

4

Computação Embarcada: Projeto e Implementação de Veículos Autônomos Inteligentes

Cláudio Rosito Jung, Fernando Santos Osório, Christian Roberto Kelber e Farlei José Heinen

Abstract

This chapter presents an overview about new tendencies, methods and applications of embedded systems in autonomous intelligent vehicles. We will present the basic concepts regarding mobile robotics, instrumentation and control of autonomous vehicles, emphasizing on new computational technologies adopted by automakers. We will also present applications of computer vision to autonomous vehicles, focusing on driver's assistance systems. Finally, we will present projects developed by automotive companies and university research groups.

Resumo

Este capítulo apresenta um panorama sobre as novas tendências, técnicas e aplicações de computação embarcada em veículos autônomos inteligentes. Serão apresentados os conceitos básicos de robótica móvel, e de instrumentação e controle de veículos autônomos, com ênfase nas novas tecnologias computacionais utilizadas pela indústria automobilística. Também serão apresentadas aplicações de visão computacional no campo de veículos autônomos, com ênfase em sistemas de apoio ao motorista. Finalmente, serão apresentados projetos desenvolvidos pela indústria automotiva e também por grupos de pesquisa em universidades.

4.1 Introdução

Um sistema embarcado pode ser considerado um sistema computacional com propósitos específicos, normalmente construído em dimensões reduzidas, que deve funcionar de forma autônoma. Como exemplos, podem ser citados telefones celulares, equipamentos médicos especializados, alguns equipamentos de instrumentação (osciloscópio, etc.) e sistemas de controle automotivos (injeção eletrônica, freios ABS, etc.).

Um requisito normalmente exigido de sistemas embarcados é a execução em tempo-real, em especial quando a aplicação envolve veículos autônomos inteligentes. Por exemplo, sistemas de freio ABS, que impedem o bloqueio completo das rodas durante a frenagem, devem analisar as informações fornecidas pelo sistema (velocidade, força de acionamento dos pedais de freio, etc.) e produzir resultados (frenagem que será efetivamente aplicada a cada uma das rodas) em uma pequena fração de tempo.

Neste capítulo, serão apresentados alguns problemas de computação embarcada que surgem no projeto e desenvolvimento de veículos autônomos inteligentes. Este capítulo está estruturado da seguinte maneira. A Seção 4.2 apresenta os principais conceitos e técnicas relacionadas à área de robótica móvel. Na Seção 4.3, é fornecida uma visão abrangente sobre veículos autônomos, sendo expostos os conceitos básicos de veículos e sistemas de transporte inteligentes. A Seção 4.4 investiga a estrutura dos controladores envolvidos na navegação autônoma, e a Seção 4.5 aborda problemas de visão computacional aplicados à navegação autônoma e sistemas de apoio ao motorista. Finalmente, a última Seção apresenta projetos desenvolvidos pela indústria automotiva e por universidades.

4.2 Robótica: Autômatos, Robôs Móveis e Robôs Autônomos

A robótica é uma área do conhecimento que tem evoluído de forma muito rápida nos últimos anos, entretanto, o estudo, o projeto e a implementação de robôs e autômatos vêm sendo desenvolvidos há vários séculos. Na verdade, é difícil estabelecer a data precisa do surgimento dos primeiros autômatos (ancestrais dos atuais robôs), onde podemos considerar como um marco na história da humanidade a construção da primeira máquina de calcular, criada por Pascal em 1642. A partir desta época inúmeros autômatos foram desenvolvidos, mas foi somente a partir de 1923 que o termo “*robot*” começou a ser empregado, tendo sido usado pela primeira vez por Karel Capek [Dudek 2000].

Os primeiros robôs eram, na verdade, autômatos complexos, verdadeiras obras de arte mecânicas, que executavam tarefas de modo repetitivo. Estes robôs deram origem aos atuais braços manipuladores de base fixa, que atualmente são largamente adotados na indústria (e.g. indústria automotiva). Somente mais recentemente surgiram os robôs móveis, que se caracterizam pela sua capacidade de se deslocar de modo guiado, semi-autônomo ou totalmente autônomo. Apesar de existirem referências mais antigas a dispositivos móveis comandados à distância, podemos considerar que sua origem foi fortemente influenciada pelo desenvolvimento de artefatos militares, como por exemplo, veículos autônomos teleguiados ou mesmo auto-guiados como as bombas V1 e V2 desenvolvidas pela Alemanha durante a 2^a. Guerra Mundial [Dudek 2000].

Portanto, o desenvolvimento da robótica evoluiu dos autômatos, passando pelos robôs manipuladores de base fixa, pelos dispositivos móveis guiados a distância, chegando mais recentemente aos robôs móveis semi-autônomos e mesmo os totalmente autônomos. Um exemplo de sucesso do desenvolvimento de veículos móveis de alta tecnologia é o rover *Soujourner* que explorou o planeta Marte em 1997. Entretanto, cabe destacar que mesmo os robôs de exploração espacial como o *Soujourner*, e seus sucessores *Spirit* e *Opportunity*, são dispositivos de autonomia limitada, necessitando ainda de comandos enviados a distância por seres humanos que controlam a missão.

Tabela 4.1 – Tipos de Autômatos, Robôs e Veículos Robóticos

<p>Funcionalidade: Tipos de Aplicações</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Mecanismos eletro-mecânicos com movimento repetitivo pré-definido e fixo (autômatos) • Manipuladores: Braços de base fixa (e.g. robôs industriais) • Manipuladores: Braços de base móvel (e.g. guias robóticas) • Robôs Móveis (ver abaixo os tipos de mobilidade): <ul style="list-style-type: none"> ○ Terrestres: <i>indoor</i>, <i>outdoor off-road</i> (qualquer terreno), veículos convencionais <i>outdoor</i> (automóveis) ○ Aquáticos, Submarinos, Aéreos ○ Exploração Espacial (e.g. <i>Soujourner</i>)
<p>Mobilidade: Dispositivos de Locomoção</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Robôs móveis com deslocamento com rodas • Robôs móveis com deslocamento com esteiras • Robôs com deslocamento por propulsão (e.g. no ar, na água) • Robôs com deslocamento por pernas (e.g. <i>animats</i>, bípedes) <p>Dispositivo/Modelo Cinemático: diferencial, síncrono, triciclo ou <i>Ackermann</i> [Dudek 2000]</p>
<p>Autonomia: Grau de Inteligência do Robô</p>	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Totalmente comandados a distância</u> (e.g. carro de “controle remoto” = tele-comandado, tele-operado) • <u>Veículos guiados</u>: dependem de informações externas, sem as quais não podem operar (AGV – <i>Automated Guided Vehicle</i>) • <u>Veículos semi-autônomos</u>: operam controlados remotamente, mas possuindo um certo grau de autonomia (e.g. podem parar de modo a evitar o choque com obstáculos) • <u>Veículos autônomos</u>: operam sem intervenção humana, de forma totalmente automatizada. Uma vez iniciada sua operação, executam tarefas de modo autônomo.

Em meio a tantos tipos distintos de robôs e veículos, conforme descrito acima, com diferentes recursos e níveis de autonomia, é importante que se busque identificar e organizá-los em categorias. Acima, na Tabela 4.1, é apresentada uma classificação dos robôs, de acordo com diferentes critérios, considerando, entre outros aspectos, sua estrutura, funcionalidade e autonomia. Além desta tabela, devem ser considerados os seguintes aspectos relativos à constituição de um robô móvel [Dudek 2000]:

- **Locomoção:** Como o robô irá se deslocar no ambiente. Os dispositivos de locomoção são de grande importância na caracterização de um robô móvel;
- **Percepção:** Como o robô irá perceber o ambiente (e.g. sensores de contato – *bumpers* - e de distância em relação a obstáculos) e inclusive monitorar parâmetros próprios dele e de seu comportamento (e.g. carga da bateria, odometria);
- **Controle e Inteligência:** Como o robô irá transformar suas percepções e conhecimentos prévios adquiridos (e.g. mapa do ambiente) em ações, ou seqüências de ações, a serem executadas;
- **Comunicação:** Como o robô irá se comunicar com um operador humano, ou mesmo com outros dispositivos robóticos;

As pesquisas em robótica móvel têm avançado na direção de uma maior integração e aperfeiçoamento destes 4 aspectos descritos acima, cuja meta principal é o desenvolvimento de modelos cada vez mais sofisticados e robustos dos chamados **RMA**s - **Robôs Móveis Autônomos**. Os RMA's, possuem, portanto, como características fundamentais, as capacidades de locomoção e de operação de modo semi ou completamente autônomo. Também deve ser considerado que maiores níveis de autonomia serão alcançados a medida que o robô passe a integrar 2 outros aspectos considerados da maior importância: robustez (capacidade de lidar com as mais diversas situações) e inteligência (de modo a resolver e executar tarefas por mais complexas que sejam).

4.2.1 Robôs Móveis: Ação e Locomoção

Os robôs e veículos móveis devem ser dotados de atuadores, que serão os responsáveis pela execução de suas ações e, principalmente, pelo seu deslocamento no ambiente. Existem diferentes tipos de dispositivos usados na locomoção dos robôs, e conforme a solução/implementação adotada o veículo terá diferentes tipos de comportamento. Podem ser citados como exemplo os robôs providos com duas rodas laterais e acionadores independentes acoplados a cada uma delas, obtendo-se, assim, um veículo de *tração diferencial*. Os robôs *Khepera* [K-Team 2005] são um exemplo de dispositivo móvel que tem um comportamento baseado na cinemática de acionamento diferencial [Dudek 2000, Heinen 2002], onde a rotação (giro do robô) é obtida pelo acionamento de modo diferenciado de cada um dos motores. Um caso particular de veículos com acionamento diferencial é o dos veículos dotados de esteiras.

Um outro tipo de acionamento é o do “carro tradicional”, que é dotado de um motor capaz de acionar ao mesmo tempo rodas de um mesmo eixo (tração dianteira ou traseira, com acionamento e controle de velocidade próprio - *throttle control*), onde este possui também um acionamento independente para girar a barra da direção (*steering control*). Este tipo de veículo usualmente terá um comportamento seguindo a cinemática *Ackermann* [Dudek 2000, Farlei 2002]. Deve-se destacar que o conhecimento do modelo de acionamento, e por conseqüência do modelo cinemático do veículo, é essencial para que se possa aplicar um mecanismo adequado de controle, ou mesmo, simular o funcionamento de um robô móvel ou veículo.

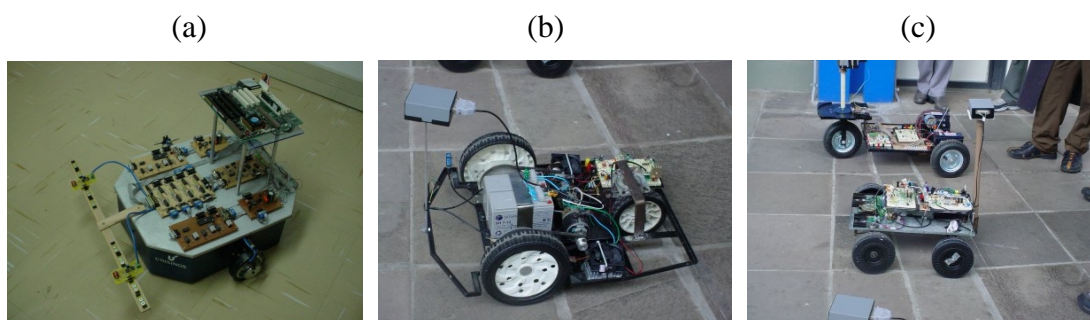


Figura 4.1: Protótipos com tração diferencial simétrica (a), assimétrica (b), triciclo e Ackermann (c), desenvolvidos por estudantes da Eng. Elétrica da UNISINOS

O acionamento de atuadores pode, em certos equipamentos, não se restringir apenas ao controle do deslocamento do veículo, podendo também ser usado para acionar outras partes do robô, como por exemplo um braço robótico, ou mesmo ser usado para

provocar ações sobre o ambiente (e.g. robô bombeiro) ou melhor posicionar um de seus sensores (e.g. uso de uma câmera acoplada a um braço robótico).

4.2.2 Robôs Móveis: Percepção

A percepção é um dos componentes principais dos robôs móveis, pois é através dos sensores que pode ser garantido ao sistema um maior nível de autonomia e robustez. Os sensores empregados junto à robótica móvel são de diferentes tipos, onde alguns servem para se ter uma realimentação mais direta do resultado de uma ação, como por exemplo, os *encoders*. A “ordem” de execução de um comando não garante que o resultado perfeito e completo desta ação seja atingido, por exemplo, uma mesma tensão de acionamento aplicada a um motor, durante um mesmo período de tempo, poderá ser afetada pela inclinação do terreno, em termos da distância total percorrida (isto sem considerar questões relacionadas à curva de resposta a aceleração e o torque do motor). O uso de um *encoder* permite que seja medido o real deslocamento (leia-se giro) das rodas de um robô móvel. Na Tabela 4.2 são listados os principais dispositivos sensores que vêm sendo utilizados junto aos RMAs.

Tabela 4.2 – Tipos de Sensores usados em RMAs

Sensor	Função
<i>Encoder</i> (de rodas)	Mede o número de rotações das rodas, e permite que se obtenha informações de odometria (medida de deslocamento).
Sensor de Infravermelho	Mede a distância entre o sensor e um obstáculo posicionado em frente a ele, através da estimativa da distância calculada em função do retorno da reflexão da luz na superfície (medida de distância).
Sensor Laser	Mede a distância entre o sensor e um obstáculo posicionado em frente – sensor direcional de alta precisão (medida de distância).
Sonar (ultra-som)	Estima a distância entre o sensor e os obstáculos ao seu redor, através da reflexão sonora. É um sensor mais sensível a perturbações, obtendo medidas aproximadas (medida de distância).
Sensores de Contato (bumpers)	Identifica quando ocorre uma colisão entre o veículo (sensor) e um ponto de contato (medida de contato/pressão).
Bússola Eletrônica	Identifica a orientação do veículo em relação ao campo magnético da terra (medida de orientação – posição relativa).
GPS	Identifica a posição absoluta do veículo no globo terrestre, baseando-se na rede de satélites GPS – <i>Global Positioning System</i> (medida de posicionamento absoluto).
Imagens: Visão Artificial	O uso de imagens permite que sejam adquiridas a partir de uma ou mais câmeras (visão monocular, estéreo ou omnidirecional) descrições do ambiente (imagem monocromática ou colorida). As imagens permitem que se implemente técnicas de determinação de posicionamento relativo, posicionamento absoluto, detecção e estimativa de deslocamento, assim como detecção de obstáculos.
Outros sensores	Acelerômetros, Giroscópios, Sensores de Inclinação, Radar, ...

O adequado uso dos sensores, bem como a correta interpretação dos dados fornecidos por estes (modelo sensorial, incluindo precisão, distância alcançada, suscetibilidade ao

ruído, etc), é que permitirá a correta implementação, ou simulação, de sistemas RMA mais robustos. Um outro tema de grande relevância na robótica é a integração de sensores (fusão sensorial), de modo a integrar e explorar a complementaridade entre os diferentes sensores, que possuem diferentes escalas de sensibilidade e confiabilidade (e.g. fusão de dados de um radar, sonar e sensor laser).

4.2.3 Robôs Móveis: Comunicação

A comunicação é uma ferramenta de grande importância, seja nos sistemas embarcados que dependem de informações externas (e.g. controle externo), ou mesmo, sendo usada de forma a estabelecer uma troca de informações entre múltiplos robôs e veículos. Um exemplo de comunicação entre controlador e dispositivo controlado, é o sistema adotado para comunicação entre a NASA e o *rover Sojourner*, que, devido às grandes distâncias, necessitava de uma certa autonomia para se manter íntegro durante a espera de novas instruções, ou mesmo, quando havia uma perda de sinal.

Em relação à comunicação entre veículos, este tipo de comunicação tem se apresentado como de grande importância, principalmente em situações relacionadas ao controle de fluxo em comboios nas estradas, conforme será apresentado posteriormente. Atualmente a comunicação é um tema de grande interesse e um importante foco de pesquisa na área de robótica móvel, estando fortemente relacionada às pesquisas em Inteligência Artificial e Sistemas MultiAgentes.

4.2.4 Robôs Móveis: Controle e Inteligência

Um sistema robótico móvel pode ter diferentes níveis de autonomia e inteligência, o que será definido pelo tipo de sistema de controle integrado ao sistema. Existem sistemas RMAs que possuem um nível de autonomia e inteligência extremamente limitado, como por exemplo os AGVs convencionais industriais.

Um AGV industrial é um robô móvel que usualmente segue uma marcação pré-estabelecida (e.g. uma faixa pintada no solo), e mesmo se este possui integrada uma capacidade de se deslocar de modo autônomo (locomoção) e de perceber o ambiente (sensor da faixa), seu sistema de controle depende desta informação para poder continuar atuando. Se um pedaço da faixa for danificado, o robô usualmente não terá como prosseguir sua tarefa e deverá parar de se movimentar. O mesmo acontece caso este robô detecte um obstáculo em seu caminho, ele irá parar e aguardar que o obstáculo seja removido. Nota-se que os níveis de robustez, autonomia e inteligência de um veículo como este são bastante reduzidos, não sendo capaz de suportar falhas na marcação ou de desviar de obstáculos e retornar para a execução de sua tarefa.

Em função disto, as pesquisas em robótica móvel autônoma tem avançado na direção de propor sistemas de controle, que incluam “comportamentos inteligentes”, de modo a tornar os robôs mais confiáveis, robustos e menos dependentes da intervenção de seres humanos. Este “comportamento inteligente” é implementado através de sistemas de controle que devem, entre outras funções, realizar tarefas como as descritas a seguir:

- Garantir a preservação da integridade física dos seres humanos, bem como não causar danos ao ambiente onde está inserido;
- Garantir a preservação da integridade física do robô: evitar colisões contra pessoas e objetos (obstáculos estáticos ou móveis);

- Garantir a manutenção de informações que permitam uma melhor execução das tarefas, o que pode incluir: construção e atualização de um mapa do ambiente, determinação da localização do robô em relação a este mapa, definição de trajetórias que permitam que ele se desloque de um ponto a outro (considerando o mapa disponível);
- Integrar as informações provenientes de diferentes sensores, interpretando estas informações e levando em consideração problemas de ruído e erros associados às mesmas;
- Gerar os comandos, na seqüência correta, de modo a realizar passo-a-passo as tarefas que lhe são atribuídas;
- Definir soluções alternativas para situações imprevistas que se apresentem e que por ventura possam prejudicar a execução das ações que estavam planejadas;
- Capacidade de se adaptar, aprender com as experiências passadas e corrigir seus erros e, quem sabe no futuro, ter a capacidade de evoluir !

Concluindo, para que se possam desenvolver adequadamente projetos na área de robótica móvel e veículos autônomos, é necessário que primeiramente possamos: (i) obter modelos confiáveis do comportamento dos diversos componentes destes sistemas (atuadores e sensores); (ii) modelar o comportamento do sistema, projetando um sistema de controle que seja capaz de integrar os dados sensoriais, gerar um plano de ação e executar este plano; (iii) simular o sistema completo – sensores, controle, atuadores, de forma a validar e aperfeiçoar o sistema de controle; (iv) integrar o sistema de controle em um robô/veículo real de modo a validar a proposta e verificar a sua robustez perante situações reais.

4.3 Veículos Inteligentes

A automação veicular, além de propiciar ao motorista maior segurança em condições críticas adversas, também pode auxiliá-lo na condução do veículo, onde uma ou mais tarefas podem ser automatizadas, tais como: seguir a pista, mantendo a faixa correta, manter uma distância segura entre veículos, regular automaticamente a velocidade do veículo conforme as condições de trânsito e características da rodovia, fazer ultrapassagens seguras e evitar obstáculos, achar o caminho mais curto e seguro para o destino bem como mover o veículo e estacioná-lo em ambiente urbano.

Visando aumentos na segurança, no conforto, na estabilidade e no rendimento dos veículos automotores, a Indústria tem investido intensamente em sistemas eletrônicos embarcados. Com o intuito de auxiliar os condutores, diversas soluções eletrônicas vêm sendo desenvolvidas e implementadas nos veículos nas últimas décadas, como freios ABS e sistema de estabilização ESP, que atuam automaticamente, quando o veículo encontra-se em condições extremas, procurando minimizar, dessa forma, a ocorrência de acidentes.

Com a introdução de soluções em informática nos veículos, o motorista pode contar em diversos países com sistemas de navegação, que o auxiliam na escolha da melhor rota entre a origem e o destino, e que podem, inclusive, adequá-la durante a viagem conforme as condições de trânsito.

4.3.1 Conceitos

A tecnologia *drive-by-wire* representa uma nova era, na qual soluções mecânicas serão substituídas por soluções eletro-mecânicas [Kelber 2003a]. A possibilidade de se dirigir um veículo a partir de sinais eletrônicos permite o uso de computadores embarcados atuando como co-pilotos e ajudando o motorista em situações de emergência, ou na execução de tarefas, tais como estacionar um veículo.

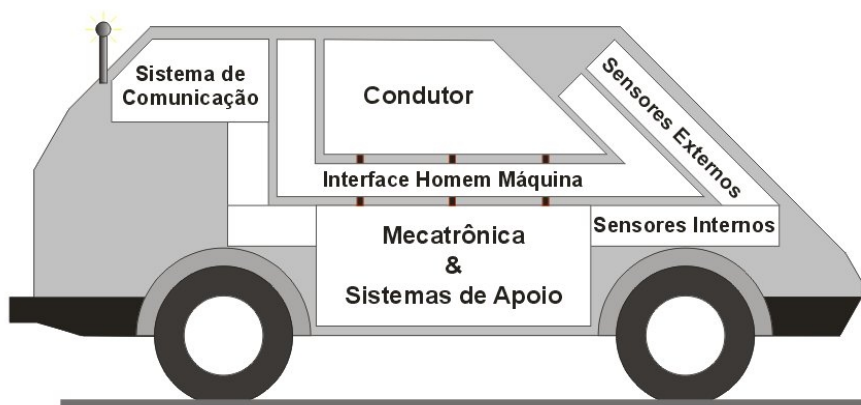


Figura 4.2: Estrutura de um Veículo Inteligente

A estrutura de um veículo inteligente com tecnologia *drive-by-wire* é apresentada na Figura 4.2. Ela consiste em uma unidade de controle estruturada em diferentes níveis hierárquicos de controle, que serão apresentados mais adiante. Destacam-se nesta unidade os Sistemas Mecatrônicos Embarcados, que consistem em todo o conjunto de controladores dos componentes eletro-mecânicos embarcados, bem como os Sistemas de Apoio ao Motorista, desenvolvidos a partir de soluções de computação aplicada.

Os Sistemas Mecatrônicos e de Apoio ao Motorista baseiam-se em informações internas e externas ao veículo através de sensores específicos. Através destas informações pode-se identificar o estado em que o veículo se encontra e como são as condições do ambiente ao seu redor. Além disso, um sistema de comunicação complementa a integração da estrutura de controle como um todo, possibilitando a troca de informações entre o veículo e uma base de supervisão e comando remotos, bem como a comunicação entre veículos. Esta estrutura permite, por exemplo, a automatização de sistemas de transporte em ambientes controlados. Através do sistema de comunicação, os veículos podem ser informados a respeito das condições do trânsito, possibilitando, dessa forma, a otimização do tráfego.

A Interface Homem Máquina (IHM) entre o condutor e o veículo automatizado também merece estudos mais aprofundados. Através da tecnologia *drive-by-wire*, o carro pode ser guiado a partir de comandos eletrônicos, não havendo, portanto, a necessidade da interface convencional de volante e pedais. IHMs, empregando *joysticks* e manches, já foram testadas, mas não há, até o momento, estudos que indiquem qual a solução mais eficaz quanto à dirigibilidade, conforto, ergonomia e segurança.

4.3.2 Sistemas Mecatrônicos Embarcados

Sistemas Mecatrônicos Embarcados consistem nos conjuntos eletro-mecânicos disponíveis num veículo, responsáveis por alguma função específica no funcionamento

do veículo. Destacam-se o sistema de injeção de combustível, sistema de freio e de posicionamento angular da barra de direção. Cada um destes sub-sistemas é controlado por uma unidade eletrônica, que se comunica com as outras através de uma rede. No setor automotivo é usual o uso da rede CAN para tais aplicações.

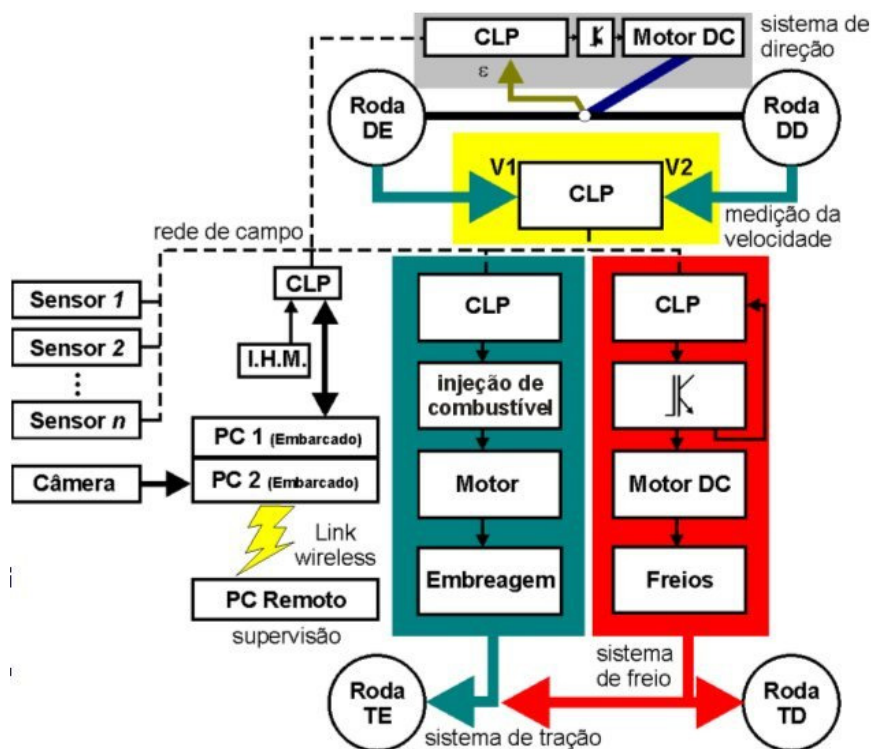


Figura 4.3: Sistema de Controle Distribuído

O sistema de controle distribuído desenvolvido no projeto de pesquisa Mini-Baja Autônomo da UNISINOS é apresentado na Figura 4.3. Neste sistema CLPs (controladores lógicos programáveis) da empresa ALTUS Sistemas de Informática foram utilizados para controlar os sub-sistemas de aceleração, frenagem e posicionamento da barra de direção do veículo. Estes se comunicam através de uma rede proprietária ALNET1 com um PC embarcado, através do qual pode ser feito um interfaceamento com um computador remoto.

Uma vez tendo torque (aceleração ou frenagem) de cada roda controlado, bem como o posicionamento da barra de direção, pode-se partir para uma atuação sobre a dinâmica do veículo propriamente dita. Diversas soluções já se encontram disponíveis nos veículos atuais, principalmente nos automóveis de maior valor agregado. Destacam-se os seguintes sistemas mecatrônicos:

- **Anti Blocking System (ABS):** Impede o bloqueio das rodas durante uma freada, evitando que o veículo derrape. Está disponível em veículos de todas as categorias. Em conjunto com o *Electronic Brake Distribution (EBD)*, garante, através de uma distribuição da força de frenagem em cada roda, uma melhor estabilidade do veículo em manobras rápidas com o pedal de freio ainda acionado.
- **Braking-Assistant (BAS):** Em casos de colisão iminente, alguns condutores pisam bruscamente no pedal do freio, mas mantêm este fortemente pressionado

apenas durante um curto espaço de tempo. O sistema “percebe” a intenção do condutor e amplifica a intensidade do freio de forma a garantir uma desaceleração máxima.

- **Electronic Stability Program (ESP):** Sistema eletrônico que reconhece o escorregamento do veículo nas direções longitudinal e transversal, como, por exemplo, o deslizamento lateral em curvas, e atua de forma orientada e independente sobre o freio de cada uma das rodas, evitando que o veículo rodopie.
- **Active Body Control (ABC):** Sistema que controla dinamicamente a carroceria do veículo, evitando que a mesma se incline para frente ou para os lados, aumentando assim o conforto dos passageiros.
- **Torque Control System (TCS):** Sistema eletrônico de controle do torque realizado por cada uma das rodas de tração, que evita que a roda “patine”, garantindo, assim, a dinâmica do veículo em arrancadas e curvas.
- **Continuous Damping Control (CDC):** Sistema de suspensão adaptativa, que possibilita uma regulagem contínua da constante de amortecimento do amortecedor. Possibilita ajustar, a partir de comandos eletrônicos, a suspensão do veículo para direção confortável ou esportiva, conforme a vontade do motorista.
- **X-by-Wire:** Tecnologia que, aos poucos, vem substituindo os comandos mecânicos por sistemas eletrônicos, como o acelerador eletrônico (*Power-by-Wire*), já disponível em diversos veículos de série, bem como os sistemas *Brake-by-Wire*, *Shift-by-Wire* e *Steer-by-Wire*.

4.3.3 Instrumentação

Na parte de sensoriamento há três grupos básicos de sensores, apresentados na Figura 4.4: Sensores para Reconhecimento de Rota, Sensores para Reconhecimento de Objetos & Obstáculos e Sensores de Navegação, que permitem que a rota traçada seja seguida com segurança.

O reconhecimento de rota baseia-se na identificação de marcações existentes na pista. O princípio de reconhecimento destas marcações pode ser:

- eletromagnético, onde o campo magnético gerado pela corrente elétrica injetada em um cabo colocado sob o asfalto da pista é rastreado,
- através de um laser, que é refletido em faixas refletoras polarizadas especialmente coladas sobre a pista,
- através de *transponders*, que são marcações opto-magnéticas ou eletrônicas colocadas de forma espaçada sobre a pista, que seguem o mesmo princípio de funcionamento dos sistemas de identificação por rádio-frequência (RFID).
- ou através de visão computacional, identificando as bordas da pista, que normalmente já se encontram pintadas sobre as rodovias para orientação dos motoristas.

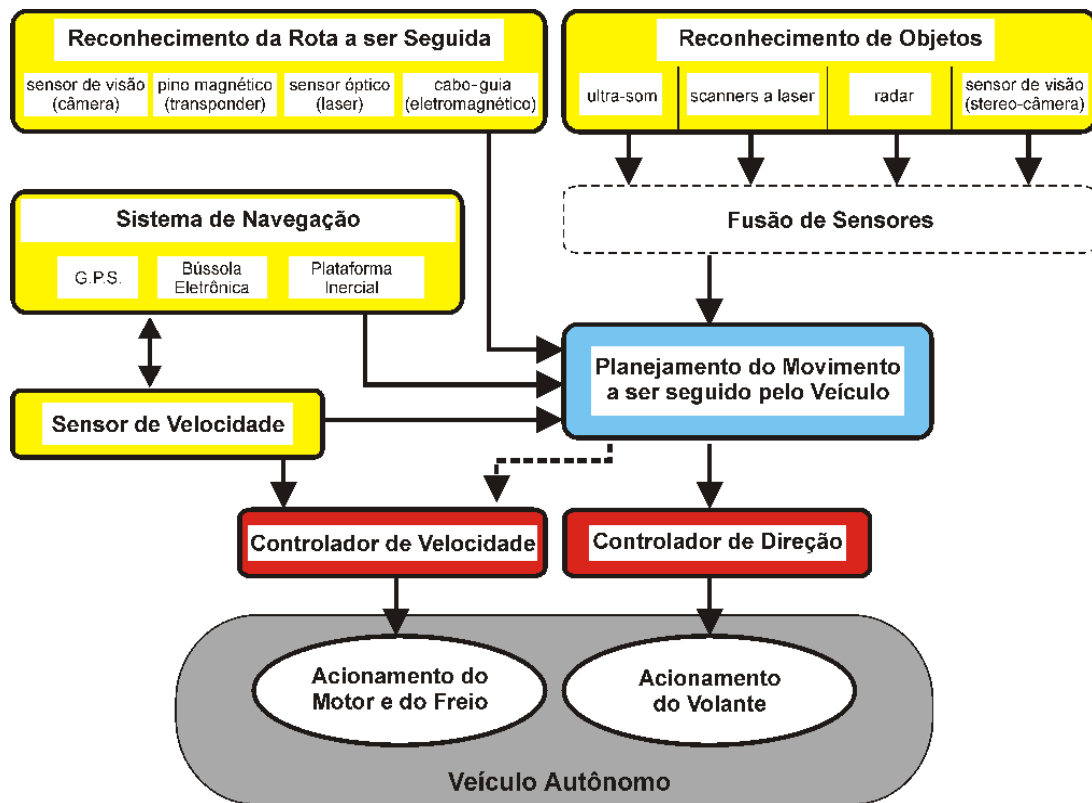


Figura 4.4: Estrutura da Instrumentação Embarcada

Através dos sensores de objetos, como *scanners* a laser, ultra-som, radar e visão estereoscópica, diferentes obstáculos podem ser detectados, fazendo com que o veículo pare ou desvie, evitando assim colisões, que representam o principal tipo de acidente de trânsito com vítimas. Ter a redução dos acidentes nas estradas, com a conseqüente redução no número de vítimas como meta, mostra a importante contribuição que o desenvolvimento de tecnologias para a automação veicular pode trazer para a sociedade.

Os sensores de navegação, como bússola, GPS, giroscópio, acelerômetros e sensores de velocidade das rodas, garantem, por sua vez, que os sistemas mecatrônicos existentes na base hierárquica da estrutura de controle permitam o veículo trafegar de forma segura e controlada, mantendo sua estabilidade dinâmica e o seguimento seguro da trajetória previamente determinada.



Figura 4.5: Radar, Scanner a Laser, Visão Estereoscópica, Plataforma Inercial integrada com GPS [Simon et al 2000]

No projeto *Autonomes Fahren* [Becker 1998], [Simon 1999], [Söhnitz 1999], [Simon 2000], [Söhnitz 2001], desenvolvido pela empresa Volkswagen junto com diversos

parceiros, por exemplo, uma estrutura com radar, *scanners* a laser, sistema de visão estéreo, plataforma inercial e GPS diferencial foi utilizada, conforme apresentado na Figura 4.5. Destaca-se aqui, segundo Becker (1999), o desenvolvimento de um sistema computacional capaz de fusionar os dados oriundos dos diferentes sensores, conforme indicado na Figura 4.6, de forma a situar com precisão o veículo autônomo em seu ambiente, minimizando os erros de instrumentação.

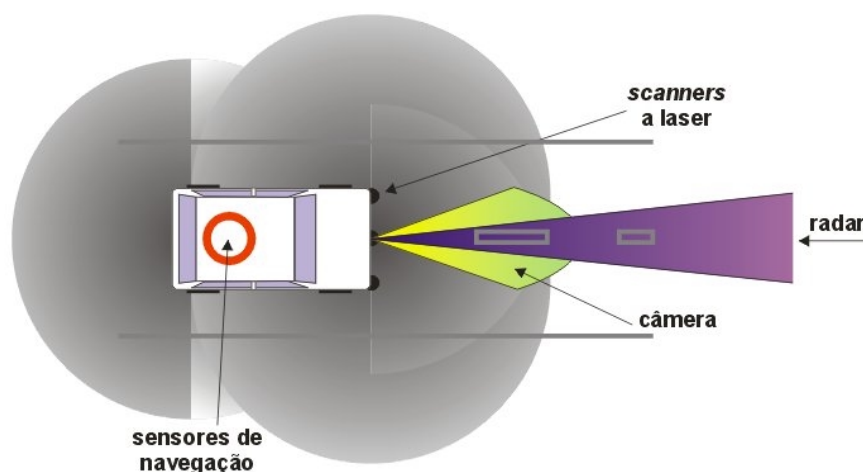


Figura 4.6: Fusão de Sensores

4.3.4 Aplicações envolvendo Tecnologias para Automação Veicular

As tecnologias para automação veicular apresentadas anteriormente representam um conjunto complexo de sensores, transdutores, atuadores, controladores e sistemas de comunicação, que são necessários, em sua grande maioria, para a navegação autônoma de um veículo inteligente. Entretanto, algumas destas tecnologias, quando utilizadas isoladamente, também podem servir de base para o desenvolvimento de Sistemas de Apoio ao Motorista.

4.3.4.1 Sistemas de Apoio ao Motorista

Os Sistemas de Apoio ao Motorista podem ser divididos em duas grandes categorias: sistemas passivos e sistemas ativos. No primeiro caso o sistema eletrônico identifica determinados cenários e alerta o motorista, que toma as devidas providências ao volante. No caso dos sistemas ativos, o “co-piloto eletrônico” pode interferir ligeiramente na condução do veículo, auxiliando o motorista, mas nunca eliminando sua responsabilidade como condutor.

Dentre os sistemas passivos destacam-se as seguintes aplicações:

- **Auxílio a estacionamento em vagas paralelas:** Nestes sistemas uma câmera de vídeo é instalada na parte traseira do veículo e suas imagens são projetadas em um *display* localizado no painel do carro. Sobrepostas com as imagens da câmera são apresentadas linhas de referência, que auxiliam o motorista durante a manobra, como pode ser visto na Figura 4.7 no sistema disponível em alguns veículos da Toyota nos mercados japonês e europeu.



Figura 4.7: Sistema de auxílio a estacionamento

- **Identificação de obstáculos em pontos cegos ao motorista:** Estes sistemas baseiam-se em informações obtidas a partir de imagens de câmeras de vídeo ou a partir de *scanners a laser* instalados na lateral do veículo, como pode ser visto na Figura 4.8. O sistema auxilia o motorista em manobras de ultrapassagem ou na realização de curvas com veículos longos, indicando a ele a existência de algum veículo, ciclista ou pedestre na região do ponto cego dos espelhos retrovisores.



Figura 4.8: Identificação de obstáculos em pontos cegos [Lages 2004]

- **Aviso de abandono de pista:** Neste sistema uma câmera de vídeo é instalada no pára-brisa do veículo e, a partir da identificação das bordas da pista, uma futura saída de pista pode ser identificada previamente e o motorista pode ser alertado. Em alguns veículos, ao invés de uma câmera de vídeo, sensores de infravermelho são instalados no pára-choque frontal do veículo e, caso esse comece a cruzar a faixa, um alerta vibratório é acionado no assento do motorista. Tais sistemas necessitam, entretanto, de uma boa pintura das faixas nas rodovias.
- **Sistema de navegação:** Com base em um mapa digital da região, e, com o auxílio do GPS, o sistema de navegação auxilia o motorista a planejar seu caminho até o destino indicando o mesmo durante a viagem. Para seu bom funcionamento, entretanto, são necessários um mapa atualizado da região e uma comunicação direta e livre de sombras com os satélites do sistema GPS.
- **Sistema de comunicação inter-veicular:** A partir da evolução dos sistemas de comunicação e informação, sistemas inteligentes de comunicação inter-veicular

estão sendo desenvolvidos com o intuito de alertar de forma automática a ocorrência de algum acidente ou impedimento de tráfego [Projekt Fleetnet (2003)]. Integrado com o sistema de navegação, pretende-se que tal infraestrutura permita que os motoristas possam trafegar de forma cooperativa, bem como que ela auxilie no controle de tráfego, minimizando a ocorrência de engarrafamentos e acidentes. Como exemplo destaca-se o sistema desenvolvido pela TU-Hamburg, na Alemanha (<http://www.et2.tu-hamburg.de/fleetnet/>).

Nos sistemas ativos para apoio ao motorista o “co-piloto eletrônico” torna-se uma espécie de “anjo da guarda” do motorista, auxiliando-o em condições extremas. Tais sistemas não vão evitar a ocorrência de acidentes, entretanto, servem para minimizar as consequências destes. Outras aplicações de sistemas ativos encontram-se na automatização de tarefas repetitivas, difíceis ou cansativas para o motorista. Destacam-se, atualmente, os seguintes sistemas:

- **Frenagem de emergência:** O sistema, baseado em informações de radares ou *scanners* a laser, como ilustra a Figura 4.9, atua sobre os freios alguns milissegundos antes de uma colisão iminente, minimizando a gravidade da colisão. Ao mesmo tempo um comando eletrônico é enviado ao *airbag*, pré-inflando-o antes da colisão. O desafio para tal sistema está no reconhecimento da iminência de colisão, uma vez que o motorista não pode ser impedido ou prejudicado de realizar uma manobra evasiva.



Figura 4.9: Sistema de Frenagem de Emergência [Lages 2004]

- **Lane Keeping Assistance:** São sistemas que ajudam o motorista a manter o centro da pista de uma rodovia em viagens muito longas. Baseado na detecção das bordas da pista, o computador de bordo gera parte do torque necessário para girar o volante do veículo e mantê-lo sobre a faixa. Assim, o “ajuste fino” do posicionamento do veículo passa a ser realizado pelo computador de bordo, deixando o motorista, desta forma, menos tenso e menos cansado ao final da viagem.
- **Adaptive Cruise Control (ACC):** Representa uma evolução do tradicional *Cruise Control*, que mantém a velocidade do veículo constante em um valor previamente determinado pelo motorista. A partir da informação gerada por sensores de distância instalados no pára-choque do veículo o sistema é capaz de ajustar o valor de referência da velocidade, adequando o deslocamento do veículo às condições de tráfego da estrada.

- **Estacionamento automático em vagas paralelas:** A manobra de estacionar um veículo em uma vaga paralela representa uma tarefa árdua e complicada para muitos condutores. Para auxiliar o motorista nestes casos, a tarefa de manobrar o veículo também pode ser automatizada. Neste caso o veículo deve, a partir de sensores de distância instalados no carro, medir o comprimento da vaga. Uma vez acionado o sistema, este posicionará automaticamente o volante, garantindo uma entrada suave na vaga. Visando a minimização de acidentes com pedestres durante a manobra, o motorista fica responsável por acelerar e frear o veículo, ficando o sistema apenas responsável pelo esterçamento das rodas.
- **Manobra de veículos articulados:** Veículos articulados, como carretas, jamantas ou tratores com reboque consistem, a partir de seu modelo matemático, em sistemas dinâmicos instáveis ao serem manobrados em marcha à ré [Schumacher 2002]. A partir de dados oriundos de sensores de navegação o sistema de apoio, similarmente ao sistema de auxílio para estacionar em vagas paralelas, pode posicionar o volante durante as manobras evitando, assim, que a carreta desvie da direção desejada e poupando, também, o motorista de realizar freqüentes manobras de parada, retorno e recomeço, a fim de realinhar o reboque.



Figura 4.10: Manobra de veículos articulados [Goetting 2001]

4.3.4.2 Sistemas de Transporte Automatizados

A este conjunto de sistemas pertencem os projetos que enfocam o desenvolvimento de soluções em sistemas de transporte integrados, que venham a funcionar de forma completamente autônoma, garantindo qualidade, eficiência, pontualidade e conforto.

Destacam-se, neste conjunto, os seguintes exemplos:

- **Integração entre linha de produção & fornecedores dentro de um pólo:** Para o transporte de material dentro de fábricas são cada vez mais utilizados veículos autoguiados (AGVs) rastreadores de cabo guia, onde o sensor instalado no veículo mede o campo magnético gerado pela corrente elétrica que passa pelo cabo, que se encontra instalado no chão. Pelo fato de não sofrer grandes interferências devido às condições climáticas, o sistema baseado em cabo guia mostra-se muito eficiente em ambientes controlados, por exemplo, parques, centros de exposições e vias internas que unem diferentes indústrias dentro de um mesmo pólo fabril. Nestes casos, sendo elevada a quantidade de material a ser transportado, um caminhão pode ser automatizado e utilizado como um AGV de grande porte para áreas externas. Como exemplo, pode ser citado o caminhão

automatizado pela empresa alemã Fox GmbH [Goetting 2001], que é utilizado dentro da firma Uzin (Ulm, Alemanha) no transporte automático do produto no final da linha de produção para o depósito. O veículo, visto na Figura 4.11, além de percorrer de forma autônoma um trajeto de 100 metros, também é manobrando e estacionado pelo computador de bordo.



Figura 4.11: Caminhão Automatizado [Goetting 2001]

- **Automação de sistemas de transporte coletivo sob condições controladas:** Equivalente ao caso anterior, um sistema equivalente pode ser implementado em microônibus, que possam integrar um sistema de transporte coletivo em regiões com ambiente controlado. Em um caminho fechado, previamente definido, podem ser instalados cabos guia e *transponders*, que servirão como referência para o conjunto de sensores implementados no veículo. O rastreamento do cabo guia, garante a referência de posição do veículo sobre a pista, e os *transponders* servem para indicar pontos de ônibus, bifurcações, áreas de travessia, etc. Através de manobras precisas e de um sistema de controle robusto, ficam garantidos a pontualidade, a segurança e o conforto dos passageiros.
- **Automated Highway Systems (AHS):** Originado no início da década de 1980 nos Estados Unidos, o estudo de sistemas de rodovias automatizadas continua presente nos principais congressos da área. Destaca-se aqui o projeto PATH - *Program on Advanced Technology for the Highway* [Parson 1988], desenvolvido na Califórnia, onde um trecho de rodovia foi instrumentado para o tráfego de veículos inteligentes.

Até o início do presente século as pesquisas focavam duas linhas de atuação distintas, uma visando tornar os veículos inteligentes, outra as estradas. Atualmente chegou-se a um consenso de que não somente os veículos, mas também as estradas devem dotadas de “inteligência” para a realização de um sistema automatizado de transporte. Neste aspecto é de fundamental importância o desenvolvimento de sistemas de comunicação inter-veicular e veículo-estrada abrindo, desta forma, novas frentes de pesquisa em computação móvel.

4.4 Controle Inteligente de Veículos Autônomos

A navegação autônoma de veículos inteligentes requer o trabalho conjunto de todos os componentes computacionais e eletro-mecânicos embarcados. Chega-se, dessa forma, a um sistema de automação veicular complexo, com diversos níveis hierárquicos de controle, que será apresentado a seguir.

4.4.1 Pirâmide de Controle

A estrutura dos diversos controladores pode ser separada em diferentes níveis, apresentados na Figura 4.12.

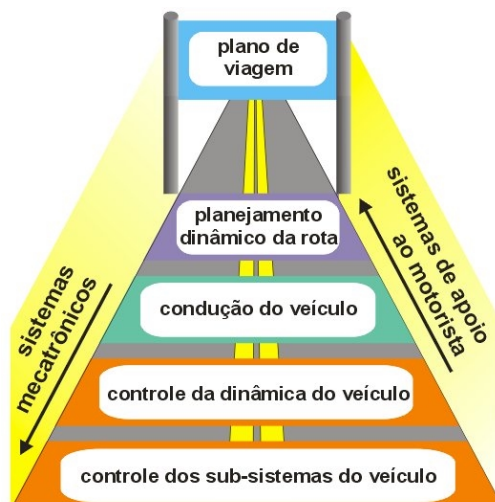


Figura 4.12: Estrutura dos diferentes Níveis de Controladores

A base do sistema de automação veicular é composta por soluções em controle de subsistemas eletro-mecânicos, muitas delas invisíveis ao motorista, como por exemplo os sistemas de controle da injeção eletrônica, do câmbio automático e da direção eletricamente assistida. Logo acima, num segundo patamar, encontram-se as soluções de controle que atuam na dinâmica do veículo, como freios ABS e sistemas ESP.

A condução do veículo, situada no meio da estrutura hierárquica de controle, é realizada atualmente pelo motorista, mas esta função também pode vir a ser automatizada por completo. Atualmente, nos carros de elevado valor agregado, sistemas de controle de velocidade *CC* (*Cruise Control*) eliminam a necessidade do motorista de se preocupar em manter a velocidade constante. Com a evolução deste sistema para o *ACC* (*Adaptive Cruise Control*), onde sensores de distância são instalados na parte posterior do veículo, o computador de bordo também é capaz de adequar a velocidade conforme as condições de tráfego.

No topo da estrutura de controle encontram-se as soluções de computação aplicada em sistemas embarcados. Destacam-se os sistemas de otimização de rota baseados em mapas digitais, que determinam como plano de viagem a melhor rota a ser seguida depois de fornecidos os pontos de partida e chegada. A rota também pode ser modificada dinamicamente ao longo da viagem, caso haja alguma obstrução no caminho original. Incluem-se aqui os sistemas baseados em Pesquisa Operacional e Inteligência Artificial, que podem indicar, conforme o surgimento de obstáculos fixos ou móveis, detectados por um sistema integrado de sensores, para onde o condutor deve guiar o veículo.

Cada subsistema de controle, dependendo de sua hierarquia na estrutura, pode ser classificado como uma solução mecatrônica, mais próxima da base da estrutura, ou como um sistema de apoio ao motorista. Não há uma fronteira bem definida entre os dois grupos, uma vez que um é complementar ao outro.

4.4.2 Controle dos Sub-Sistemas Mecatrônicos

O controle do veículo deve ser separado, primeiramente, em duas partes, sendo a primeira responsável pelo controle de velocidade e a segunda pelo controle de desvio lateral.

O controle de velocidade, para veículos dotados de motor à combustão e freio, baseia-se na estrutura do sistema *ACC Stop & Go* desenvolvido e apresentado em [Kelber 2004]. Este sub-sistema, visto na Figura 4.13, é dividido em dois ramos, um para acelerar e outro para frear o veículo. Cada ramo possui determinadas peculiaridades, que foram integradas ao modelo matemático do veículo.

A planta do ramo de aceleração é composta pelo sistema de injeção, pelo motor à combustão interna acoplado à embreagem e a dinâmica longitudinal do veículo. O sistema de injeção pode ser representado por um elemento de segunda ordem, enquanto que o motor e a embreagem são representados, respectivamente, por um elemento proporcional com retardo temporal (PT1) e um elemento não-linear do tipo zona-morta.

Embora o motor também possua uma curva característica não-linear, apenas para efeito de projeto de controladores a simplificação aqui apresentada pode ser adotada. A dinâmica longitudinal do veículo também pode ser simplificada por um elemento PT1. De forma a aumentar a dinâmica do sistema de controle, um ramo extra, contendo a curva característica do motor, pode ser adicionado numa estrutura de *feed-forward*, que, por sua vez, também serve para aliviar o trabalho do controlador da malha fechada garantindo, assim, uma resposta mais rápida do sistema como um todo.

A planta do ramo de frenagem é composta por um atuador eletro-mecânico com controle indireto de torque, os componentes mecânicos do sistema de freios e a curva característica de frenagem do veículo.

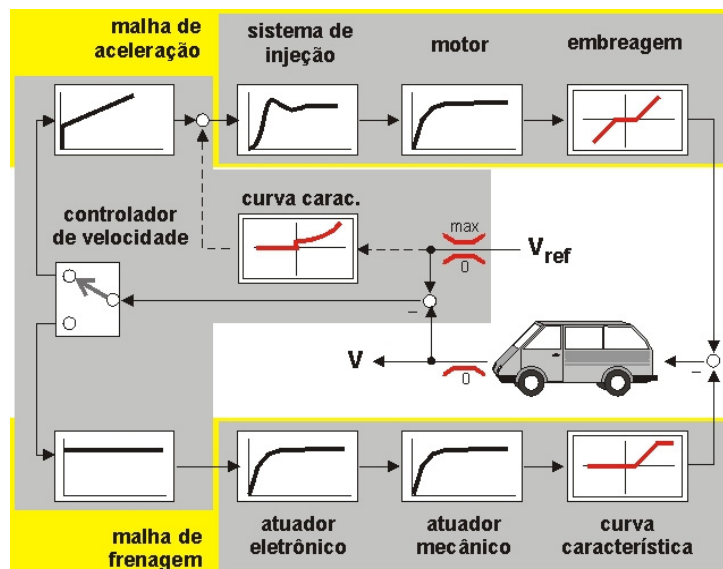


Figura 4.13: Controle de Velocidade *ACC Stop&Go*

O modelo matemático utilizado para o desenvolvimento do controlador de movimento lateral do veículo baseia-se no “modelo bicicleta” [Kelber 2004]. Este modelo é válido para acelerações laterais de até 4m/s^2 , de forma que as simplificações e linearizações realizadas no modelo não diminuem a eficácia do projeto do controlador para as

aplicações aqui propostas. As principais variáveis envolvidas são o raio de curvatura da pista χ , o ângulo da direção, a velocidade do veículo v , a posição angular do veículo em relação à pista κ e o afastamento da parte central da pista α , apresentadas no diagrama de blocos da Figura 4.14.

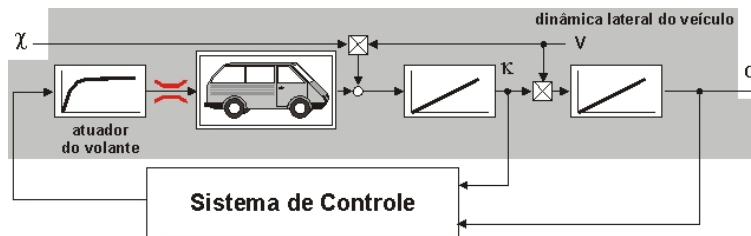


Figura 4.14: Controle do Desvio Lateral

Dentre as diferentes estruturas de controladores empregadas para o controle lateral do veículo destacam-se soluções envolvendo controladores clássicos da família PID, bem como estruturas de controle em cascata ou controle não-linear [Kelber 2002]. Tendo em vista a influência do valor da velocidade no comportamento dinâmico do veículo, faz-se necessária, para situações onde a velocidade varia muito, a utilização de controladores adaptativos ou outras técnicas de controle moderno. Da mesma forma, sistemas baseados em Inteligência Artificial também podem ser utilizados para garantir melhores condições de funcionamento e desempenho do veículo [Heinen 2002].

Para o controle de veículos em comboio é importante garantir-se a distância constante entre os veículos. Desta forma, faz-se necessária a utilização de um controlador extra, colocado em cascata com o controlador de velocidade, conforme apresentado em [Heinen 2004].

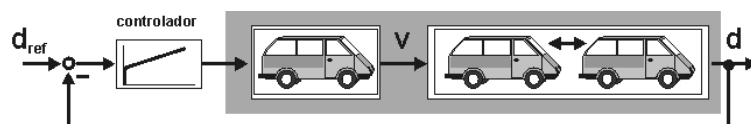


Figura 4.15: Veículos em Comboio

A distância entre os veículo pode ser obtida, por exemplo, a partir da detecção de marcações com codificação de cor colocadas no carro da frente, conforme Heinen (2004), e esta informação de distância é, então, enviada ao controlador. Este, por sua vez, envia ao controlador de velocidade a informação de acréscimo ou decréscimo de seu valor de referência, conforme o diagrama da Figura 4.15. Da mesma forma, o sistema de visão computacional adotado também permite a detecção do deslocamento lateral entre os veículos. Esta informação é, posteriormente, enviada aos controladores de distância lateral, que garantirão o alinhamento dos veículos no comboio.

4.4.3 Controle: Arquiteturas Computacionais

O desenvolvimento de um sistema de controle de um veículo autônomo é uma tarefa bastante complexa. Esta tarefa envolve inicialmente o projeto e implementação das camadas inferiores da pirâmide de controle (e.g. interface com o hardware e

dispositivos eletro-mecânicos), e posteriormente é necessária também a implementação de um sistema computacional que irá gerenciar os diversos componentes e módulos deste sistema. Um sistema computacional de controle pode envolver tarefas mais simples, que podem ser gerenciadas apenas por CLPs (controladores lógicos programáveis). Entretanto, sistemas mais complexos, planejados para controlar a execução de tarefas mais complexas (e.g. estacionar um carro, dirigir de modo autônomo), requerem uma *arquitetura computacional de controle* [Medeiros 1998] bem mais sofisticada. As tarefas desta arquitetura de controle podem envolver:

- Capacidade para ler e interpretar os sinais recebidos dos sensores do veículo;
- Capacidade de evitar obstáculos presentes no caminho do veículo;
- Capacidade para reagir a eventos, inclusive eventos inesperados, como a aparição imprevista de obstáculos móveis;
- Capacidade de planejamento de trajetórias e de execução de tarefas, como por exemplo: definição de rotas de um ponto A até um ponto B, tendo conhecimento, ou não, de um mapa do ambiente;
- Capacidade de gerenciar os diversos componentes do sistema, de modo gerar os comandos na ordem adequada e com os parâmetros corretos, a fim de que a tarefa que foi planejada possa ser executada;
- Em alguns tipos de sistemas de controle, ainda podem ser necessárias as seguintes funcionalidades:
 - Garantir a manutenção da localização do veículo (manter corretamente identificada sua posição e orientação em relação ao ambiente em que está inserido [Heinen 2002]);
 - Realizar um mapeamento do ambiente, construindo em sua memória um mapa do ambiente que representa suas “lembranças” sobre os caminhos explorados (e.g. arquitetura SMPA [Dudek 200, Medeiros 1998]);
 - Aprender sobre o ambiente e como interagir com o mesmo, se adaptando na medida que novos conhecimentos são adquiridos (e.g. sistemas adaptativos dotados de mecanismos de aprendizado de máquina [Maes 1994]);
 - Comunicar, interagir e até mesmo cooperar com outros dispositivos computacionais (e.g. sistemas multiagentes [Álvares e Sichman 1997, Garcia e Sichman 2003]);
 - Por fim, alguns sistemas podem até mesmo requerer que o sistema de controle implemente técnicas de detecção e tolerância à falha, de modo a identificar e compensar defeitos localizados em seus componentes (e.g. um robô em Marte ou de exploração submarina talvez não possa ser trazido de volta para manutenção [Advocate 2005, Deuker et al. 1998]);

O sistema computacional de controle deve, portanto, executar tarefas como: preservar a integridade do veículo, preservar a integridade dos objetos e entes presentes no ambiente onde este veículo atua, planejar/executar/encontrar soluções para a execução de tarefas, e em alguns casos deve inclusive interagir com outros sistemas. As características de um tal sistema de controle nos remete ao estudo de técnicas que vem

sendo abordadas junto ao domínio da Inteligência Artificial (I.A.), e principalmente no que diz respeito a técnicas de controle de “agentes artificiais autônomos” e “sistemas multi-agentes” [Wooldridge 1995, Álvares e Sichman 1997, Garcia e Sichman 2003]. Uma série de técnicas e conceitos, relacionados à robótica autônoma, tem sido reaproveitados na implementação de sistemas de I.A. baseados em agentes, e vice-versa. Os principais aspectos que serão abordados aqui são relativos a: Percepção, Raciocínio e Ação, onde o aspecto comunicação também será abordado, mas de forma complementar (vide Figura 4.16).

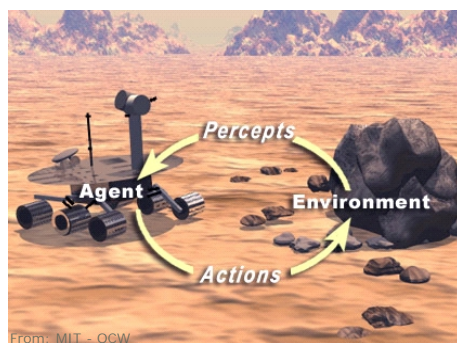


Figura 4.16: Veículo/Agente que percebe o ambiente, raciocina e age sobre este ambiente [MIT-OCW 2005]

As arquiteturas computacionais de controle de veículos autônomos são as mais diversas, e mesmo na literatura são encontrados diferentes enfoques e abordagens [Heinen 2002, Dudek 2000, Medeiros 1998, Wooldridge 1995, Russel e Norvig 1995], entretanto, podem ser citadas algumas das arquiteturas de controle que se tornaram as mais conhecidas e reconhecidas pelas suas características e potencialidades: controle reativo, controle deliberativo, controle hierárquico e controle híbrido [Medeiros 1998, Heinen 2002]. Nas próximas seções serão detalhadas um pouco mais estas diferentes arquiteturas de controle.

4.4.3.1 Controle Reativo

O controle reativo consiste de um sistema de reação sensorial-motora, onde este tipo de controle normalmente é o mais simples de ser implementado (reativo puro), não necessitando de muitos recursos computacionais para sua implementação. No controle reativo existe um laço de: (i) leitura dos sensores; (ii) imediato processamento destas informações; (iii) geração de um comando de resposta para os atuadores. Usualmente um esquema de controle reativo considera apenas as leituras sensoriais realizadas no presente para fins de tomada de decisão e geração de comandos de ação [Wooldridge 1995, Medeiros 1998, Santos 2004]. Um sistema reativo é bastante útil para implementar comportamentos como: desviar de obstáculos (*avoid collision behaviour*: reage a presença de um obstáculo), e seguir um objeto (*wall-following/lane-follow behaviour*: acompanhar um elemento guia).

A Figura 4.17 apresenta um esquema que pode ser considerado como um sistema de controle reativo, caso a tomada de decisão do agente-robô não se utilize de mapas, de memória, ou de outras informações adicionais, fazendo uso apenas das informações sensoriais a fim de gerar uma nova ação. Na Figura 4.17 pode ser visto um exemplo de

wall-following sendo simulado usando uma adaptação do *Khepera-Sim* [Michel 1997, K-Team 2005].

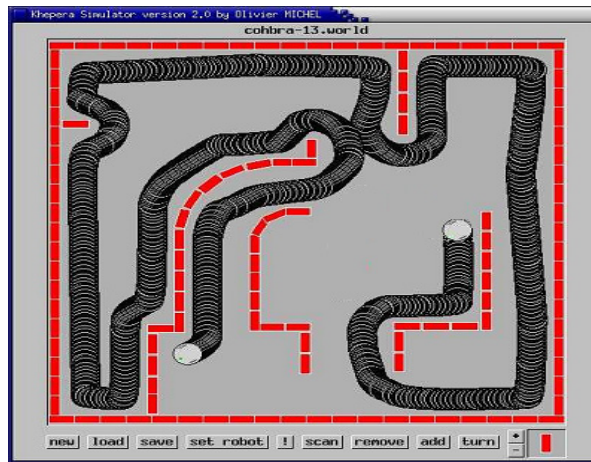


Figura 4.17: Simulação de um comportamento reativo do tipo *Wall-Following*

4.4.3.2 Controle Deliberativo

O controle deliberativo (ou cognitivo) consiste da aplicação de um mecanismo de planejamento das ações, podendo ser estabelecido um plano prévio de execução de uma seqüência de ações, baseado nos conhecimentos que o sistema possui sobre o problema a ser resolvido (e.g. mapa do ambiente, rotas disponíveis). No controle deliberativo é assumida a existência de um processo de alto nível de raciocínio e tomada de decisões, usualmente mais complexo de ser implementado do que o controle reativo. Este processo permite que sejam planejadas ações de modo a tratar e executar tarefas que exigem um nível de controle mais sofisticado, como por exemplo, definir (traçar uma rota) e executar a tarefa de se deslocar de um ponto a outro do ambiente considerando um mapa deste, como apresentado na Figura 4.18.

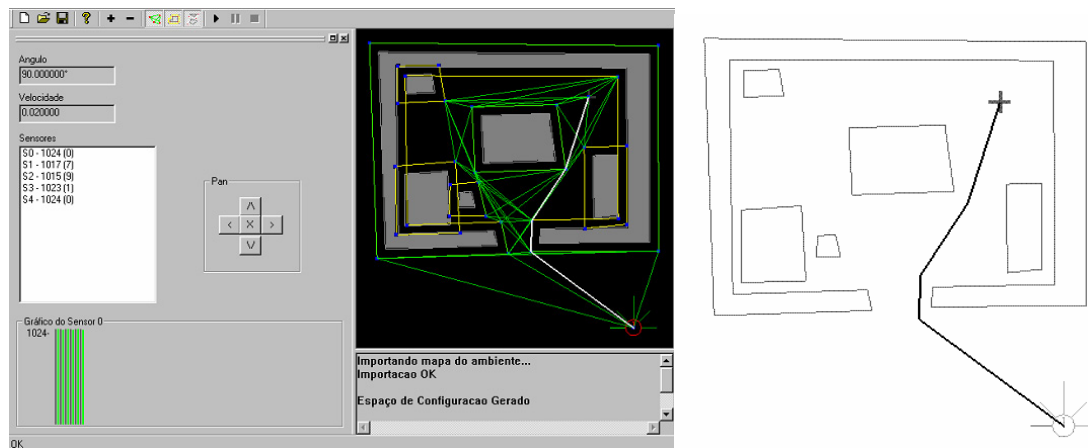


Figura 4.18: Comportamento deliberativo com o planejamento e execução de trajetória considerando o mapa do ambiente [Heinen 2000]

Entretanto, o controle “deliberativo puro” possui limitações quando colocado frente a eventos imprevistos, como por exemplo, um obstáculo que se moveu obstruindo a sua rota [Heinen 2000]. Neste caso, o controle deliberativo puro irá ter dificuldades de reagir a uma nova configuração do ambiente, que não havia sido prevista em seu

planejamento inicial. Pode-se dizer que o ideal em um sistema de controle seria que este tivesse a capacidade de reação de um sistema reativo, com a capacidade de planejamento e execução de tarefas complexas de um sistema deliberativo. Desta combinação entre reativo e deliberativo surgem os sistemas hierárquicos/híbridos, abordados no próximo item.

4.4.3.3 Controle Hierárquico e Controle Híbrido

O controle hierárquico/híbrido consiste da combinação de múltiplos módulos de controle reativo e/ou deliberativo em camadas dispostas de modo que estes possam operar de modo hierárquico ou em paralelo. A combinação dos diferentes módulos de controle leva a adoção de um esquema de prioridades em relação às múltiplas camadas do sistema, onde é comum encontrarmos estes sistemas de controle classificados como: sistemas hierárquicos com decomposição vertical e decomposição horizontal [Dudek 2000, Heinen 2002]. Os sistemas hierárquicos/híbridos apresentam a vantagem de poderem combinar os comportamentos obtidos de seus diferentes módulos a fim de obter um comportamento mais robusto e uma execução de tarefas mais complexas.

Um exemplo de aplicação deste tipo de sistema de controle seria a composição do planejamento e execução de uma tarefa de navegação do ponto A ao ponto B (controle deliberativo – de menor prioridade), onde um módulo reativo estaria encarregado, de preservar a integridade do robô, desviando dos obstáculos que forem percebidos através de seus sensores (controle reativo – de maior prioridade). Neste exemplo, pode-se imaginar que o robô passa para um controle reativo ao detectar um obstáculo que esteja dificultando seu deslocamento, e uma vez “resolvido o problema”, ele retorna a execução de sua tarefa principal, onde pode inclusive solicitar ao módulo deliberativo um novo planejamento de trajetória (nova rota).

Encontram-se disponíveis na literatura diversas propostas de arquiteturas de controle hierárquico, como por exemplo: decomposição vertical, decomposição horizontal, *subsumption control*, arquitetura SMPA (*sense-model-plan-act*) [Brooks 1986 e 1991, Dudek 2000, Heinen 2002]. Estas arquiteturas de controle tem sido aplicadas com sucesso em diferentes tarefas e problemas relacionados ao controle de robôs autônomos. Além destes sistemas de controle, também pode ser citada uma outra arquitetura de controle de agentes autônomos que tem sido amplamente adotada, a arquitetura BDI (*Beliefs, Desire, Intentions*) [Osório et al. 2004], baseada em estados mentais. O modelo BDI, e outros modelos baseados em estados mentais, têm sido adotados na construção de *frameworks* para o controle de agentes autônomos, permitindo inclusive sua integração com mecanismos de comunicação entre agentes, e seu conseqüente uso em problemas relacionados a sistemas multiagentes que envolvam comunicação e cooperação entre os agentes [Osório et al. 2004].

O controle híbrido é implementado através de uma série de módulos que operam em paralelo e que se comunicam. Um exemplo de sistema de controle híbrido de veículos autônomos é a arquitetura proposta por Heinen (2002) – Arquitetura COHBRA/HyCAR, a qual implementa módulos de controle de localização, de manipulação da representação do ambiente e uma hierarquia de módulos em camadas de controle do robô (camada vital, funcional e deliberativa), onde estes módulos se comunicam através de uma memória compartilhada (tipo *blackboard*) [Heinen e Osório

2002a, 2002b]. A Figura 4.19 apresenta o esquema da arquitetura de controle COHBRA.

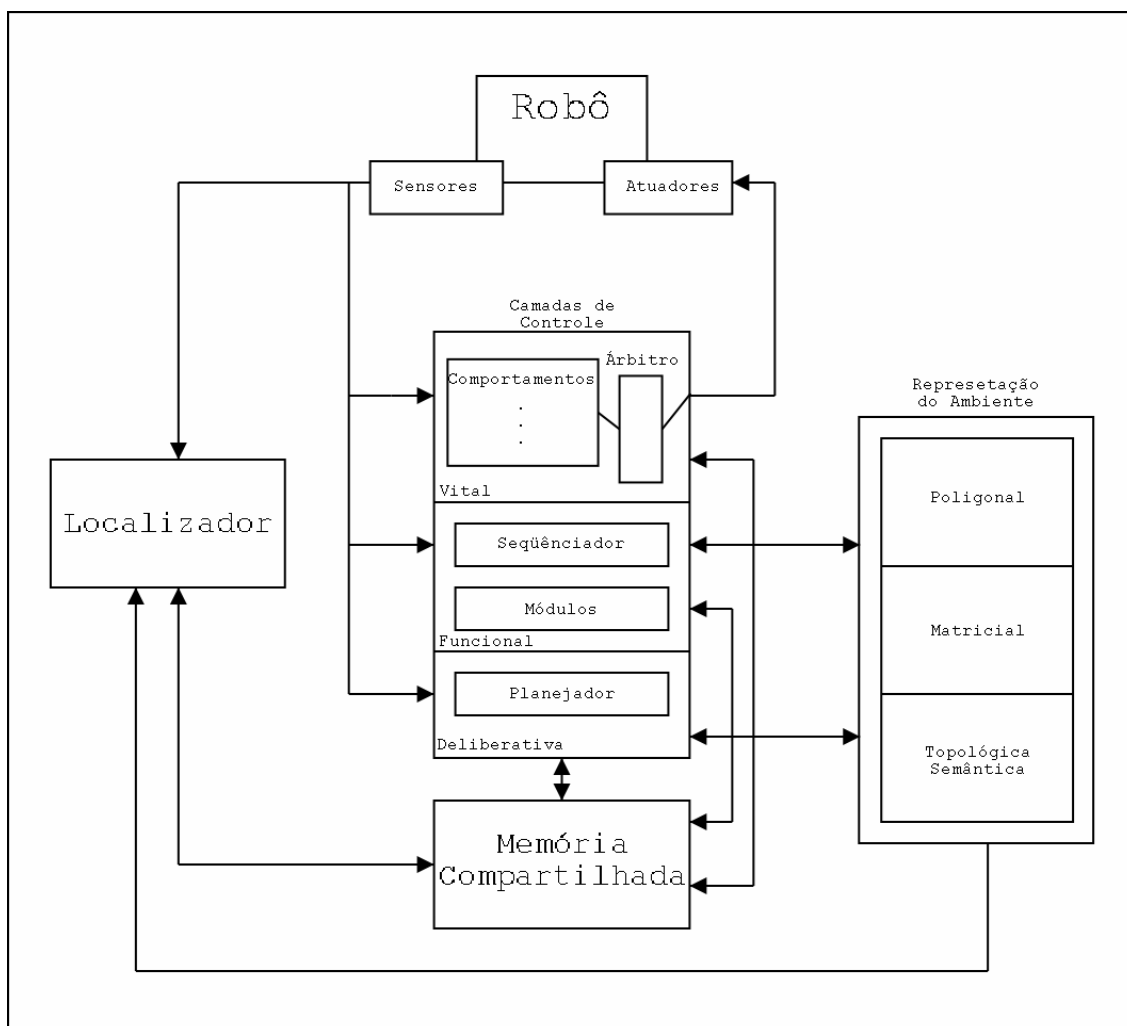


Figura 4.19: Arquitetura de Controle Híbrido COHBRA

4.4.4 Planejamento de Trajetórias

O planejamento de uma rota, especificando uma trajetória unindo dois pontos, origem A ao destino B, é um dos componentes de grande importância dentro de um sistema computacional de controle de veículos autônomos. O algoritmo de planejamento de trajetória deve levar em consideração o mapa de ocupação do ambiente (obstáculos) e as demais informações disponíveis (e.g. pontos-alvo A e B, rotas, mapa topológico) de modo a definir um caminho a ser percorrido pelo veículo.

Existem diferentes algoritmos que permitem estabelecer um planejamento de trajetórias, onde destacam-se os mais conhecidos [Latombe 1991, Pio e Campos 2003]: Busca em Grafos (Grafo de Visibilidade/Diagramas de Voronoi + Busca do caminho ótimo) [Heinen 2000, Dudek 2000]; Algoritmo A* [Heinen 2002, Dudek 2000]; Busca baseada em Campos Potenciais e Campos Vetoriais [Dudek 2000, Heinen 2002, Pio e Campos 2003]. A aplicação destes algoritmos usualmente depende do tipo de representação do ambiente disponível (representação geométrica ou grade de ocupação espacial – Fig 19)

e de questões referentes aos requisitos de performance relativos a complexidade da busca de uma solução para o problema da trajetória.

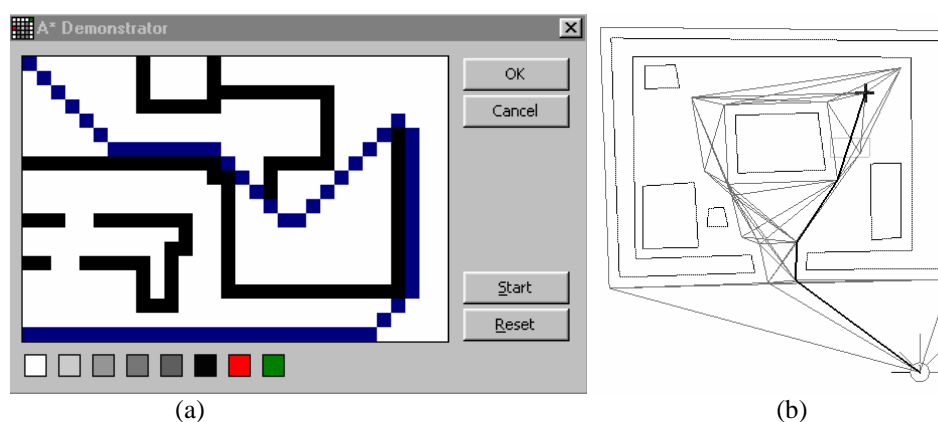


Figura 4.20: Planejamento de Trajetória – (a) baseado em grade com uso do A* e (b) baseado em uma descrição geométrica e uso de Busca em Grafos

É importante destacar que os algoritmos de navegação, ao iniciarem o controle do deslocamento do veículo de acordo com uma determinada trajetória, são altamente dependentes da correta identificação e/ou estimativa da posição atual do veículo em relação ao mapa do ambiente e a sua posição em relação à trajetória especificada. Uma vez que os comandos são gerados na forma de uma seqüência de ações, que permitem que o veículo percorra o caminho especificado, erros em seu posicionamento e orientação podem implicar em graves problemas na execução da tarefa. ***Em função disto, em tarefas de navegação onde existe uma rota pré-especificada, é de grande importância que o robô possua um mecanismo que garanta a manutenção da estimativa de sua posição atual.*** Além disto, o sistema de controle do robô também deve ser suficientemente robusto, de modo a poder contornar situações imprevistas, usualmente representadas pela presença de obstáculos não esperados em sua trajetória.

4.4.5 Simulação de Veículos Autônomos

Atualmente um grande número de simuladores de veículos e robôs autônomos estão disponíveis para uso em pesquisas acadêmicas, e mesmo para uso em aplicações práticas comerciais. Não buscamos aqui listar todos os simuladores disponíveis no mercado, mas sim alguns dos simuladores bastante conhecidos no meio acadêmico¹, bem como simuladores desenvolvidos pelo GPVA da Unisinos².

No meio acadêmico, o *K-Team* tornou-se amplamente conhecido pela comercialização de robôs para fins de estudos acadêmicos como o *Khepera* e o *Koala* [K-Team 2005]. Estes robôs são comercializados acompanhados de *softwares* que permitem simular seu comportamento, mas também controlá-los à distância através do computador. O simulador *Khepera* é uma ferramenta que, devido ao seu projeto, simula de modo bastante adequado o comportamento do robô, onde seus sensores e atuadores foram modelados de forma a reproduzir com um bom grau de fidelidade o comportamento real do robô. O robô *Khepera*, bem como o simulador deste, têm sido amplamente utilizados

¹ Simuladores robóticos disponíveis na Web: <http://inf.unisinos.br/~osorio/palestras/jai2005.html>

² GPVA – Grupo de Pesquisa de Veículos Autônomos: <http://www.exatec.unisinos.br/~autonom>

principalmente no estudo de comportamentos reativos, mas também podem ser aplicados em tarefas de mais alto nível, como o mapeamento de ambientes [Alves e Osório 2003]. Outros robôs de maior porte como os *Nomad* (Nomadic Technologies), também possuem simuladores que possibilitam realizar experimentos virtuais, tendo também como característica de grande importância, a fidelidade com que reproduz o comportamento de seus sensores e atuadores. Um exemplo de aplicação desenvolvido tanto em simulação quanto usando um robô real *Nomad*, para o mapeamento de ambientes, é apresentado por Edson P. Silva Junior (2003).

Em suma, uma das principais características que um bom simulador deve possuir é a possibilidade de modelar de forma correta e próxima da realidade os sensores e atuadores que o veículo/robô real possui. O modelo destes componentes deve também incluir um modelo de erro no seu comportamento (e.g. ruído nos sensores, erros de comando, ações incorretamente executadas – como rodas que patinam em um piso escorregadio). Além do modelo de erro dos sensores/atuadores, pode ser considerado um modelo do comportamento físico do robô. O modelo físico deve incluir um modelo da cinemática, e pode incluir um modelo da dinâmica do veículo. Dependendo da aplicação pode ser importante considerar a relação do robô para com o ambiente em que está inserido, levando em consideração elementos como: o atrito, a inclinação do terreno, a ação do vento, e até mesmo as correntes marinhas no caso de um veículo autônomo submarino. Além disto também é interessante que o simulador ofereça diferentes recursos para definir, configurar e alterar o ambiente onde está inserido o veículo/robô.

O GPVA/Unisinos vem desenvolvendo uma série de ferramentas que tem sido utilizadas no estudo dos veículos autônomos, possibilitando um maior aperfeiçoamento das técnicas computacionais usadas no controle destes veículos. Como exemplos das ferramentas já desenvolvidas, podemos citar:

- **SimRob2D (Sim):** Simulador 2D que permite ler descrições geométricas do ambiente, planejar uma trajetória e evitar obstáculos imprevistos, através de um controle hierárquico reativo-deliberativo [Heinen 2000];
- **SimRob3D:** Simulador 3D que permite ler descrições geométricas do ambiente, planejar uma trajetória, evitar obstáculos imprevistos e determinar/manter a informações sobre a localização do robô. Este simulador realiza as tarefas através do uso de um controlador híbrido, baseado na arquitetura COHBRA [Heinen 2002, Heinen & Osório 2002a, 2002b] apresentada na seção anterior. As Figuras 4.21 e 4.22 apresentam a interface do simulador SimRob3D;
- **Seva2D:** Simulador para o controle da tarefa de estacionamento autônomo de veículos. Este simulador foi implementado com dois controladores, o SEVA-A, baseado em um autômato (uma máquina de estados combinando técnicas reativas-deliberativas) e o SEVA-N baseado em uma rede neural (implementa o autômato, através do aprendizado a partir de um conjunto de exemplos) [Osório et al. 2002];
- **Seva3D:** Simulador 3D para o estacionamento autônomo de veículos, baseado na biblioteca de funções fornecida pelo SimRob3D, capaz de realizar o estacionamento de veículos, baseando-se em informações obtidas pelos sensores modelados no SimRob3D (desenvolvido por Farlei Heinen e Milton Heinen).

Todos estes sistemas buscam cada vez mais dotar os simuladores desenvolvidos de melhores modelos de sensores, de atuadores. Além disto buscam prover recursos para simplificar a adição de componentes que permitam construir controladores híbridos com arquiteturas robustas o suficiente para poderem ser implementadas e funcionarem corretamente em veículos e robôs reais.



Figura 4.21: SimRob3D – Interface do Simulador



Figura 4.22: SimRob3D – Exemplo de visualização da simulação

Estes objetivos relacionados à construção de simuladores robustos de veículos e robôs autônomos vem sendo buscados por inúmeros grupos de pesquisa no mundo inteiro, onde pode ser citada, como exemplo desta iniciativa, a proposta de um simulador

denominado *Mission Simulation Facility* – MSF da NASA (2005). Isto demonstra que tanto abordagens como a do GPVA/Unisinos no Brasil, quanto abordagens como a da NASA nos EUA, vem buscando o desenvolvimento da pesquisa em veículos autônomos através do uso de simuladores e do aperfeiçoamento dos sistemas computacionais de controle destes veículos. Embora cada ferramenta tenha suas particularidades, podemos concluir listando os componentes que são incluídos na maioria dos simuladores de veículos autônomos:

- Modelo dos sensores e atuadores (instrumentação), com inclusão no modelo de funções para a aproximação do erro associado aos componentes;
- Modelo da cinemática do veículo;
- Modelo do ambiente e do terreno onde o veículo irá atuar (mapa);
- Sistema de controle robusto, usualmente baseado em uma arquitetura de controle hierárquica ou híbrida;
- Inclusão (opcional) de um módulo específico para manutenção da localização do veículo.

4.5. Visão Computacional Aplicada a Veículos Autônomos e Sistemas de Apoio ao Motorista

Um grande problema da atualidade se refere ao grande número de acidentes de trânsito no país. Segundo o anuário estatístico de acidentes de trânsito do DENATRAN (Departamento Nacional de Trânsito) de 2002 [DENATRAN 2002], houve cerca de 250 mil acidentes de trânsito com vítimas no país em 2002, resultando em aproximadamente 19 mil vítimas fatais e 320 mil vítimas não fatais. O desenvolvimento de sistemas para auxiliar o condutor e informá-lo sobre as condições da pista pode contribuir significativamente para a diminuição do número de acidentes.

Nesta seção, será abordada a aplicação de técnicas de visão computacional em sistemas de apoio ao motorista e navegação autônoma. Serão focadas aplicações que estão sendo desenvolvidas para veículos inteligentes comerciais, mas os conceitos abordados podem ser estendidos para a navegação de robôs móveis em geral.

Embora câmeras estacionárias (fixadas em lugares estratégicos fora do veículo) também sejam utilizadas em sistemas de monitoramento de tráfego e sistemas de apoio ao motorista [Kastrinaki et al. 2003], este trabalho abordará aplicações que utilizam câmera e/ou outros sensores embarcados no veículo. Para o monitoramento da pista, pode ser utilizada visão monocular, através de uma câmera instalada no interior do veículo e alinhada com seu eixo central (conforme a Figura 4.23), ou visão estéreo, através de duas câmeras posicionadas nas laterais do veículo. A visão estéreo proporciona uma maior quantidade de informação, pois introduz a noção de profundidade; entretanto, a sincronia das câmeras introduz um problema adicional (e custo computacional extra). Outra questão a ser analisada se refere à utilização de câmeras coloridas ou monocromáticas: imagens coloridas contêm mais informação do que imagens em tons de cinza, mas seu processamento é mais demorado.

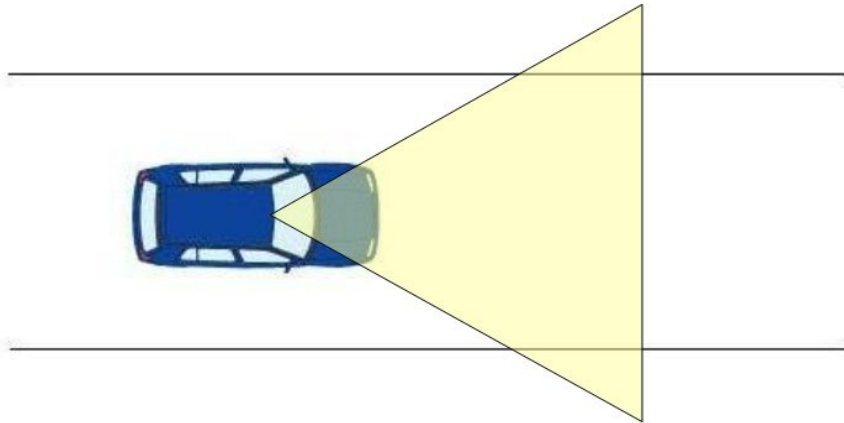


Figura 4.23: Veículo equipado com visão monocular

Na análise de seqüências de vídeo obtidas a partir de câmeras embarcadas, há uma série de fatores que podem complicadores (ou até impossibilitadores):

- **Falhas na Pintura:** há várias rodovias cuja pintura está gasta (ou mesmo apresentando lacunas), dificultando a determinação das fronteiras da pista;
- **Sombras:** árvores, prédios, pontes e outros veículos projetam sombra sobre a rodovia e outros veículos, alterando sua intensidade e textura;
- **Posição Solar:** a orientação solar pode causar saturação na imagem capturada pela câmera, ou provocar reflexos especulares;
- **Oclusão:** veículos trafegando na mesma rodovia podem ocluir parcialmente ou totalmente a visão da câmera;
- **Condições Climáticas:** fenômenos da natureza (como neblina, chuva ou neve) podem degradar significativamente a qualidade das imagens adquiridas.

Alguns desses fatores são ilustrados na Figura 4.24. Figura 4.24(a) ilustra a quase inexistência de pintura na borda direita da pista, Figura 4.24(b) mostra a influência de sombras, Figura 4.24(c) mostra saturação causada por luz solar com incidência frontal, e Figura 4.24(d) mostra oclusão quase completa da marcação da pista.



Figura 4.24: exemplos de fatores que dificultam a detecção das bordas da pista.

A seguir, serão detalhados os problemas de detecção de saída de pista, detecção de obstáculos, detecção e reconhecimento de sinais de trânsito e navegação autônoma. Para cada um desses problemas, serão discutidos o tipo de câmera e a quantidade mais adequados.

4.5.1. Detecção de Saída de Pista

Um problema importante no contexto de sistemas de apoio ao motorista se refere ao desenvolvimento de sistemas de detecção de saída da pista. O objetivo principal de tais sistemas é monitorar a posição do veículo com relação às bordas da pista, e emitir um alarme se o veículo apresentar tendências de saída de pista. A detecção antecipada de cruzamentos de pista é fundamental para motoristas de ônibus e caminhões, que geralmente realizam viagens de longa duração e à noite, com alta possibilidade de sonolência ao volante.

Um pré-requisito para detecção de saída de pista é a identificação robusta das bordas da pista. Na grande maioria das aplicações envolvendo veículos inteligentes, isso significa detectar a pintura que demarca as bordas da pista de rolagem (embora em algumas aplicações como navegação autônoma de robôs seja necessária a análise de ambientes não estruturados). Algumas técnicas utilizam câmeras coloridas para a detecção da pista [Thorpe et al. 1988], mas a grande maioria das técnicas propostas recentemente utiliza imagens monocromáticas. Uma razão para isso é que a pintura da pista é normalmente branca, e o custo de processar imagens coloridas não compensa o ganho introduzido pela informação cromática. Alguns autores optaram pelo uso de visão estéreo [Bertozzi and Broggi 1998]; entretanto, a utilização de apenas uma câmera tem sido a opção mais utilizada na grande maioria das técnicas de detecção das bordas da pista, pois a noção de profundidade não adiciona informação relevante nesse problema.

Há diversas abordagens propostas na literatura. Entre as hipóteses mais comuns utilizada para a obtenção das fronteiras da pista, pode-se salientar [Bertozzi et al. 2002]:

- **Foco de atenção:** a análise de uma pequena porção da imagem diminui o custo computacional, mas a escolha da região de interesse pode ser um fator complicador.
- **Geometria da estrada:** a formulação de um modelo matemático para a geometria esperada da estrada resulta em modelos robustos com relação a artefatos na imagem, mas pode ser pouco flexível para aplicações em rodovias com estruturas distintas;

Diversos autores já exploraram as características acima, e utilizaram uma grande variedade de ferramentas de processamento de imagens e visão computacional para detecção da pista. A seguir, algumas técnicas são brevemente resumidas.

Kluge (1994) propôs uma técnica para estimar a orientação e curvatura de estradas com base nas bordas detectadas, sem a necessidade de agrupá-las em contornos. Tal proposta funciona bem quando até 50% dos pixels das bordas estão afetados por ruído, o que pode não ocorrer em diversas situações práticas.

Beucher e Bilodeau (1994) abordaram o problema de segmentação de estradas e detecção de obstáculos utilizando morfologia matemática. Sua técnica consiste em aplicar um filtro temporal (para remoção do ruído e conexão de pinturas pontilhadas), seguida de uma detecção de bordas e segmentação usando *watersheds*. O maior problema da segmentação por *watersheds* é a obtenção de contornos pouco suaves, o que praticamente impossibilita a estimativa de orientação e curvatura.

Outra classe de detectores de pista [Pomerleau 1995, Bertozzi and Broggi 1998, Broggi 1998] utiliza a vista de topo (*birds eye view*), obtida através da perspectiva inversa. Tais

técnicas trabalham com coordenadas de mundo (e não com coordenadas de imagem), e possibilitam uma estimativa robusta dos contornos da pista. Entretanto, há um custo computacional adicional para o cálculo da perspectiva inversa para todos os quadros da seqüência de imagens, além da necessidade de calibração da(s) câmara(s).

Vários modelos para as fronteiras da pista foram e vêm sendo propostos na literatura [Enkelmann et al. 1995, Wang et al. 1998, Wang et al. 2000, Risack et al. 2000, Park et al. 2003, Wang et al. 2004]. Tais técnicas assumem que a pista possui uma característica geométrica específica, e curvas matemáticas (como modelos lineares, parabólicos ou splines) são ajustadas às imagens adquiridas. Em geral, curvas com um número maior de graus de liberdade são mais maleáveis, mas também mais sensíveis ao ruído. Por outro lado, curvas mais simples não fornecem um ajuste tão exato, mas são mais robustas com relação à presença de ruído/artefatos. A grande vantagem de usar um modelo suave de curva para segmentar a pista é a possibilidade de obter facilmente informações com respeito à orientação e à curvatura da pista. Tais informações são cruciais no desenvolvimento de um sistema de detecção de saída de pista.

Jung e Kelber (2004b) propuseram um modelo linear-parabólico para as fronteiras da pista. A parte linear do modelo é utilizada no campo de visão próximo à câmara, e a parte parabólica se ajusta à região mais distante. Tal modelo combina a flexibilidade do modelo quadrático com a robustez do modelo linear.

Para a detecção de saída de pista, é necessária informação sobre a posição e/ou orientação do veículo com relação ao centro da pista e/ou suas bordas. Essa análise pode ser realizada em coordenadas de mundo ou em coordenadas de imagem. O uso de coordenadas de mundo fornece informação sobre deslocamento e/ou orientações reais do veículo, que podem ser quantificados em distâncias ou ângulos; entretanto, é necessária a calibração da câmara para obtenção de tais coordenadas. Por outro lado, a utilização somente das coordenadas de imagem não requer conhecimento a priori sobre o tipo/posição da câmara. A seguir, algumas técnicas de detecção de saída de pista são brevemente comentadas.

LeBlanc et al (1996) propuseram um sistema de prevenção de saída de pista. Tal sistema estima a trajetória do veículo e compara com a geometria da estrada obtida por visão computacional, e calcula o tempo para cruzamento de pista (TLC, ou Time for Lane Crossing). Risack et al. (2000) combinaram informação de visão e radar para estimar o TLC e antecipar saídas de pista, com resultados interessantes. Entretanto, ambos sistemas requerem calibração de câmara para a obtenção de coordenadas de mundo.

Lee (2002) propôs um sistema de detecção de saída de pista, que estima a orientação das bordas da pista usando uma função de distribuição de bordas (*edge distribution function*, ou EDF). As mudanças de orientações são utilizadas para calcular o desvio com relação ao centro da pista. Embora essa técnica funcione satisfatoriamente para estradas bem pintadas, a estimativa da orientação pode falhar se a pintura for fraca e/ou com marcas de pintura espaçadas, o que é bem comum em estradas brasileiras. Bem recentemente, Lee et al (2003) propuseram uma modificação introduzindo um extrator de pixels de borda, aumentando a robustez da técnica. Entretanto, falhas ainda podem ocorrer durante curvas, pois um modelo linear de contorno é utilizado.

Pesquisadores da Volkswagen [Weiss et al. 2004] utilizaram sensores de radar, visão e laser para detecção de trocas de faixa de rodagem. Claramente esta é uma solução economicamente inviável, dado o alto custo dos sensores a laser.

Jung e Kelber (2004a) utilizaram o modelo de pista linear-parabólico (2004b), e utilizaram a orientação fornecida pela parte linear para obter uma métrica de desvio de pista. Quando essa métrica ultrapassa um determinado limiar, um alarme de saída de pista é emitido. Um exemplo de detecção de saída de pista é mostrado na Figura 4.25. A evolução da métrica de desvio é ilustrada na Figura 4.25(a), e aumenta à medida que o veículo se aproxima da outra faixa. Figuras 4.25(b)-(e) ilustram alguns quadros da seqüência de vídeo na qual ocorre a saída de pista.

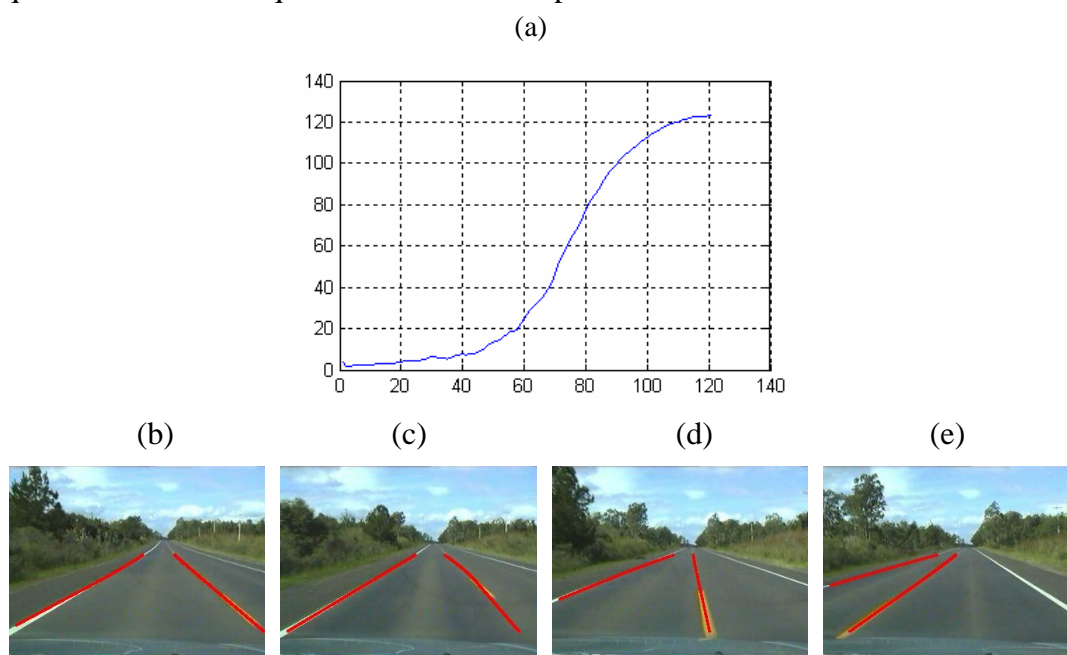


Figura 4.25: Exemplo de detecção de saída de pista. (a) Métrica proposta de desvio. (b)-(e) Alguns quadros na seqüência de vídeo.

Atualmente, alguns veículos comerciais já incorporam sistemas de detecção de saída de pista. Por exemplo, o Citroën C5 possui sensores infra-vermelhos na parte lateral inferior dos pára-choques, que informam ao motorista se o veículo está cruzando uma marcação da pista (o assento do condutor vibra). Esse sistema é relativamente simples, e alerta o motorista quando ele já está efetivamente cruzando a marcação da estrada (ou seja, o sistema não é capaz de antecipar o cruzamento). Algumas empresas como Valeo (<http://www.valeo.com/automotive-supplier/Jahia/lang/en/pid/889>) e Iteris (<http://www.iteris.com/av/avindex.html>) desenvolvem tecnologia baseada em visão computacional para antecipar saída de pista, mas não é de nosso conhecimento a utilização desses sistemas em veículos comerciais.

4.5.2 Detecção de Obstáculos

Um tipo freqüente de acidentes de trânsito é a colisão entre veículos e atropelamentos (ou seja, colisão de veículo com pedestres). Dessa forma, sistemas de rastreamento de objetos podem ser utilizados para detectar objetos em possível rota de colisão com o veículo, alertando o condutor. Embora algumas técnicas tratem do problema de

detecção de obstáculos de forma genérica, grande parte dos autores foca na detecção e rastreamento de objetos específicos (em geral, outros veículos ou pedestres), levando em consideração características geométricas particulares do objeto de interesse. Um exemplo de detecção de obstáculos [Beucher and Bilodeau 1994] pode ser observado na Figura 4.26, e se refere ao projeto europeu Prometheus (http://cmm.ensmp.fr/~beucher/prom_sta.html). Também deve-se salientar que na navegação autônoma de robôs em ambientes não estruturados, caracteriza-se como obstáculo qualquer objeto que possa atrapalhar o movimento do robô.

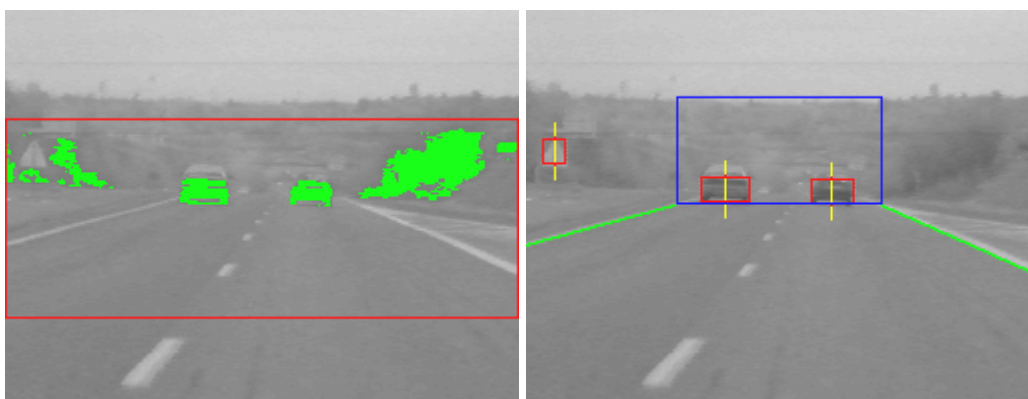


Figura 4.26: exemplo de detecção de obstáculos

Entre as abordagens mais populares para a detecção de obstáculos, podem ser citadas [Bertozzi et al. 2002]:

- **Análise de imagens estáticas:** normalmente possibilitam um processamento rápido, e independem do movimento do veículo; por outro lado, não exploram a continuidade temporal no movimento do obstáculo.
- **Fluxo óptico:** permite a detecção de obstáculos genéricos e o cálculo de velocidades relativas, mas normalmente demandam um custo computacional alto e são sensíveis a movimentos do veículo e calibragem de câmera.
- **Visão estéreo:** introduzem a noção de profundidade, permitindo a reconstrução de objetos 3D; entretanto, apresentam um custo computacional complexo, e são sensíveis a parâmetros de câmera.
- **Reconhecimento de objetos por forma:** o conhecimento *a priori* da forma dos objetos a serem detectados geralmente acarreta em detecções mais robustas, com poucos falsos positivos; por outro lado, técnicas baseadas em modelos são pouco genéricas.

Além disso, outros sensores como radar [Beauvais and Lakshmanan 2000] e laser [Stiller et al. 2000] podem ser combinados com a informação visual, com a vantagem de proverem informação sobre a distância dos objetos detectados. Por outro lado, a introdução de outros sensores tem um custo financeiro associado (o valor de um sensor a laser custa dezenas de milhares de dólar), além da dificuldade e custo computacional para realizar a fusão de dados. A seguir, algumas técnicas de visão computacional para detecção de obstáculos são brevemente comentadas.

As abordagens de Bertozzi et al (1997) e Thomanek et al. (1994) procuram padrões específicos na imagem (como forma e simetria) para detecção de obstáculos. Entretanto,

a informação das bordas da pista não é utilizada para reduzir o espaço de busca, acarretando um custo computacional elevado.

Dentro do contexto do projeto ARGO, Fascioli e Broggi (1999) desenvolveram uma técnica para detecção de objetos baseada em visão binocular. Basicamente, a técnica consiste em desfazer a perspectiva em cada uma das imagens, e calcular as disparidades entre elas nas imagens remapeadas. Embora seja rápido, o sistema apresenta pouca sensibilidade a obstáculos em algumas regiões (e.g. nas laterais da imagem), causando erros de detecção devido a ruído ou desvios na calibração das câmeras.

Stein et al. (2000) e Alix et al. (2003) assumem um modelo plano de estrada, e se baseiam nesse modelo para detecção de possíveis obstáculos. A técnica em [Stein et al. 2000] utiliza um modelo probabilístico para detectar estruturas situadas fora desse plano, que são consideradas obstáculos em potencial. O método em [Alix et al. 2003] usa uma formulação homográfica para o fluxo de pixels entre quadros consecutivos, detectando objetos fora do plano da estrada (que são os candidatos a obstáculos). Claramente, tais técnicas encontram limitações em aclives ou declives.

Chuanjin et al. (2003) desenvolveram um algoritmo baseado em visão monocular para a detecção de obstáculos. Um filtro de Kalman é utilizado para o rastreamento de objetos, e um modelo geométrico tridimensional da estrada é estimado para obtenção da distância do objeto detectado.

Demonceaux e Kachi-Akkouche (2004) também utilizaram visão monocular para detecção de obstáculos. Nessa abordagem, o movimento da estrada com relação ao veículo é calculada através da transformada *wavelet*, e regiões com diferentes padrões de movimento são detectadas estatisticamente. Embora rápido, o método proposto não permite estimativas de distância e velocidade em coordenadas de mundo.

No contexto do projeto PROTECTOR, pesquisadores da DaimlerChrysler [Gavrila et al. 2004] desenvolveram um sistema para detecção de pedestres baseado em visão estéreo. Um mapa de profundidades é calculado inicialmente e algoritmos de busca por forma são utilizados para detectar os pedestres. Finalmente, o *bounding box* de cada pedestre é utilizado para o rastreamento ao longo do tempo. Um exemplo de detecção desta técnica é ilustrado na Figura 4.27.



Figura 4.27: Exemplo de detecção de pedestres pelo sistema Protector

O problema de detecção de obstáculos também vem sendo abordado por empresas comerciais. Por exemplo, a alemã Aglaia (<http://www.aglaia-gmbh.de/english/start.html>) oferece soluções baseadas em visão artificial para a detecção de obstáculos em aplicações automotivas.

4.5.3 Detecção e Reconhecimento de Sinais de Trânsito

Uma outra característica desejável para sistemas de apoio ao motorista é a inclusão de técnicas de detecção e reconhecimento de sinais de trânsito. Dessa forma, as placas de trânsito seriam monitoradas continuamente, e o condutor seria informado sobre as condições da pista à frente (e.g. velocidade máxima permitida, curva acentuada, sinal de parada obrigatória, etc.). Para a implementação de tal característica, dois passos são necessários:

1. **Detecção:** nesta etapa, os sinais de trânsito são segmentados e isolados do fundo da imagem;
2. **Reconhecimento:** nesta etapa, os sinais de trânsito previamente segmentados são reconhecidos, normalmente através de uma busca em um banco de dados existente.

No contexto de detecção de sinais de trânsito, a informação cromática tem um papel fundamental. O Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), cuja denominação atual é Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes (DNIT), do Brasil, divide a sinalização de trânsito brasileira em seis classes: Placas de Advertência; Placas Educativas; Placas de Indicação; Placas de Obras; Placas de Regulamentação; e Placas de Serviços Auxiliares. Em geral, essas placas possuem cor, geometria e tamanhos específicos, conforme ilustrado na Figura 4.28.



Figura 4.28: Exemplos de sinais de trânsito brasileiros

Embora não seja do nosso conhecimento a existência de um sistema de detecção e reconhecimento voltado a sinais de trânsito brasileiros, diversos pesquisadores no mundo inteiro vêm propondo soluções para este problema, explorando informações como cor e geometria contextualizadas para as regras de sinalização de seus países. Para a análise da informação cromática, diversos espaços de cores já foram utilizados.

Embora o espaço RGB tenha sido explorado por alguns autores [de la Escalera et al. 1997, Buluswar and Draper 1998], o espaço HSI (ou HSV) tem sido mais popular [Piccioli et al. 1996, de la Escalera et al. 2003, Fang et al. 2003], devido a sua maior similaridade com o sistema visual humano.

De uma certa forma, o problema de detecção de sinais de trânsito pode ser encarado como um caso particular do problema de detecção de obstáculos, cuja região de busca é geralmente uma vizinhança nas laterais das fronteiras da pista. Embora o conhecimento a priori da cor e da geometria dos sinais de trânsito facilite os processos de detecção e reconhecimento, os seguintes fatores complicadores são encontrados no cotidiano:

- Diferenças de iluminação devidas à posição solar e/ou sombras devem ser levadas em consideração na análise cromática das imagens;
- Diferenças no ângulo de visão e distância entre a câmera e a placa de trânsito mudam a geometria e a escala esperada da placa na imagem projetada.

Além disso, um problema adicional na detecção de sinais de trânsito brasileiros é a degradação/má conservação da sinalização nas rodovias nacionais. São comuns placas de trânsito com a pintura gasta, enferrujadas ou até mesmo pichadas. A seguir, algumas técnicas de detecção e reconhecimento de sinais de trânsito propostas por pesquisadores de diversos países serão brevemente descritas (deve-se notar que algumas delas utilizam informações específicas sobre cor e geometria da sinalização de trânsito de seus países).

Fang e colaboradores (2003) estudaram o problema de detecção e rastreamento de sinais de trânsito em seqüências de vídeo. Inicialmente, duas redes neurais são utilizadas feições de cor (no espaço de cores HSI) e forma, que são utilizadas para a detecção das placas. Nos quadros seguintes do vídeo, um filtro de Kalman é utilizado para rastrear os sinais de trânsito detectados. Os resultados apresentados pelos autores demonstraram detecção e rastreamento eficientes para diferentes condições de iluminação e situações climáticas.

O grupo de Escalera [de la Escalera et al. 2003] utilizou algoritmos genéticos e redes neurais para a detecção e reconhecimento de sinais de trânsito. Na fase de detecção, um algoritmo de limiarização no espaço de cores HSI é utilizado para achar pré-candidatos, e algoritmos genéticos são aplicados para a segmentação individual das placas. A seguir, redes neurais são utilizadas na fase de reconhecimento, classificando as placas segmentadas em um banco de imagens previamente armazenado. Exemplos de detecção de sinais de trânsito são mostrados na Figura 4.29. Apesar dos bons resultados obtidos por esta técnica, a combinação com um detector de pista pode ser utilizada para reduzir o espaço de busca.



Figura 4.29: Exemplo de detecção de sinais de trânsito pela técnica de Escalera et al. (2003)

Barnes e Zelinsky (2004) desenvolveram uma técnica rápida para detecção e reconhecimento de sinais de trânsito (em particular, para sinais de limite de velocidade). Eles exploram a simetria radial das placas (através de um detector rápido de simetria) para a segmentação das placas em tons de cinza, e utilizam a correlação cruzada normalizada (NCC) em cada canal cromático na fase de reconhecimento. Embora essa técnica seja de fato rápida, ela é bastante limitada, pois assume o formato circular para placas de trânsito.

A empresa Aglaia, que já foi citada neste trabalho por estudar a detecção de obstáculos, também desenvolve soluções para detecção e reconhecimento de sinais de trânsito (http://www.aglaia-gmbh.de/english/rooms/picroom_prototypen_verkehrszeichenerkennung.html).

4.5.4 Navegação Visual

A navegação visual é um processo que permite controlar o deslocamento de um veículo autônomo (robô móvel) baseando-se principalmente em um conjunto de imagens de referência capturadas previamente do caminho a ser percorrido. Várias propostas são encontradas na literatura [Matsumoto et al. 1996, Jones et al. 1997, Hu and Uchimura, 2002, Matsumoto et al. 1999, Gross et al. 2003], descrevendo sistemas que permitem o controle do deslocamento de um robô, seguindo uma trajetória previamente especificada através de imagens, fazendo uso de *técnicas de navegação visual*.

Estes sistemas usualmente adquirem imagens de uma única câmera monocromática [Matsumoto et al. 1996], mas podem também ser adaptados para usar visão estéreo [Jones et al. 1997], câmeras omnidirecionais³ [Matsumoto et al. 1999, Gross et al. 2003], e câmeras com aquisição de imagens coloridas [Righes 2004]. O objetivo destes sistemas é buscar imitar um comportamento típico dos seres humanos: uma pessoa é capaz de ser conduzida por um caminho, armazenar em sua memória o caminho percorrido, e em um momento posterior, realizar de modo autônomo novamente este mesmo caminho, baseando-se em suas lembranças da paisagem e de alguns pontos de referências memorizados.

Os sistemas de navegação visual usualmente são compostos de uma base de imagens, ou seja, uma seqüência de imagens capturadas a intervalos regulares, que descreve o caminho a ser percorrido. Esta seqüência pode ser “anotada”, incluindo a associação de ações a serem realizadas quando uma certa posição for alcançada (e.g.: avançar x metros em frente, girar θ graus à esquerda). Esta seqüência é a “memória do caminho” que o robô possui. O processo de navegação inicia pela captura de uma imagem a partir da câmera do robô, identificando a seguir qual imagem na base de imagens é a mais similar à imagem capturada, ou então, pode também ser considerada uma imagem inicial como sendo o ponto de partida. A partir da comparação entre a imagem capturada pelo robô e a imagem atual, o robô determina o comando a ser executado. Este comando faz com que o robô gire (se ele estiver levemente deslocado para a esquerda, ou para a direita, em relação à imagem alvo atual), ou faz ele avançar até que ambas imagens estejam corretamente enquadradas (vide Figura 4.30). Após os ajustes de posição/orientação serem realizados, o robô executa o comando associado à imagem de referência atual, ou simplesmente continua avançando. A medida que o robô alcança o alvo, a imagem atual

³ Omnidirectional Vision - <http://www.cis.upenn.edu/~kostas/omni.html>

é trocada pela imagem seguinte da base de imagens e todo o processo se repete. Normalmente a comparação entre imagem capturada pelo robô e imagem atual da base de imagens é feita usando técnicas como a correlação cruzada normalizada – NCC [Martin, J. and Crowley, J. L. 1995].

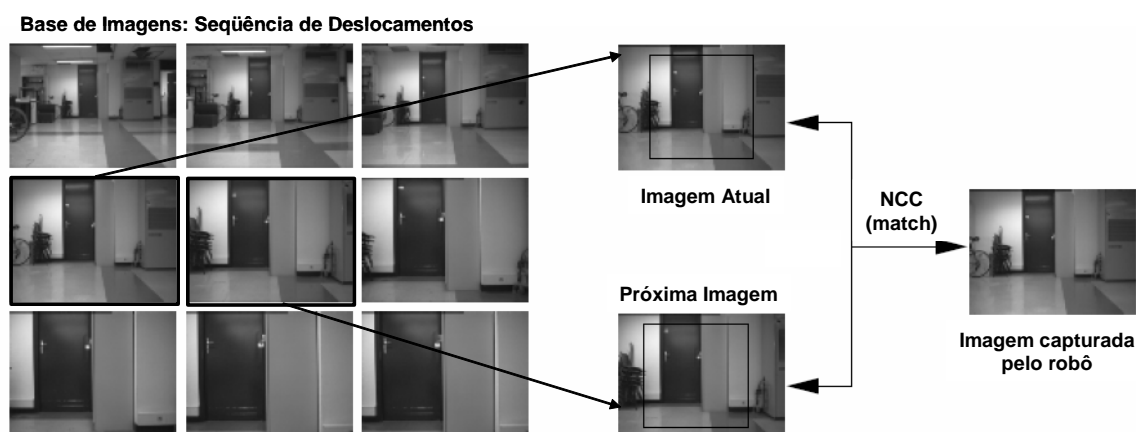


Figura 4.30: Navegação baseada em imagens [Jones et al. 1997]

Esta técnica vem sendo aperfeiçoada e mais recentemente foram propostas melhorias de modo a usar sistemas de visão omnidirecional, o que garante uma quantidade adicional de informações e de referências sobre a posição atual do robô, assim como permite que o caminho possa ser navegado nos dois sentidos, ida e volta, usando apenas uma única seqüência de imagens [Matsumoto et al. 1999]. Encontram também disponíveis alguns trabalhos que propõem a identificação de pontos de referência na imagem (sub-imagens, fragmentos ou *SIFT features*) [Se 2002, Righes 2004], ao invés de se usar toda imagem.

4.6 Aplicações Práticas: estudos de caso

O Grupo de Pesquisas em Veículos Autônomos (GPVA) da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS - desenvolveu um sistema de automação veicular baseado em uma plataforma de Mini-Baja.



Figura 4.31: Mini-Baja com Tecnologia *drive-by-wire*

O veículo foi modificado para garantir a implementação da tecnologia *drive-by-wire*, tendo uma rede com CLPs Altus como base eletrônica. Uma vez automatizados os sistemas de aceleração, frenagem e direção, o veículo pode ser dirigido a partir de sinais eletrônicos. Diferentes interfaces-homem-máquina foram testadas, dentre elas um

joystick e um sistema remoto com comandos enviados via telefone celular, apresentados na Figura 4.31 [Kelber 2003b]. Visando garantir uma maior estabilidade dinâmica do veículo guiado por *joystick*, também foi desenvolvido um módulo eletrônico de compensações das oscilações laterais do carro para altas velocidades [Kelber 2004].

Dentre os projetos universitários de destaque encontram-se os protótipos desenvolvidos por universidades norte-americanas, que participaram do *Grand DARPA Challenge 2004 – Autonomous Ground Vehicles*, patrocinado pelas forças armadas daquele país. A tarefa consistia em um veículo terrestre realizar um percurso de 300km de forma completamente autônoma. A equipe do primeiro veículo que completasse o trajeto receberia um prêmio de um milhão de dólares. Entretanto, o veículo que foi mais longe não percorreu mais do que 14km, mesmo tendo custado o triplo do valor do prêmio.



Figura 4.32: Grand DARPA Challenge 2004 – Autonomous Ground Vehicles

A montadora de veículos BMW está desenvolvendo, através do seu grupo de pesquisas, uma série de dispositivos inovadores que facilitarão a vida dos motoristas, proporcionando conforto e tranquilidade ao dirigir e principalmente aumentando a segurança no trânsito: o Projeto *Connected Drive*. Neste projeto de comunicação veicular o computador de bordo pode, dentre as diversas funções, solicitar através da Internet uma reserva de vaga em um edifício garagem, ligar/desligar qualquer aparelho na casa do usuário, caso esta também esteja automatizada, e até mesmo posicionar o volante do veículo em manobras de estacionamento em vagas paralelas, como indicado na Figura 4.33.

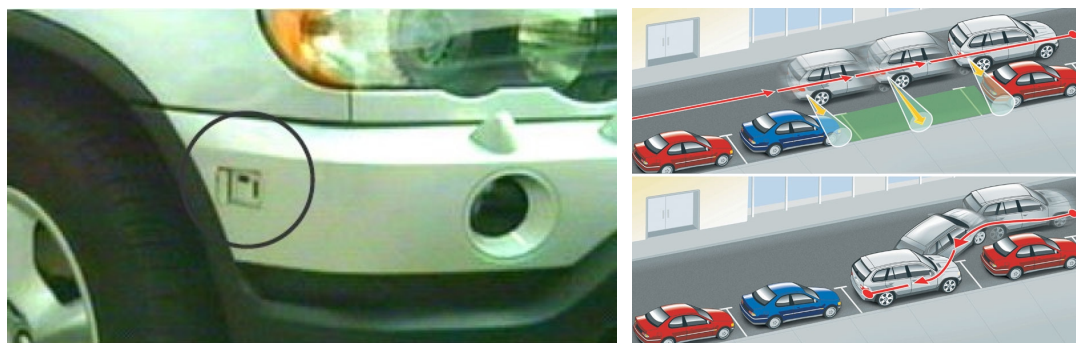


Figura 4.33: Projeto Connected Drive (BMW) – automatização da manobra de estacionamento em vagas paralelas

No setor de cargas o primeiro foco da automação veicular encontra-se na automatização dos veículos de carga e descarga. Destacam-se aqui os projetos desenvolvidos pelas

empresas alemãs FOX GmbH e Goetting KG. Como exemplos, ilustrados na Figura 4.34, destacam-se retroescavadeiras e empilhadeiras portáteis, que podem ser transportadas sob a carreta de um caminhão e que minimizam o tempo de carga e descarga, bem como o uso extensivo de mão de obra para esta função.



Figura 4.34: Veículos de carga e descarga automatizados [Goetting 2001]

No setor de transporte de cargas a empresa alemã Daimler-Chrysler destaca-se como líder no investimento de sistemas de apoio ao motorista. Como exemplo pode ser citado o projeto *Promote-Chauffeur*, ilustrado na Figura 4.35, a partir do qual caminhões foram dotados com sistemas de alerta de saída de pista baseados em visão computacional, bem como de sistemas anti-colisão. Os caminhões também podem trafegar em comboios autônomos, onde apenas um motorista é necessário no caminhão da frente. Com base nesta tecnologia o transporte de cargas pode ser realizado de forma mais eficiente, uma vez que, enquanto um motorista descansa, o outro dirige o comboio, não sendo necessários, portanto, dois motoristas para cada caminhão ou paradas longas para descanso do caminhoneiro.



Figura 4.35: Projeto *Promote-Chauffeur* (Daimler-Chrysler)– caminhões em comboio

Um dos projetos de grandes proporções na área de automação veicular foi realizado na Alemanha pela empresa Volkswagen em parceria com alguns fornecedores e com pesquisadores da Technische Universität Braunschweig. Neste trabalho um veículo de testes foi automatizado com inúmeros sensores de diferentes tipos e, como atuador, foi construído um robô condutor, que encontra-se ao volante no lugar do motorista, como ilustra a Figura 4.36. Este robô substitui pilotos de prova que testam veículos em

condições extremas, para ensaios de durabilidade e resistência, nas pistas de teste da empresa.



Figura 4.36: Projeto Autonomes Fahren (Volkswagen) – robô motorista

Não se pode, entretanto, prever se os veículos serão, no futuro, completamente autônomos. Diferentes diretrizes, que seguem em direções opostas, devem ser discutidas e estabelecidas pela sociedade. Se, por um lado, a diretriz básica for a segurança total nas estradas, então o fator humano deve ser minimizado e os veículos deverão seguir de forma autônoma seus caminhos. Por outro lado, esta decisão elimina a liberdade individual de dirigir e sentir prazer ao dirigir, uma vez que o condutor não tomaria mais as decisões conforme sua vontade, necessitando apenas indicar ao computador o destino da viagem. Este conflito de diretrizes já pode ser notado ao serem comparados os motoristas das sociedades norte-americana, alemã, italiana e brasileira. Enquanto os norte-americanos e alemães dão preferência ao câmbio automático, a maioria dos italianos e brasileiros prefere o câmbio manual, pois gostam de ter total “domínio” sobre *la machina*.

Da mesma forma, a sociedade deverá definir qual o fator mais importante num sistema de transporte: capacidade de transporte ou conforto individual. Com base nas atuais condições de trânsito das grandes cidades fica evidente a necessidade de um sistema efetivo de transporte em massa. Entretanto, o principal fator que vai na direção contrária desta diretriz é a liberdade individual de poder ir a qualquer lugar e a qualquer hora de forma extremamente confortável. Mas, por outro lado, as ruas e avenidas das grandes cidades não comportarão mais um aumento expressivo no número de veículos, o que faz a decisão recair na diretriz de aumento da capacidade de transporte. Tal sistema integrado de transporte irá requerer conceitos diferentes das estruturas existentes nos dias de hoje, devendo possuir alta flexibilidade de horário além de proporcionar conforto aos passageiros.

A evolução dos sistemas de automação veicular vem causando um aumento significativo na complexidade dos veículos que, dependendo do modelo, já contam com um grande número de motores elétricos de todos os tamanhos, controlados através de circuitos envolvendo microeletrônica e eletrônica de potência, diversos e diferentes sistemas de rede de computadores, elevado número de microcontroladores e sensores, entre outros sistemas. Esta tendência na automação veicular necessitará de profissionais com conhecimentos de diferentes áreas além das engenharias mecânica e de produção,

como engenharia elétrica com amplo conhecimento em microeletrônica, eletrônica de potência, automação, sistemas de comunicação, redes de computadores, instrumentação e controle, bem como uma excelente base de informática, imprescindível para implementação dos algoritmos dos sistemas de apoio ao motorista, baseados em Inteligência Artificial, além da interligação de todos os sistemas do veículo. Os projetos tendem a serem realizados cada vez mais por equipes multidisciplinares, que deverão trabalhar em grupo desde o início do desenvolvimento dos sistemas

Referências

- Advocate Project. (2005). *European ESPRIT Project – AdvocateI and AdvocateII: Underwater Robotics Fault Diagnosis*. Web: <http://www.advocate-2.com> e http://www.advocate-2.com/intelligent_monitoring/nss_robots.htm (acessado em maio de 2005)
- Alix, R., Coat, F. L., and Aubert, D. (2003). Flat world homography for non-flat world on-road obstacle detection. In *Proceedings of IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, pages 310–315, Columbus, USA.
- Álvares, L.O. e Sichman, J. (1997). Introdução aos Sistemas Multiagentes. *XVII Congresso da SBC - Anais JAI'97*. Brasília, DF.
- Alves, Flávio O. (2004) Reconhecimento Inteligente de Sinais de Trânsito Brasileiros.. Unisinos * Informática, Trabalho de Conclusão de Curso (TCC). São Leopoldo, RS.
- Alves, F. e Osorio, F.S. (2005). Aplicação da Abordagem SMPA para a Navegação de um Robô Móvel Autônomo. *XXII Congresso da SBC – ENIA 2003*. Campinas – SP.
- Barnes, N. and Zelinsky, A. (2004). Real-time radial symmetry for speed sign detection. In *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, pages 566–571, Parma, Italy.
- Beauvais, M. and Lakshmanan, S. (2000). Clark: a heterogeneous sensor fusion method for finding lanes and obstacles. *Image and Vision Computing*, 18(5):397–413.
- Becker, J. Simon, A., Söhnitz, I., Göllinger, H., Schumacher, W., (1998) “A Decentralized Path Planning and Control Structure for an Autonomous Vehicle”, In *Proceeding of the IV '98. IEEE International Conference on Intelligent Vehicles*. Stuttgart, Germany; October.
- Becker, J.C. (1999) “Fusion of Data from Object-Detecting Sensors of an Autonomous Vehicle”, In *Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems*. Tokyo, Japan. Bertozzi, M. and Broggi, A. (1998). GOLD: A parallel real-time stereo vision system for generic obstacle and lane detection. *IEEE Transactions on Image Processing*, 7(1):62–81.
- Bertozzi, M., Broggi, A., and Castelluccio, S. (1997). A real-time oriented system for vehicle detection. *Journal of System Architecture*, 43:317–325.
- Bertozzi, M., Broggi, A., Cellario, M., Fascioli, A., Lombardi, P., and Porta, M. (2002). Artificial vision in road vehicles. *Proceedings of the IEEE*, 90(7):1258–1271.

- Beucher, S. and Bilodeau, M. (1994). Road segmentation and obstacle detection by a fast watershed transformation. In *Proceedings of IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, pages 296–301.
- Birch, S. (2003). “Enhanced lighting one of BMW research focuses”. In *AEI – focus on electronics*, pp. 97- 102, Feb. 2003.
- Broggi, A. (1998). Vision-based driving assistance. *IEEE Expert*, 13(6):22–23.
- Brooks, R. A. (1986). A robust Layered Control System for a Mobile Robot. *IEEE Journal of Robotics and Automation*. RA-2, p. 14-23.
- Brooks, R. A. (1991). Intelligence without reason. *Proceedings of the IJCAI - International Joint Conference on Artificial Intelligence*, pages 569-595.
- Buluswar, S. and Draper, B. (1998). Color recognition in outdoor images. In *International Conference on Computer Vision*, pages 171–177.
- Chuanjin, L., Xiaohu, Q., Xiyue, H., Yi, C., and and, Z. X. (2003). A monocular-vision-based driver assistance system for collision avoidance. In *Proceedings of IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems*, pages 463–468.
- de la Escalera, A., Armingol, J. M., and Mata, M. (2003). Traffic sign recognition and analysis for intelligent vehicles. *Image and Vision Computing*, 21(3):247–258.
- de la Escalera, A., Moreno, L., Salichs, M., and Armingol, J. (1997). Road traffic sign detection and classification. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 44(6):848–859.
- Demonceaux, C. and Kachi-Akkouche, D. (2004). Robust obstacle detection with monocular vision based on motion analysis. In *Proceedings of IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, pages 527 – 532.
- DENATRAN - Anuário estatístico de acidentes de trânsito (2002). Annual report, DENATRAN. <http://www.denatran.gov.br/acidentes.htm>.
- Deuker B., Perrier M., and Amy B., (1998). Fault Diagnosis of Undersea Robots Using Neuro-Symbolic Hybrid Systems, In: *Proceedings of OCEANS'98*, Nice.
- Dudek, G. and Jenkin, M. (2000). *Computational Principles of Mobile Robotics*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Garcia, A. C. B. e Sichman, J. (2003). Agentes e Sistemas MultiAgentes. In: *Sistemas Inteligentes: Fundamentos e Aplicações* (Coord. Solange Rezende). Editora Manole, SP.
- Gross, H.-M., Koenig, A., Schroeter, C., and Boehme, H.-J. (2003). Omnivision-based probabilistic self-localization for a mobile shopping assistant continued. In: *Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ - International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Las Vegas, Nevada. USA.
- Enkelmann, W., Struck, G., and Geisler, J. (1995). ROMA: A system for model-based analysis of road markings. In *Proceedings of IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, pages 356–360, Detroit, USA.
- Fang, C.-Y., Chen, S.-W., and Fuh, C.-S. (2003). Road-sign detection and tracking. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 52(5):1329–1341.

- Fascioli, M. B. A. and Broggi, A. (1999). Performance analysis of a low-cost solution to vision-based obstacle detection. In *Proceedings of IEEE/IEEJ/JSAI International Conference on Intelligent Transportation Systems*, pages 350–355.
- Fleetnet – Inter-Vehicle Communication. <http://www.et2.tu-harburg.de/fleetnet/>
- Gavrila, D., Giebel, J., and Munder, S. (2004). Vision-based pedestrian detection: the protector system. In *Proceedings of IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, pages 13–18, Parma, Italy.
- Guldner, J., (1999) “Regelungstechnische Betrachtungen zur automatischen Lenkung von Kraftfahrzeugen”, *Automatisierungstechnik*, Vol.47, No.11.
- Goetting, H.H. (2001). FOX GmbH: Automatisierte Fahrzeuge. <http://www.foxit.de>
- Heinen, F and Osório, F. (2002a). Sistema de Controle Híbrido para Robôs Móveis Autônomos. *Workshop de Teses e Dissertações em Inteligência Artificial*, Porto de Galinhas, Brazil.
- Heinen, F. J. (2000). *Robótica Autônoma: Integração entre Planificação e Comportamento Reativo*. Série Produção Discente, Editora Unisinos. São Leopoldo, RS. Web: <http://ncg.unisinos.br/robotica/> (acessado: maio de 2005)
- Heinen, Farlei J. (2002). Sistema de Controle Híbrido para Robôs Móveis Autônomos. *Unisinos – PIPCA – Dissertação de Mestrado em Computação Aplicada*. São Leopoldo, RS. Web: <http://inf.unisinos.br/~osorio/alunos/mestrado/> (acessado: maio de 2005)
- Heinen, Farlei; Osório, Fernando Santos. (2002b). HyCAR - A Robust Hybrid Control Architecture for Autonomous Robots. In: *HIS 2002 - Hybrid Intelligent Systems*, 2002, Santiago do Chile. Published in *Soft-Computing Systems - Design, Management and Applications*. *Frontiers in Artificial Intelligence and Applications Series*. Amsterdam: IOS Press. V. 87, p. 830-840.
- Heinen, F.J.; Kelber, C.R.; Jung, C.R.; Osório, F.S.; (2004) "Navegação de Veículos de Carga Autônomos utilizando Visão Computacional com Algoritmo de Segmentação por Cores" In: *Anais do 4. Congresso Internacional de Automação, Sistemas e Instrumentação*; São Paulo, Brasil, 23-25 November.
- Hu, Z. and Uchimura, K. (2002). Dynamical road modeling and matching for direct visual navigation. In: *Proceedings of the 6th IEEE Workshop on Applications of Computer Vision (WACV'02)*.
- Ishida, S.; Gayko, J. E.; (2004) "Development, Evaluation and Introduction of a Lane Keeping Assistance System"; In *Proceeding of the 2004 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*; Parma, Itália, 14-17 June
- Jones, S. D., Andersen, C. S., and Crowley, J. L. (1997). Appearance based processes for visual navigation. In: *IROS'97 – Proceedings of the IEEE Intelligent Robots and Systems Conference*, Vol. 2, pp. 551-557.
- Jung, C. R. and Kelber, C. R. (2004a). A lane departure warning system based on a linear-parabolic lane model. In *Proceedings of IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, pages 891–895, Parma, Italy.

- Jung, C. R. and Kelber, C. R. (2004b). A robust linear-parabolic model for lane following. In *Proceedings of SIBGRAPI*, pages 72–79, Curitiba, PR.
- Kastrinaki, V., Zervakis, M., and Kalaitzakis, K. (2003). A survey of video processing techniques for traffic applications. *Image and Vision Computing*, 21(4):359–381.
- Kelber, C.R., Dreger, R.S., Schirmbeck, J., Borges, D.A.; (2002) "Non-Linear Steering Control Strategy for an Optical Stripe Tracker"; In *Proceeding of the IEEE / AMC'02 - 7th International Workshop on Advanced Motion Control*; Maribor, Slovenia, July.
- Kelber, C.R.; Osório, F.S.; Jung, C.R.; Heinen, F.J.; Dreger, R.S.; Gules, R.; Mello Jr., C.D.; Silveira, M.A.; Schumacher, W.; (2003a) "Tecnologias para Automação Veicular - Soluções em Mecatrônica e Sistemas de Apoio ao Motorista"; *Engenharia - Estudos Tecnológicos*; ISSN 1517-3615, Vol. XXIII, No. 24, p.37-47.
- Kelber, C.R.; Dreger, R.S.; Gomes, G.K.; Webber, D.; Schirmbeck, J.; Netto, R.H.; Borges, D.A.; (2003b) "Cell-Phone Guided Vehicle, an Application based on a Drive-by-Wire Automated System"; In *Proceeding of the 2003 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*; Ohio, USA, 9-11 June.
- Kelber, C.R.; Webber, D.; Gomes, G.K.; Lohmann, M.A.; Rodrigues, M.S.; Ledur, D.; (2004) "Active Steering Unit with integrated ACC for X-by-Wire vehicles using a joystick as H.M.I."; In *Proceeding of the 2004 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*; Parma, Itália, 14-17 June.
- Kluge, K. (1994). Extracting road curvature and orientation from image edge points without perceptual grouping into features. In *Proceedings of IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, pages 109–114.
- K-Team. *K-Team Group - Robotic Platforms for Research and Education, Custom Developments*, Switzerland. <http://www.k-team.com/> (acessado: maio de 2005)
- Lages, U. (2004). "Laser Sensor Technologies for Preventive Safety Functions". In *Proceedings of ATA EL 2004*, Parma, Italy.
- Latombe, J. (1991). *Robot Motion Planning*. Kluwer Academic Publisger, Boston, MA.
- LeBlanc, D. J., G. E. Johnson, P. J. V., Gerber, G., Sonia, R. D., Ervin, R. D., Lin, C.-F., Ulsoy, A. G., and Pilutti, T. E. (1996). CAPC: A road-departure prevention system. *IEEE Control Systems Magazine*, 16:61–71.
- Lee, J. W. (2002). A machine vision system for lane-departure detection. *Computer Vision and Image Understanding*, 86(1):52–78.
- Lee, J. W., Kee, C.-D., and Yi, U. K. (2003). A new approach for lane departure identification. In *Proceedings of IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, pages 100–105, Columbus, OH.
- Maes, P. (1994). Modelling Adaptive Autonomous Agents. *Artificial Life Journal*. Edited by C. Langton, Vol. 1, No. 1 & 2, pp. 135-162, MIT Press.
- Manigel, J.; Leonhard, W.; (1992) "Vehicle Control by Computer Vision"; *IEEE Transactions on industrial electronics*, vol.39, no. 3, pp. 181-188, June

- Martin, J. and Crowley, J. L. (1995). Experimental comparison of correlation techniques. In: *Proceedings of the International Conference on Intelligent Autonomous Systems*, Karlsruhe, Germany.
- Matsumoto, Y., Ikeda, K., Inaba, M., and Inoue, H. (1999). Visual navigation using omnidirectional view sequence. In: *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*.
- Matsumoto, Y., Inaba, M., and Inoue, H. (1996). Visual navigation using view-sequenced route representation. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 83{88, Minneapolis, Minnesota.
- Medeiros, Adelardo A.D. (1998). A Survey of Control Architectures for Autonomous Mobile Robots. *JBCS - Journal of the Brazilian Computer Society*, special issue on Robotics, vol. 4, n. 3.
- Michel, Olivier. (1997). Khepera Simulator Homepage. (último acesso: maio de 2005). Web: <http://diwww.epfl.ch/lami/team/michel/khep-sim/>
- MIT-OCW. (2005). MIT OpenCourseWare, Techniques in Artificial Intelligence - <http://ocw.mit.edu/OcwWeb/Electrical-Engineering-and-Computer-Science/6-825Techniques-in-Artificial-IntelligenceFall2002/CourseHome/index.htm>
- NASA (2005). NASA Ames' Mission Simulation Facility (MSF). Web: <http://ic.arc.nasa.gov/projects/msf/index.html> (acessado: maio de 2005)
- Osório, F. S.; Heinen, F.; Fortes, L. (2002). Controle da Tarefa de Estacionamento de um Veículo Autônomo através do Aprendizado de um Autômato Finito usando uma Rede Neural J-CC. In: *VII Simpósio Brasileiro de Redes Neurais, 2002*, SBC - Porto de Galinhas - Recife.
- Osório, F. S.; Musse, S. R.; Santos, C. T.; Heinen, F.; Braun, A. e Silva, A.T. S. (2004). Ambientes Virtuais Interativos e Inteligentes: Fundamentos, Implementação e Aplicações Práticas. *XXIV Congresso da SBC – JAI 2004* (Jornadas de Atualização em Informática). Tutorial. Salvador, Bahia. Web: <http://inf.unisinos.br/~osorio/palestras/jai04-avii.html> (acessado: maio de 2005)
- Park, J., Lee, J., and Jhang, K. (2003). A lane-curve detection based on an LCF. *Pattern Recognition Letters*, 24(14):2301–2313.
- Parson, R.E.; Zhang, W.B. (1988); “Lateral Guidance Systems Requirements Definition”. In Program on Advanced Technology for the Highway – PATH Research Report, October.
- Piccioli, G., de Micheli, E., Parodi, P., and Campani, M. (1996). Robust method for road sign detection and recognition. *Image and Vision Computing*, 14(3):209–223.
- Pio, J. L. de Souza e Campos, M. F. M. (2003). Navegação Robótica. *XXII Congresso da SBC – Anais JAI'03*. Campinas, SP.
- Pomerleau, D. A. (1995). RALPH: Rapidly adapting lateral position handler. In *Proceedings of IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, pages 506–511, Detroit, USA.
- Projekt Fleetnet (2003): Smarte Netze – Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation kann den Verkehr sicherer machen. In *Hightech Report 1/2003*.

- Righes, Eduardo M. (2004), Processamento de Imagens para Navegação de Robôs Autônomos. Unisinos – Informática, Trabalho de Conclusão de Curso (TCC). São Leopoldo, RS. Disponível em: <http://inf.unisinos.br/~osorio/alunos/tcc/>
- Risack, R., Mohler, N., and Enkelmann, W. (2000). A video-based lane keeping assistant. In *Proceedings of IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, pages 506–511, Dearborn, MI.
- Russell, S. and Norvig, P. (1995). *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. Prentice-Hall Series in Artificial Intelligence, New Jersey.
- Santos, Cássia T. (2004). Um Ambiente Virtual Inteligente e Adaptativo baseado em Modelos de Usuário e Conteúdo. *Unisinos – PIPCA - Dissertação de Mestrado em Computação Aplicada*. São Leopoldo, RS. Web: <http://inf.unisinos.br/~cassiats/dissertacao/> (acessado: maio de 2005)
- Schumacher, W. (2002); “Stabilisierung der Rückwärtsfahrt von LKW-Aufliegern und Gliederzügen durch einen Regler.”; In *Automatisierungs- und Assistenzsysteme für Transportmittel - 2. Braunschweiger Symposium*, TU-Braunschweig, 20-21 Februar 2002. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 460, 2002, ISBN 3-18-346012-2.
- Se, Stephen; Lowe, David and Little, Jim. (2002) Mobile Robot Localization and Mapping with Uncertainty using Scale-Invariant Landmarks. *International Journal of Robotics Research*, Vol.21, No. 8, August 2002. pp.735-758.
- Silva Júnior, Edson Prestes (2003). Navegação Exploratória baseada em Problemas de Valores de Contorno. UFRGS – PPGCC – Tese de Doutorado. Porto Alegre, RS.
- Simon, A.; Becker, J., (1999) “Vehicle Guidance for an Autonomous Vehicle”, In *Proceeding of the IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems*. Tokyo, Japan; 5-8 October.
- Simon, A., Söhnitz, I., Becker, J., Schumacher, W.; (2000) “Navigation and Control of an Autonomous Vehicle”, In *Proceeding of the 9th IFAC Symposium on Control in Transportation Systems*. Braunschweig; 13-15 June.
- Söhnitz, I., Schwarze, K., (1999) “Lateral Control of an Autonomous Vehicle: Design and First Practical Results”, In *Proceeding of the IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems*. Tokyo, Japan; 5-8 October.
- Söhnitz, I. (2001); "Querregelung eines autonomen Strassenfahrzeugs"; *Fortschritt-Berichte VDI*, Reihe 8, Nr. 882.
- Stein, G. P., Mano, O., and Shashua, A. (2000). A robust method for computing vehicle ego-motion. In *Proceedings of IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, pages 362 – 368, Dearborn, USA.
- Stiller, C., Hipp, J., Rössig, C., and Ewald, A. (2000). Multisensor obstacle detection and tracking. *Image and Vision Computing*, 18(5):389–396.
- Thomanek, F., Dickmanns, E. D., and Dickmanns, D. (1994). Multiple object recognition and scene interpretation for autonomous road vehicle guidance. In *Proceedings of IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, pages 231–236, Paris, France.

- Thorpe, C., Hebert, M., Kanade, T., and Shafer, S. (1988). Vision and navigation for the carnegie-mellon navlab. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 3(10).
- Trächtler, A., Lohmann, B., Struck, G., (1992) “Regelung der Querbewegung eines Kamerageführten Strassenfahrzeug”, *Automatisierungstechnik*, Vo.40, No.10.
- Wang, Y., Shen, D., and Teoh, E. (1998). Lane detection using catmull-rom spline. In *Proceedings of IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, pages 51–57, Stuttgart, Germany.
- Wang, Y., Shen, D., and Teoh, E. (2000). Lane detection using spline model. *Pattern Recognition Letters*, 21(6-7):677–689.
- Wang, Y., Teoh, E., and Shen, D. (2004). Lane detection and tracking using B-snake. *Image and Vision Computing*, 22(4):269–280.
- Weiss, K., Kaempchen, N., and Kirchner, A. (2004). Multiple-model tracking for the detection of lane change maneuvers. In *Proceedings of IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, pages 937–942, Parma, Italy.
- Wooldridge, M. and Jennings, N. (1995). Intelligent Agents: Theory and Practice. In: *Knowledge Engineering Review*, v. 10, n. 2.



O Prof. Dr. Cláudio Rosito Jung é bacharel em Matemática (UFRGS, 1993), mestre em Matemática Aplicada (UFRGS, 1995) e doutor em Ciência da Computação (UFRGS, 2002). Seus principais interesses de pesquisa incluem filtragem e realce de imagens usando wavelets, segmentação de imagens ruidosas, tratamento de imagens médicas, detecção e acompanhamento de pessoas, detecção de construções em imagens aéreas e visão computacional aplicada a veículos autônomos e sistemas de apoio ao motorista. Prof. Cláudio vem publicando seus trabalhos em conferências e periódicos de âmbito nacional e internacional, tais como SIBGRAPI, IEEE Intelligent Vehicles Symposium, IEEE Transactions on Image Processing, Pattern Recognition Letters e Image and Vision Computing. Ele recebeu recentemente uma bolsa de produtividade nível 2 do CNPq (demanda 10/2004).



O Prof. Dr. Fernando Santos Osório é Bacharel e Mestre em Ciência da Computação pela UFRGS e Doutor em Computação pelo INPG - IMAG de Grenoble na França (1998). Possui ampla experiência na pesquisa, uso e desenvolvimento de ferramentas de Inteligência Artificial e vêm atuando em projetos de I.A. ligados as áreas de Robótica, Visão Computacional, Realidade Virtual e Jogos. Atualmente coordena a Linha de Pesquisa em Inteligência Artificial do Programa Interdisciplinar de Pós-Graduação em Computação Aplicada da UNISINOS. Foi o coordenador geral do IV ENIA (2003) e co-chair do V ENIA (2005) promovido pela SBC.



O Prof. Dr. Christian Roberto Kelber, engenheiro e mestre em Engenharia Elétrica pela PUC-Rio, obteve no ano de 2000 o título de Doutor (Dr.-Ing.) pelo *Institut für Regelungstechnik* da *TU-Braunschweig*, na Alemanha, com foco no controle de máquinas elétricas. Desde 2001 integra o corpo docente do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS, sendo um dos fundadores do Grupo de Pesquisa em Veículos Autônomos. Suas áreas de interesse estão relacionadas com Controle de Máquinas Elétricas e Automação Veicular.



O Prof. Farlei Heinen é graduado em Informática e mestre em Computação Aplicada pela UNISINOS (2002), tendo desenvolvido sua dissertação na área de robótica móvel autônoma e simulação de veículos autônomos em ambientes virtuais. O Prof. Heinen colabora ativamente em projetos de pesquisa na área da robótica ligados ao Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada da Unisinos (PIPCA), e também colabora com o Grupo de pesquisa em Veículos Autônomos (cadastrado junto ao CNPq). Atualmente o prof. Heinen é o coordenador do curso de Engenharia da Computação: Computação aplicada às Engenharias da Unisinos.