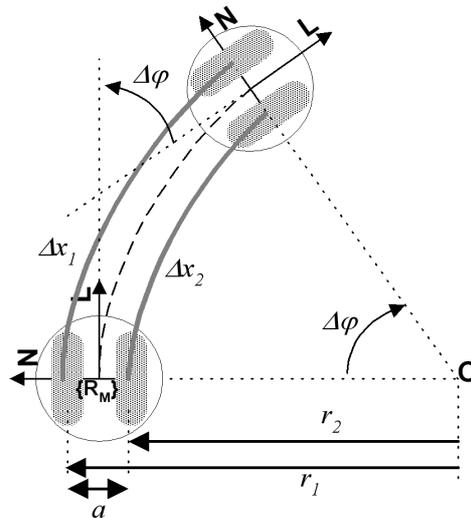


Figura 3.4.2. Odometria num robô móvel.

Em certas aplicações é possível reduzir os efeitos dos erros de odometria empregando sistemas de navegação Doppler, ilustrado na Figura 3.4.3. Seu princípio de operação é baseado na variação de frequência observada em um sinal quando a energia radiada se reflete sobre uma superfície que está em movimento em relação ao emissor. O sensor Doppler inclinado a um ângulo β mede a componente da velocidade relativa do robô v_D em relação à velocidade do terreno v_A .

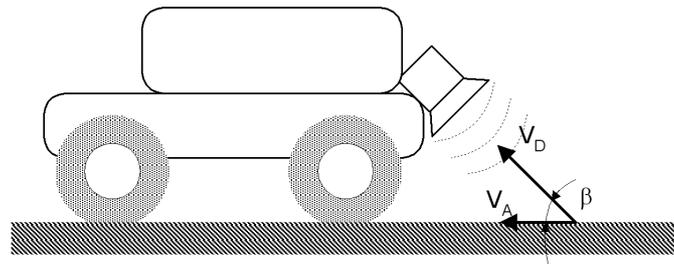


Figura 3.4.3. Sensor Doppler.

Os sistemas marítimos empregam energia acústica enquanto os aeroespaciais empregam energia eletromagnética (ondas de rádio). No entanto, erros na determinação da velocidade do veículo surgem devido a interferências produzidas pelos lóbulos laterais dos sensores, incertezas relacionadas ao ângulo de incidência do sinal e componentes verticais de velocidade introduzidas pela reação do veículo perante superfícies irregulares.

A maioria dos pesquisadores da área de robótica móvel concorda que a odometria é uma parte importante dos sistemas de navegação de robôs. Atualmente é uma técnica amplamente usada em robôs móveis e, para isso, são empregados codificadores ópticos (*encoders*), ilustrados na Figura 3.4.4. Os *encoders* possuem elevada precisão e são montados sobre os eixos das rodas, o que lhes permite computar de forma muito precisa o número de voltas (e a fração) que estas realizam. Para a estimação de sua pose se requer o registro odométrico de pelo menos duas rodas do veículo.

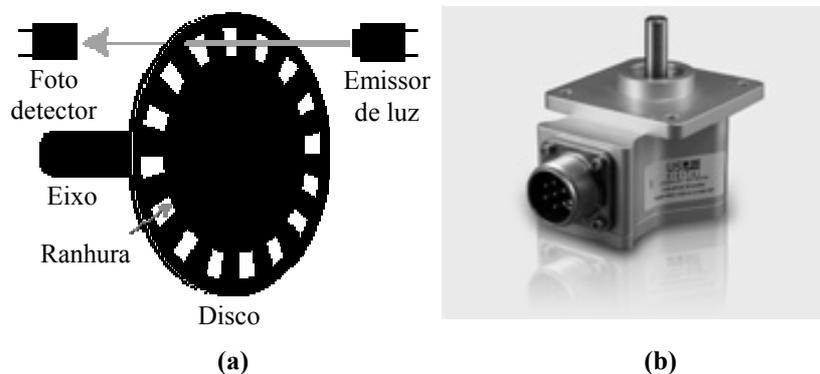


Figura 3.4.4. Encoder óptico. (a) Princípio de funcionamento (b) Dispositivo comercial.

a.2) Navegação inercial

Os sistemas de navegação inercial estimam a posição e orientação do veículo empregando medidas das acelerações e ângulos de orientação.

Os acelerômetros são baseados em sistemas pendulares. A primeira integração das acelerações proporciona a velocidade e a segunda, a posição. A precisão do acelerômetro é fator crítico devido à dupla integração das acelerações, já que pequenos erros cometidos por este repercutem de forma importante na posição estimada. A estimação da posição se torna ainda mais complicada quando a relação sinal/ruído também é pequena devido a pequenas acelerações.

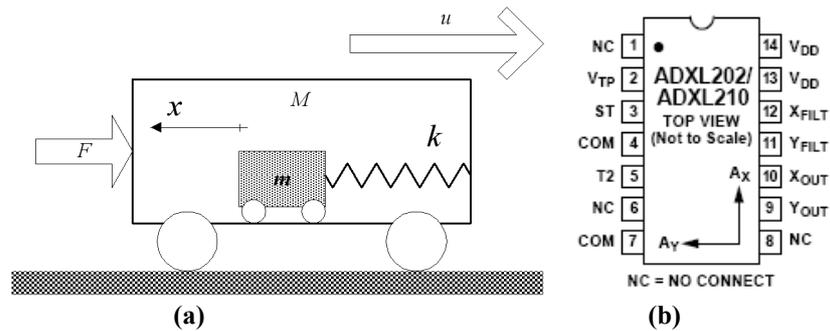


Figura 3.4.5. Acelerômetro. (a) Princípio de funcionamento. (b) Acelerômetro eletrônico.

O acelerômetro é um dispositivo de massa m que se vincula ao robô móvel de massa M através de uma mola de constante elástica k . Uma condição para que o acelerômetro funcione corretamente é que $M \ll m$. Quando o robô móvel se move, a condição

$$F = m \cdot a = k \cdot x$$

é cumprida, onde a é a aceleração do robô e x é a deformação sofrida pela mola devido à ação da força F . Logo, é possível de se obter o valor da aceleração a , da velocidade u e da distância do caminho curvilíneo s como

$$a = \frac{k}{m} \cdot x \rightarrow u = \int a \cdot dt \rightarrow s = \int u \cdot dt.$$

Para medir os ângulos de orientação são empregadas bússolas. Essencialmente este sensor é composto por um ímã com liberdade de rotação no plano horizontal. Devido à ação do campo magnético terrestre este ímã será orientado segundo o meridiano magnético do lugar, indicando a direção do norte magnético.

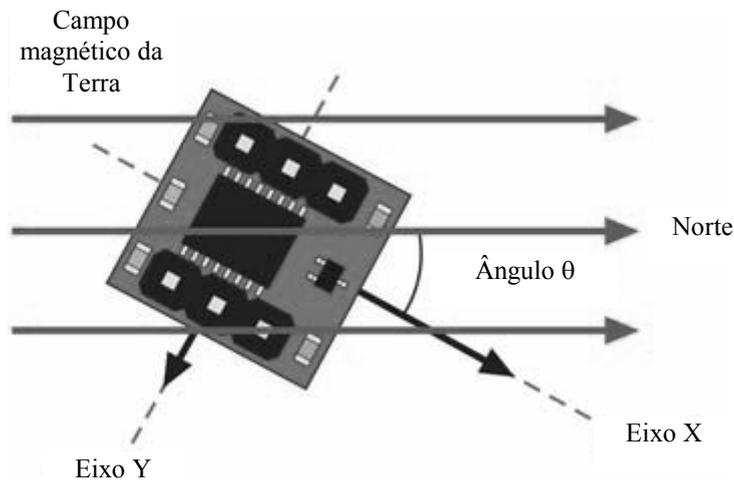


Figura 3.4.6. Bússola eletrônica HM55B baseada em efeito Hall.

A medição do ângulo de orientação também é possível com o emprego de giroscópios. Um giroscópio de medição de orientação possui um eixo que é fixado de maneira a se manter sempre na horizontal em relação à superfície da Terra.



Figura 3.4.7. Giroscópio de orientação desenvolvido por Herman Anschütz-Kaempfe em 1903.

Giroscópios possuem duas vantagens principais quando comparados a bússolas: primeiro que indicam o norte geográfico, ou seja, a direção do eixo de rotação da Terra, e não o norte magnético. Segundo que não são afetados pelo metal da estrutura mecânica do robô.

Os acelerômetros e giroscópios são acoplados ao veículo diretamente ou através de uma barra estabilizadora que minimiza os efeitos de inclinação de todo o sistema. No primeiro caso são requeridos sensores adicionais para medição dos ângulos de inclinação (inclinômetros) para realizar a correspondente correção na leitura do acelerômetro.

Os sensores de orientação são de particular importância no posicionamento de robôs móveis devido ao fato que eles podem ajudar a compensar o problema mais notável do sistema de odometria: **em qualquer método de posicionamento baseado apenas em odometria, qualquer erro de orientação transitório, por menor que seja, produzirá um erro de direção constante e crescente.** Por essa razão, é de grande valia a possibilidade dos erros de orientação serem detectados e corrigidos imediatamente.

Ao contrário dos sistemas odométricos, os sistemas de navegação inercial não são afetados pelos problemas da interação do veículo com o terreno e podem corrigir os erros provenientes de tais ondulações e irregularidades. Na prática, sistemas inerciais são mais confiáveis e precisos que os odométricos, porém são muito mais caros e frágeis.

Ambas as técnicas são simples de serem implementadas, mas apresentam um grave inconveniente como estimadores de posição absoluta: os erros são cumulativos e a incerteza no valor da posição estimada cresce na proporção do espaço percorrido. É por isso que tais sistemas são complementados por algum outro tipo de sistema de posicionamento absoluto que reduza periodicamente tal incerteza.

b) Estimação explícita baseada em estações de transmissão

Este tipo de sistema de posicionamento absoluto é empregado há décadas em aplicações marítimas e aeronáuticas, mas sua utilização ocorre há vários séculos. As estrelas foram utilizadas, desde muito antigamente, como um sistema de referência para estimar a posição. Mais tarde os faróis construídos pelo homem também passaram a ser usados com esse propósito. Nos últimos anos, com o surgimento dos robôs móveis para ambientes externos, tais sistemas têm se tornado cada vez mais interessantes para a comunidade científica de robótica. A vantagem desta técnica vem do fato de que ela proporciona localização absoluta

do veículo em uma área suficientemente grande, sem requerer nenhuma estruturação do ambiente. Tal característica torna este tipo de sistema especialmente adequado para emprego em aplicações nas quais o veículo deve mover-se em ambientes muito diversos e naqueles em que deve percorrer grandes distâncias.

A configuração destes sistemas é baseada em um receptor (ou transceptor) que fica a bordo do robô, e em um conjunto de estações transmissoras de RF (rádio-frequência) localizadas em lugares conhecidos distantes do veículo.

Os avanços tecnológicos têm promovido grande melhora na capacidade dos sistemas baseados em estações de transmissão, através da incorporação de LASER, ultrassom e transmissores de RF. É importante se notar que nenhum dos sistemas de RF pode ser empregado com certeza em ambientes interiores.

Dois grupos fundamentais podem ser caracterizados:

- Sistemas de posicionamento mediante estações fixas;
- Sistemas de posicionamento mediante estações móveis.

b.1) Estações fixas

Os sistemas de posicionamento mediante estações fixas são basicamente de dois tipos:

Triangulação: Conhecidos como métodos de navegação hiperbólica ou passivos. Este método foi desenvolvido durante a Segunda Guerra Mundial e a implementação original foi chamada de LORAN (do inglês *LOng RAnge Navigation*), ou navegação de longo alcance. Este sistema compara os tempos de chegada de dois sinais idênticos transmitidos simultaneamente a partir de transmissores de alta potência localizados em posições de coordenadas conhecidas, como mostra a Figura 3.4.8.

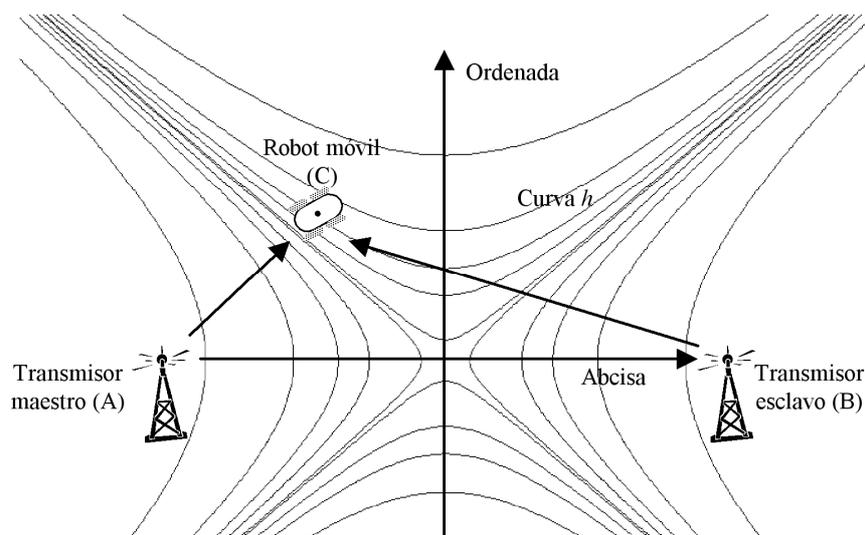


Figura 3.4.8. Para cada ponto sobre uma linha hiperbólica, a distância $(ABC - AC) = k$, sendo k constante.

O transmissor mestre envia um sinal de identificação ao robô móvel e a outras estações transmissoras (escravas). Quando as estações escravas recebem o sinal do mestre, o retransmitem acrescentando seu próprio sinal de identificação; tais sinais também são

recebidos pelo robô móvel, mas um instante de tempo após a recepção do sinal do mestre. A diferença de tempo entre a recepção dos sinais pelo robô está diretamente relacionada com as distâncias entre as estações e o próprio robô. A diferença das distâncias é igual a uma constante h , que se relaciona com uma curva hiperbólica na qual se encontra posicionado o robô móvel, e em cujos focos estão localizadas as estações de transmissão:

$$(\overline{AB} + \overline{BC}) - (\overline{AC}) = h$$

Para evitar ambiguidades no posicionamento do robô, três ou mais estações de transmissão são necessárias para se encontrar o ponto de intersecção das linhas hiperbólicas.

A versão mais moderna desta técnica é a LORAN-C, que funciona em frequências do espectro entre 90 kHz e 100kHz. Ainda que seu uso tenha decaído notavelmente depois do surgimento do GPS, não deixa de servir como um sistema alternativo de posicionamento devido à cobertura que possui atualmente (ver Figura 3.4.9). A Rússia utiliza um sistema praticamente idêntico, inclusive na mesma banda de frequências, chamado de CHAYKA.

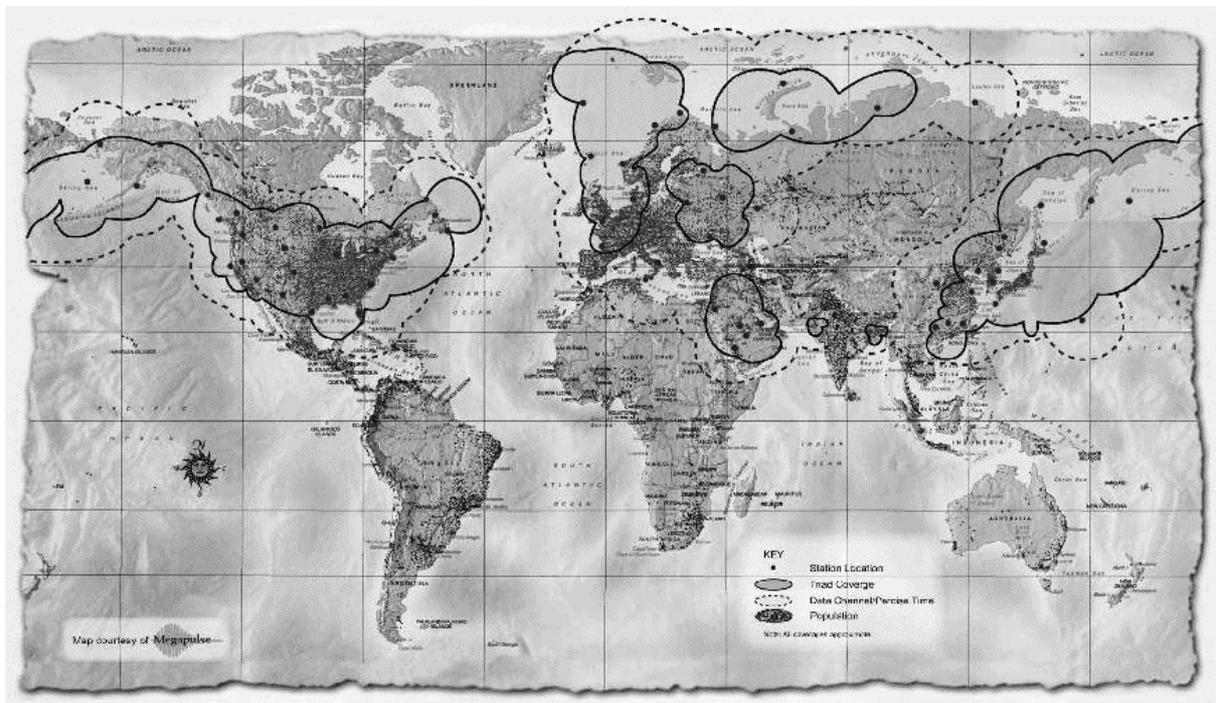


Figura 3.4.9. Cobertura do sistema LORAN.

Trilaterização: São sistemas ativos. Medem o atraso de propagação de um sinal a um número de transceptores localizados em pontos de coordenadas conhecidas, como mostra a Figura 3.4.10. Os sistemas ativos funcionam a partir dos 100 m e até quase 100 km, com uma exatidão próxima a 2 m.

O sistema opera da seguinte maneira: o transceptor móvel emite um sinal de identificação que é captado por vários transceptores fixos, que os devolvem adicionando seu próprio código de identificação. O retardo existente entre o instante em que o robô emite o sinal e aquele em que recebe cada resposta determina a distância a que se encontra de cada estação fixa. São necessárias ao menos três estações fixas para que o robô possa calcular sua localização corretamente.

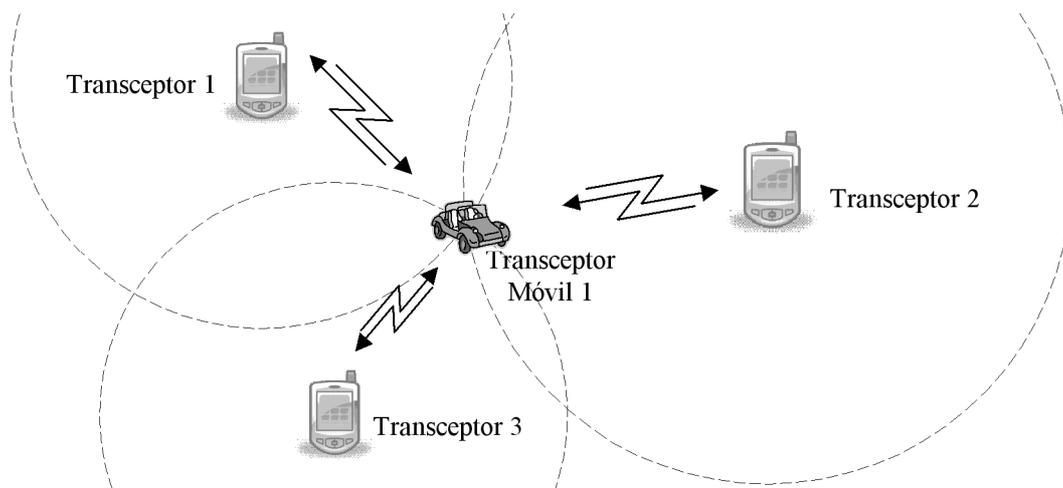


Figura 3.4.10. Esquema de funcionamento de um sistema de trilaterização.

Os sistemas de trilaterização ultrassônicos oferecem uma exatidão aceitável e são uma solução de baixo custo ao problema de localização de robôs móveis. Devido ao alcance relativamente curto do ultrassom, tais sistemas são adequados para operarem em pequenas áreas de trabalho e somente se não existirem obstáculos significativos que interfiram com a propagação do sinal.

Os sistemas de posicionamento ópticos geralmente utilizam algum tipo de mecanismo de busca operando em conjunto com dispositivos de referência estrategicamente posicionados em pontos de coordenadas conhecidas dentro do ambiente de operação do robô móvel. Um dos principais problemas associados a estes sistemas é a necessidade de se preservar a visibilidade entre o robô e as os transmissores.

b.2) Estações Móveis

Os sistemas de posicionamento através de estações móveis operando a partir de satélites são, atualmente, os de maior interesse para robôs móveis. O primeiro sistema de posicionamento por satélites é baseado na alteração da frequência dos sinais de rádio transmitidos, conhecido como Efeito Doppler. Hoje tal sistema foi substituído pelo GPS (*Global Positioning System*), que é muito mais potente e tem sua estrutura apresentada na Figura 3.4.11.

O GPS (seu nome correto é NAVSTAR-GPS) emprega uma constelação de 24 satélites (incluindo três de reserva) orbitando a Terra a cada 12 horas a uma altura de 20.200 km, aproximadamente. Quatro satélites são colocados em cada uma de seis órbitas cujos planos estão separados 55° a partir do plano do Equador. Cada satélite transmite dois sinais de rádio em alta frequência, modulados por um pseudo-ruído binário em que são codificadas de maneira complexa as informações sobre o instante exato em que o sinal foi transmitido, informação orbital etc. Empregando pelo menos três satélites, o receptor pode calcular, por trilaterização, sua posição (latitude e longitude) e sua altitude de forma instantânea e contínua (a cada intervalo de 30 a 60ns). Também é possível a determinação de sua velocidade a partir da variação da frequência causada pelo Efeito Doppler.

Apesar de ser conceitualmente simples, esta filosofia de operação do GPS introduz, pelo menos, quatro desafios tecnológicos:

- Sincronização dos relógios entre os satélites individuais e os receptores de GPS;
- Localização precisa e em tempo real dos satélites;
- Medição exata do tempo de propagação do sinal;
- Suficiente relação sinal-ruído para uma operação eficaz na presença de possíveis interferências.

A precisão do GPS depende de vários fatores, alguns comuns a outros sistemas de posicionamento por Rádio-frequência (como instabilidade na transmissão do sinal, posição relativa do receptor com relação às estações de transmissão etc.), e outros específicos do GPS (alteração da velocidade de propagação do sinal de rádio, erros no posicionamento orbital etc.). A precisão alcançada chega a ser de $\pm 20\text{m}$ para veículos em movimento e de $\pm 10\text{m}$ para medidas estacionárias. No entanto, com o emprego do GPS diferencial, que é auxiliado por uma estação em Terra que possui coordenadas fixas e conhecidas, pode-se melhorar a precisão até um par de metros.

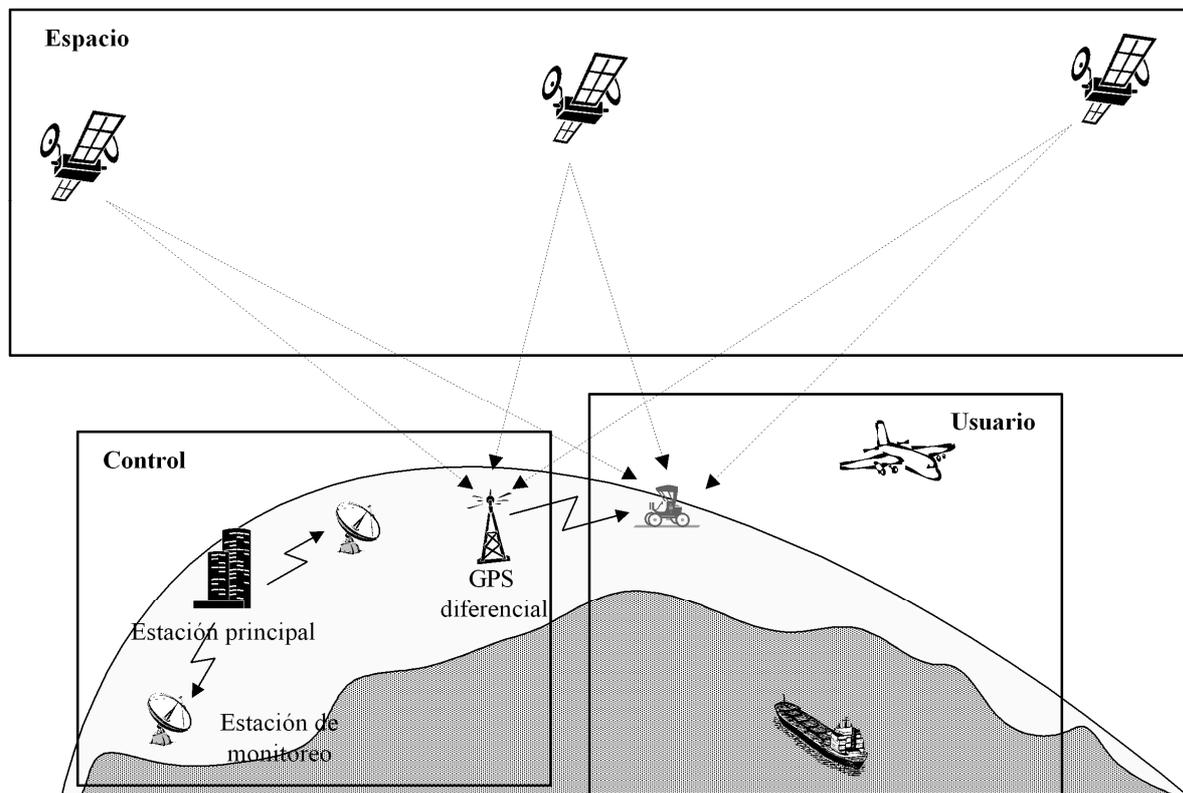


Figura 3.4.11. O Sistema de Posicionamento Global (GPS) consiste de três segmentos fundamentais: Espaço, Controle e Usuário.

A antiga União Soviética possuía um sistema similar chamado GLONASS, que agora é gerenciado pela Federação Russa. Atualmente a União Européia está desenvolvendo seu próprio sistema de posicionamento por satélites, chamado de GALILEO.

3.4.2 Estimadores baseados na percepção do ambiente

Os estimadores baseados na percepção do ambiente empregam sensores que captam informação sobre o entorno do robô e, a partir de tal informação, inferem a localização do robô móvel através de sua comparação com outros dados do modelo conhecido do ambiente.

Os sensores empregados nesse tipo de estimadores podem ser classificados em dois grupos:

Sensores ativos: são os que emitem algum tipo de energia ao meio (luz ou ultrassom, por exemplo). Proporcionam medidas diretas de distância do entorno. Entre os sistemas mais empregados estão os sonares (ultrassom) e os scanners LASER.

Sensores passivos: Limitam-se a captar a energia existente no meio. Entre os sistemas mais utilizados estão as câmeras de vídeo e os sensores infravermelhos.

Além das características comuns a outras aplicações, como resolução, precisão, alcance etc., para aplicações em robôs móveis é necessário considerar outras características do sensor, como sua imunidade a variações de condições ambientais, sua robustez a vibrações, seu tamanho, seu consumo de energia, seu desgaste e sua segurança de funcionamento.

a) Estimação através de marcas ou balizas

Em geral, as marcas são características do ambiente de operação que um robô pode reconhecer a partir de seus sensores. Ainda que se possa entender que este processo considera a percepção do entorno, a posição não é estimada a partir do ambiente percebido, mas de forma mais ou menos direta com base em triangulação realizada pela medição de distâncias e/ou ângulos às marcas.

As marcas naturais são aqueles objetos ou características próprios do ambiente. O principal problema relacionado ao posicionamento a partir de marcas naturais consiste em se conseguir detectar e extrair características distintivas do entorno. O sistema sensorial mais utilizado para isso é a visão computadorizada. A maioria dos sistemas de visão empregados na navegação por marcas naturais procuram identificar segmentos verticais de tamanho apreciável, como os marcos de uma porta, a interseção de paredes, ou objetos característicos como fontes de luz. No entanto, a visão computadorizada é uma área muito ampla e diversa para que se possa resumir-la em poucas linhas, razão pela qual apenas se comenta aqui de maneira superficial.

No caso de marcas artificiais, geralmente estas são formas geométricas (retângulo, linhas, círculos etc.) que possuem posição fixa e conhecida a partir da qual o robô pode estimar a sua própria posição. Podem, inclusive, oferecer informações adicionais (na forma de código de barras, por exemplo). As marcas artificiais são inseridas, portanto, com o propósito de facilitar a navegação do robô móvel, ao contrário das marcas naturais.

É necessário que o robô móvel conheça as marcas e sua posição dentro da área de trabalho. Com o objetivo de se simplificar o problema da interpretação das marcas, considera-se que a posição e a orientação atuais do veículo são conhecidas de forma aproximada, de forma que o robô necessita observar e comparar a informação das marcas de maneira limitada. O procedimento geral para estimação da posição em função das marcas é ilustrado na Figura 3.4.12.

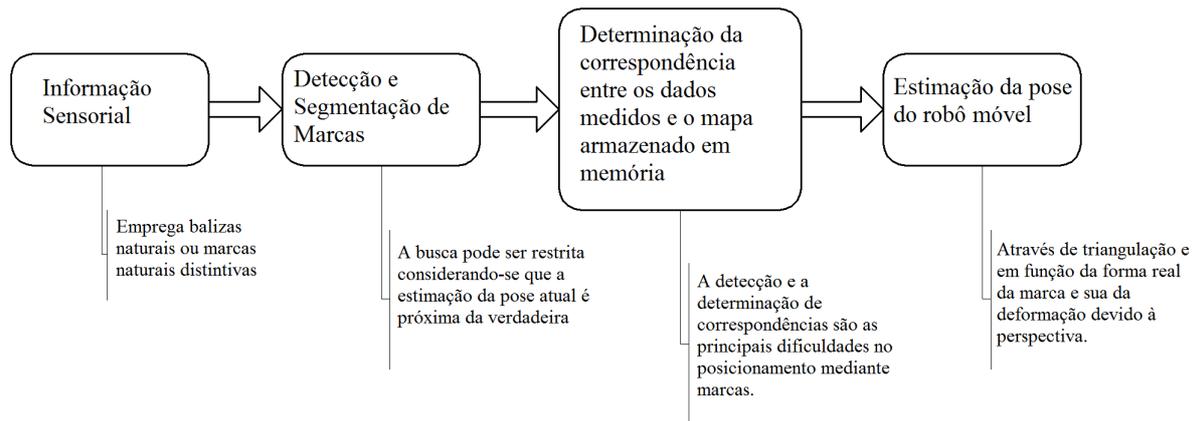


Figura 3.4.12. Procedimento geral para posicionamento por detecção de marcas.

Apesar de pode interpretar-se que este processo advém da percepção do entorno, a posição não é estimada a partir da análise do ambiente percebido, mas determinada de maneira mais ou menos direta com base no princípio de triangulação, a partir da medida de distâncias, ângulos ou ambos. O número mínimo de marcas requeridas dependerá do tipo de sistema empregado, como mostrado na Figura 3.4.13.

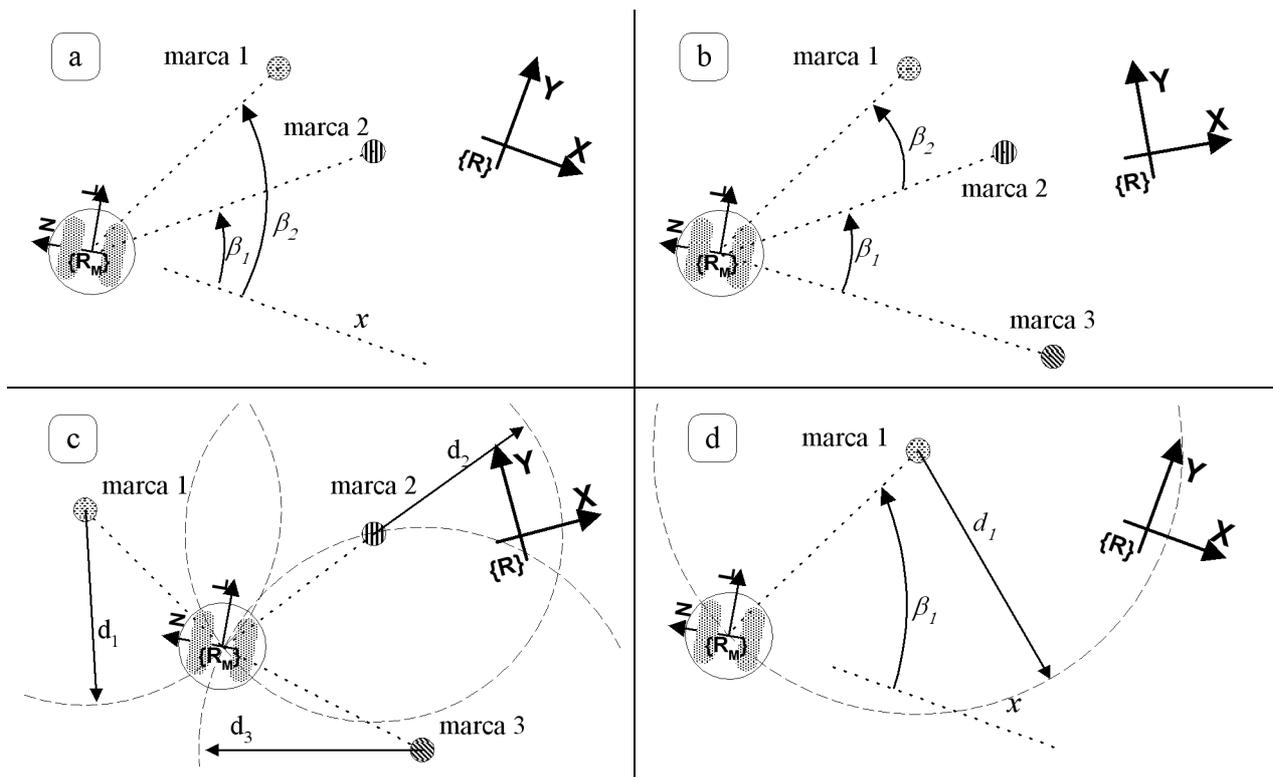


Figura 3.4.13. Diferentes possibilidades de triangulação. a) Ângulos absolutos de referência. b) Ângulos observados entre marcas. c) Distâncias observadas das marcas. d) Ângulo e distância a uma marca.

Outro tipo de sistema de navegação que tem sido amplamente usado na indústria é denominado “Linha de Navegação”. A Linha de Navegação pode ser entendida como uma marca contínua. O sensor utilizado nesse tipo de sistema precisa estar muito próximo da linha e, por consequência, o movimento do robô fica limitado à vizinhança imediata da linha. Existem diversas maneiras de se implementar esse sistema, com base em princípios eletromagnéticos, ópticos (reflexão), térmicos ou químicos [14].

A precisão obtida por esses métodos depende da confiabilidade da informação extraída dos parâmetros geométricos da marca. Tal confiabilidade, por sua vez, depende da posição e do ângulo relativos entre o robô e a marca.

b) Posicionamento baseado em mapas do ambiente

O posicionamento baseado em mapas do ambiente (também conhecido como *map matching*) é uma técnica na qual o robô emprega seus sensores para criar um mapa do seu entorno local. Este mapa é comparado com um mapa global previamente armazenado em sua memória. Se for encontrada alguma correspondência entre os mapas, o robô é capaz de computar sua posição e orientação real no ambiente. O mapa previamente armazenado pode ser um modelo CAD do ambiente, ou pode ser construído *à priori* a partir da própria informação sensorial.

O procedimento básico para se realizar posicionamento baseado em mapas de ambiente é ilustrado na Figura 3.4.14.

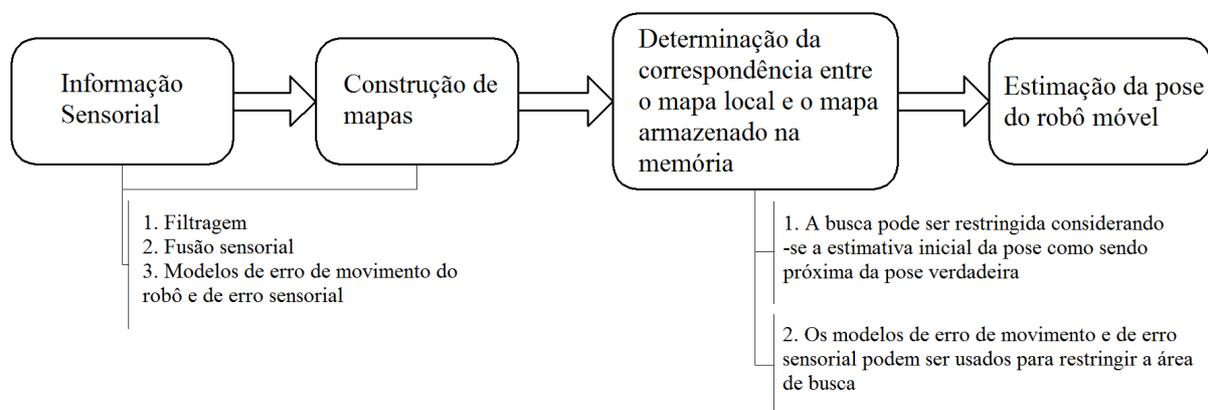


Figura 3.4.14. Posicionamento baseado em mapas.

A maioria dos sensores empregados com este propósito utiliza algum método de determinação de distância. Basicamente, existem três métodos diferentes:

- Tempo de voo;
- Deslocamento de fase;
- Deslocamento de frequência.

As principais vantagens do posicionamento baseado em mapas do ambiente são as seguintes:

- Este método emprega a configuração natural dos ambientes interiores em edifícios ou laboratórios para obter informação sobre a posição do veículo sem modificar a área de operação;
- Pode ser empregado para gerar uma atualização do mapa do ambiente;
- Permite ao robô conhecer um novo ambiente e melhorar a exatidão da estimativa de sua posição através de exploração.

As desvantagens do posicionamento baseado em mapas de ambiente estão relacionadas com os requerimentos para uma navegação satisfatória:

- ↓ O ambiente deve ser altamente estático e suas características devem ser fáceis de serem reconhecidas, de modo que possam ser empregadas para comparação;
- ↓ O sensor empregado para elaboração do mapa deve ser bastante preciso (em relação à tarefa a ser desenvolvida);
- ↓ É necessária uma importante capacidade de medição e processamento de informação.

É preciso notar que a maioria dos trabalhos atuais neste sentido está limitada a ambientes relativamente simples e a experimentos de laboratório.

Fundamentalmente existem dois pontos de partida para o processo de posicionamento baseado em mapas. Um é a existência de um mapa armazenado em memória e o outro é que o robô deve construir seu próprio mapa do ambiente.

b.1) Construção de mapas

Rencken [15] definiu o problema de se construir o mapa da seguinte maneira: “Dadas a posição do robô e um conjunto de medições, o que estão vendo os sensores?”. Obviamente, a habilidade do robô para construir o mapa está totalmente limitada à sua capacidade sensorial.

Hoppen [16] et al. enunciaram os três passos principais a serem seguidos no processamento da informação sensorial para construir o mapa do ambiente:

1. Extração de características a partir dos dados não processados;
2. Fusão dos dados de vários tipos de sensores;
3. Geração automática de um modelo do ambiente com diferentes graus de abstração.

Um problema relacionado com a construção do mapa é a exploração autônoma. Para elaborar um mapa, o robô deve explorar seu entorno para mapear áreas não registradas. Habitualmente se supõe que o robô começa sua exploração sem ter conhecimento do ambiente. A partir daí, segue-se uma estratégia de movimentação que objetiva maximizar a área mapeada no menor tempo possível. Tal estratégia é chamada de estratégia de exploração e depende fortemente do tipo de sensor empregado.

b.2) Técnicas de comparação de dados

Um dos aspectos mais importantes da navegação baseada em mapas é a comparação de dados, ou seja, o processo através do qual se estabelece a correspondência entre um mapa local atual e o mapa global armazenado em memória. Os algoritmos empregados na comparação de mapas podem ser classificados como:

- Algoritmos baseados na extração de características;
- Algoritmos baseados em técnicas icônicas.

Os algoritmos baseados na extração de características resolvem o problema da estimação da posição do robô a partir da extração de um conjunto de características de cada um dos conjuntos a serem comparados, para então buscar os pares de correspondência entre seus elementos. Por sua vez, os algoritmos baseados em técnicas icônicas trabalham diretamente com dois conjuntos de dados, buscando a correspondência direta de seus elementos.

Ambos os enfoques apresentam vantagens e desvantagens:

- Os algoritmos baseados na extração de características requerem uma estruturação dos dados que possibilite a identificação de objetos ou formas determinadas (segmentos, círculos, polígonos) enquanto os algoritmos baseados em técnicas icônicas comparam diretamente os dados obtidos pelos sensores;
- Os algoritmos baseados na extração de características são mais rápidos que aqueles baseados em técnicas icônicas, pois os primeiros comparam apenas subconjuntos de características, enquanto nos outros se comparam todos os pontos dos dois conjuntos de dados;
- Os algoritmos icônicos são mais precisos que os baseados em extração de características, pois a extração de características implica numa redução da quantidade de informação.
- Ambos os estimadores são robustos a erros devido aos sensores.

b.3) Mapas topológicos e mapas geométricos

No posicionamento baseado em mapas há duas representações comuns: os mapas topológicos e os mapas geométricos. Um mapa geométrico representa os objetos de acordo com suas relações geométricas absolutas [17], [18] (Figura 3.4.15.a). Pode ser uma representação em forma de grade [8] ou ainda mais abstrata, como um mapa de polígonos e linhas [19]. Por sua vez, os mapas topológicos se baseiam mais na relação geométrica entre as características observadas do que em sua posição absoluta [20] (Figura 3.4.15.b). O resultado é apresentado na forma de um grafo onde os nós representam as características observadas e os arcos representam as relações entre tais características.

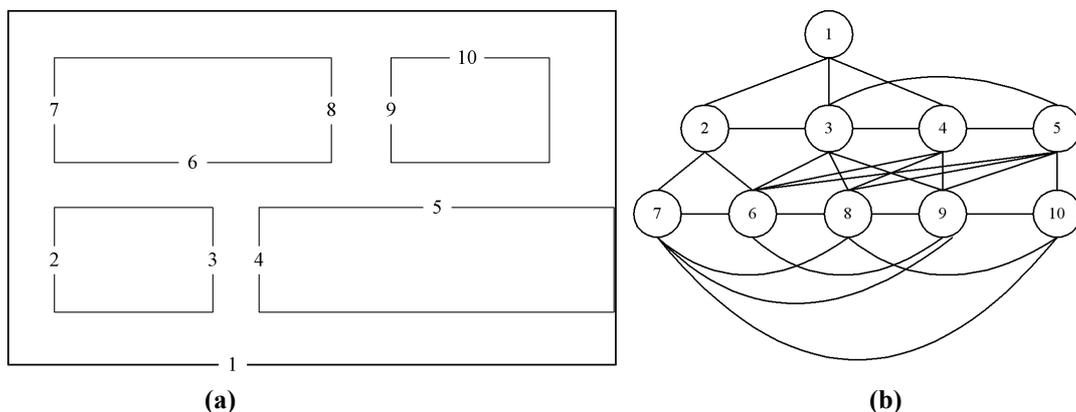


Figura 3.4.15. Diferentes tipos de mapas. (a) Geométrico. (b) Topológico.

Ao contrário dos mapas geométricos, mapas topológicos podem ser construídos e atualizados sem se considerar a estimativa de posição do robô. Isso significa que qualquer erro nesta representação será independente de qualquer erro na estimação de posição do robô. Isso

permite gerar mapas de grandes dimensões sem se preocupar com erros de odometria, já que todas as conexões entre os nós são relativas. Assim que o mapa é estabelecido, o processo de posicionamento é essencialmente o processo de comparação e correspondência do mapa local com a localização apropriada no mapa armazenado em memória.

Os mapas geométricos frequentemente são empregados em esquemas de navegação ocidental⁶, ou seja, uma navegação baseada em uma planificação com base em coordenadas geométricas e trajetórias pré-fixadas.

Já os mapas topológicos são empregados em esquemas de navegação polinésia⁷, em que a navegação é baseada em objetivos sensoriais que são associados a padrões de reação.

Por exemplo, para que o robô móvel se mova da porta 2 à porta 5 na Figura 3.4.15, no caso de um mapa geométrico a posição inicial do robô móvel deve coincidir com a posição da porta 2, e a posição de destino será a coordenada da porta 5. No caso de um mapa topológico, a posição inicial é dada pela percepção da porta 2 e o destino será alcançado através do cumprimento sucessivo de objetivos intermediários: alcançar a porta 3, alcançar a porta 4 e, finalmente, alcançar a porta 5.

⁶ N. do T.: Do espanhol: *navegación occidental*.

⁷ N. do T.: Do espanhol: *navegación polinésica*.

4 Esquemas básicos de navegação para evitar obstáculos

O planejamento de caminhos para robôs móveis é uma função fundamental em operações autônomas. Trata-se do problema de se encontrar um caminho ótimo (em algum sentido), livre de colisões, entre uma posição inicial e uma final em um entorno fechado ou limitado. As dimensões dos obstáculos e suas posições no ambiente podem ser parcial ou completamente desconhecidas. O planejamento de rotas em ambientes desconhecidos é executado durante a movimentação do robô e é frequentemente feito por um algoritmo de resolução de labirintos (*maze-search*), que também se aplica para regiões não convexas. Ao contrário, quando o ambiente é completamente conhecido, o problema de se encontrar uma rota é, usualmente, solucionado por um algoritmo de busca gráfica.

Uma característica dos robôs móveis é o fato de possuírem algum tipo de sistema para evitar obstáculos (gerador local de trajetórias), desde os primitivos algoritmos que paravam o robô para evitar colisão assim que um obstáculo era detectado, até os algoritmos mais sofisticados, que permitem ao robô contornar o obstáculo para alcançar seu destino. Existe uma ampla gama de sensores usados na detecção de obstáculos (ultrassônicos, LASER, câmeras de vídeo etc.). A seguir se faz uma breve descrição de alguns dos métodos empregados na geração local de trajetórias, com o emprego de distintos sensores, analisando suas vantagens e desvantagens.

4.1 Método de detecção de bordas ou esquinas

Um método muito usado para evitar obstáculos é baseado na detecção de bordas. Neste método, a partir da informação dada por um sensor ultrassônico, um algoritmo trata de determinar a posição das bordas verticais dos obstáculos, dirigindo o robô ao redor de uma das bordas percebidas. A linha que conecta as bordas detectadas é considerada para representar um dos limites do obstáculo.

A desvantagem da implementação deste método é que o veículo deve parar em frente ao obstáculo para que os sensores obtenham a informação (apesar de esta não ser uma limitação do método em si, pois tal problema pode ser contornado com o uso de computadores mais rápidos no processamento da informação).

Outra variante do método de detecção de bordas é aquela em que o robô permanece estacionário por algum tempo obtendo uma vista panorâmica do ambiente.

Uma desvantagem comum a ambas as técnicas é a pouca precisão devida ao sistema sensorial empregado. Os sensores ultrassônicos possuem alguns inconvenientes, como:

- Frequentes leituras errôneas são causadas por ruído ultrassônico de fontes externas ou por reflexões do sinal. As falsas leituras nem sempre podem ser filtradas e isso faz com que o algoritmo detecte bordas falsas (inexistentes);
- Reflexão especular ocorre quando o ângulo entre a frente de onda e a normal a uma superfície plana é muito grande. Nesse caso, a superfície reflete parte da onda ultrassônica do sensor e o obstáculo é detectado como sendo menor ou estando mais distante do que é na realidade;
- O espalhamento natural do sinal ultrassônico limita a exatidão na determinação da posição da borda. Este depende da distância que o sensor está do obstáculo e do ângulo entre a superfície do obstáculo e o ângulo acústico do sensor.

Qualquer uma das situações acima pode fazer com que o algoritmo determine a existência de uma borda numa localização completamente errônea, resultando no fato do robô móvel realizar movimentos não desejados. No entanto, o emprego de sensores LASER no lugar de ultrassônicos melhora notavelmente o desempenho desses algoritmos e permite que a informação dos sensores seja utilizada na construção de mapas do ambiente.

4.2 A grade de certeza para representação de obstáculos

O método denominado “grade de certeza” [21], é especialmente indicado quando são utilizados sensores pouco precisos, como os de ultrassom. Trata-se de um método de representação probabilística de obstáculos em um modelo global sobre uma grade. Na grade de certeza, a área de trabalho do robô é representada por um arranjo bidimensional de elementos quadrados, chamados de células. Cada célula contém um valor de certeza (cv) que indica o grau de confiança de que um obstáculo exista ali. Com este método, os cv são atualizados por uma função de probabilidade que leva em consideração as características dos sensores utilizados.

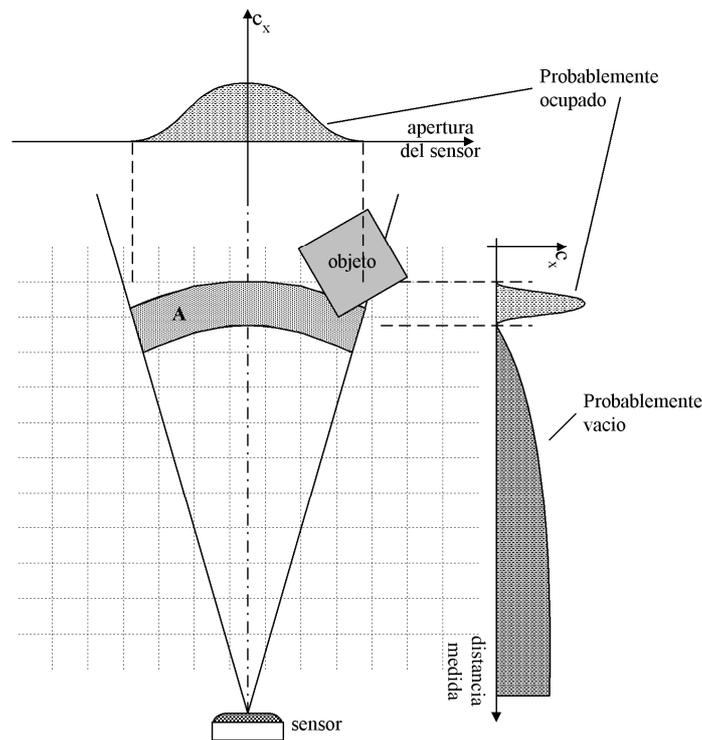


Figura 4.2.1. Projeção bi-dimensional do campo de visão cônico de um sensor ultrassônico.

Os sensores ultrassônicos possuem um campo de visão cônico. Um sensor típico entrega uma leitura radial da distância das proximidades do objeto com o cone, mas não especifica a posição angular do objeto, como ilustrado na Figura 4.2.1.

Se um objeto é detectado por um sensor ultrassônico, é muito provável que este objeto esteja mais próximo do eixo acústico do sensor do que da periferia do campo de visão. Por essa razão, a função de probabilidade C_x promove aumento nos valores de certeza nas células próximas ao eixo acústico, em detrimento daquelas que estão na periferia.

Na aplicação deste método o robô móvel permanece parado por um período, tomando uma imagem panorâmica do ambiente. Logo, a função de probabilidade C_x é aplicada a cada uma das leituras dos sensores e a grade de certeza é atualizada. Finalmente, o robô se move a uma nova posição, pára, e repete o mesmo procedimento. Caso o robô navegue por um quarto dessa maneira, o resultado final será que a grade de certeza representará

Na aplicação deste método, o robô móvel permanece estacionário por um período tomando uma imagem panorâmica. Logo, a função probabilística C_x , é aplicada a cada uma das leituras dos sensores, atualizando a grade de certeza. Finalmente, o robô se move a uma nova posição, se detém e repete o mesmo procedimento. O robô atravessa um quarto dessa maneira; o resultado da grade de certeza representa um mapa bastante preciso desse quarto.

4.3 O método do campo de potencial

A ideia de forças imaginárias atuando sobre o robô foi sugerida por Khatib [22]. Neste método, os obstáculos exercem forças repulsivas enquanto o ponto de destino aplica uma força atrativa ao robô. Uma força resultante \mathbf{r} , que corresponde à soma das forças atrativas e repulsivas, é calculada para uma determinada posição do robô. A partir do valor dessa força, o

sistema calcula a aceleração do robô e sua nova posição para uma iteração. O algoritmo, então, é repetido até que o robô atinja seu ponto de destino.

Krogh [23] melhorou este conceito levando em consideração a velocidade do robô na vizinhança dos obstáculos. Thorpe [24] aplicou o método do campo de potencial no planejamento de caminhos *off-line*. Newman e Hogan [25] constroem a função potencial combinando funções individuais dos obstáculos com operações lógicas. A definição e o conhecimento do modelo do ambiente é comum a tais métodos, sendo os obstáculos representados por formas geométricas pré-definidas simples.

Brooks [26], [27] e Arkin [28] usam o método do campo de potencial em um robô móvel experimental equipado com um conjunto de sensores ultrassônicos. A implementação de Brooks trata cada faixa de leituras ultrassônicas como uma força repulsiva. Se a magnitude da soma das forças repulsivas ultrapassa certo limite, o robô pára e se move na direção da força resultante. Nesta realização se considera apenas um jogo de leituras por vez, sendo que as leituras anteriores são perdidas. O robô de Arkin emprega um método similar alcançando uma velocidade de 0,12cm/s numa travessia entre obstáculos.

4.4 Método do campo de forças virtuais (VFF)

O método VFF (*Virtual Force Field*) é o primeiro método que permite evitar obstáculos em tempo real para veículos autônomos rápidos. Ao contrário dos métodos anteriores, VFF permite que o veículo seja controlado de forma contínua e rápida enquanto se move através de obstáculos inesperados. VFF não requer que o veículo se detenha para analisar os obstáculos.

O conceito do VFF

As componentes do método VFF [29] são:

- 1) Utiliza uma grade-histograma cartesiana bidimensional (*cartesian histogram grid*) C , para representar os obstáculos. Como no conceito da grade de certeza, cada célula i,j mantém na grade um valor de certeza c_{ij} , que representa a confiança do algoritmo na existência de um obstáculo naquela localização.

A “grade histograma” difere da “grade de certeza” pois a última é atualizada em tempo real, enquanto a primeira, não. O método da grade de certeza projeta contorno de probabilidades sobre as células que estão afetadas por um jogo de leituras dos sensores. Tal procedimento é computacionalmente intensivo pode impor um alto tempo de penalização caso seja executado de maneira *on-line*. Já no método VFF, apenas uma célula da grade-histograma é incrementada para cada jogo de leituras, criando uma distribuição de probabilidades com custo computacional muito menor. Para um sensor ultrassônico, esta célula corresponde à distância medida, como mostrado na Figura 4.4.1. Isso pode ser entendido como uma simplificação excessiva, mas o fato é que assim se obtém uma distribuição probabilística através de amostragens muito rápidas e contínuas de cada sensor, enquanto o veículo está em movimento. Depois, a mesma célula e suas vizinhas são sucessivamente incrementadas, como se observa na Figura 4.4.1. Isso resulta em uma distribuição de probabilidades na grade-histograma em que os valores de maior certeza se encontram nas células que correspondem à real localização dos obstáculos.

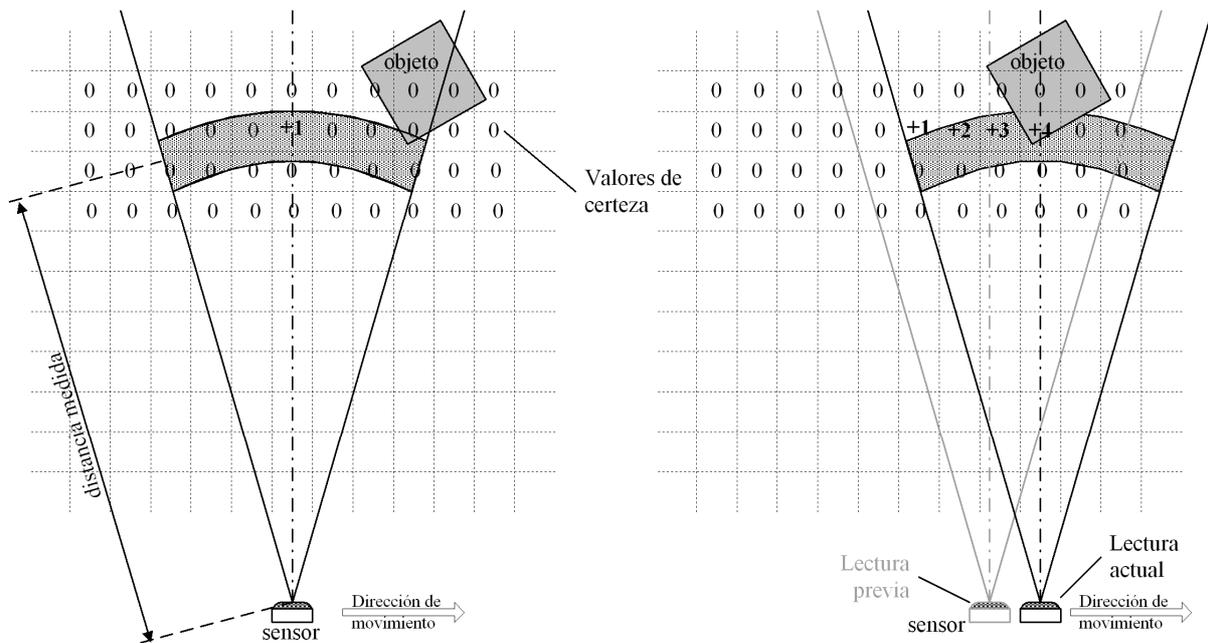


Figura 4.4.1. Grade histograma.

2) Em seguida, se aplica a ideia de campo de potencial à grade-histograma. Assim, a informação do sensor (informação probabilística) pode ser utilizada de modo eficiente para controlar o veículo. A Figura 4.4.2 mostra como trabalha este algoritmo.

Como o veículo se move, uma janela de $w_s \times w_s$ células o acompanha, ocupando uma região quadrada de C . Esta região é chamada de "região ativa" (denotada por C^*). As células que momentaneamente se encontram na região ativa são chamadas de "células ativas" (denotadas como c_{ij}^*). A janela está sempre centrada na posição do robô.

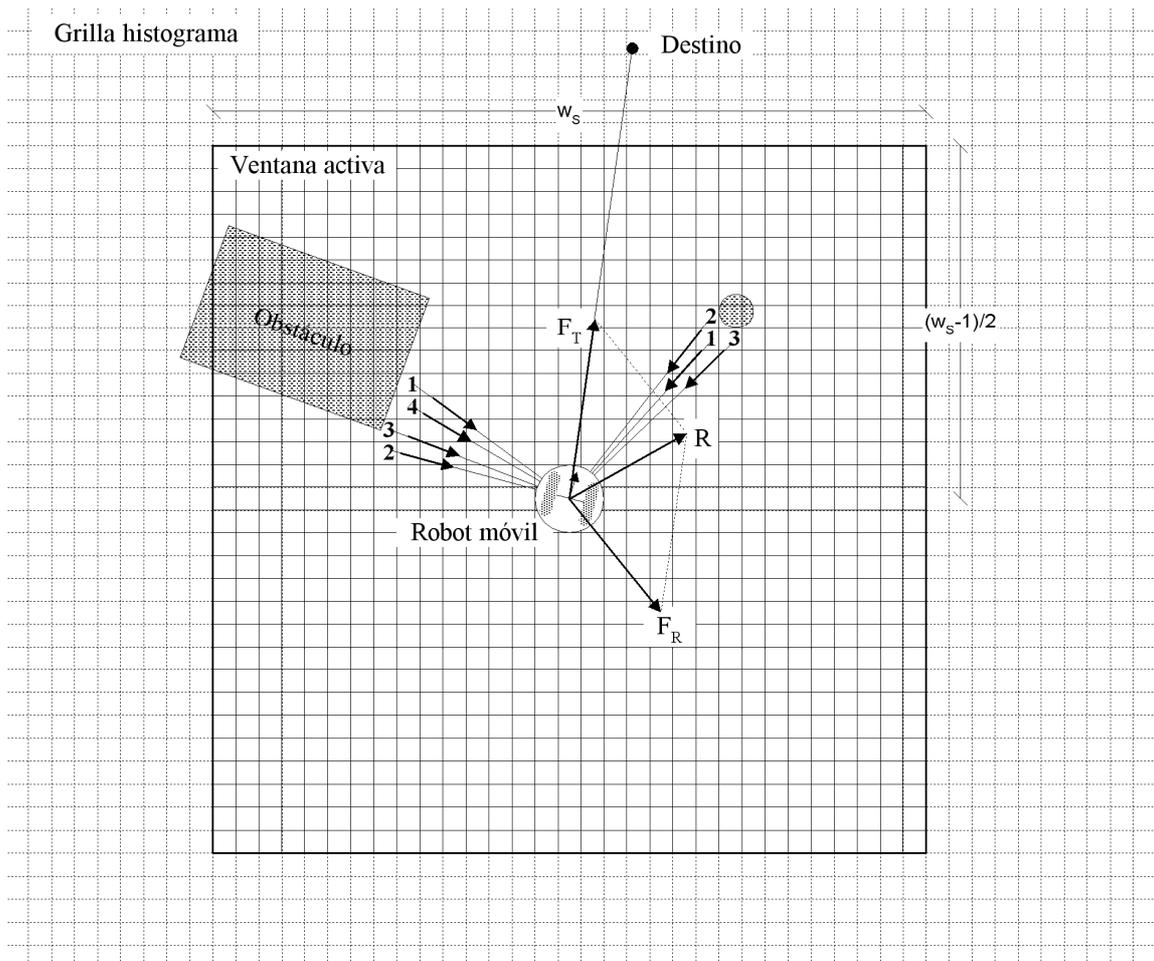


Figura 4.4.2. Conceito de campo de forças virtuais: as células ocupadas exercem forças repulsivas sobre o robô. A amplitude é proporcional ao valor de certeza da célula e da proximidade com as mesmas.

Cada célula ativa exerce uma "força repulsiva virtual" f_{ij} , contra o robô. A amplitude desta força é proporcional ao valor de certeza c_{ij}^* e inversamente proporcional a d^a , onde d é a distância entre a célula e o centro do veículo, e a é um número real positivo.

Para cada iteração todas as forças repulsivas virtuais são totalizadas para se produzir a força repulsiva resultante \mathbf{fr} . Simultaneamente, uma "força atrativa virtual" \mathbf{ft} , de amplitude constante, é aplicada ao veículo, "empurrando-o" em direção ao seu destino. A soma de \mathbf{fr} e \mathbf{ft} produz a força resultante \mathbf{r} .

3) Combinando os conceitos 1 e 2, em tempo real, habilitamos o sensor para influir no controle de direção imediatamente.

Na prática, cada faixa de leituras é armazenada na grade-histograma tão logo quanto possível, e o seguinte cálculo de \mathbf{r} leva esses dados em consideração. Esta característica dá ao veículo uma resposta rápida diante dos obstáculos que aparecem repentinamente, resultando numa conduta mais reativa, necessária para altas velocidades.

Desvantagens do método VFF

Este método apresenta vários problemas que não são fáceis de solucionar:

- Com baixa visibilidade entre dois obstáculos (uma porta, por exemplo) se encontram alguns problemas. Em alguns casos o robô não pode passar através dos obstáculos porque as forças repulsivas de ambos os lados resultam em uma força que o empurra para trás. Quanto menor for a visibilidade entre dois obstáculos, maiores serão os problemas.
- Outro problema surge da natureza discreta da grade-histograma. Em relação ao cálculo eficiente das forças repulsivas em tempo real, a posição momentânea do robô é mapeada sobre a grade-histograma. Quando esta posição muda de uma célula a outra, pode-se encontrar mudanças bruscas na posição de \mathbf{r} . Estas mudanças causam flutuações consideráveis no controle de direção. A situação é más grave quando a força constante dirigida ao ponto de destino coincide com a direção da força repulsiva. Nesta situação, a direção da resultante \mathbf{r} poderá oscilar próxima dos 180° . Por esta razão, faz-se necessário, para suavizar o sinal de controle para o motor, acrescentar um filtro passa-baixas à malha de controle do VFF. Este filtro introduz um retardo que afeta desfavoravelmente a resposta do robô ante a obstáculos inesperados.
- Finalmente, se identifica um problema que ocorre quando o robô atravessa um corredor longo: quando a travessia é ao longo da linha central entre as duas paredes, o movimento do robô é estável. Mas, se o robô se desvia ligeiramente para um dos lados da linha central, ele experimenta uma força repulsiva virtual a partir da parede mais próxima. Esta força empurra o robô até a linha central, e o processo se repete com a outra parede. Sob certas condições, este processo resulta em um movimento oscilatório e instável.

4.5 Método do histograma de campo vetorial (VFH)

A análise cuidadosa das desvantagens do método VFF revelam um problema: uma redução excessiva de dados ocorre quando as forças repulsivas individuais das células da grade-histograma são totalizadas para calcular a força resultante \mathbf{fr} . Centenas de pontos-dados são reduzidos em um só vetor: a direção e a amplitude de \mathbf{fr} . Como consequência, a informação detalhada sobre a distribuição local de obstáculos é muito pobre. Para remediar o problema, desenvolveu-se um novo método denominado "Histograma de Campo Vetorial" (VFH) [18]. Este método emprega uma técnica de redução de dados em dois estados muito mais simples que a técnica de um só passo usada pelo método VFF. Existem três níveis de representação de dados:

- 1) O nível mais alto retém a descrição detalhada do ambiente do robô. Neste nível, a grade-histograma cartesiana bidimensional \mathbf{C} , é continuamente atualizada no tempo com o jogo de dados amostrados pelo conjunto de sensores. Este processo é idêntico ao descrito para o método VFF.
- 2) Para o nível intermediário, um histograma polar unidimensional \mathbf{h} é construído em torno da localização momentânea do robô. \mathbf{h} compreende n setores angulares de largura γ . Uma transformação mapeia a região ativa \mathbf{C}^* sobre \mathbf{h} , resultando que cada sector k retém um valor h_k que representa a "densidade polar de obstáculos" na direção que corresponde ao sector k . A Figura 4.5.1 mostra o mapeamento de \mathbf{C}^* em \mathbf{h} , onde todas as células ativas relacionadas com o sector k foram remarcadas.

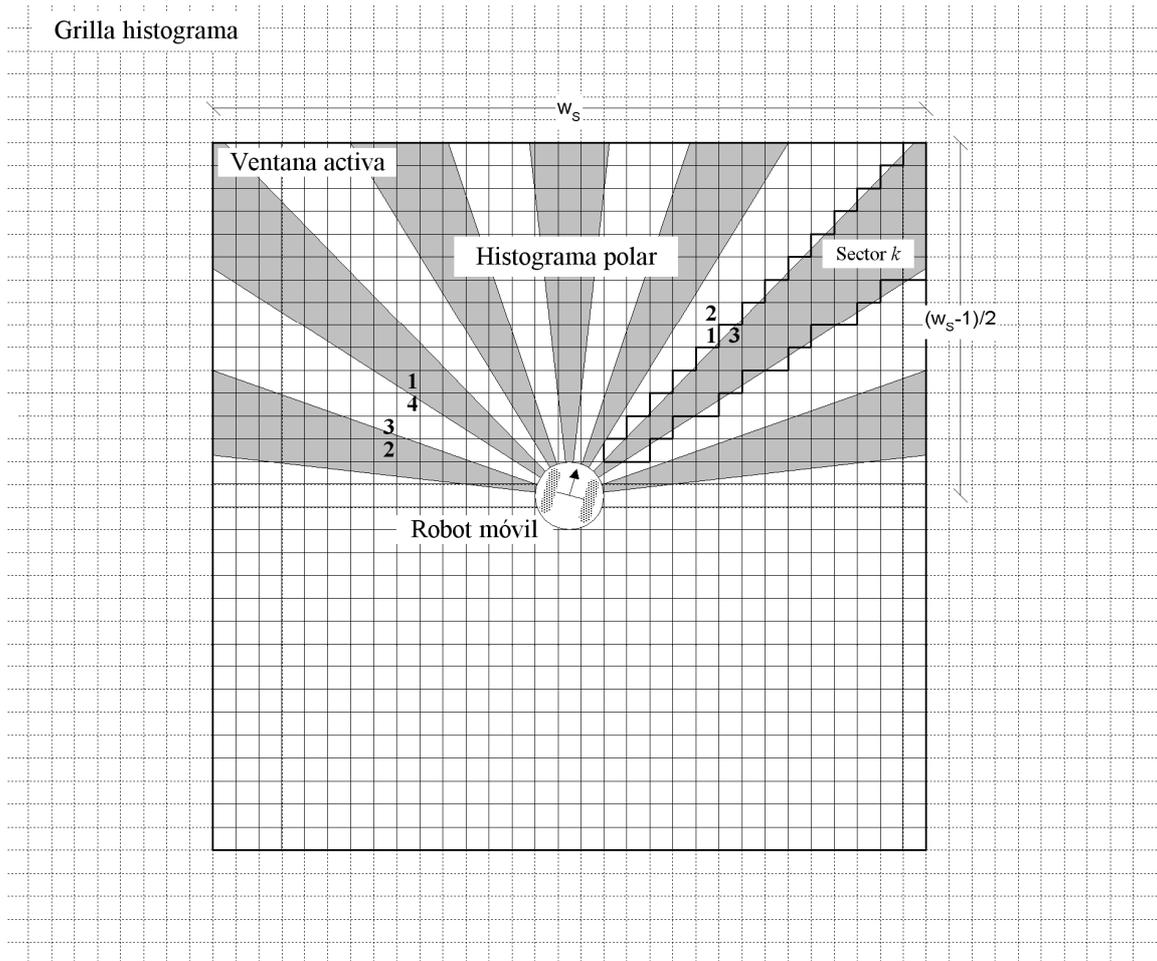


Figura 4.5.1. Mapeamento das células da janela ativa sobre o histograma polar.

Devido à natureza discreta da grade-histograma, o resultado deste mapeamento pode resultar em possíveis erros na seleção da direção de referência. Logo, se aplica uma função suavizante h_k' , que leva em consideração os setores adjacentes ao setor k .

3) O nível mais baixo de representação de dados é a saída do algoritmo VFH e são os valores de referência para o controlador de direção e de velocidade do veículo.

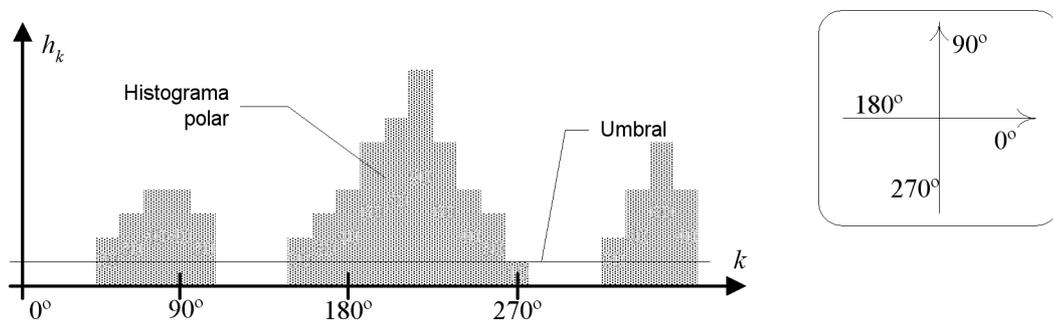


Figura 4.5.2. Densidade polar de obstáculos.

Com base no valor limite (*umbral*) e na distribuição Densidade Polar de Obstáculos (POD) da Figura 4.5.2, as referências são obtidas. Isto é conseguido considerando os setores com POD maior que o limite como zonas proibidas, e aqueles setores com POD menor que o

limite como zonas transitáveis ou vales. Aquele vale mais próximo à direção desejada é selecionado.

Este método apresenta algumas desvantagens. Por se tratar de um método para evitar obstáculos em tempo real, a velocidade de processamento da informação está relacionada à máxima velocidade que o robô pode alcançar. Por outro lado, o volume de informação com que trabalha este método requer uma grande capacidade de armazenamento de informação no robô.

4.6 Controle estável baseado em impedância

Um dos principais inconvenientes dos algoritmos anteriores é sua falta de rigor ao se analisar e garantir a estabilidade do sistema. Neste sentido, uma alternativa é usar malhas combinadas de controle em espaço livre e em espaço restrito, como desenvolvido em [34], que permitem o projeto de sistemas estáveis (Figura 4.6.1.). O sistema de controle para evitar obstáculos se baseia no emprego do conceito de impedância estendida, em que se regula a relação entre as *forças fictícias* F e o *erro modificado de movimento* $\tilde{\zeta}_n$. As forças fictícias são geradas a partir da informação provida pelos sensores de ultrassom⁸ com base na distância robô-obstáculo e atuam sobre o *erro real de movimento* $\tilde{\zeta}$ mediante o *fator de correção* ψ . No projeto dos controladores se inclui a análise de estabilidade do sistema de controle desenvolvido, empregando a teoria de Lyapunov de sistemas não lineares.

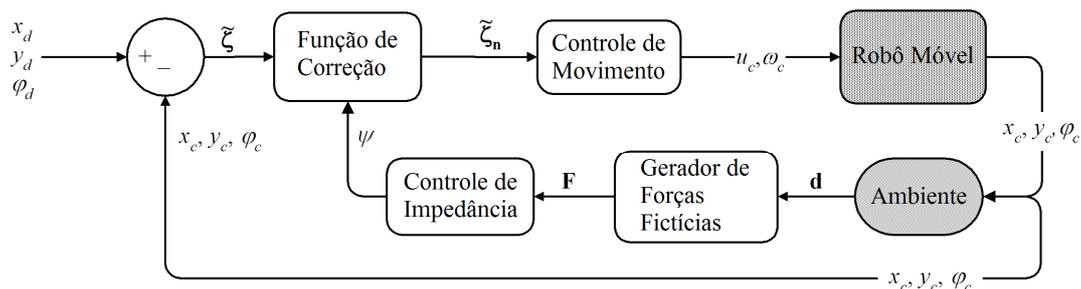


Figura 4.6.1. Malha de controle baseada em impedância.

O laço externo corresponde ao controlador de movimento de espaço livre e o interno ao controle para evitar obstáculos, baseado no conceito de impedância generalizada.

⁸ N. do T.: O autor refere-se a sensores de ultrassom para medida de distância a obstáculos. Mas, outros tipos de sensores que fornecem a medida de distância também podem ser utilizados, como sensores infravermelhos ou de varredura LASER.

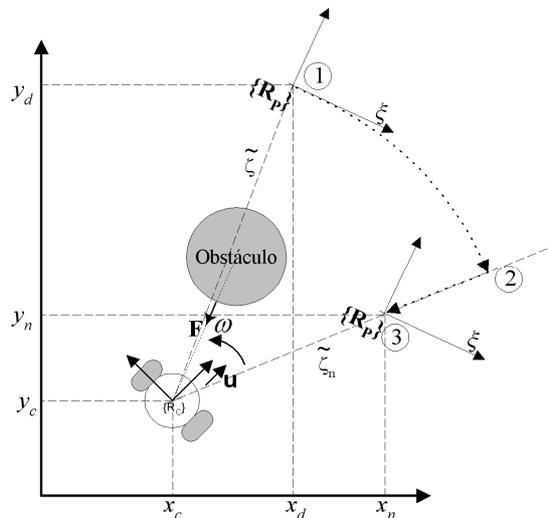


Figura 4.6.2. Funcionamento do sistema de malha fechada.

Na ausência de obstáculos, o objetivo do movimento está dado pela posição (x_d, y_d) do referencial $\{R_P\}$ em ① (Figura 4.6.2). Na presença de um obstáculo, o robô móvel modifica momentaneamente seu objetivo de movimento a ② e ③, posição (x_n, y_n) do referencial $\{R_P\}$, a fim de evitar o choque. Devido à alteração de posição do objetivo de movimento, o robô móvel começará a distanciar-se do obstáculo e, uma vez distante do mesmo, o robô móvel voltará a ser guiado por seu objetivo de controle do espaço livre. A distância a partir da qual se considera que o robô móvel está nas proximidades de um obstáculo está definida pelas dimensões do robô e pelas velocidades de deslocamento.

4.7 Controle estável baseado em fluxo óptico

O fluxo óptico [30] [31] é definido como a distribuição da velocidade de movimento aparente dos padrões de brilho de uma imagem. O fluxo óptico é produzido pelo movimento relativo entre os objetos e o observador. Como consequência, o fluxo óptico pode prover informação sobre o arranjo espacial dos objetos observados e a velocidade de modificação desse arranjo [32].

A Figura 4.7.1 mostra uma imagem do ambiente do robô móvel visto pela câmara a bordo do mesmo. Nas laterais da imagem são demarcadas janelas sobre as quais se realiza a medição do fluxo óptico [33] e, simultaneamente, se observa o campo vetorial dos fluxos ópticos esquerdo e direito, respectivamente.



Figura 4.7.1. Imagem do corredor por onde navega o robô móvel e o campo de fluxo óptico resultante.

São projetados dois controladores discretos: o primeiro controla a velocidade linear u e o segundo, a velocidade angular ω do robô móvel. Cada controlador está associado a um modelo entrada-saída discreto com seus respectivos parâmetros. Este algoritmo, ao contrário de outros propostos na literatura, requer a utilização de apenas uma câmera de vídeo e controla simultaneamente a velocidade linear e a angular do robô móvel.

O algoritmo de controle proposto se baseia em igualar o fluxo óptico em duas janelas laterais da imagem, $[\dot{r}_{xizq} \ \dot{r}_{xder}]^T$, com suas respectivas referências, $[\dot{r}_{Dxizq} \ \dot{r}_{Dxder}]^T$, e no conhecimento da dinâmica do robô móvel e da cinemática não-linear que descreve a relação entre o movimento do robô e o fluxo óptico resultante.

Nesta aplicação se propõe como estratégia de controle [34] gerar os valores de velocidade de referência a partir de informação fornecida pela medição do fluxo óptico, como mostra a Figura 4.7.2.

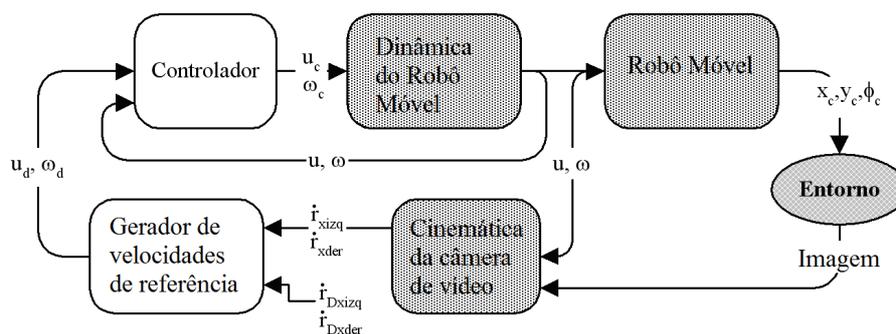


Figura 4.7.2. Estrutura de controle proposta para navegação mediante fluxo óptico.

A vantagem desta estratégia de controle é que é preventiva, ou seja, dada uma referência de fluxo óptico, o robô móvel ajustará sua velocidade em função da proximidade dos objetos. A principal desvantagem é que o algoritmo é sensível a mudanças de iluminação e que o ambiente deve estar especialmente preparado.

4.8 Controle estável baseado em visão 2D^{1/2}

Um sistema de visão 2D^{1/2} básico relaciona a coordenada de profundidade (distância) entre o ponto projetado por um apontador LASER sobre um objeto e a posição da projeção desse ponto na imagem, dadas que são conhecidas as poses do apontador LASER e da câmera. Aqui, o raio do apontador LASER é substituído por um feixe de LASER horizontal.

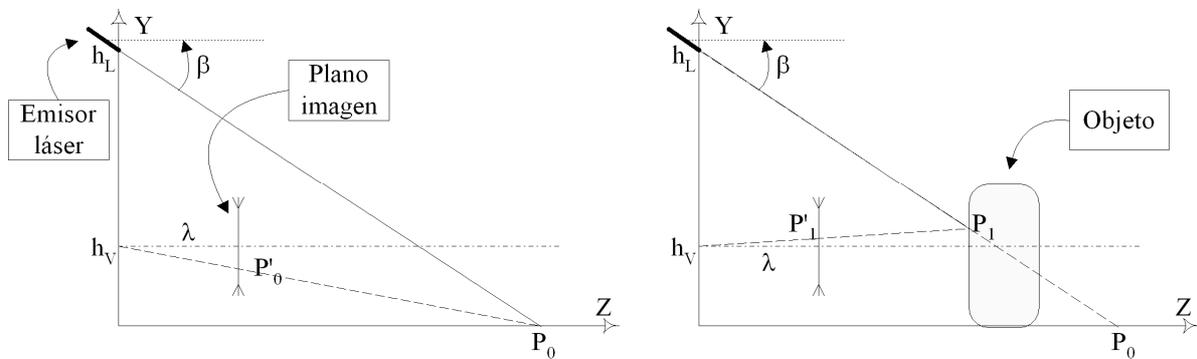


Figura 4.8.1. Esquema de funcionamento básico de um sistema de visão 2D^{1/2}.

Na Figura 4.8.1 se observa o princípio de funcionamento de um sistema de visão 2D^{1/2}. A projeção de luz do apontador sobre o plano de terra se corresponde com uma projeção sobre o plano da imagem. Na presença de um obstáculo a projeção do feixe de luz sobre o mesmo modifica a projeção sobre o plano da imagem. Conhecidos os parâmetros da câmara, pode-se conhecer a distância relativa entre esta e o objeto, a partir do seguinte sistema de equações geométricas:

$$\begin{cases} \text{reta}(h_v, P'_i, P_i) \\ \text{reta}(h_L, P_i) \end{cases}$$

cujas únicas soluções são as coordenadas P_i no espaço tridimensional.

Propõe-se como estratégia de controle [34] gerar a direção de referência, φ_d para controlar a orientação do robô, e gerar uma velocidade desejada u_d para regular a velocidade linear do robô móvel. Tudo isso pode ser feito a partir da informação obtida por um sistema de visão 2D^{1/2}, como mostra a Figura 4.8.2.

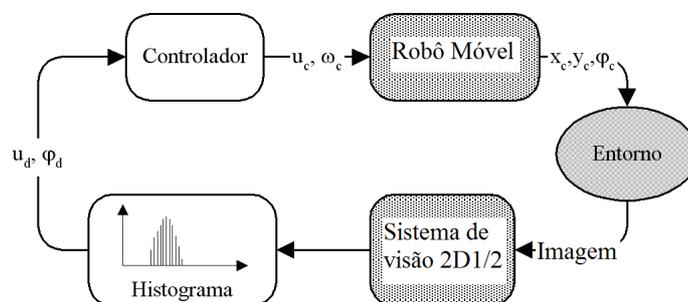


Figura 4.8.2. Estrutura de controle proposta para navegação mediante visão 2D^{1/2}.

A informação do sistema sensorial é expressa em forma de histograma, como ilustra a Figura 4.8.3. Sobre este histograma se decide a direção que o robô móvel deve tomar para evitar o obstáculo.

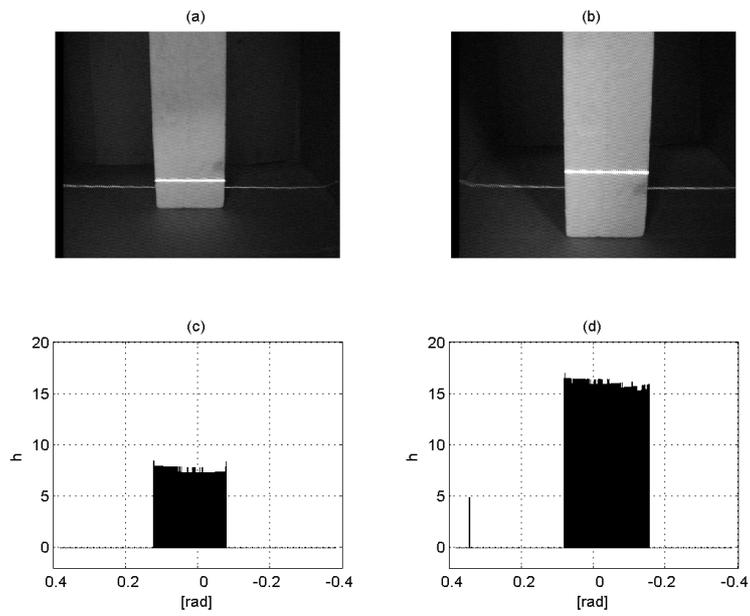


Figura 4.8.3. Sequência de imagens de um objeto em interação com o segmento de LASER e seus histogramas correspondentes.

5 Modelos matemáticos do robô móvel

Ainda que o robô móvel seja o mesmo, os modelos matemáticos que existem para lhe representar são muito variados. Cada modelo matemático tem características distintas, a tal ponto que representam diversas propriedades cinemáticas e dinâmicas do mesmo robô móvel. Portanto, cada um dos modelos matemáticos apresentados terá uma utilidade diferente de acordo com as propriedades ou comportamentos que o usuário necessita observar. Neste capítulo se apresenta a modelagem matemática da estrutura do robô móvel em duas versões distintas:

Modelo cinemático
Modelo dinâmico

Com base nestes modelos encontram-se as velocidades com que se desloca o robô móvel, assim como sua posição.

O robô móvel tipo unicycle apresenta algumas vantagens, como alta mobilidade, alta tração com rodas pneumáticas e uma simples configuração de rodas [35]. Devido a estas vantagens é que esta configuração é a mais utilizada tanto em robôs de pequeno porte como em aplicações industriais. Por esta razão, os modelos cinemáticos e dinâmicos apresentados neste capítulo se referem ao robô móvel tipo unicycle.

5.1 Fundamentos matemáticos

Assume-se que os robôs móveis estudados são construídos com uma estrutura rígida, equipada com rodas não-deformáveis e que elas se movem sobre um plano horizontal. O robô móvel está sujeito a três restrições cinemáticas:

1. Movimento restrito ao eixo de simetria do robô móvel: isto é, o robô móvel se desloca na direção em que se encontram as rodas de tração e seu movimento é devido ao giro dessas rodas.

$$\left. \begin{array}{l} \dot{x} = u \cdot \cos \varphi \\ \dot{y} = u \cdot \sin \varphi \end{array} \right\} \Rightarrow u = \frac{\dot{x}}{\cos \varphi} = \frac{\dot{y}}{\sin \varphi}$$

(5.1.1)

Manipulando:

$$\dot{y} \cdot \cos \varphi - \dot{x} \cdot \sin \varphi = 0$$

(5.1.2)

Esta é uma restrição *holonômica*, já que somente existem relações entre as coordenadas.

2. As rodas não deslizam no solo: ou seja, o robô móvel não perde aderência ao terreno e, portanto, existe uma relação direta entre o movimento de rotação das rodas e o movimento de translação do robô.

$$\begin{aligned} \dot{\varphi} &= r \cdot \frac{(\dot{\theta}_d - \dot{\theta}_i)}{2 \cdot b} \Rightarrow r \cdot (\dot{\theta}_d - \dot{\theta}_i) = 2 \cdot b \cdot \dot{\varphi} \\ u &= r \cdot \frac{(\dot{\theta}_d + \dot{\theta}_i)}{2} \Rightarrow r \cdot (\dot{\theta}_d + \dot{\theta}_i) = 2 \cdot u = 2 \cdot (\dot{y} \cdot \sin \varphi + \dot{x} \cdot \cos \varphi) \end{aligned}$$

(5.1.3)

Manipulando as equações anteriores se obtém outras duas restrições:

$$\begin{aligned} \dot{\theta}_d \cdot r &= \dot{y} \cdot \sin \varphi + \dot{x} \cdot \cos \varphi + b \cdot \dot{\varphi} \\ \dot{\theta}_i \cdot r &= \dot{y} \cdot \sin \varphi + \dot{x} \cdot \cos \varphi - b \cdot \dot{\varphi} \end{aligned}$$

(5.1.4)

Essas são restrições *não-holonômicas*, pois envolvem relações não integráveis entre coordenadas diferenciais.

5.2 Modelos cinemáticos

Nesse tipo de modelo se considera uma massa pontual, de modo que esta não exerça nenhum efeito sobre a estrutura, anulando as perturbações a ela associadas (momentos de inércia e atritos).

5.2.1 Modelo cinemático cartesiano

Considere um veículo monociclo posicionado a uma distância qualquer no referencial inercial $\{\mathbf{R}\}$. Seu movimento é governado pela ação combinada da velocidade angular ω , e da velocidade linear u , que é sempre dirigida sobre um dos eixos do referencial móvel $\{\mathbf{R}_M\}$, como mostrado na Figura 5.2.1.

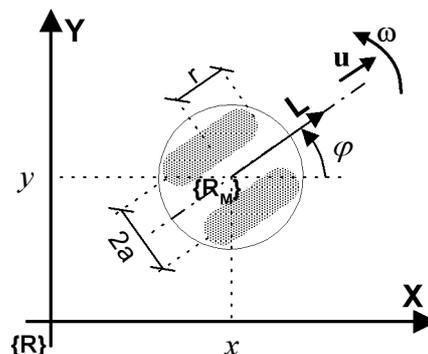


Figura 5.2.1. Posição e orientação do robô móvel expressas em coordenadas cartesianas.

O conjunto de equações cinemáticas que envolvem a posição cartesiana do veículo, x e y , e sua orientação φ , é:

$$\begin{cases} \dot{x} = u \cdot \cos \varphi \\ \dot{y} = u \cdot \sin \varphi \\ \dot{\varphi} = \omega \end{cases}, \quad (5.2.1)$$

onde u é simplesmente a componente do vetor \mathbf{u} projetada ao longo de sua direção e x , y , φ são todas as variáveis medidas em relação à origem do referencial $\{\mathbf{R}\}$.

5.2.2 Modelo cinemático polar

Considere um veículo monociclo posicionado a uma distância distinta de zero no referencial destino $\{\mathbf{R}_p\}$. Seu movimento é governado pela ação combinada da velocidade angular ω , e da velocidade linear u , que é sempre dirigida sobre um dos eixos do referencial móvel $\{\mathbf{R}_M\}$, como ilustrado na Figura 5.2.2.

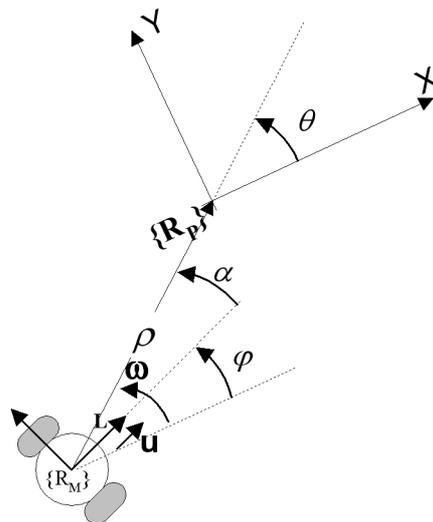


Figura 5.2.2. Posição e orientação do robô móvel expressas em coordenadas polares.

Como já mencionado, o conjunto de equações cinemáticas que envolvem a posição cartesiana do veículo relacionadas com o referencial $\{\mathbf{R}_p\}$ é dado pela equação (5.2.1). Mas, ao invés de representar a posição do robô móvel em termos de suas coordenadas cartesianas, quando se considera o erro de distância $\rho > 0$ e sua orientação θ em relação a $\{\mathbf{R}_p\}$, o seguinte sistema de equações [36] deve ser considerado:

$$\begin{aligned} \dot{\rho} &= u \cdot \cos \alpha \\ \dot{\theta} \cdot \rho &= u \cdot \sin \alpha \Rightarrow \dot{\theta} = u \cdot \frac{\sin \alpha}{\rho} \\ \dot{\varphi} &= \omega \end{aligned} \quad (5.2.2)$$

Agora, seja o erro de direção $\alpha = \theta - \varphi$ o ângulo medido entre o eixo principal do veículo e o vetor distância ρ . Então, tem-se:

$$\begin{cases} \dot{\rho} = -u \cdot \cos \alpha \\ \dot{\alpha} = -\omega + u \cdot \frac{\sin \alpha}{\rho} \\ \dot{\theta} = u \cdot \frac{\sin \alpha}{\rho} \end{cases} \quad (5.2.3)$$

Apesar do fato de que é possível a obtenção de um número infinito de outras equações cinemáticas básicas, neste trabalho é dada atenção especial ao sistema de equações (5.2.3), já que esse sistema é de grande utilidade para o desenvolvimento de sistemas de controle de malha fechada estáveis, onde o objetivo de movimento é fixado na origem do referencial $\{\mathbf{R}_P\}$.

5.2.3 Relação entre os modelos

É importante observar que o que se desenvolveu até aqui são dois modelos cinemáticos de um mesmo robô móvel e, portanto, sempre existirá alguma relação que permita vincular ambos os sistemas de representação.

Na Figura 5.2.3 representa-se o robô móvel em dois referenciais distintos. O referencial $\{\mathbf{R}\}$ em coordenadas cartesianas e o referencial $\{\mathbf{R}_P\}$ em coordenadas polares.

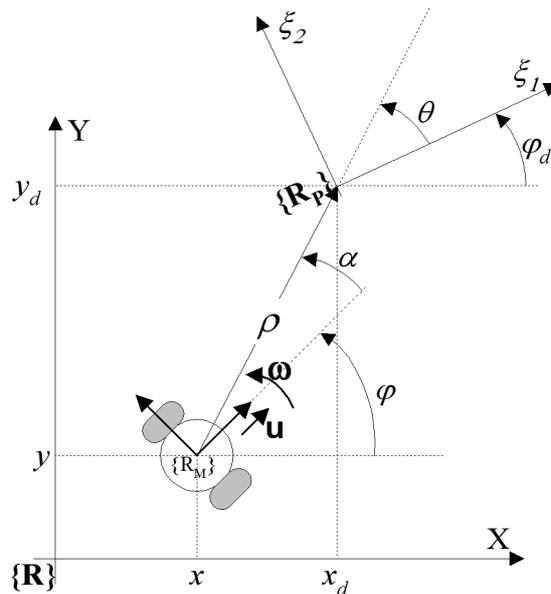


Figura 5.2.3

A transformação entre coordenadas polares e cartesianas que relaciona ambos os referenciais é dada por

$$\begin{cases} \rho = \sqrt{(x_d - x)^2 + (y_d - y)^2} \\ \theta = \arctan[(y_d - y), (x_d - x)] - \varphi_d \\ \alpha = \arctan[(y_d - y), (x_d - x)] - \varphi \end{cases} \quad (5.2.4)$$

Deve-se notar que, dado que as equações cinemáticas de (5.2.3) são baseadas no uso de coordenadas polares, estas equações são realmente válidas apenas para valores distintos de zero do erro de distância ρ (os ângulos α e θ são indefinidos quando $\rho=0$). Logo, isso implica que a correspondência um a um com o sistema de equações (5.2.1) é perdida sobre a singularidade.

5.3 Modelos dinâmicos

Em tarefas em que se requer alta velocidade e/ou transporte de cargas pesadas, considerar o modelo dinâmico na lei de controle é de grande importância, já que isso permite aproveitar ao máximo a potência do sistema de tração sem perder precisão na tarefa requerida. Os modelos matemáticos obtidos são acoplados, mas é possível fazer seu desacoplamento a partir de hipóteses como considerar o centro de gravidade sobre o eixo de simetria do robô. A ordem dos dois modelos aqui apresentados pode ser ampliada ou reduzida a partir de considerações físicas nos modelos do sistema de tração.

5.3.1 Modelo dinâmico de parâmetros conhecidos

Para desenvolver o sistema dinâmico [37] consideram-se os efeitos produzidos pela massa da estrutura no comportamento do robô, incorporando-se o momento de inércia do veículo, os atritos e suas perturbações.

a) O sistema elétrico

O diagrama de blocos da Figura 5.3.1 apresenta o modelo dos atuadores do robô móvel: motores de corrente contínua com ímãs permanentes.

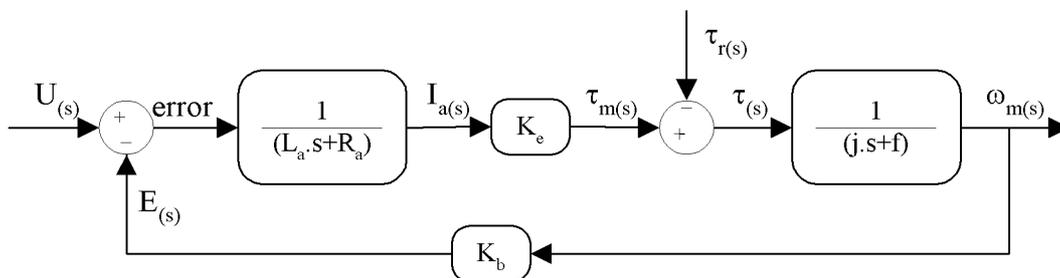


Figura 5.3.1. Modelo dinâmico dos motores.

Expressando o torque perturbador (τ_r) como função da tensão aplicada (U) e da velocidade angular no eixo do motor (ω_m), se encontra que:

$$\begin{aligned}\tau_r &= \tau_m - \tau \\ \tau_m &= \frac{K_e}{(R_a + L_a \cdot s)} \cdot (U - K_b \cdot \omega_m) \\ \tau &= (f + j \cdot s) \cdot \omega_m\end{aligned}$$

(5.3.1)

Manipulando as equações anteriores, tem-se

$$\tau_r = \frac{K_e}{(R_a + L_a \cdot s)} \cdot U - (f + j \cdot s) \cdot \omega_m - \frac{K_e \cdot K_b}{(R_a + L_a \cdot s)} \cdot \omega_m, \quad (5.3.2)$$

ou

$$\tau_r = \frac{K_e}{(R_a + L_a \cdot s)} \cdot U - \frac{(R_a + L_a \cdot s) \cdot (f + j \cdot s) \cdot K_e \cdot K_b}{(R_a + L_a \cdot s)} \cdot \omega_m. \quad (5.3.3)$$

b) O sistema mecânico

A Figura 5.3.2 mostra a geometria do veículo. Considera-se o veículo como um corpo rígido, sem considerar a massa das rodas e dos rotores das máquinas elétricas. O ponto G, de coordenadas (b, δ) , indica o centro de massa do veículo e P, de coordenadas (x, y) , indica o ponto médio ao eixo comum das rodas de tração, daqui em diante denominado "centro de rotação".

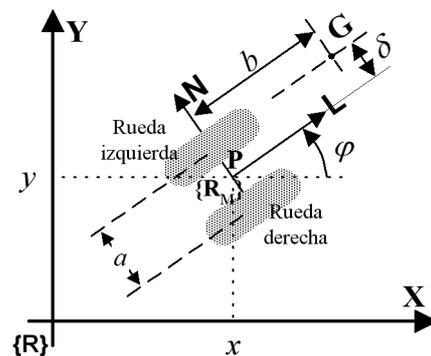


Figura 5.3.2. Descrição geométrica do veículo.

c) Geometria e dinâmica

Como o movimento do veículo é plano, consideram-se três variáveis de estado: as coordenadas (x, y) de P e o ângulo φ , que descreve a orientação do veículo com respeito a um sistema de referência inercial $\{R\}$. Também se define um sistema de referência $\{R_M\}$ coincidente com o veículo (P, L, N), onde o vetor L é perpendicular ao eixo das rodas de tração e N é perpendicular a L. As equações que definem a dinâmica do veículo são

$$\begin{aligned}\frac{d\varphi}{dt} &= \frac{(\omega_{r1} - \omega_{r2})}{a} \cdot r_r \\ \frac{dx}{dt} &= \frac{r_r \cdot (\omega_{r1} + \omega_{r2})}{2} \cdot \cos(\varphi), \\ \frac{dy}{dt} &= \frac{r_r \cdot (\omega_{r1} + \omega_{r2})}{2} \cdot \sin(\varphi)\end{aligned}$$

(5.3.4)

onde ω_{r1} e ω_{r2} são, respectivamente, as velocidades angulares das rodas esquerda e direita e r_r é seu raio. Pode-se deduzir que as equações dx/dt e dy/dt do sistema de (5.3.4) estão relacionadas por $\frac{dy}{dt} - \frac{dx}{dt} \cdot \tan(\varphi) = 0$. Tal fato demonstra que o veículo tem dois graus de liberdade (σ , φ), e não três (x , y , φ), onde σ é a abscissa curvilínea expressa como

$$\left(\frac{d\sigma}{dt}\right)^2 = \left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2.$$

(5.3.5)

d) Dinâmica

Considera-se que o movimento das rodas sobre o piso é uma rotação instantânea sem deslizamentos. As forças transmitidas ao veículo pelo contato entre a roda esquerda (direita) e o piso são denominadas \mathbf{f}_{c1} (\mathbf{f}_{c2}). Assume-se que a reação sobre as rodas tem direção normal ao plano, ou seja, direção \mathbf{K} (em outras palavras, o movimento não tem perturbações).

$v = \frac{d\sigma}{dt} \cdot \mathbf{L}$ será a velocidade linear do centro de rotação P e ω a velocidade angular do corpo ao longo do eixo \mathbf{K} . A velocidade do ponto G, na Figura 5.3.2, é

$$\begin{aligned}v_G &= v + \omega \cdot \mathbf{K} \times (b \cdot \mathbf{L} + \delta \cdot \mathbf{N}) \\ v_G &= \left(\frac{d\sigma}{dt} - \delta \cdot \frac{d\varphi}{dt}\right) \cdot \mathbf{L} + b \cdot \frac{d\varphi}{dt} \cdot \mathbf{N}.\end{aligned}$$

Logo, a energia cinética é dada por

$$\begin{aligned}Ec &= \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_G^2 + \frac{1}{2} \cdot I \cdot \omega^2 \\ Ec &= \frac{1}{2} \cdot m \cdot \left(\frac{d\sigma}{dt}\right)^2 - m \cdot \delta \cdot \frac{d\sigma}{dt} \cdot \frac{d\varphi}{dt} + \frac{1}{2} \cdot (I + m \cdot \delta^2 + m \cdot b^2) \cdot \left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^2,\end{aligned}$$

sendo

m a massa da estrutura; e

I seu momento de inércia em relação ao eixo \mathbf{K} no ponto G.

Aplicando as equações de Lagrange, onde as coordenadas generalizadas são σ e φ , resulta:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left[\frac{\partial Ec}{\partial \dot{\sigma}} \right] - \frac{\partial Ec}{\partial \sigma} &= m \cdot \frac{d^2 \sigma}{dt^2} - \delta \cdot \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = (fc_1 + fc_2) \cdot \mathbf{1} \\ \frac{d}{dt} \left[\frac{\partial Ec}{\partial \dot{\omega}} \right] - \frac{\partial Ec}{\partial \varphi} &= [m \cdot (\delta \cdot a^2 + b^2) + I] \cdot \frac{d^2 \varphi}{dt^2} - \delta \cdot m \cdot \frac{d^2 \sigma}{dt^2} = (fc_2 - fc_1) \cdot a \cdot \mathbf{1}. \end{aligned} \quad (5.3.6)$$

É importante observar que estas equações são válidas em relação ao centro de rotação, logo as coordenadas generalizadas estão definidas neste ponto. Um conjunto de equações não lineares seria obtido com coordenadas referidas em relação ao centro de massa. Este esclarecimento é motivado pelo fato de que, dada a estrutura do veículo, é mais fácil seguir uma trajetória com o veículo representado no centro de rotação P do que com o veículo representado no centro de massa G.

e) Modelo do sistema

O torque τ_r sobre a roda esquerda (direita) é $fc_1 \cdot r_r$ ($fc_2 \cdot r_r$), onde r_r é o raio das rodas de tração. Considerando ambos os motores iguais, a equação (5.3.3) por ser reescrita como

$$\begin{aligned} fc_1 &= \frac{K_e}{(R_a + L_a \cdot s) \cdot r_r} \cdot U_1 - \frac{(R_a + L_a \cdot s) \cdot (f + j \cdot s) + K_e \cdot K_b}{(R_a + L_a \cdot s)} \cdot n \cdot \omega_{r1} \\ fc_2 &= \frac{K_e}{(R_a + L_a \cdot s) \cdot r_r} \cdot U_2 - \frac{(R_a + L_a \cdot s) \cdot (f + j \cdot s) + K_e \cdot K_b}{(R_a + L_a \cdot s)} \cdot n \cdot \omega_{r2}, \end{aligned} \quad (5.3.7)$$

onde

$$\begin{aligned} \omega_{r1} &= \frac{v_1}{r_r} \quad e \\ \omega_{r2} &= \frac{v_2}{r_r} \end{aligned} \quad (5.3.8)$$

são as velocidades lineares das rodas esquerda e direita, respectivamente (veja Figura 5.3.2). Estas velocidades podem ser expressas em relação à velocidade linear do robô v e a sua velocidade angular ω , como:

$$\begin{aligned} v_1 &= \frac{d\sigma}{dt} \cdot \mathbf{L} + \omega \cdot \mathbf{K} \times \mathbf{N} = \left(\frac{d\sigma}{dt} - \frac{1}{2} a \frac{d\varphi}{dt} \right) \cdot \mathbf{L} \\ v_2 &= \frac{d\sigma}{dt} \cdot \mathbf{L} + \omega \cdot \mathbf{K} \times (-\mathbf{N}) = \left(\frac{d\sigma}{dt} + \frac{1}{2} a \frac{d\varphi}{dt} \right) \cdot \mathbf{L}. \end{aligned} \quad (5.3.9)$$

Substituindo as equações (5.3.7), (5.3.8) e (5.3.9) em (5.3.6), tem-se:

$$\begin{aligned} \frac{d^3\sigma}{dt^3} + c_1 \cdot \frac{d^2\sigma}{dt^2} + c_2 \cdot \frac{d\sigma}{dt} + c_3 \cdot \frac{d^3\varphi}{dt^3} + c_4 \cdot \frac{d^2\varphi}{dt^2} &= c_5 \cdot (U_1 + U_2) \\ \frac{d^3\varphi}{dt^3} + c_6 \cdot \frac{d^2\varphi}{dt^2} + c_7 \cdot \frac{d\varphi}{dt} + c_8 \cdot \frac{d^3\sigma}{dt^3} + c_9 \cdot \frac{d^2\sigma}{dt^2} &= c_{10} \cdot (U_1 + U_2), \end{aligned}$$

(5.3.10)

com

$$\begin{aligned} c_1 &= \frac{r_r^2 \cdot m \cdot R_a + 2 \cdot n \cdot f \cdot L_a + 2 \cdot n \cdot j \cdot R_a}{(r_r^2 \cdot m + 2 \cdot n \cdot j) \cdot L_a} \\ c_2 &= \frac{2 \cdot n \cdot (f \cdot R_a + K_e \cdot K_b)}{(r_r^2 \cdot m + 2 \cdot n \cdot j) \cdot L_a} \\ c_3 &= \frac{-r_r^2 \cdot m \cdot \delta \cdot L_a}{(r_r^2 \cdot m + 2 \cdot n \cdot j) \cdot L_a} \\ c_4 &= \frac{-r_r^2 \cdot m \cdot \delta \cdot L_a}{(r_r^2 \cdot m + 2 \cdot n \cdot j) \cdot L_a} \\ c_5 &= \frac{r_r \cdot K_e}{(r_r^2 \cdot m + 2 \cdot n \cdot j) \cdot L_a} \\ c_6 &= \frac{2 \cdot r_r^2 \cdot I_c \cdot R_a + a^2 \cdot n \cdot f \cdot L_a + a^2 \cdot n \cdot j \cdot R_a}{(2 \cdot r_r^2 \cdot I_c + a^2 \cdot n \cdot j) \cdot L_a} \\ c_7 &= \frac{a^2 \cdot (n \cdot f \cdot R_a + K_e \cdot K_b)}{(2 \cdot r_r^2 \cdot I_c + a^2 \cdot n \cdot j) \cdot L_a} \\ c_8 &= \frac{-2 \cdot r_r^2 \cdot m \cdot \delta \cdot L_a}{(2 \cdot r_r^2 \cdot I_c + a^2 \cdot n \cdot j) \cdot L_a} \\ c_9 &= \frac{-2 \cdot r_r^2 \cdot \delta \cdot R_a}{(2 \cdot r_r^2 \cdot I_c + a^2 \cdot n \cdot j) \cdot L_a} \\ c_{10} &= \frac{r_r \cdot a \cdot K_e}{(2 \cdot r_r^2 \cdot I_c + a^2 \cdot n \cdot j) \cdot L_a} \end{aligned}$$

onde

$$I_c = m \cdot (\delta^2 + b^2) + I$$

é o momento de inércia em relação ao centro de rotação P. Expressando as equações de maneira que somente fique uma derivada de maior ordem em cada uma, chegamos a:

$$\begin{aligned} \frac{d^3\sigma}{dt^3} + k_1 \cdot \frac{d^2\sigma}{dt^2} + k_2 \cdot \frac{d\sigma}{dt} + k_3 \cdot \frac{d^2\varphi}{dt^2} + k_4 \cdot \frac{d\varphi}{dt} &= k_5 \cdot U_1 + k_6 \cdot U_2 \\ \frac{d^3\varphi}{dt^3} + k_7 \cdot \frac{d^2\varphi}{dt^2} + k_8 \cdot \frac{d\varphi}{dt} + k_9 \cdot \frac{d^2\sigma}{dt^2} + k_{10} \cdot \frac{d\sigma}{dt} &= k_{11} \cdot U_1 + k_{12} \cdot U_2, \end{aligned}$$

(5.3.11)

onde

$$\begin{aligned} k_1 &= \frac{c_1 - c_3 \cdot c_9}{1 - c_3 \cdot c_8} & k_7 &= \frac{c_6 - c_8 \cdot c_4}{1 - c_3 \cdot c_8} \\ k_2 &= \frac{c_2}{1 - c_3 \cdot c_8} & k_8 &= \frac{c_7}{1 - c_3 \cdot c_8} \\ k_3 &= \frac{c_4 - c_3 \cdot c_6}{1 - c_3 \cdot c_8} & k_9 &= \frac{c_9 - c_8 \cdot c_1}{1 - c_3 \cdot c_8} \\ k_4 &= \frac{-c_3 \cdot c_7}{1 - c_3 \cdot c_8} & k_{10} &= \frac{-c_8 \cdot c_2}{1 - c_3 \cdot c_8} \\ k_5 &= \frac{c_5 + c_3 \cdot c_{10}}{1 - c_3 \cdot c_8} & k_{11} &= \frac{-c_{10} - c_8 \cdot c_5}{1 - c_3 \cdot c_8} \\ k_6 &= \frac{c_5 - c_3 \cdot c_{10}}{1 - c_3 \cdot c_8} & k_{12} &= \frac{c_{10} - c_8 \cdot c_5}{1 - c_3 \cdot c_8}. \end{aligned}$$

A Figura 5.3.3 e a Figura 5.3.4 permitem ver o comportamento do robô no tempo com base na tensão aplicada em seus motores. Observa-se que a resposta do sistema não é instantânea.

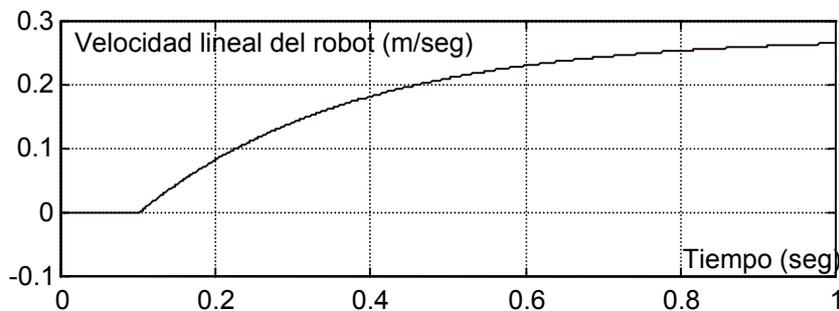


Figura 5.3.3. Evolução temporal da velocidade linear do robô móvel para uma entrada degrau de tensão nos motores de tração ($U_1 = U_2$ em $t = 0,1$ s).

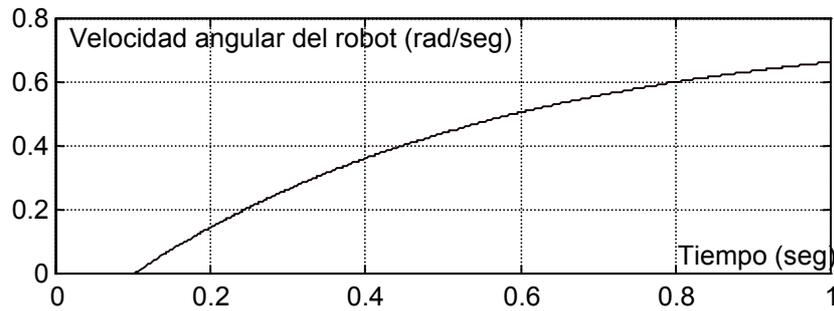


Figura 5.3.4. Evolução temporal da velocidade angular do robô móvel para uma entrada degrau de tensão nos motores de tração ($U_1 = -U_2$ em $t = 0,1$ s).

5.3.2 Modelo dinâmico com incertezas para um robô móvel.

Em muitos casos o robô deve transportar cargas importantes, ou transporta sobre sua estrutura um manipulador para realizar alguma tarefa específica. Nestes casos, as variações de cargas ou os próprios movimentos do manipulador geram variações nos parâmetros que se apresentam como perturbações para a malha de controle. Estas variações nos parâmetros podem ser tratadas como incertezas do modelo que podem ser identificadas *on-line*. O robô móvel (e seus parâmetros característicos) é ilustrado na Figura 5.3.5, onde:

G	centro de massa
B	centro da linha que une as rodas de tração
$h = [x \ y]^T$	ponto que se deseja controlar
u, \bar{u}	velocidade longitudinal e lateral do centro de massa
ω, ψ	velocidade angular e orientação do robô móvel
d, b, a, e, c	distâncias
F_{rx}, F_{ry} e (F_{rlx}, F_{rly})	força longitudinal e lateral no pneu da roda direita (esquerda)
F_{cx} e F_{cy}	força longitudinal e lateral exercida sobre C pela roda livre
F_{ex} e F_{ey}	força longitudinal e lateral exercida sobre E pela ferramenta (por exemplo um, braço robótico)
τ_e	momento exercido pela ferramenta

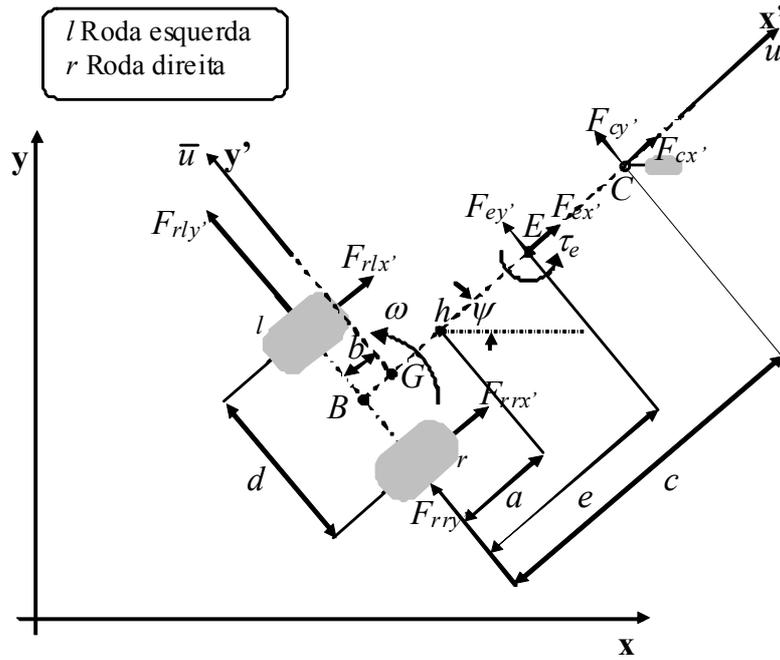


Figura 5.3.5. Robô móvel e seus parâmetros característicos.

As equações de forças e momentos para o robô são (Newton-Euler) [38]:

$$\begin{aligned}
 \sum F_{x'} &= m(\dot{u} - \bar{u}\omega) = F_{rlx'} + F_{rrx'} + F_{ex'} + F_{cx'} \\
 \sum F_{y'} &= m(\dot{v} - u\omega) = F_{rly'} + F_{rry'} + F_{ey'} + F_{cy'} \\
 \sum M_z &= I_z \dot{\omega} = \frac{d}{2}(F_{rrx'} - F_{rlx'}) - b(F_{rly'} - F_{rry'}) + (e-b)F_{ey'} + (c-b)F_{cy'} + \tau_e,
 \end{aligned}
 \tag{5.3.12}$$

onde m é a massa do robô e I_z é o momento de inércia ao redor do eixo vertical que passa pelo ponto G.

A cinemática do ponto h é descrita por

$$\begin{aligned}
 \dot{x} &= u \cos \psi - \bar{u} \sin \psi - (a-b)\omega \sin \psi, \\
 \dot{y} &= u \sin \psi - \bar{u} \cos \psi - (a-b)\omega \cos \psi.
 \end{aligned}
 \tag{5.3.13}$$

De acordo com Zhang [35], as velocidades são (incluindo as velocidades de deslizamento)

$$\begin{aligned}
 u &= \frac{1}{2} [R_l(\omega_r + \omega_l) + (u_r^s + u_l^s)] \\
 \omega &= \frac{1}{d} [R_l(\omega_r + \omega_l) + (u_r^s + u_l^s)] \\
 \bar{u} &= \frac{b}{d} [R_l(\omega_r + \omega_l) + (u_r^s + u_l^s)] + \bar{u}^s,
 \end{aligned}
 \tag{5.3.14}$$

onde

R_t é o raio nominal do pneu;

ω_r e ω_l são as velocidades angulares das rodas esquerda e direita, respectivamente;

u_r^s e u_l^s são as velocidades de deslizamento longitudinal das rodas esquerda e direita, respectivamente; e

\bar{u}^s é a velocidade de deslizamento lateral das rodas.

Os modelos dos motores (desprezando os efeitos indutivos) são

$$\begin{aligned}\tau_r &= k_a(v_r - k_b\omega_r)/R_a \\ \tau_l &= k_a(v_l - k_b\omega_l)/R_a\end{aligned}$$

(5.3.15)

onde

v é a tensão de alimentação dos motores;

k_a é a constante de torque multiplicada pela constante de redução;

k_b é a constante contra-eletromotriz multiplicada pela constante de redução;

R_a é a resistência elétrica da armadura; e

τ é o torque desenvolvido pelos motores.

As equações dinâmicas das combinações roda-motor são

$$\begin{aligned}I_e\dot{\omega}_r + B_e\omega_r &= \tau_r - F_{rrx}R_t \\ I_e\dot{\omega}_l + B_e\omega_l &= \tau_l - F_{rlx}R_t\end{aligned}$$

(5.3.16)

com I_e , B_e como momento de inércia e coeficiente de atrito viscoso, respectivamente, da combinação rotor do motor, caixa de redução e roda, e R_t como raio nominal do pneu.

Da combinação das equações (5.3.12), (5.3.13), (5.3.14), (5.3.15) e (5.3.16) se obtém o modelo dinâmico do robô móvel, dado por

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\psi} \\ \dot{u} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u \cos \psi - a \omega \sin \psi \\ u \sin \psi - a \omega \cos \psi \\ \omega \\ \frac{\theta_3^0}{\theta_1^0} R_t r \omega^2 - 2 \frac{\theta_4^0}{\theta_1^0} u \\ -2 \frac{\theta_3^0}{\theta_2^0} R_t r u \omega - \frac{\theta_4^0}{\theta_2^0} d^2 \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{2r}{\theta_1^0} & 0 \\ 0 & \frac{2rd}{\theta_2^0} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_u \\ v_\omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta_x \\ \delta_y \\ 0 \\ \delta_u \\ \delta_\omega \end{bmatrix}.$$

(5.3.17)

As entradas deste modelo são

$$\begin{aligned}v_u &= \frac{v_l + v_r}{2} \\v_\omega &= \frac{v_r - v_l}{2}\end{aligned}$$

(5.3.18)

Os parâmetros do modelo dinâmico são

$$\begin{aligned}\theta_1^0 &= \frac{R_a}{k_a} (mR_t r + 2I_e), & \theta_2^0 &= \frac{R_a}{k_a} (I_e d^2 + 2R_t r (I_z + mb^2)), \\ \theta_3^0 &= \frac{R_a}{k_a} mb, & \theta_4^0 &= \frac{R_a}{k_a} \left(\frac{k_a k_b}{R_a} + B_e \right).\end{aligned}$$

(5.3.19)

Os elementos do vetor de incertezas são

$$\begin{aligned}\delta_x &= -\bar{u}^s \sin \psi, & \delta_y &= -\bar{u}^s \cos \psi \\ \delta_u &= \frac{1}{\theta_1^0} \left[R_t r \frac{R_a}{k_a} (m\omega \bar{u}^s + F_{ex'} + F_{cx'}) + \theta_4^0 (u_r^s + u_l^s) + I_e \frac{R_a}{k_a} (\dot{u}_r^s + \dot{u}_l^s) \right] \\ \delta_\omega &= \frac{1}{\theta_2^0} \left[\theta_4^0 (u_r^s - u_l^s) + I_e d \frac{R_a}{k_a} (\dot{u}_r^s - \dot{u}_l^s) - 2R_t r \theta_3^0 \dot{\bar{u}}^s + 2R_t r \frac{R_a}{k_a} (eF_{ey'} + cF_{cy'} + \tau_e) \right].\end{aligned}$$

(5.3.20)

O vetor de incertezas será nulo se forem desprezados os deslizamentos das rodas, as forças e torques exercidos na ferramenta e as forças exercidas na roda livre. Assume-se que as forças e os torques exercidos na ferramenta não são medidos por um sensor.

Para identificação dos parâmetros, a dinâmica de u e de ω podem ser expressas como

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\theta_3^0}{\theta_1^0} R_t r \omega^2 - 2 \frac{\theta_4^0}{\theta_1^0} u \\ -2 \frac{\theta_3^0}{\theta_2^0} R_t r u \omega - \frac{\theta_4^0}{\theta_2^0} d^2 \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2r & 0 \\ \theta_1^0 & 0 \\ 0 & \frac{2rd}{\theta_2^0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_u \\ v_\omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta_u \\ \delta_\omega \end{bmatrix}.$$

(5.3.21)

Ordenando e desprezando o vetor de incertezas, tem-se

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{2r} \dot{u} & 0 & -\frac{R_t}{2} \omega^2 & \frac{1}{r} u \\ 0 & \frac{1}{2rd} \dot{\omega} & \frac{R_t}{d} u \omega & \frac{d}{2r} \omega \end{bmatrix} \theta^0 = \begin{bmatrix} v_u \\ v_\omega \end{bmatrix},$$

(5.3.22)

onde $\theta^0 = [\theta_1^0 \ \theta_2^0 \ \theta_3^0 \ \theta_4^0]^T$ pode ser conhecido com o emprego de algum método de identificação.

A equação (5.3.17) do modelo dinâmico é útil quando é possível alterar diretamente a tensão de alimentação dos motores. No entanto, a maioria dos robôs disponíveis no mercado tem controladores PID de baixo nível para seguir as entradas de velocidades de referência e não permitem a manipulação direta de tais tensões. Portanto, é de grande utilidade apresentar o modelo do robô móvel em uma forma mais apropriada, considerando como sinais de controle as velocidades de referência linear e angular. Para esse propósito, os controladores de velocidade são incluídos no modelo ³⁹ e, para que este não seja tão complexo, consideram-se controladores de velocidade PD com referências de velocidade constantes, como os descritos pela seguinte equação:

$$\begin{bmatrix} v_u \\ v_\omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{PL} \cdot (u_{ref} - u_{me}) - k_{DL} \cdot \dot{u}_{me} \\ k_{PA} \cdot (\omega_{ref} - \omega_{me}) - k_{DA} \cdot \dot{\omega}_{me} \end{bmatrix},$$

(5.3.23)

onde

$$u_{me} = \frac{1}{2} [r \cdot (\omega_r + \omega_l)]$$

$$\omega_{me} = \frac{1}{d} [r \cdot (\omega_r - \omega_l)]$$

(5.3.24)

A partir das equações (5.3.12), (5.3.13), (5.3.14), (5.3.15), (5.3.16) e (5.3.23) se obtém o modelo dinâmico do robô móvel dado por

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\psi} \\ \dot{u} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u \cos \psi - a \omega \sin \psi \\ u \sin \psi - a \omega \cos \psi \\ \omega \\ \frac{\bar{\theta}_3^0}{\bar{\theta}_1^0} \omega^2 - \frac{\bar{\theta}_4^0}{\bar{\theta}_1^0} u \\ -\frac{\bar{\theta}_5^0}{\bar{\theta}_2^0} u \omega - \frac{\bar{\theta}_6^0}{\bar{\theta}_2^0} \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{1}{\bar{\theta}_1^0} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\bar{\theta}_2^0} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_{ref} \\ \omega_{ref} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{\delta}_x \\ \bar{\delta}_y \\ 0 \\ \bar{\delta}_u \\ \bar{\delta}_\omega \end{bmatrix}.$$

(5.3.25)

Os parâmetros desse modelo dinâmico são

$$\begin{aligned}
 \bar{\theta}_1^0 &= \left(\frac{R_a}{k_a} (mR_l r + 2I_e) + 2rk_{DL} \right) / (2rk_{PL}), \\
 \bar{\theta}_2^0 &= \left(\frac{R_a}{k_a} (I_e d^2 + 2R_l r (I_z + mb^2)) + 2rdk_{DA} \right) / (2rdk_{PA}), \\
 \bar{\theta}_3^0 &= \frac{R_a}{k_a} mb / (2k_{PL}), \quad \bar{\theta}_4^0 = \frac{R_a}{k_a} \left(\frac{k_a k_b}{R_a} + B_e \right) / (rk_{PL}) + 1, \\
 \bar{\theta}_5^0 &= \frac{R_a}{k_a} mbR_l / (dk_{PA}), \quad \bar{\theta}_6^0 = \frac{R_a}{k_a} \left(\frac{k_a k_b}{R_a} + B_e \right) d / (2rk_{PA}) + 1.
 \end{aligned}
 \tag{5.3.26}$$

Os dois primeiros elementos do vetor de incertezas $[\delta_x \quad \delta_y \quad 0 \quad \bar{\delta}_u \quad \bar{\delta}_\omega]^T$ são como os dois primeiros da equação (5.3.20), enquanto os dois últimos elementos são

$$\begin{aligned}
 \bar{\delta}_u &= \frac{R_l R_a}{2\bar{\theta}_1^0 k_{PL} k_a} (m\omega \bar{u}^s + F_{ex'} + F_{cx'}) + \frac{\bar{\theta}_4^0}{2\bar{\theta}_1^0} (u_r^s + u_l^s) + \frac{I_e R_a + rk_{DL} k_a}{2\bar{\theta}_1^0 rk_{PL} k_a} (\dot{u}_r^s + \dot{u}_l^s), \\
 \bar{\delta}_\omega &= \frac{\bar{\theta}_6^0}{\bar{\theta}_2^0 d} (u_r^s - u_l^s) + \frac{I_e d R_a + 2rk_a k_{DA}}{2\bar{\theta}_2^0 k_{PA} dk_a} (\dot{u}_r^s - \dot{u}_l^s) - \frac{\theta_3^0}{\bar{\theta}_2^0} \dot{u}^s + \frac{R_l R_a}{\bar{\theta}_2^0 k_{PA} dk_a} (eF_{ey'} + cF_{cy'} + \tau_e).
 \end{aligned}
 \tag{5.3.27}$$

Assim como no modelo anterior, o vetor de incertezas não será considerado se as velocidades de deslizamento das rodas, as forças e momentos exercidos pela ferramenta e as forças exercidas pela roda livre não tiverem um valor significativo.

O modelo para a obtenção da parametrização linear do modelo é similar ao aplicado em (5.3.21). Logo, a dinâmica de u e de ω podem ser expressas da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\bar{\theta}_3^0}{\bar{\theta}_1^0} \omega^2 - \frac{\bar{\theta}_4^0}{\bar{\theta}_1^0} u \\ -\frac{\bar{\theta}_5^0}{\bar{\theta}_2^0} u \omega - \frac{\bar{\theta}_6^0}{\bar{\theta}_2^0} \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{\bar{\theta}_1^0} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\bar{\theta}_2^0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{ref} \\ \omega_{ref} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{\delta}_u \\ \bar{\delta}_\omega \end{bmatrix}.
 \tag{5.3.28}$$

Reordenando e desprezando o vetor de incertezas, obtém-se a parametrização linear

$$\begin{bmatrix} \dot{u} & 0 & -\omega^2 & u & 0 & 0 \\ 0 & \dot{\omega} & 0 & 0 & u\omega & \omega \end{bmatrix} \bar{\theta}^0 = \begin{bmatrix} u_{ref} \\ \omega_{ref} \end{bmatrix},
 \tag{5.3.29}$$

com $\bar{\theta}^0 = [\bar{\theta}_1^0 \quad \bar{\theta}_2^0 \quad \bar{\theta}_3^0 \quad \bar{\theta}_4^0 \quad \bar{\theta}_5^0 \quad \bar{\theta}_6^0]^T$.

Os vetores de parâmetros θ^0 e $\bar{\theta}^0$ contêm a maioria das constantes dos modelos, incluindo as constantes dos motores e, no último dos modelos, as constantes dos controladores PD de baixo nível.

5.4 Avaliação dos diversos modelos

Em regime permanente os três modelos podem apresentar comportamentos similares. Isso se deve a diferentes fatores, sendo os que mais se destacam a elevada relação de transmissão que possuem as caixas de redução dos motores de tração e a massa do robô que se relaciona com seu tamanho.

Em relação aos dois modelos cinemáticos, o comportamento de ambos é idêntico. Isso se deve ao fato de que se está representando o mesmo processo, apenas em diferentes sistemas de coordenadas.

No entanto, na medida em que aumenta a massa, o comportamento de qualquer dos modelos cinemáticos difere do dinâmico nos tempos de crescimento das variáveis do sistema. Portanto, a trajetória descrita pelo robô difere, como ilustra a Figura 5.4.1. Algo parecido acontece na medida em que diminui a relação de transmissão das caixas de redução de ambos os motores. Nesse sentido, é notável a influência que possui a ordenada δ do centro de massa G, como se observa na Figura 5.4.2, de modo que se pode concluir que o modelo dinâmico se comporta de maneira semelhante a um robô real. Não se deve descartar o uso de modelos cinemáticos quando a influência da estrutura mecânica é desprezível em relação aos parâmetros dos atuadores.

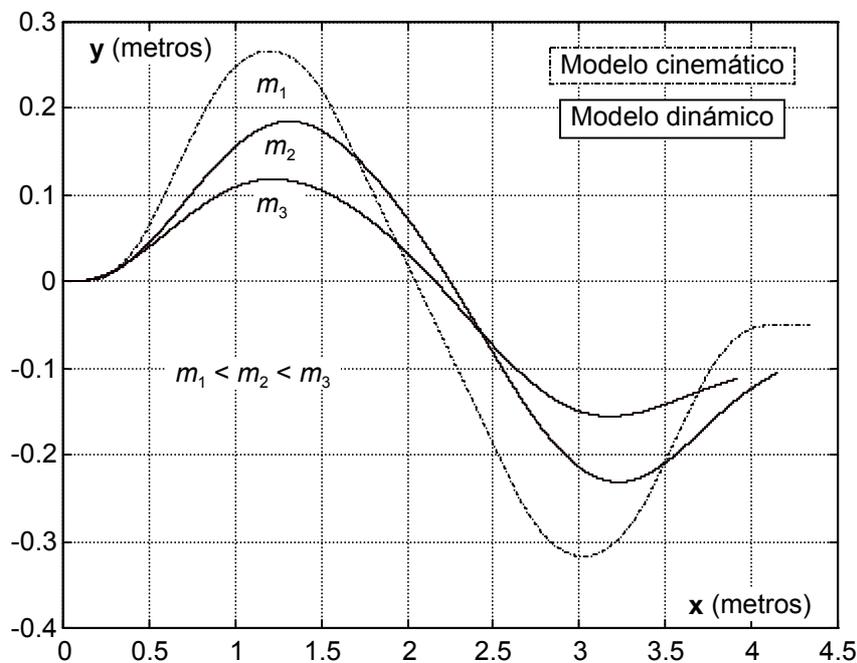


Figura 5.4.1. Influência da massa da estrutura mecânica sobre as trajetórias descritas pelo robô móvel.

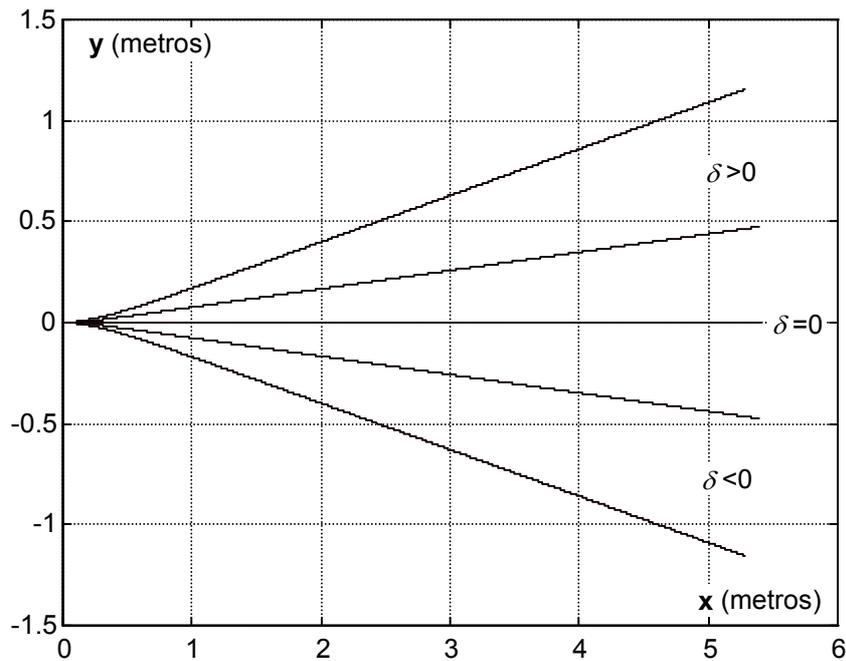


Figura 5.4.2. Influência da ordenada, δ , do centro de massa G, sobre a trajetória do robô móvel.

Os modelos dinâmicos apresentados descrevem melhor os robôs móveis reais, dado que não se necessita gerar forças a partir de tensões, nem de equipamentos adicionais como amplificadores de corrente. Ambos os tipos de modelos permitem ensaiar a influência que os parâmetros da estrutura mecânica possuem sobre o comportamento do robô. A Figura 5.4.3, a Figura 5.4.4 e a Figura 5.4.5 apresentam a influência do raio das rodas de tração (rr) e da separação entre as rodas (b) sobre as velocidades linear e angular do robô. Estes ensaios foram realizados sobre o modelo cinemático.

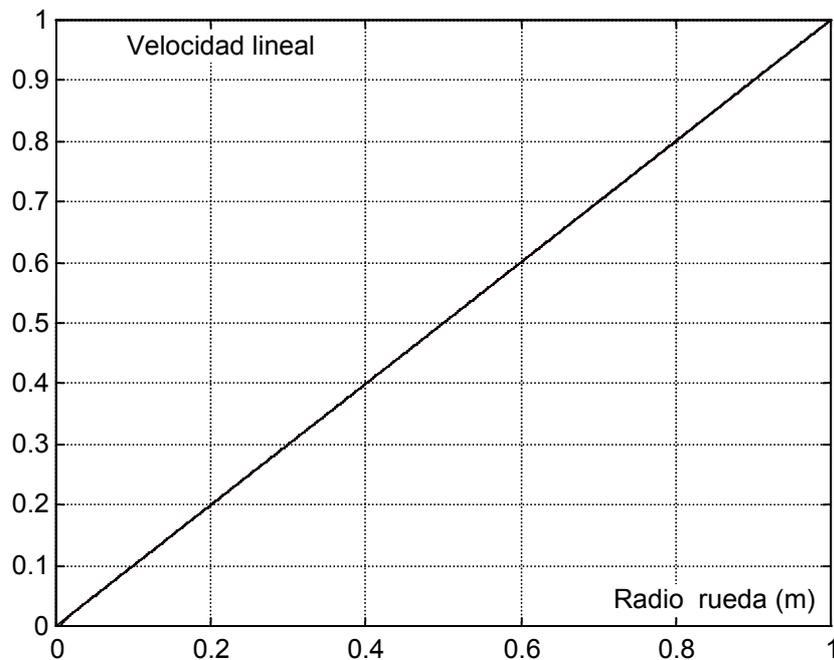


Figura 5.4.3. Relação existente entre o raio das rodas de tração (rr) e a velocidade linear do robô.

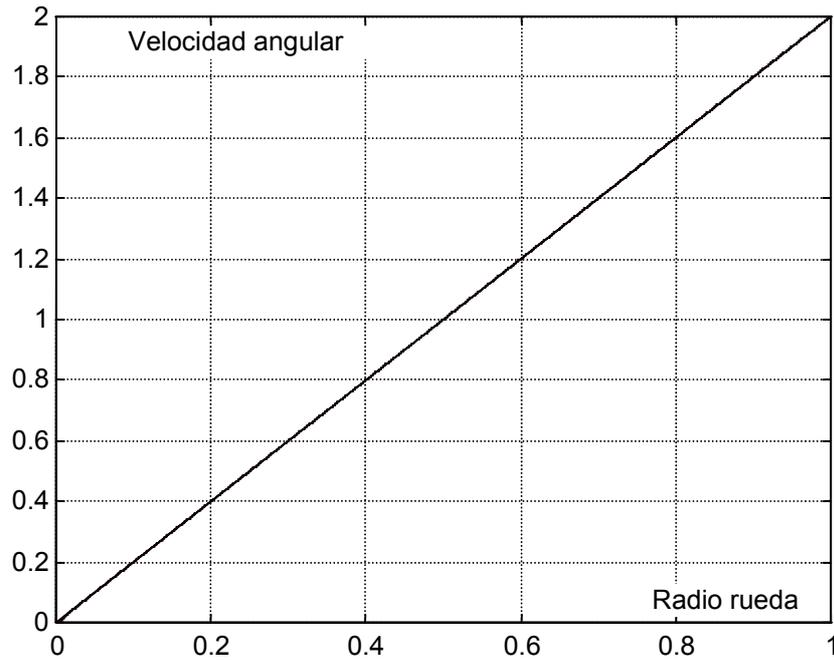


Figura 5.4.4. Relação existente entre o raio das rodas de tração (rr) e a velocidade angular do robô.

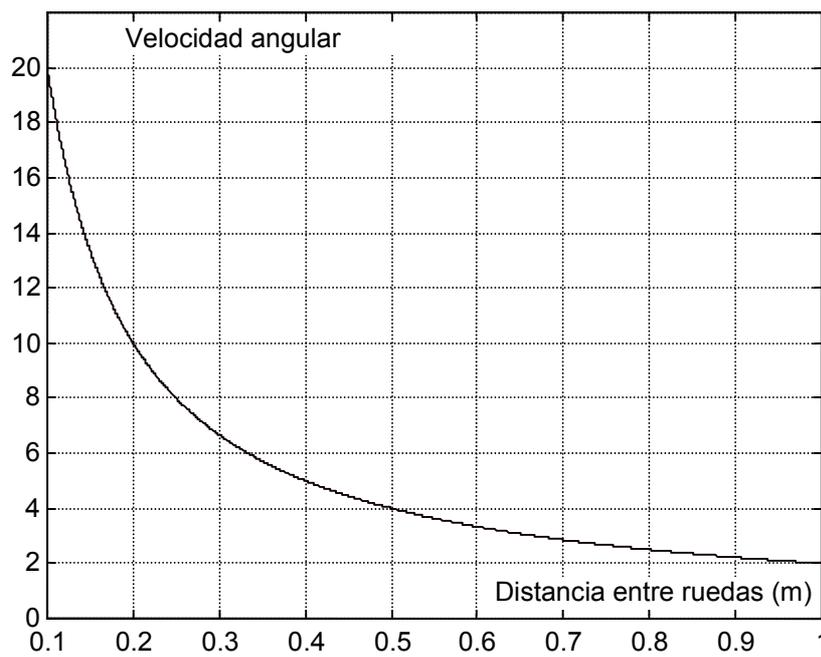


Figura 5.4.5. Relação existente entre a separação das rodas de tração (b) e a velocidade angular do robô para $0,1 < b < 1$.

É importante destacar que modelos cinemáticos e dinâmicos mais complexos podem ser obtidos considerando-se a distribuição das rodas e sua geometria [40].

Referências

- [1] Calderón Estevez, Leopoldo, “Sensor ultrasónico adaptivo de medidas de distancia”, Universidad Complutense de Madrid, Madrid, España, 1989.
- [2] González Jiménez, Javier y Ollero Baturone, Aníbal, “Estimación de la posición de un robot móvil”, Informática y Automática, vol.29-4, España, 1996.
- [3] Lozano-Pérez, Tomás “Foreword: Mobile Robot and Robotics”. Autonomous Robot Vehicles. Editores I.J. Cox y G.T. Wilfong. Springer-Verlag. pp vii-xi, 1990.
- [4] Arkin, Ronald “Behavior-Based Robotics”. The MIT Press. pp 1-29, 1998.
- [5] Campion, G., Bastin, G and D’Andréa-Novel. “Structural properties and classifications of kinematics and dynamics models of wheeled mobile robots”. IEEE Transactions on Robotics and Automation. Vol. 12, No. 1. February 1996.
- [6] Jones, J.L. and Flynn, A.M. “Mobile Robots. Inspiration to Implementation”. Editorial. A.K. Peters, Ltd. USA. 1993. Ch. 6, pp.139-161
- [7] Adamowski, J.C., Simões, M.G. y Gozman, F.G., "Desenvolvimento de um robô móvel", Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 1990.
- [8] Cox, I.J., "Blanche - An experiment in guidance and navigation of an autonomous robot vehicle", IEEE, Trans RA, vol. 7, number 2, 1991.
- [9] Connell, J. y Viola, P., "Cooperative control of a semi-autonomous mobile robot", IBM T.J. Watson Research Center, 1990.
- [10] Leopoldo Calderón Estévez, Ramón Ceres Ruiz, José Nó Sánchez de León y José Ramón Alique López. “Sensores de distancia en robótica” Revista Robótica. No.12. Marzo-Abril. 1985. España.
- [11] Leonard J. and Durrant-Whyte, H.F., 1991, “Mobile Robot Localization by Tracking Geometric Beacons.” IEEE Transaction on Robotics and Automation, Vol.7, No.3, pp. 376-382.
- [12] Borenstein, J., Everett, H.R. and Feng, L. “Where am I? Sensors and Methods for Mobile Robot Positioning”. Universidad de Michigan, USA, Abril-1996.
- [13] González Jiménez, J y Ollero Baturone, A. “Estimación de la posición de un robot móvil” Informática y Automática. Vol.29, pp.3-18. Asociación Española de Informática y Automática. Abril - 1996.
- [14] Russell, A., “Laying and Sensing Odor Markings as a Strategy for Assisting Mobile Robot Navigation Task”. Robotics and Automation Magazine. Vol. 2. No. 3. September. 1995.

-
- [15] Rencken, W.D., 1993, "Concurrent Localization and Map Building for Mobile Robots Using Ultrasonic Sensors". Proceedings of the 1993 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robotics and Systems, Yokohama, Japan, July 26-30, pp.2192-2197.
- [16] Hoppen, P., Knieriemen, T. and Puttkamer, E., 1990, "Laser-Radar Based Mapping and Navigation for an Autonomous Mobile Robot". Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, Cincinnati, OH, May 13-18, pp984-953.
- [17] Moravec, H.P. and Elfes, A., 1985, "High Resolution Maps from Wide Angle Sonar". Proceedings of the IEEE Conference on Robotics and Automation. Washington D.C., pp.116-121.
- [18] Borenstein, J. and Koren, Y., 1991, "The Vector Field Histogram - Fast Obstacle Avoidance for Mobile Robots". IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 7, No. 3, June, pp.278-288.
- [19] Crowley, J., 1989, "World Modeling and Position Estimation for a Mobile Robot Using Ultrasonic Ranging". Proceeding of IEEE International Conference on Robotics and Automation, Scottsdale, AZ, May 14-19, pp.243-251.
- [20] Courtney, J. and Jain, A., 1994, "Mobile Robot Localization via Classification of Mutisensor Maps". Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, San Diego, CA, May 8-13, pp.1672-1678.
- [21] Moravec, H. P., "Sensor fusion in certainty grids for mobile robots", AI Mag., 1988.
- [22] Khatib, O., "Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots", Proc. IEEE, Int. Conf. RA, 1985.
- [23] Krogh, B. H., "A generalized potential field approach to obstacle avoidance control", Int. Robotics Res. Conf., Bethlehem, 1984.
- [24] Thorpe, C.F., "Path relaxation: Path planning for a mobile robots", Autonomous mobile robots, Carnegie-Mellon University, 1985.
- [25] Newman, W. S. y Hogan, N., "High speed robot control and obstacle avoidance using dynamics potential functions", Proc. IEEE, Conf. RA, 1987.
- [26] Brooks, R.A., "A robust layered control system for mobile robots", IEEE, Tran. RA, Vol. 2, num. 1, 1987.
- [27] Brooks, R. A. y Connell, J. H., "Asynchronous distributed control system for a mobile robots", Proc. SPIE, Mobile robots, 1987.
- [28] Arkin, R. C., "Motor schema-based mobile robots navigation", Int. Journal Robotics Res., 1989.
- [29] Borenstein, J. and Koren, Y., "Real-time obstacle avoidance for fast mobile robots", IEEE Tran. System, Man and Cybernetics, vol 19, num 5, 1989.
- [30] Gibson, J.J. "The perception of the visual world". Riverside Press, Cambridge, England, 1950.
- [31] Gibson, J.J. "The senses considered as perceptual systems". Houghton-Mifflin, Boston, 1966.
- [32] Gibson J.J. "On the analysis of change in the optical array". Scandinavian Journal of Psychology, (18), pp. 161-163, 1977.
- [33] Gamarra, D. F., Bastos Filho, T. F., Sarcinelli Filho, M., Carelli, R.; Soria, C. M. "Optical Flow Calculation Using Data Fusion with Decentralized Information Filter". International Conference on Robotics and Automation, v. 1, pp. 2864-2869. Barcelona. 2005.

- [34] Secchi, H.A. "Algoritmos para el control de robots basado en comportamientos" Tesis doctoral. Universidad Nacional de San Juan, 2006.
- [35] Zhang, Y., Hong, D., Chung, J.H. y Velinsky, S.A. "Dynamic model based robust tracking control of a differentially steered wheeled mobile robot". Proceedings of American Conference Control. Philadelphia, Pennsylvania, pp 850-855, 1998.
- [36] Aicardi, M., Casalino, G., Bicchi, A. and Balestrino A. "Closed loop steering of unicycle-like vehicles via Lyapunov techniques". IEEE Robotics and Automation Magazine. Vol. 2, No.1. March 1995.
- [37] Preciado, A. y Meizel, D. "Dynamics modelling and identification of a mobile robot", IV Congreso Latinoamericano de Control Aut., Puebla, México, 1990.
- [38] Boyden, F.D. y Velinsky, S.A. "Dynamic modeling of wheeled mobile robot for high load applications", IEEE International Conference on Robotics and Automation. Vol. 4, pp 3071-3078.
- [39] de la Cruz, Celso "Control de formación de robots" Tesis doctoral. Universidad Nacional de San Juan, Argentina, 2006.
- [40] Campion, G., Bastin, G and D'Andréa-Novel. "Structural properties and classifications of kinematics and dynamics models of wheeled mobile robots". IEEE Transactions on Robotics and Automation. Vol. 12, No. 1. February 1996.