

PROJETO DE PESQUISA

Navegação de Veículos Autônomos em Ambientes Externos Não Estruturados
Baseada em Visão Computacional

Projeto de Mestrado

Rafael Luiz Klaser

Coordenador e Orientador do Projeto

Prof. Dr. Fernando Santos Osório – ICMC/USP



Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação

| Universidade de São Paulo |

Março 2012

Identificação do Projeto

Título:

“Navegação de Veículos Autônomos em Ambientes Externos Não Estruturados Baseada em Visão Computacional”

Palavras Chave:

Robótica Móvel, Visão Computacional, Navegação Autônoma, Mapa Local de Navegabilidade, Percepção 3D, Ambiente Externo

Dados Gerais do Projeto

Proponente e Coordenador:

Prof. Dr. Fernando Santos Osório

Instituição:

USP – ICMC – PPG CCMC (São Carlos, SP)

Titulação:

Doutor em Computação (INPG-IMAG, Grenoble – França, 1998)

Departamento de Sistemas de Computação – SSC

Laboratório de Robótica Móvel – LRM - Web: <http://www.icmc.usp.br/~lrn>

Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Sistemas Embarcados Críticos – INCT-SEC

Núcleo de Apoio a Pesquisa do Centro de Robótica de São Carlos - NAP CRob/SC-USP

Dados do Aluno/Mestrando

Nome:

Rafael Luiz Klaser

Instituição:

Programa de Pós-Graduação em Ciências de Computação e Matemática Computacional

CCMC - ICMC/USP – Laboratório de Robótica Móvel (LRM)

INCT-SEC – Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Sistemas Embarcados Críticos

Titulação:

Bacharel em Ciência da Computação pela Universidade do Vale do Rio dos Sinos (2007)

Mestrando em Ciências de Computação pelo ICMC/USP

(Matriculado junto ao PG-CCMC do ICMC da USP - Início em Março de 2012)

Resumo

O objetivo deste trabalho é capacitar um veículo terrestre a se locomover de modo autônomo em ambientes externos não estruturados ou pouco estruturados, ou seja, em um campo com vegetação/plantação e/ou em uma floresta pouco densa (*outdoor* e *off-road*). O veículo deverá ser capaz de se dirigir até uma localização pré-determinada (coordenada GPS) escolhendo por meios próprios o caminho a seguir, ao mesmo tempo em que desvia de obstáculos, percebendo-os de forma autônoma. O sistema de navegação autônoma irá se basear na aquisição e processamento de imagens, obtidas a partir de um par de câmeras (câmera estéreo), constituindo assim um sistema de visão binocular do qual é possível se obter uma percepção tridimensional do ambiente. Portanto, pretende-se extrair parâmetros de navegabilidade do ambiente percebido pela câmera estéreo, como por exemplo, caminhos livres, obstruções e obstáculos, que combinados com as informações de posição e orientação do veículo e do ponto de destino (baseando-se em coordenadas de GPS) serão integrados em um sistema robusto de navegação. Este trabalho irá utilizar a plataforma CaRINA I do LRM - ICMC/USP e INCT-SEC dotado de uma câmera estéreo, GPS e bússola, e atuadores usados para o controle de tração e direcionamento do veículo. Inicialmente serão estudados e trabalhados algoritmos para a criação do mapa de disparidade a partir do par de imagens obtidas pela câmera estéreo. Para a criação deste mapa o algoritmo deverá ter um compromisso de desempenho entre a qualidade (disparidade/profundidade) e a performance em termos de tempo de processamento, uma vez que a aplicação final deverá executar em tempo real (*soft real-time*). A partir do mapa de disparidade, será elaborado um mapa local de navegabilidade que irá processar e classificar o espaço tridimensional percebido, separando e representando as regiões navegáveis (seguras) e as regiões não navegáveis (obstáculos e regiões à evitar) do espaço em frente ao veículo. Este mapa local será utilizado em conjunto com as informações de posição atual e de destino (GPS e bússola) a fim de realizar o controle da navegação do veículo. Estão sendo consideradas duas abordagens principais para o controle local da navegação: a primeira baseada no uso de Redes Neurais Artificiais, conforme proposto em trabalhos anteriores desenvolvidos por membros do grupo do LRM e a segunda baseada em uma adaptação do algoritmo VFH. Nestas abordagens serão consideradas como parâmetro de entrada as informações tridimensionais do mapa de navegabilidade. Além disto, também serão necessários estudos que visam identificar, a partir das imagens da câmera estéreo, o plano de referência de base (chão), seus desníveis e obstáculos, classificando-os como elementos transponíveis ou não. As principais contribuições esperadas deste trabalho são a adaptação e aperfeiçoamento dos algoritmos para a geração de mapas de disparidade, a proposta e o desenvolvimento de algoritmos para a obtenção de mapas locais de navegabilidade com informações espaciais (3D), e por fim o aperfeiçoamento de técnicas previamente desenvolvidas para detectar e desviar de obstáculos em mapas 2D, a fim de permitir uma navegação baseada no mapa de navegabilidade 3D. Este trabalho resultará em um sistema com possibilidade de aplicação em importantes tarefas de navegação, como por exemplo, em sistemas voltados para aplicações agrícolas e em sistema de combate a incêndio em florestas.

Sumário

1. Introdução.....	5
1.1 <i>Objetivo Geral</i>	6
1.2 <i>Justificativa e Aplicações</i>	6
1.3 <i>Contribuições Esperadas</i>	8
2. Referencial Teórico e Problema Abordado.....	8
2.1 <i>Mapeamento e Localização</i>	8
2.2 <i>Sensores para Mapeamento e Localização</i>	9
2.3 <i>Mapas de disparidade</i>	12
2.4 <i>Navegação: Estratégia, planejamento e controle</i>	13
2.5 <i>Considerações Finais</i>	15
3. Objetivos e Metodologia.....	15
3.1 <i>Objetivos Específicos</i>	16
3.2 <i>Materiais e Métodos</i>	16
4. Plano de Trabalho e Cronograma.....	18
5. Resultados Esperados.....	19
5.1 <i>Forma de Análise dos Resultados</i>	19

1. Introdução

A robótica de manipuladores já faz parte do cotidiano em vários processos de produção industrial. Em se tratando de robótica móvel, a sua aplicação prática ainda apresenta muitos desafios. Na robótica móvel, a navegação é a capacidade do veículo de se locomover no ambiente, podendo ser guiada (tele operada), autônoma ou híbrida (semiautônoma). A navegação autônoma é totalmente dependente do aparato sensorial acessível ao robô, pois a percepção e estímulos do ambiente precisam ser capturados para que este possa reagir de acordo. A morfologia do robô também vai limitar seu comportamento em relação a sua mobilidade (restrições cinemáticas), onde o aparato sensorial também deve ser propício para a execução de suas tarefas. A capacidade de se deslocar de forma autônoma e segura depende certamente de um certo grau de “inteligência” do dispositivo de controle e navegação do robô. Através do uso de técnicas de Inteligência Artificial, pretende-se traduzir em algoritmos estes processos de controle e navegação inteligente, viabilizando aos veículos uma locomoção autônoma robusta e de modo seguro.

A capacidade de locomoção é própria dos animais. Em robôs móveis, para mimetizar essa capacidade, dotam-se os mesmos de aparatos motores e sensoriais, podendo estes, ser ou não inspirados na fisiologia dos animais (Webb, 2000). Tais aparatos são fundamentais e definem a capacidade, características e especificidades dos movimentos. A visão é um subsistema biofísico sensorial que podemos associá-la intuitivamente às especificidades e características das estratégias de locomoção nos animais. Portanto, implementar um sistema de visão artificial com capacidade sensorial em um robô móvel, significa dotá-lo de um sistema análogo de percepção, que irá permitir que este realize tarefas de movimentação e deslocamento de modo similar. Para Marr (1982), a visão é acima de tudo uma tarefa de processamento de informações, porém, como a informação é representada a partir de imagens, o tratamento destas é um dos principais problemas que precisa ser investigado. Desta forma, a constituição de um sistema de visão computacional adequado para um determinado problema, como a navegação robótica, ainda é uma tarefa desafiadora.

Apesar da inspiração biológica no tratamento de problemas computacionais ser mais notória nos dias de hoje, apresentando-se como algo mais recente através da difusão das áreas de estudo multidisciplinares, como por exemplo, a computação cognitiva, biologia computacional, computação bio inspirada e bioinformática; o processo indutivo de observação da natureza biológica era notório como motivação para os algoritmos computacionais já em décadas passadas (Poggio, 1984).

Porém, as pesquisas nesta área não se baseiam puramente em descobertas baseadas na observação dos sistemas naturais, a nossa capacidade de inventar traz também a introdução de diversas novas tecnologias ao dia a dia. Da mesma maneira, a capacidade técnica de combinar diversas abordagens tecnológicas em aplicações práticas, permitem o desenvolvimento concreto de ferramentas e utensílios que com o passar do tempo se tornam parte do cotidiano e até indispensáveis. Os Robôs Móveis Autônomos (RMA) ainda dependem de muitos avanços nas pesquisas tecnológicas, mas já é possível visualizar a sua viabilidade através da combinação de abordagens bem sucedidas em diversas áreas para diversos tipos de aplicações junto a sociedade, tanto do ponto de vista econômico quanto do ponto de vista das tecnologias que já estão sendo

embarcada nestes dispositivos.

1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver um sistema de navegação autônoma baseado em visão computacional a fim de capacitar um veículo terrestre autônomo a se locomover em ambientes externos não estruturados, ou seja, em campos com vegetação/plantação e/ou em florestas pouco densas. O veículo deverá ser capaz de se dirigir até uma localização determinada, desviando dos obstáculos, percebendo-os de forma autônoma, e escolhendo por meios próprios o caminho a seguir. O veículo autônomo deverá ter a capacidade de identificar os elementos do terreno onde irá se deslocar, identificando o chão e os obstáculos, a fim de evitar zonas não transponíveis ou muito acidentadas. Portanto, o objetivo deste trabalho é desenvolver um sistema de navegação robusto e seguro voltado à aplicação em veículos autônomos para ambientes externos não estruturados (ou muito pouco estruturados), baseado no uso de visão computacional realizada através da captura de imagens estéreo, no uso de mapas de profundidade (mapas de disparidade), e no uso mapas locais de navegabilidade.

1.2 Justificativa e Aplicações

A aplicação de um sistema de visão computacional requer uma boa interpretação da imagem, onde a informação contida nela é bastante abrangente, porém de difícil acesso. Processos mais simples como segmentação, detecção de bordas, e extração de características locais já são amplamente utilizados em aplicações baseadas em imagem, mas no caso da navegação robótica em ambientes não estruturados, será necessário o uso de informações de percepção espacial (3D) a fim de identificar obstáculos e outros elementos que possam prejudicar a navegação do robô.

Com a capacidade de processamento dos computadores atuais, algoritmos mais complexos e custosos se tornam viáveis, permitindo a concepção de uma visão computacional mais eficaz. Com o uso de câmeras estéreo associadas com técnicas para a geração dos mapas de disparidade é possível obter, a partir deste tipo de câmeras, dados semelhantes aos sensores do tipo *rangefinder*, baseados em Sonar, Laser (LIDAR) ou Infravermelho, porém com uma resolução espacial na ordem de *megapixels*. Além disto, as câmeras são dispositivos de extremo baixo custo, se comparadas por exemplo, com dispositivos como os sensores Laser de medida de distância. Até mesmo as câmeras estéreo possuem atualmente um custo bastante baixo se comparado a outros dispositivos, pois a princípio são constituídas a partir de duas câmeras comuns.

Uma das principais motivações deste trabalho advém da possibilidade de desenvolvimento de uma aplicação conforme apresentada em um estudo anterior desenvolvido por Gustavo Pessin, sob a orientação do prof. Osório (Pessin, 2008), onde foi apresentado um sistema multiagente de robôs móveis com a finalidade de combate a incêndios florestais em um ambiente simulado. Os veículos simulados foram equipados com sonares (ou sensores laser do tipo LIDAR), bússola e GPS para permitir a navegação autônoma em ambientes externos não estruturados (*outdoor* e *off-road*). O

ambiente era tipicamente uma floresta ou mata não muito densamente ocupada, que permitia o deslocamento daqueles veículos. Naquele trabalho foi demonstrado com sucesso o uso de uma Rede Neural Artificial (RNA) treinada para controlar o veículo, integrando os dados sensoriais e a geração de comandos para os atuadores do veículo. Estes veículos robóticos autônomos, denominados de Robombeiros¹, são capazes de se deslocar em direção ao foco de incêndio, desviando de obstáculos e se aproximando do local estimado onde devem realizar as ações de combate ao fogo (Pessin *et al.*, 2007; Pessin *et al.*, 2010). Esta abordagem servirá de base e inspiração para o projeto e aplicação do sistema de controle de navegação que será então desenvolvido, porém será adotado um sistema de visão computacional como principal informação sensorial e a utilização de um veículo terrestre real.

Outra importante aplicação deste trabalho que está sendo proposto é junto a aplicações agrícolas: máquinas e implementos agrícolas que possam se deslocar pelas plantações para semear, pulverizar defensivos agrícolas, arar a terra, e até mesmo realizar a colheita de modo autônomo. O INCT-SEC e o LRM estabeleceram recentemente uma parceria junto a uma empresa brasileira de máquinas agrícolas, a Jacto S/A^{2,3}, cuja sede fica situada na cidade de Pompéia/SP. A proposta desta cooperação é o desenvolvimento de soluções robóticas para a automação de veículos agrícolas com um custo final que fique dentro de limites aceitáveis em relação ao mercado comercial deste tipo de produtos.

Os veículos deverão poder atuar em diferentes plantações (por exemplo, café, *citrus*/laranja e cana-de-açúcar, que são culturas muito difundidas no Estado de São Paulo, e também em outros estados). Testes preliminares foram realizados pelos membros do Laboratório LRM, demonstrando a viabilidade do uso de um sistema de visão baseado em câmeras estéreo para uso em aplicações agrícolas. A *fig. 1.1* apresenta as plataformas robóticas que tem servido como base de referência para a proposta e desenvolvimento deste projeto: veículos simulados (**RoBombeiros**), veículo automatizado dotado de câmera e atuadores para navegação autônoma (**CaRINA I**, desenvolvido junto ao INCT-SEC e ao LRM-ICMC/USP), e o veículo JAV da Jacto S/A (**Jacto Autonomous Vehicle**).



Fig. 1.1 – Simulador RoBombeiros (esquerda), Jacto JAV (centro), CaRINA (direita)
Fonte: (Pessin, 2008), Jacto S/A, LRM – ICMC/USP

1 RoBombeiros – Site com links para publicações e material referente ao projeto: <http://sites.google.com/site/pessin/>
 2 Máquinas Agrícolas Jacto S/A - <http://www.jacto.com.br/>
 3 Jacto - Pulverizador Autônomo JAV. Vídeo disponível em: <http://www.youtube.com/watch?v=JwTm1kQ2gE0>

1.3 Contribuições Esperadas

As principais contribuições acadêmico-científicas esperadas deste trabalho são: *(i)* adaptação e aperfeiçoamento dos algoritmos para a geração em “tempo real” de mapas de disparidade, obtendo estes mapas a partir de um par de imagens capturadas pela câmera estéreo; *(ii)* proposta e desenvolvimento de algoritmos para a obtenção de mapas locais de navegabilidade com informações espaciais (3D), onde o espaço tridimensional será dividido em regiões e estas regiões serão identificadas como sendo navegáveis ou não navegáveis; *(iii)* aperfeiçoamento de técnicas para a navegação baseada no uso de GPS, bússola e mapas locais de navegabilidade, onde as pesquisas previamente desenvolvidas para detectar e desviar de obstáculos com o uso de mapas 2D, serão estendidas a fim de trabalhar com mapa de navegabilidade/ocupação em 3D. Deste trabalho resultará um sistema com possibilidade de aplicação prática em importantes tarefas de navegação autônoma, como por exemplo, em sistemas voltados para aplicações agrícolas e em sistema de combate a incêndio em florestas, tarefas estas que podem ser perigosas para o ser humano (por exemplo, exposição prolongada aos produtos químicos de defensivos agrícolas, e combate/contato direto com fumaça e incêndios).

2. Referencial Teórico e Problema Abordado

Um veículo autônomo tem como problemática básica as questões referentes ao mapeamento, localização e navegação, as quais são fortemente influenciadas pelas características do ambiente, do problema em questão a ser tratado e da configuração do robô (sensores e atuadores) (Wolf et al. 2009). Quando se trata de navegação em ambiente externo, o desconhecimento do ambiente e da sua dinâmica tornam o mapeamento e localização mais críticos. Em um ambiente semi-estruturado podemos considerar a existência de algum referencial e impor alguma restrição, porém estes devem ser considerados intermitentes, ou seja, o sistema deve ser mais tolerante à perda momentânea de referenciais. Quando o ambiente não é estruturado depara-se com a falta de referenciais elementares (linhas, paredes, trilhas ou vias de deslocamento bem definidas) e com a baixa possibilidade de imposição de restrições. O desenvolvimento de um sistema autônomo para um veículo móvel se caracteriza primariamente pelo tratamento destas questões.

2.1 Mapeamento e Localização

A questão do mapeamento e localização é considerado um problema central na robótica móvel, onde a caracterização do veículo como autônomo de fato pode vir a ser dada essencialmente pela sua capacidade de tratar esta questão. Para que um robô possa ir de um ponto ao outro do ambiente ele deve conhecer, pelo menos, a sua localização e a localização do seu ponto de destino.

Quando o mapa e a estrutura do ambiente, assim como a localização do veículo, são

desconhecidos *a priori* essa questão se torna crítica. Esse problema é normalmente tratado através de abordagens como SLAM (*Simultaneous Location and Mapping*). Uma solução robusta e eficiente para a questão de localização e mapeamento simultâneos (SLAM) na prática ainda é desafiadora (Dissanayake *et al.*, 2001), onde uma abordagem recorrente no tratamento da localização e do mapeamento é a utilização de visão computacional. Entretanto, em ambientes externos (*outdoor*) extensos, a construção de um mapa global e a definição da localização em relação a este mapa pode ser tornar um problema intratável. Uma solução para este problema da localização em ambientes externos é a determinação da localização através do uso do GPS (*Global Positioning System*), que é baseado na triangulação da posição do veículo em relação a uma “constelação” de satélites deste sistema. Portanto, a posição do veículo e de seu destino pode ser estimada diretamente (com um certo erro) a partir das informações fornecidas por um aparelho localizador GPS.

2.2 Sensores para Mapeamento e Localização

Um veículo móvel terrestre se desloca (geometricamente) apoiado sobre um plano de suporte, ou seja, seus graus de liberdade podem ser considerados em duas dimensões. Desta forma, o reconhecimento do chão representa uma necessidade, e se caracteriza um importante desafio ao se considerar um ambiente externo e não estruturado composto por um solo com vegetação. Além da detecção do chão, é necessária uma certa classificação das regiões deste plano de suporte (solo) como sendo, por exemplo, uma superfície transitável ou não transitável: devido à presença de vegetação, obstáculos, buracos e demais impedimentos.

Os sensores típicos, como sonares e lasers, não apresentam dados muito adequados para viabilizar essa classificação, uma vez que o sonar possui uma limitação de alcance e de precisão e o sensor laser de 1 feixe é capaz apenas de analisar uma seção planar do espaço tridimensional (além de ter um custo muito elevado para certas aplicações). As câmeras de vídeo são mais adequadas para capturar estas informações que caracterizam o ambiente, principalmente, se forem usadas câmeras estéreo, das quais é possível extrair uma informação de profundidade dos elementos da cena capturada. A utilização de câmeras de vídeo demandam algumas tarefas elementares, como o ajuste de foco, a utilização de lentes adequadas ao ângulo de visão necessário, e uma devida calibragem.

A calibragem das câmeras é um processo fundamental para se obter um sistema de visão computacional com representação tridimensional a partir de um par de câmeras independentes (binocular). Neste processo são calculados (estimados) os parâmetros internos e externos de cada câmera. Estes parâmetros são essenciais para a reconstrução tridimensional a partir das imagens capturadas pela câmera estéreo (Faugeras, 1993).

A estimação dos parâmetros internos (intrínsecos) basicamente consiste em obter a distância focal e o ponto central da imagem, que por questões de alinhamento entre lentes e sensor pode não ser o pixel central da imagem, influenciando fortemente os demais processos de estimação (Wilson; Shafer, 1994). Estes dois parâmetros definem como a imagem é formada por uma câmera estilo estenopeica (*pin-hole*) e a sua projeção perspectiva (*fig. 2.1*). Outros parâmetros também internos, não associados com o modelo de projeção e sim com as características físicas das lentes utilizadas, também são estimados no processo de calibragem. O modelo estenopeico é uma construção

matematicamente simples, muito utilizado por pintores renascentistas do séc. XV, como Leonardo da Vinci. No caso das câmeras de vídeo existe a necessidade de utilização de lentes, tanto para reduzir a imagem a ser projetada no sensor (filme) como para aproximá-las. As lentes comumente são estruturas com curvatura esférica, característica esta que provoca distorções óticas na imagem projetada. Estes efeitos são chamados de distorções radiais, produzindo imagens com demonstrado na *fig. 2.2*, nos casos, onde esta distorção pode ser em forma de “barril” (*barrel*) ou “almofada” (*pincushion*) (Weng, 1992).

As distorções óticas influenciam fortemente de forma negativa o processo de correspondência entre as imagens para extrair a informação tridimensional, sendo grande fonte de ruído quando não corrigidas. É interessante notar que, matematicamente, o processo de correção das distorções óticas se baseia na curvatura esférica da lente, porém as lentes são formadas por uma composição de várias camadas com curvaturas diferentes (*fig. 2.3*), que ainda podem apresentar defeitos no processo de fabricação. Portanto, o modelo matemático utilizado na correção é sempre uma aproximação global do aparato ótico, fonte por si só de imprecisão (Wilson; Shafer, 1994). Existem ainda outros parâmetros que podem ser considerados, porém estes estão associados a questões técnicas da forma de aquisição da imagem e não à formação da imagem propriamente dita, portanto são subjetivas ao aparato utilizado sendo necessárias ou não, como por exemplo, os problemas referentes ao entrelaçamento e varredura da imagem.

De posse dos parâmetros internos associados às distorções é necessário um pré-processamento para a sua correção que ao ser aplicado produz uma imagem mais própria para os algoritmos de correspondência que formarão a imagem tridimensional. Os parâmetros internos são também chamados de parâmetros do modelo, isto é, como a imagem é formada. Um outro modelo de câmera geralmente associado à veículos móveis são as câmeras omnidirecionais, capazes de produzir uma imagem em 360 graus, útil para veículos com esse grau de liberdade de movimentos. A calibragem deste tipo de câmera é ainda mais complexa.

O segundo conjunto de parâmetros são os parâmetros externos (extrínsecos), também chamados de parâmetros de pose. Este conjunto diz respeito à posição da câmera em relação ao ambiente, no caso, a um sistema de coordenadas referencial. Estes são os principais parâmetros para a reconstrução tridimensional, pois são utilizados para se chegar a uma correspondência entre os pixels de cada uma das duas imagens. A correspondência entre os pontos é obtida pelos princípios da geometria epipolar (*fig. 2.4*) (Faugueras, 1993). De posse dessa correspondência, a partir do deslocamento destes pontos (disparidade) e um processo de triangulação, pode ser construída uma representação tridimensional em um mapa de profundidade. Fundamentalmente, são determinados os planos formados pelos pontos em comum em cada imagem (referenciais obtidos pela calibragem) e o ponto central de cada imagem. Esses planos no espaço (ambiente) são coincidentes, ou seja, o mesmo plano de corte. Esta reprojeção do plano em cada imagem definem retas, chamadas retas epipolares. Desta forma é possível fazer a correspondência dos demais pontos (não referenciais). Este alinhamento das imagens é chamado de retificação (Fusiello; Trucco; Verri, 2000), como pode ser visto na *fig. 2.5*. Pela geometria epipolar todos os planos formados pelos pontos referenciais serão concorrentes e as suas intersecções se dão em uma reta em comum, chamada linha base. Esta linha base determina o alcance da visão.

Em um estudo anterior realizado por Rafael Luiz Klaser (Klaser, 2007), em seu trabalho de

conclusão de curso, foi aplicada visão tridimensional para monitorar experimentos de laboratório utilizando como processo de calibragem o método de Tsai (1987). Naquele trabalho, onde as duas câmeras podiam ser posicionadas para o ambiente com uma certa liberdade observando-se alguns critérios, foi possível verificar que um conjunto de referenciais capazes de descrever os três planos ortogonais do espaço tridimensional produziam uma calibragem bastante precisa. Para isso, foi utilizado um molde semelhante ao canto de uma sala contendo pelo menos três pontos referenciais em cada parede e no chão (*fig. 2.6*). Uma vantagem do método de Tsai (1987) é que o referencial para a calibragem é dado informando sua posição na imagem e sua posição real no ambiente, sendo a posição real dada de forma relativa a um sistema de coordenadas referencial no espaço. Com isso, ao extrair a informação tridimensional de um ponto pelo processo de triangulação a partir da calibragem do par estéreo, a informação resultante contém as coordenadas espaciais do ponto na unidade de medida adotada. Desta forma, é possível saber a posição real de um determinado ponto podendo ser extraída uma nuvem de pontos 3D do ambiente (*3D point cloud*). Porém, para se obter as coordenadas tridimensionais de um determinado ponto no espaço é necessário saber onde esse ponto se encontra em cada imagem (Mundy; Zisserman, 1994). Isto não é trivial, mas é possível utilizar métodos de detecção e casamento (*matching*) de características (*features*) das imagens para buscar a correspondência, como por exemplo, o método SIFT (*Scale-Invariant Feature Transform*) (Lowe 1999) e o método SURF (*Speeded Up Robust Features*) (Bay *et al.*, 2006).

Uma abordagem baseada neste princípio em que, a partir de duas poses da mesma cena, se extrai uma terceira coordenada tendo por base uma calibragem das câmeras e um processo de correlação global dos pixels, é chamada de mapa de disparidade. Este processo é computacionalmente custoso e existem diversas técnicas para a sua implementação.

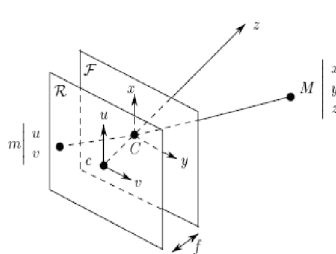


Fig. 2.1: Ponto central e distância focal
Fonte: (Faugeras, 1993)

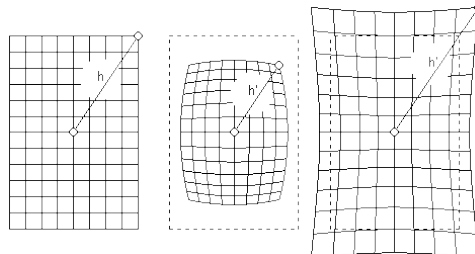


Fig. 2.2: Distorções óticas

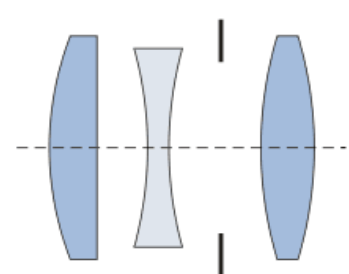


Fig. 2.3: Exemplo de composição ótica

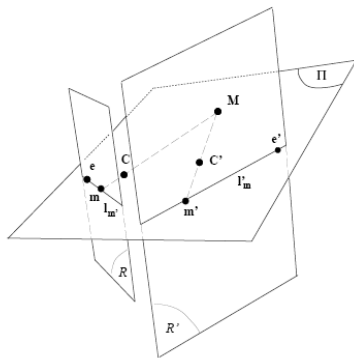


Fig. 2.4: Geometria epipolar
Fonte: (Faugeras, 1993)



Fig. 2.5: Retificação
Fonte: Andrea Fusiello

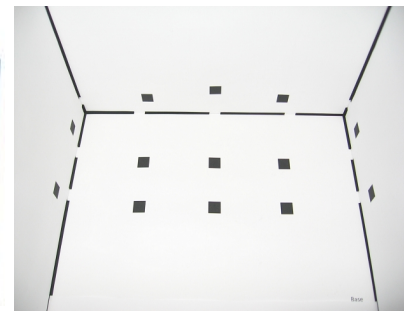


Fig. 2.6: Calibragem com referenciais fixos
Fonte: (Klaser, 2007)

Portanto, neste trabalho serão adotados os sensores do tipo GPS e Bússola (posição e orientação) para localização, e câmeras estéreo para a extração de mapas locais. Estes mapas descreverão o ambiente e os obstáculos através de uma representação espacial (3D) aonde se encontra o veículo robótico autônomo. A câmera estéreo irá fornecer um mapa de navegabilidade local composto por informações obtidas a partir do mapa de disparidade que será descrito a seguir.

2.3 Mapas de disparidade

Os mapas de disparidade, também chamados de mapas de profundidade, se tornaram uma ferramenta bastante utilizada para a percepção tridimensional. Para robôs móveis autônomos os mapas de disparidade são muito úteis, principalmente na detecção e desvio de obstáculos. O veículo pode extrair da informação de profundidade parâmetros para a navegação, como por exemplo, uma região frontal de maior profundidade pode representar um caminho sem obstáculos, livre de objetos e elementos localizados em frente a câmera.

Atualmente, a implementação direta em hardware dos algoritmos de cálculo do mapa de disparidade a partir de um par de imagens (câmera estéreo) permite a aplicação em tempo real e de forma embarcada (*fig. 2.7*) (Khaleghi; Ahuja; Wu, 2008). A ideia fundamental por trás do mapa de disparidade é fornecer uma informação de profundidade relativa, mapeada diretamente na imagem bidimensional a partir do valor do pixel. Usualmente são utilizadas imagens em tons de cinza (*8 bits*), fornecendo então até 255 níveis de profundidade. Na *fig. 2.8*, o mapa de disparidade está representando os obstáculos mais próximos por tons mais claros e os obstáculos mais distantes por tons mais escuros, desta forma, os pixels da imagem passam a representar no lugar da informação de cor ou luminosidade uma informação de profundidade sobre os elementos da cena. Os dispositivos sensores que fornecem uma imagem colorida juntamente com o mapa de disparidade têm sido denominados de dispositivos RGB-D (Imagem RGB + *Depth*/mapa de disparidade).

O sensor *Kinect* da Microsoft⁴ fornece imagens RGB-D com uma precisão de 2047 níveis de profundidade. Uma avaliação da qualidade do mapa de disparidade produzido pelo *Kinect* (Khoshelham, 2011) mostrou que a relação entre o nível de profundidade e distância não é linear, onde a distância real dos objetos é gradualmente maior do que a distância estimada a medida que se afastam da câmera. O *Kinect* é utilizado atualmente como base de comparação pois é uma aplicação em larga escala comercial desta técnica, e produz resultados práticos bastante satisfatórios. Porém, essa não linearidade não é um defeito próprio daquela implementação, ela advém do fato de o mapa ser gerado a partir de imagens que são formadas pela projeção perspectiva.

Em sistemas onde as câmeras são estacionárias (fixas em um local), como na aplicação tradicional do *Kinect*, técnicas de extração e supressão do fundo podem ser utilizadas para aumentar a robustez do método. No caso das aplicações em robótica móvel, as câmeras estão em constante movimento potencializando estes efeitos negativos, levando à necessidade de outros métodos para minimizar estes efeitos.

4 Microsoft Kinect - <http://www.xbox.com/en-us/kinect>

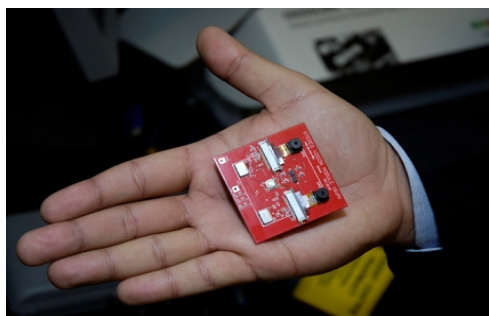
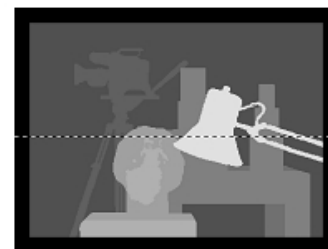


Fig. 2.7: Sistema de visão tridimensional embarcado baseado em mapa de disparidade
Fonte: (Khaleghi; Ahuja; Wu, 2008)



(a)



(b)

Fig. 2.8: a) Imagem RGB; b) Mapa de disparidade
Fonte: University of Tsukuba

O mapa de disparidade provê uma percepção espacial que representa os elementos da cena em um espaço tridimensional, fornecendo assim, uma fonte muito rica de informações sobre a cena. A partir destas informações é possível então, definir a trajetória do veículo de modo a desviar dos obstáculos que se encontram a sua frente ao mesmo tempo em que este se locomove em direção ao seu destino. Este processo é denominado de navegação robótica e será detalhado a seguir.

2.4 Navegação: Estratégia, planejamento e controle

A navegação em campo aberto se torna um problema de tomada de decisões difícil, visto a falta de um mapa global atualizado, a falta de referenciais locais e o excesso de ruído dos sensores, que produzem pouca informação válida para o sistema. Apesar de o veículo estar buscando um destino preestabelecido, dirigir-se sempre em linha reta pode não ser a melhor decisão, ou mesmo impossível. Além disto, a indicação da posição atual (localização) pode não ser totalmente confiável.

Mesmo que utilizando GPS, esse sistema apresenta erro de localização exata, ainda mais se considerarmos também o fato de que veículo não terá uma estrada ou via como referência (ambiente não estruturado). Já no caso de dispositivos como o odômetro, utilizados para manter um controle da localização por *dead-reckoning* (Dudek; Jenkin, 2000), a confiabilidade é ainda menor pois há grande tendência de discrepância. Estas discrepâncias podem ser resultadas de derrapagens das rodas, erros de estimação da real distância percorrida ou mesmo das alterações involuntárias de direção do veículo.

Uma possível melhoria da precisão do GPS existe. Uma abordagem é o DGPS (GPS diferencial), onde antenas em solo são utilizadas para aumentar a precisão do local estimado pelos sinais dos satélites. No entanto, nem sempre este tipo de abordagem é possível pela falta desta infraestrutura, além de possuir um custo bem mais elevado em relação a abordagem tradicional que pode não compensar a precisão. No Brasil, o IBGE disponibiliza serviços de posicionamento de precisão através da RBMC⁵ (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo). O GPS tradicional possui um erro médio usual entre 5 a 10 metros da posição estimada informada em relação a posição real, enquanto um DGPS pode reduzir este erro médio para menos de 1 metro (aprox. 50 cm). É interessante observar

⁵ IBGE – <http://www.ibge.gov.br> - RBMC – <http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/rbmc/rbmc.shtm>

que em aplicações de GPS em roteiros rodoviários (e urbanos) a existência de um mapa local permite um certo ajuste de coerência que visualmente dá a impressão de uma maior precisão, porém em campo aberto esta abordagem não é possível. Existe inclusive um “jogo”, denominado de *GeoCaching*⁶, inspirado nesta ideia de navegação baseada em GPS, onde o usuário deve encontrar um ponto de destino usando como informação apenas as coordenadas GPS disponíveis.

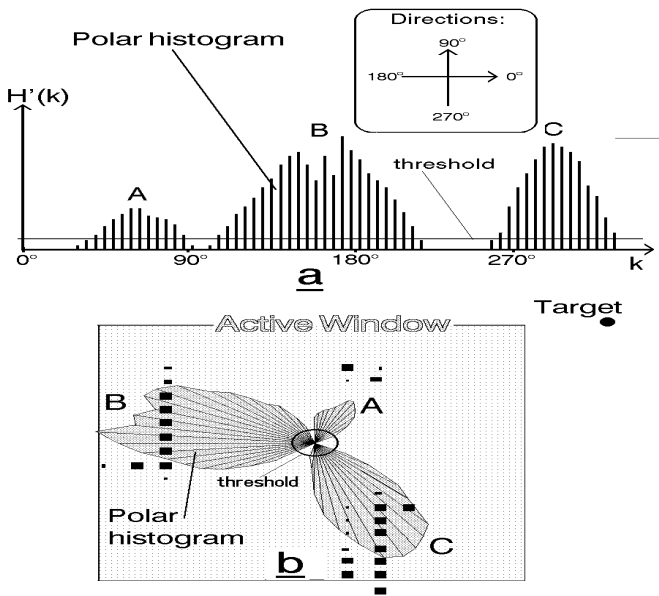
O algoritmo básico de navegação de um veículo autônomo pode se basear em um princípio estratégico similar ao utilizado por uma pessoa portadora de deficiência visual, ou seja, passos controlados e o constante monitoramento do ambiente ao seu redor. Uma pessoa consegue achar, de modo intuitivo e racional, um caminho em direção a um determinado destino e evitar colisões com obstáculos em seu caminho. No caso de um veículo autônomo, este não possui essa capacidade intrínseca de navegação e desvio de obstáculos, devendo ser dotado de algum recurso computacional e/ou físico para tal. Existem diversos algoritmos clássicos de estratégia de navegação, como por exemplo, o algoritmo do *bug* (Choset *et al.*, 2005) e suas variantes (Taylor; Lavelle, 2009), que se baseiam na detecção de bordas (obstáculos) e executam a locomoção aproximando-se a elas e fazendo o seu contorno.

A operação de navegação requer um planejamento, este planejamento pode ser categorizado como local ou global. No planejamento global há a necessidade de que o ambiente seja previamente conhecido através da representação de um mapa global (geralmente estático), enquanto que o planejamento local se baseia apenas na posição onde o robô se encontra e no alcance dos seus sensores. As metodologias de planejamento podem ser agrupadas em quatro categorias principais: gráficas, clássicas, heurísticas e de campo potencial. As metodologias baseadas em campos potenciais são soluções elegantes e simples para o planejamento local, porém, de acordo com o tipo de ambiente em que o robô se encontra podem apresentar problemas relacionados a mínimos locais. Em ambientes abertos e com poucos obstáculos os campos potenciais são uma abordagem largamente adotada. Uma técnica em destaque na abordagem de campos potenciais é o VFH (*Vector Field Histogram*) (Borenstein; Koren, 1991), que soluciona diversos problemas associados a este tipo de abordagem. O VFH foi projetado para ser utilizado em tempo real a partir dos dados dos sensores, gerando um histograma (*fig. 2.9*) que representa a proximidade dos objetos em relação ao veículo. Idealizado para se utilizar com sensores do tipo sonar, leva em conta as questões inerentes a ruídos próprios desta classe de sensor, sendo base para outros métodos que utilizam esta abordagem de campo potencial/campo de força.

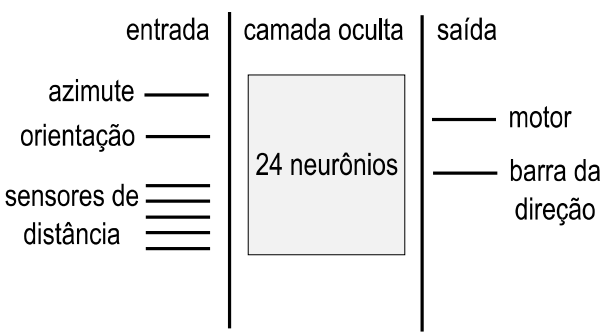
A arquitetura de controle de navegação de um robô móvel pode ser classificada basicamente como reativa, deliberativa ou híbrida (Wolf *et al.*, 2009), podendo ser estruturada de forma hierárquica; um caso particular de arquitetura híbrida em camadas. No projeto COHBRA (Heinen, 2002), foi utilizada a abordagem híbrida em camadas para a criação de um sistema de controle para robôs móveis. Esta abordagem permite ao sistema de controle planejar e executar um plano de uma trajetória (camada deliberativa) ao mesmo tempo em que detecta a presença e desvia de obstáculos que não foram previamente mapeados (camada reativa). Os sistemas de controle também podem vir a ser construídos a partir de Máquinas de Estados Finitos (FSM – *Finite State Machines*), Sistemas Especialistas e/ou Sistemas Nebulosos (FIS - *Fuzzy Inference Systems*), Redes Neurais Artificiais (RNA), ou mesmo, uma combinação destes em diversas camadas. As RNAs são consideradas sistemas "caixa-

⁶ GeoCaching Game: <http://www.geocaching.com/guide/default.aspx>

preta": após o treinamento da RNA os pesos sinápticos associados a cada neurônio (por exemplo, perceptron) não têm propriamente um “significado”, somente valores numéricos que representam o conhecimento adquirido. A sua capacidade de generalização torna-a tolerante a ruídos e permite a aplicação principalmente quando não se consegue estruturar totalmente o problema a partir de regras bem definidas. É uma técnica extremamente plástica, podendo ser aplicada a diversas classes de problemas. O sistema SEVA3D (Heinen *et al.*, 2006) se baseou em uma FSM para fazer o controle de navegação do veículo, já no simulador RoBombeiros (Pessin, 2008), adotou-se uma RNA para este fim (fig. 2.10).



Fonte: (Borenstein; Koren, 1991)



2.5 Considerações Finais

Nesta seção deste projeto de pesquisa foram apresentados os principais problemas referentes a navegação autônoma do veículo relativos às questões de localização, mapeamento e navegação. Em relação a localização, foi considerada uma proposta de utilização de sensores do tipo GPS (para a localização) e de uma câmera estéreo (para o mapeamento local e desvio de obstáculos). Por fim, foram apresentados e feita uma breve análise sobre dois métodos de navegação, VFH e RNAs, onde ambos são soluções adequadas para uma navegação baseada em uma orientação de destino, associada ao desvio de obstáculos detectados através de uma percepção local. Estes elementos constituem-se portando dos módulos e componentes deste projeto de pesquisa de mestrado.

3. Objetivos e Metodologia

O objetivo deste trabalho é desenvolver um sistema de navegação autônoma baseado em visão computacional a fim de capacitar um veículo terrestre a se locomover em ambientes externos

não estruturados, ou seja, um campo com vegetação/plantação e/ou floresta pouco densa. O veículo deverá ser capaz de desviar de obstáculos, percebendo-os de forma autônoma, e se dirigir até uma localização determinada escolhendo por meios próprios o caminho a seguir. Deverá ter alguma capacidade de reconhecer o terreno que irá se deslocar a fim de evitar zonas não transponíveis ou muito acidentadas.

3.1 *Objetivos Específicos*

Os principais objetivos específicos deste projeto de mestrado, que se apresentam como um desdobramento do objetivo geral descrito acima, são:

- Extração de referenciais a partir de um par de câmeras, constituindo um sistema de visão binocular (estéreo);
- Estudar e aperfeiçoar os algoritmos de geração do mapa de disparidade, obtido a partir das imagens estéreo;
- Gerar um mapa de navegabilidade local, a partir das informações visuais, que possa ser adaptado a algoritmos de planejamento e controle de navegação autônoma;
- Desenvolver um mecanismo de navegação autônoma, baseado nas informações de GPS, Bússola e do Sistema de Visão, capaz de desviar de obstáculos e dirigir o veículo até um destino determinado de forma robusta e eficiente;
- Fazer uso dos conhecimentos prévios de trabalhos desenvolvidos no laboratório e contribuir para a consolidação de tecnologias capazes de atribuir navegabilidade autônoma a veículos de diversas naturezas para fins práticos;
- Aplicação e avaliação do sistema de navegação autônoma em um veículo real em ambiente externo não estruturado;

3.2 *Materiais e Métodos*

Este trabalho será desenvolvido junto ao LRM⁷ – Laboratório de Robótica Móvel do ICMC/USP e em parceria com o INCT-SEC (Instituto Nacional C&T em Sistemas Embarcados Críticos). Diversos trabalhos relacionados ao desenvolvimento de veículos autônomos e robôs móveis inteligentes vêm sendo pesquisados e desenvolvidos junto a este laboratório, destacando-se, a pesquisa e uso de sistemas de navegação baseados em visão computacional. Atualmente, o Laboratório conta com uma parceria estabelecida com a empresa Jacto S/A⁸ (equipamentos agrícolas) para o desenvolvimento de um sistema autônomo de navegação de veículos em ambientes agrícolas. O LRM possui atualmente duas plataformas de teste para aplicações de veículos móveis autônomos que foram adquiridas pelo INCT-SEC: os veículos CaRINA I e CaRINA II⁹ (*fig. 3.1*). Também, possui robôs e plataformas móveis de pequeno porte. Para realizar os testes e avaliar o desempenho do sistema proposto teremos à disposição o veículo CaRINA I, que já possui integrada uma câmera de vídeo estéreo e um dispositivo de localização GPS com bússola, bem como outros dispositivos sensores e atuadores de controle do veículo. O veículo CaRINA I é o mais adaptado para ambientes externos não estruturados (*off-road*) a

⁷ LRM - Laboratório de Robótica Móvel do ICMC/USP - <http://www.lrm.icmc.usp.br/>

⁸ Grupo Jacto - <http://www.jacto.com.br/>

⁹ CaRINA - Carro Robótico Inteligente para Navegação Autônoma - <http://www.lrm.icmc.usp.br/carina/>

que pretendemos aplicar. Já o veículo CaRINA II está mais focado para ambientes urbanos (vias e estradas urbanas).

A primeira etapa do projeto consiste no levantamento de todos os pontos críticos do sistema proposto, após esta etapa serão avaliadas as técnicas mais acessíveis que são adequadas para o tratamento de cada ponto crítico. Será levado em conta prioritariamente o que já vem sendo trabalhado no laboratório, a fim de promover a integração das tecnologias já dominadas pelo grupo. Para a programação serão utilizadas as bibliotecas OpenCV¹⁰ e PCL¹¹ como ferramentas centrais, podendo vir a ser utilizado o *framework* ROS¹² para a integração destas ferramentas.

Para a localização será aplicada basicamente a utilização de GPS e bússola. Como o destino também será dado em forma de informação de posição de GPS esta questão não é tão crítica para esse projeto. A localização é bastante afetada por ruídos dos sensores, principalmente aqueles que fornecem informações de odometria. Dependendo da aplicação pode ser desnecessário considerar uma localização espacial precisa do veículo, apenas que o mesmo seja capaz de chegar no seu destino eficazmente. Por se tratar de um ambiente externo e não estruturado, sua navegação permite uma certa liberdade de movimentos dentro de um perímetro onde haja um caminho factível, preferencialmente buscando um caminho próximo do ótimo, como é o caso deste trabalho. Desta forma, o erro associado ao posicionamento por GPS não está sendo considerado crítico.

Inicialmente serão estudados e trabalhados algoritmos para a criação do mapa de disparidade a partir do par de imagens obtidas da câmera estéreo. Neste processo, o algoritmo deverá ter um compromisso de desempenho entre a qualidade do mapa de disparidade/profundidade e a performance em termos de tempo de processamento. A partir do mapa de disparidade será elaborado um mapa de navegabilidade, que representa as regiões navegáveis (seguras) e regiões não navegáveis (obstáculos e regiões a evitar) em frente ao veículo. O mapa final gerado será utilizado em conjunto com as informações de posição atual e de destino (GPS e bússola), a fim de realizar a navegação do veículo.

Serão desenvolvidos estudos relacionados à aplicação de técnicas de campos potenciais e de algoritmos derivados do VFH, a fim de realizar o planejamento e controle da navegação do veículo autônomo. Além destes estudos, também serão desenvolvidos estudos relativos ao uso de Redes Neurais Artificiais (RNAs) para o controle da navegação do veículo, conforme proposto no trabalho dos RoBombeiros (Pessin, 2008). Ambas as técnicas, VFH e RNAs, são adequadas para uma navegação baseada em um ponto/orientação de destino (fornecido pelas coordenadas GPS). Assim, será possível inclusive comparar o desempenho e resultados obtidos com cada uma destas técnicas, permitindo uma melhor avaliação e escolha do melhor método a ser embarcado e adotado junto ao veículo autônomo. Nestas duas abordagens serão consideradas como parâmetro de entrada as informações tridimensionais do mapa de navegabilidade. Além disto, também serão necessários estudos que visam identificar, a partir das imagens da câmera estéreo, o plano de referência de base (chão), seus desníveis e impedimentos, classificando-os como elementos transponíveis ou não. Elemento que também é parâmetro para o planejamento, controle e estratégia da navegação.

Para o desenvolvimento do sistema de navegação autônoma do veículo será utilizada a ferramenta *Player-Stage*¹³, que já vem sendo adotada junto ao LRM (Wolf *et al.*, 2009). Esta

10 OpenCV - <http://opencv.willowgarage.com/>

11 PCL - <http://pointclouds.org/>

12 ROS - <http://www.ros.org/>

13 Player Project e Player-Stage - <http://www.willowgarage.com/pages/software/player> e <http://playerstage.sourceforge.net/>

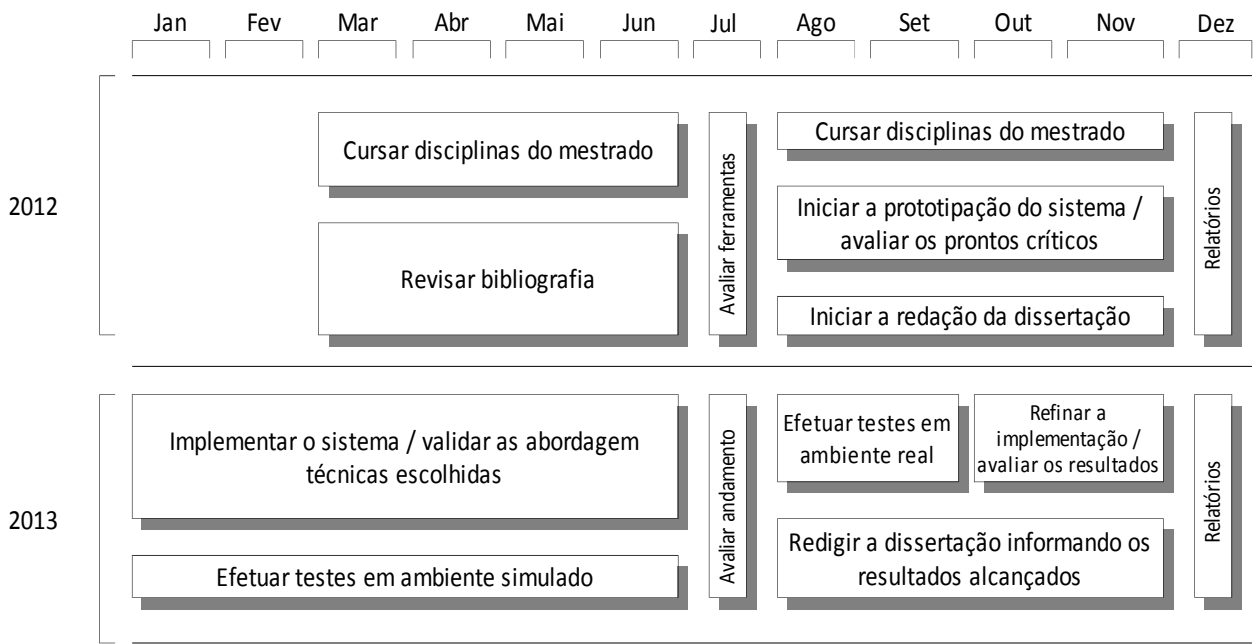
ferramenta permite desenvolver simulações dos robôs e veículos móveis baseadas no uso de sensores e atuadores virtuais equivalentes aos disponíveis no veículo. O software *Player* também provê ferramentas para o acesso aos dispositivos de hardware do robô, oferecendo uma interface (API) de alto nível para acesso aos *drivers* de dispositivos, como o GPS, a bússola, e os controladores dos motores do veículo. Esta ferramenta tem permitido um maior reaproveitamento de código e maior produtividade no desenvolvimento de aplicações robóticas junto ao LRM.



Fig. 11: Veículo CaRINA I (esquerda), CaRINA II (direita)
Fonte: LRM ICMC/USP

4. Plano de Trabalho e Cronograma

O quadro (1) abaixo apresenta um cronograma das macro atividades deste projeto. A execução das mesmas se dará respeitando os devidos prazos de projeto e da pós-graduação que não estão aqui explicitados. A colocação temporal das macro atividades estão dispostas nos períodos da sua maior concentração principal, porém a execução das atividades se darão de forma integrada.



Quadro 1: Cronograma sintético

5. Resultados Esperados

Este tipo de tecnologia promove o interesse e possíveis aplicações junto à sociedade, sendo de grande relevância à pesquisa e ao desenvolvimento de novas tecnologias nas áreas afins, a exemplo de iniciativas como as que vêm sendo desenvolvidas em outros países (por exemplo, *DARPA Grand/Urban Challenge*¹⁴, *ELROB*¹⁵, *AUVSI/IGVC*¹⁶).

Este trabalho espera contribuir no desenvolvimento de soluções para a arquitetura de um veículo móvel autônomo robusto e seguro. Mais especificamente, este estudo estará focado na implementação de um sistema de visão computacional para a navegação autônoma aplicável a veículos terrestres em geral, permitindo aplicações diversas.

As principais aplicações deste sistema robótico de navegação autônoma são:

- O combate à incêndios em florestas, conforme proposto nos trabalhos desenvolvidos anteriormente por Pessin (2008);
- O uso em aplicações agrícolas visando criar veículos autônomos usados para arar a terra, semear, pulverizar e realizar a colheita em plantações, visando assim fomentar a cooperação já estabelecida com empresas que atuam nesta área;
- O uso em aplicações militares e/ou civis para o auxílio no transporte de carga e suprimentos em ambientes não estruturados;
- O transporte de cargas em locais perigosos onde a presença de um motorista possa ser dispensada de modo a proteger sua segurança.

5.1 Forma de Análise dos Resultados

Os resultados serão analisados comparativamente com as soluções já desenvolvidas no LRM e em comparação com projetos semelhantes e relacionados. Além disto, serão avaliadas e comparadas as diferentes abordagens adotadas neste estudo, como por exemplo, comparando a abordagem baseada em VFH com RNAs. Outro quesito a ser avaliado é o desempenho geral do sistema, onde serão realizadas medições e avaliações dos tempos de processamento e do desempenho alcançados. A adaptabilidade e robustez final do resultado para as áreas de interesse e aplicação citadas nesta proposta irá indicar o grau de sucesso atingido. As necessidades de melhorias e a delineação de avanços que devem ser alcançados poderão servir de base para novos projetos, constituindo um avanço na prospecção tecnológica para o desenvolvimento de um sistema eficiente e robusto de navegação autônoma.

14 DARPA Challenge - <http://www.darpa.mil/About/History/Archives.aspx>

15 ELROB – European Robot Trial - <http://www.elrob.org/>

16 Intelligent Ground Vehicle Competition - <http://www.igvc.org/>

Referências

- BAY, H. *et al.* Speeded-up robust features (SURF). In: **Computer Vision and Image Understanding**, v. 110, n. 3, p. 346–359, 2008.
- BORENSTEIN, J.; KOREN, Y. The vector field histogram-fast obstacle avoidance for mobile robots. In: **IEEE Journal of Robotics and Automation**, v. 7, n. 3, p. 278-288, 1991.
- CHOSSET, H. *et al.* **Principles of robot motion: theory, algorithms, and implementation.**, The MIT Press, 2005.
- DISSANAYAKE, M. W. M. G. *et al.* A solution to the simultaneous localization and map building (slam) problem. In: **IEEE Transactions on Robotics and Automation**, v. 17, p. 229–241, 2001.
- DUDEK, G. & JENKIN, M. **Computational Principles of Mobile Robotics.** Cambridge University Press. 2000.
- FAUGERAS, O. **Three-dimensional computer vision: a geometric viewpoint.**, The MIT Press, 1993.
- FUSIELLO, A.; TRUCCO, E.; VERRI, A. A compact algorithm for rectification of stereo pairs. In: **Machine Vision and Applications**, v. 12, n. 1, p. 16-22, 2000.
- HEINEN, F. **Sistema de Controle Híbrido para Robôs Móveis Autônomos.**, Dissertação (Mestrado) - Mestrado em Computação Aplicada / Unisinos, 2002.
- HEINEN, M. *et al.* SEVA3D: Autonomous Vehicles Parking Simulator in a three-dimensional environment. In: **Journal of INFOCOMP**, 2007.
- KHALEGHI, B.; AHUJA, S.; WU, Q. M. J. A new miniaturized embedded stereo-vision system (MESVS-I). In: **Proceedings of the 2008 Canadian Conference on Computer and Robot Vision.**, p. 26–33, 2008
- KHOSHELHAM, K.; ELBERINK, S. O. Accuracy and resolution of kinect depth data for indoor mapping applications. In: **Sensors**, v. 12, n. 2, p. 1437–1454, 2012. ISSN 1424-8220.
- KLASER, R. L., **Aplicação de Técnicas de Visão Computacional para Monitorar Experimentos de Comportamento de Invertebrados**, Monografia (Bacharel em Ciência da Computação), Unisinos (Universidade do Vale do Rio dos Sinos), 2007.
- LOWE, D. G. Object recognition from local scale-invariant features. In: **Proceeding of the International Conference on Computer Vision**, v. 2, p. 1150–1157, 1999.
- MARR, D. **Vision: A Computational Investigation into the Human Representation and Processing of Visual Information.** New York, NY, USA: Henry Holt and Co., Inc., 1982. ISBN 0716715678.

MUNDY, J. L.; ZISSERMAN, A. Repeated structures: Image correspondence constraints and 3D structure recovery., In: **Proceedings of the Second Joint European - US Workshop on Applications of Invariance in Computer Vision**, p. 89–106, 1994.

PESSIN, G. *et al.*; Vinícius Nonnemacher ; Sandro Souza Ferreira . Utilizando Redes Neurais Artificiais no Controle de Robôs Móveis Aplicados ao Combate de Incêndios Florestais. In: **XVI SEMINCO - Seminário de Computação da FURB**. Anais do XVI Seminco. Blumenau : FURB,v. 1, p. 19-30, 2007.

PESSIN, G. **Evolução de estratégias e controle inteligente em sistemas multi-robóticos robustos**. Dissertação (Mestrado) - Mestrado em Computação Aplicada / Unisinos, 2008.

PESSIN, G. *et al.* Intelligent Control and Evolutionary Strategies Applied to Multirobotic Systems. In: **IEEE-ICIT 2010 International Conference on Industrial Technology** - Viña del Mar, Chile: IEEE Press, v. 1, p. 1427-1432, 2010.

POGGIO, T. Vision by man and machine. In: **Scientific American**, v. 250, n. 4, p. 106–122, 1984.

TAYLOR, K.; LAVALLE, S. M. I-bug: An intensity-based bug algorithm. In: **IEEE International Conference on Robotics and Automation**, p. 3981–3986, 2009

TSAI, R. Y. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses. In: **IEEE Journal of Robotics and Automation**, v. 3, n. 4, p. 323–344, 1987.

WEBB, B. What does robotics offer animal behaviour? In: **Animal Behaviour**, v. 60, n. 5, p. 545-558, 2000.

WENG, J.; COHEN, P.; HERNIOU, M. Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation. In: **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, v. 14, n. 10, p. 965–980, 1992.

WILLSON, R. G.; SHAFER, S. A. What is the center of the image? In: **Journal of the Optical Society of America A** v. 11, n. 11, p. 2946-2955, 1994.