

1 Introdução

1.1. Motivação

O crescimento e popularização da robótica têm se evidenciado nos últimos anos principalmente com a explosão da automação industrial, comercial e residencial, além do aparecimento de robôs móveis caracterizados por diversos produtos e aplicações.

O uso de robôs na automação industrial, exploração espacial, exploração submarina, em locais inóspitos e em tarefas penosas e perigosas tem experimentado ampla difusão. Robôs autônomos são capazes de substituir o homem em trabalhos de alto risco, assim como em serviços que não enobrecem o ser humano, podendo realizar atividades em áreas de difícil acesso ou em condições ambientais desfavoráveis. No Brasil, robôs são cada vez mais usados em operações como levantamentos hidrográficos, monitoração ambiental, supervisão de sistemas de produção de petróleo e gás e pesquisas oceanográficas entre outras, gerando grande demanda de pesquisa em robótica, principalmente na área submarina. Um trabalho nacional feito sobre reconhecimento de ambientes através de sistema robótico autônomo, que utiliza visão para alcançar objetivos pré-determinados pode ser visto em [1].

A RIA (*Robotic Industries Association*) estima que há atualmente 142 mil robôs em uso industrial nos Estados Unidos. Em 2003, a venda de robôs industriais na América do Norte observou aumento de 19% com valor estimado de 876,5 milhões de dólares. De acordo com a UNECE (*The United Nations Economic Commission for Europe*), em 2003 houve crescimento de 25% na demanda mundial de robôs, sendo a robótica atualmente uma indústria de 8 bilhões de dólares globalmente, com crescimento esperado para 22,61 bilhões de dólares em 2010.

Também se podem verificar grandes mudanças no mercado de robôs móveis de uso doméstico. Segundo a UNECE o maior crescimento para os próximos 3

anos será relativo a robôs pessoais, e não industriais. Enquanto um robô industrial é projetado para realizar tarefas na manufatura, robôs pessoais são construídos para realizar tarefas para seu usuário. Hoje podem ser encontrados robôs entre eletrodomésticos, como aspiradores robóticos autônomos, cortadores de grama e equipamentos para segurança, inspeção e vigilância robóticos. A indústria de brinquedos e robôs para entretenimento, tal como o uso de ferramentas educacionais como kits de robótica, também tem tido grande crescimento. Este fenômeno não é decorrente somente do perceptível aumento do interesse relacionado a robôs móveis, mas é também relativo à queda de preços associada à produção de robôs. As aplicações possíveis para robôs móveis pessoais vão do transporte, vigilância, segurança, limpeza, entretenimento, educação a até mesmo o auxílio a deficientes físicos, entre outras.

Se a tecnologia para robôs de uso pessoal crescer como promete, com preços competitivos, e boa aceitação comercial, este pode vir a ser um grande mercado em um futuro próximo, ainda mais se for levado em conta que a indústria eletro-eletrônica é a que apresenta o segmento com o maior número de empregados mundialmente. De acordo com Dan Kara, presidente da empresa *Robotic Trends*, a indústria de robôs pessoais deve crescer de 5,4 bilhões de dólares em 2005 para 17,1 bilhões em 2010.

O avanço da robótica atual se deve em grande parte a alguns fatores. Primeiramente, a redução de custos associados a hardware tem permitido a produção de robôs cada vez mais baratos e com grande poder computacional, requisito importante para desenvolvimento de sistemas autônomos. Além disto, a pesquisa em robótica tem crescido muito, permitindo grandes avanços ao integrar áreas do conhecimento tão diversas quanto Inteligência Artificial, Ciência da Computação, Matemática, Engenharia Elétrica, Engenharia de Controle e Engenharia Mecânica.

Fatores econômicos ainda requerem a substituição de arquiteturas complexas por arquiteturas mais simples, o desenvolvimento de robôs de baixo custo, além do uso de sistemas inteligentes. O grande objetivo da robótica está na criação de robôs autônomos capazes de executar tarefas sem a necessidade de intervenção humana. A autonomia de robôs é de muito interesse em uma grande quantidade de aplicações, principalmente aquelas que envolvem riscos, como operações de resgate e segurança, desarmamento de minas, uso policial,

exploração submarina e espacial, aplicações nucleares e militares. Também são importantes as aplicações que envolvem benefícios econômicos, abrangendo a indústria de serviços, agricultura, manufatura e construção, e até mesmo o uso em cirurgias médicas.

Dentro do cenário apresentado, o estudo de robôs móveis e do planejamento de movimento tem sido tema central de diversas pesquisas nos meios acadêmico e industrial. Os países que não estiverem capacitados ao desenvolvimento das tecnologias associadas à automação e robótica certamente ficarão defasados tecnologicamente no mercado global. É uma preocupação mundial atual a viabilização rápida de máquinas inteligentes, a viabilização de altos ganhos em flexibilidade e o desenvolvimento de sistemas robóticos com desempenho próximo ao humano.

A presente dissertação tem como objetivo apresentar algoritmos para navegação, exploração e mapeamento de ambientes por robôs móveis de baixo custo auxiliados por uma câmera simples e de baixa resolução.

A seção 1.2 apresenta uma visão geral sobre robôs autônomos, robôs móveis, métodos tradicionais de representação de um ambiente por um robô e técnicas tradicionais de exploração de um ambiente por um robô.

A seção 1.3 descreve os objetivos propostos nesta dissertação.

A seção 1.4 descreve os capítulos seguintes do presente trabalho.

1.2. Navegação, Localização e Mapeamento para Robôs Móveis

1.2.1. Robôs Autônomos

Robôs inteligentes são sistemas mecânicos que possuem a capacidade de funcionamento autônomo. Estes devem integrar as capacidades de perceber o mundo, raciocinar e interagir com o mesmo, podendo aprender e se adaptar às mudanças ocorridas no ambiente. Percepção, planejamento e ação constituem as três primitivas de robôs inteligentes.

A capacidade de percepção de um robô agrega os instrumentos necessários para mensurar suas propriedades internas e outras relativas ao ambiente. Com tal

propósito existe uma grande variedade de sensores com aplicação comum em robótica indo desde odômetros e sonares a câmeras digitais.

Um trabalho recente sobre a percepção de ambientes utilizando-se de câmera de vídeo acoplada a um sistema robótico autônomo pode ser visto em [1].

Aliado à percepção, robôs autônomos devem poder incorporar uma base de conhecimento em relação ao ambiente junto a qual possam ter capacidade de raciocínio. As habilidades de percepção e raciocínio é que permitirão ao robô observar o mundo e tomar ações de modo autônomo e adaptativo permitindo ao sistema se locomover de forma inteligente e decidir quais movimentos são necessários de modo a cumprir objetivos pré-determinados.

Além das habilidades de percepção e raciocínio, também é de fundamental importância para um robô, dito inteligente, que consiga aprender e evoluir quais os melhores comportamentos a serem tomados. Para muitos pesquisadores, a autonomia está diretamente relacionada à capacidade de aprendizado.

A autonomia é um fator de grande importância para robôs móveis. Uma visão geral sobre robôs móveis é apresentada a seguir.

1.2.2. Robôs Móveis

O estudo de robôs móveis é uma área relativamente recente de pesquisa que lida com o controle de veículos autônomos e sua relação com o ambiente. O estudo do planejamento do movimento tem tido papel vital no avanço da robótica. O mínimo que se pode esperar de um robô autônomo é a capacidade de planejar seus próprios movimentos. Esta capacidade é necessária dado que, para um robô realizar tarefas, este precisa se movimentar e interagir com o mundo real.

Nos Estados Unidos, agências como o DARPA e ESPIRIT têm financiado fortemente projetos de robôs de larga escala, tais como veículos convencionais e *off-road* autônomos. O tamanho destes projetos tem requerido a colaboração de centenas de pesquisadores de diversas universidades e áreas de estudo distintas.

Quanto à sua movimentação, robôs móveis autônomos devem ter as habilidades de navegação, de exploração, de mapeamento e de auto-localização. A interação mais básica de um robô com o ambiente é feita pela percepção deste e sua navegação. A navegação constitui a aptidão de se chegar a lugares desejados sabendo-se da sua localização e conhecendo-se o ambiente ao seu redor. Para

navegar, muitas vezes o robô precisa de um modelo do ambiente, sem o qual não pode tomar decisões. Em determinadas aplicações o modelo não é dado ao robô, que precisa então fazer a modelagem do ambiente movendo-se e “sentindo-o”. Daí o mapeamento lida com a criação de um modelo representativo do mundo através da percepção do mesmo feita por sensores. A capacidade de explorar um ambiente está no robô descobrir áreas ainda não conhecidas do ambiente visando agregar mais informações à sua base de conhecimento da maneira mais eficaz possível. Por fim, a auto-localização é o procedimento que integra a percepção sensorial com o conhecimento previamente acumulado, objetivando-se a localização do robô em relação ao ambiente.

As quatro tarefas apresentadas se inter-relacionam e requerem a tomada de decisões de maneira autônoma e inteligente. Agentes autônomos e inteligentes devem não só poder interagir com o ambiente na busca de atingir seus objetivos, reunir informações e aprender com o mesmo, mas também se adaptarem às mudanças.

O mapeamento de um ambiente gera uma representação interna ao robô do meio. A seção seguinte apresenta algumas representações tradicionais possíveis.

1.2.3. Representação do Ambiente

Ao navegar pelo espaço, um robô pode fazer uma modelagem interna deste ambiente criando um mapa do mesmo. Existem diversas possibilidades de representação do ambiente, sendo as mais usuais:

- Representações Métricas:
 - o Decomposição Espacial [2-6]:
 - *Bitmaps*;
 - *BSP*;
 - *Quadtree*;
- Representações Geométricas [7-11];
- Representações Topológicas [12-14];

As representações métricas do ambiente lidam com a reprodução ótima, de acordo com as medidas obtidas, de modo quantitativo e preciso.

Na representação métrica por decomposição espacial guarda-se uma tabela ou *grid* que representa o espaço (Figura 1-1). A decomposição espacial mais simples é por *bitmap*. Nesta decomposição, existem dois componentes essenciais:

- As coordenadas do robô em uma referência global;
- Representação em *grid* do ambiente onde as propriedades do mesmo são guardadas;

A decomposição por *bitmap* usa uma representação icônica baseada em uma matriz de células, onde cada célula está centrada em coordenadas $r = (r_i, r_j)$ do mundo real e correspondem a uma área quadrada. Cada célula carrega atributos referentes ao ambiente tais como estado (vazio, ocupado, não explorado) e certeza (medida de probabilidade referente aos seus estados possíveis).

A Figura 1-1 apresenta um exemplo de uma representação métrica do ambiente. Em azul pode-se ver as paredes do ambiente. Os quadrados cinzas representam as áreas do *grid* ocupadas (paredes) e os brancos as áreas não ocupadas.

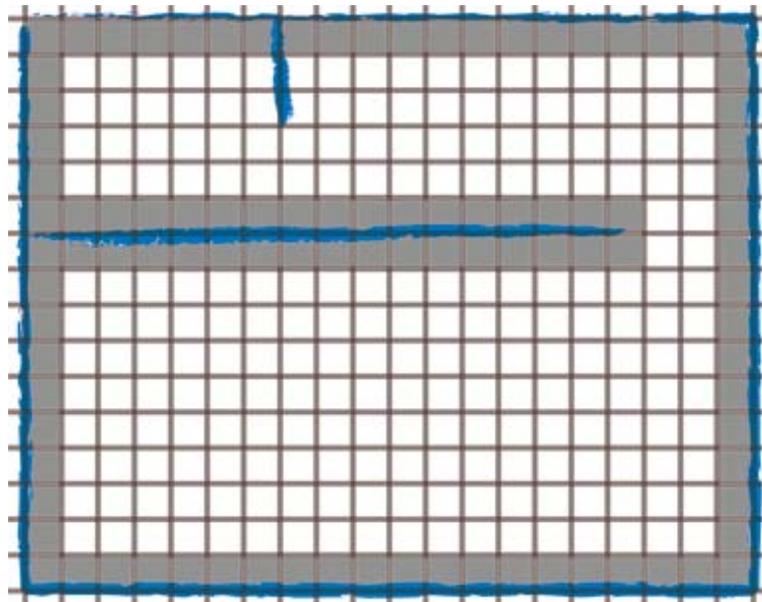


Figura 1-1: Representação métrica do ambiente

As representações topológicas do ambiente (Figura 1-2) abordam técnicas relacionais e associativas de representação. As técnicas representativas usam modelos em grafo, onde diferentes *landmarks* são tratados como nós de um grafo e seus caminhos são tratados como adjacências.

Enquanto modelos métricos são mais precisos, modelos topográficos/topológicos são mais robustos quanto a estratégias de navegação. A existência de modelos híbridos associa precisão e robustez criando uma independência de modelos que faz com que erros de percepção verificados nas representações métricas não se propaguem para as representações topológicas. O uso de um modelo híbrido pode ser visto em [14].

A Figura 1-2 apresenta o mesmo ambiente da Figura 1-1 mas utilizando uma representação topológica. Os círculos representam os nós e as linhas cinzas representam os caminhos entre os nós.

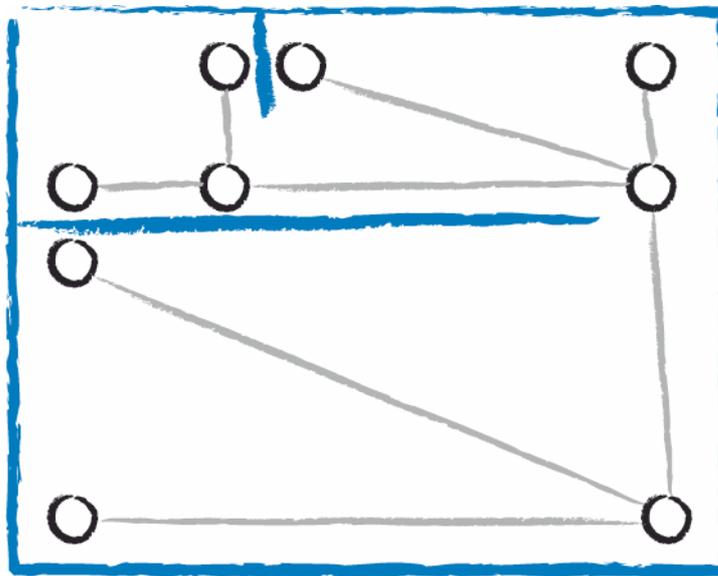


Figura 1-2: Representação Topológica do ambiente

Para poder representar um ambiente, um robô precisa fazer a exploração do mesmo. A seção seguinte apresenta técnicas tradicionais de exploração de um ambiente.

1.2.4. Técnicas de Exploração

O problema central em exploração está em cobrir uma área não explorada de maneira eficaz. Alguns métodos propostos mais tradicionais são:

- *Random Potential Field* – Busca aleatória: Percorre-se o ambiente randomicamente seguindo um campo potencial gerado de modo aleatório [13];

- *Repulsive Field*: Utiliza-se de campo de potencial onde o robô é repellido de áreas visitadas recentemente e atraído para áreas ainda não conhecidas. Um trabalho que usa campos potenciais harmônicos pode ser visto em [15].;
- Busca por centróides das áreas desconhecidas: O robô tenta seguir centróides de áreas ainda desconhecidas [13];
- *Frontier-Based Exploration* [16]: Encontrando-se as fronteiras entre as áreas conhecidas e as áreas desconhecidas, é traçada uma estratégia de exploração que pode levar em conta o centróide destas áreas, como exemplo;
- *Voronoi-Graph Methods*: Métodos baseados em grafos de *Voronoi* podem ser vistos em [2, 4, 13];

Nesta e nas últimas seções foi apresentado um panorama sobre robôs autônomos e robôs móveis, métodos de representação de um ambiente por um robô e técnicas tradicionais para a exploração de um ambiente. Dentro deste contexto, na próxima seção serão apresentados os objetivos do presente trabalho.

1.3. Objetivo

O objetivo deste projeto é desenvolver técnicas para navegação, exploração e mapeamento de ambientes por robôs móveis utilizando-se de tecnologias de áreas diversas, tendo em vista o grande número de estudos recentes com foco nestas técnicas aliado ao crescimento comercial do uso de robôs móveis.

Esta dissertação tem como fim desenvolver e aplicar as componentes de um algoritmo de auto-localização e mapeamento simultâneos (SLAM – Simultaneous Localization And Mapping) para robôs móveis que planeje uma estratégia de exploração visual (por câmeras) do ambiente, permitindo a construção eficiente de um modelo topológico do mesmo, sem necessidade de se usar sensores de alto custo.

Este objetivo é atingido através da combinação de componentes de tecnologia já existentes para a geração de um sistema robótico de baixo custo. A contribuição deste projeto está na fusão dos procedimentos da Teoria da Informação, Visão Computacional, Processamento de Imagens, Algoritmos

Genéticos e algoritmos de SLAM baseados em grafos para a criação de algoritmos de exploração e navegação de robôs móveis.

É proposto um algoritmo de SLAM para robôs móveis que planeje uma estratégia de exploração visual (por câmeras) do ambiente. Este algoritmo deve fazer a construção eficiente de um modelo topológico (baseado em grafos) do ambiente sem necessidade de se usar sensores com alto custo. As componentes deste algoritmo são desenvolvidas e investigadas.

Todo o desenvolvimento é feito para ambientes estáticos, apesar de se verificar posteriormente robustez na presença de alguns elementos dinâmicos no ambiente.

O projeto consiste no prosseguimento de trabalhos já desenvolvidos ou em desenvolvimento, tendo como foco a aplicação prática dos métodos criados. Além disso explora técnicas clássicas na área em conjunto com técnicas mais atuais viabilizando novos avanços para as pesquisas recentes.

O algoritmo proposto se baseia na quantidade de informação presente em sub-regiões de imagens panorâmicas em 2D para determinar lugares a serem explorados pelo robô usando uma única câmera fixa sobre o mesmo. Utilizando métrica relacionada à quantidade de informação (derivada da Teoria da Informação de Shannon) [17], o algoritmo determinará na imagem localizações potenciais de nós para se prosseguir a exploração do ambiente. O algoritmo também lidará com a navegação do robô para os novos nós, onde o processo deve ser repetido. Uma estratégia de reconhecimento de imagens invariável à translação, escala e rotação, utilizando transformadas com características invariáveis (Fourier, Mellin do tipo 1 e Mellin do tipo 2) [18-24], é utilizada para navegar o robô para nós já conhecidos. Também é apresentada técnica alternativa a esta, utilizando-se de transformações baseadas em SIFT (*Scale-Invariant Feature Transforms*) [25-35]. O algoritmo prossegue iterativamente até ter explorado o ambiente com nível de detalhamento pré-especificado.

Durante o desenvolvimento da dissertação, etapas do algoritmo foram desenvolvidas, testadas e aplicadas em experimentos práticos com um robô do tipo *differential-drive*, como será descrito na seção adiante.

1.4. Metodologia

O objetivo deste projeto foi desenvolver os procedimentos do algoritmo de exploração e mapeamento do ambiente proposto. O mapeamento do ambiente é topológico, ou seja, o mapa é um grafo onde cada nó representará uma localização do ambiente. O robô deve guardar uma imagem panorâmica de cada nó tal como as distâncias e ângulos entre os nós explorados, para que em um segundo momento, este mapa criado possa servir de base para que o robô navegue autonomamente para lugares desejados.

A princípio, o projeto pode ser sub-dividido em 5 componentes. Estas componentes são:

1. Criação de imagens panorâmicas;
2. Identificação de lugares a serem explorados;
3. Navegação para lugar não explorado;
4. Navegação para lugar já explorado;
5. Processamento das imagens obtidas e do grafo que representa o ambiente;

Na componente 1 do algoritmo, a criação das imagens panorâmicas é feita através da composição de várias imagens obtidas com o robô apontado para diferentes ângulos. Para que as imagens sejam concatenadas é necessário encontrar pontos em comum entre elas e recombina-las. Isto foi feito utilizando técnicas baseadas em entropia e análises de correlações entre regiões das imagens, entre outras.

Na componente 2, para determinar localizações potenciais a serem exploradas, pode-se utilizar alguma métrica, como entropia por exemplo, que faça essa escolha através das imagens panorâmicas. Uma das opções escolhidas para tal foi o algoritmo de exploração se basear na quantidade de informação (entropia) presente em sub-regiões de imagens panorâmicas em 2D para determinar regiões a serem exploradas pelo robô usando uma única câmera fixa sobre o mesmo.

O algoritmo proposto também deve lidar com a navegação do robô para os novos nós através de controle com feedback servo-visual. Na componente 3, uma estratégia de reconhecimento de imagens rápida é utilizada para navegar o robô para nós já conhecidos. Isso foi inicialmente feito fazendo comparações de

transformadas invariáveis a determinadas características das imagens como escala, translação e rotação. Transformadas como de Fourier ou Mellin, por exemplo, possuem propriedades que auxiliaram nesta tarefa.

Também foi adotado outro método para a componente 3. Neste método utilizou-se de descritores SIFT, junto a um algoritmo de *Visual Tracking* proposto, para se fazer a navegação para lugares desconhecidos. Uma variação deste método foi utilizada na componente 4, onde se deseja navegar para lugares já conhecidos.

Uma segunda etapa do projeto envolve o refinamento do modelo interno criado fazendo-se refinamento do grafo relativo ao mapeamento topológico utilizando técnica baseada em algoritmos genéticos e teoria de grafos.

1.5. Organização da Tese

O restante da tese está dividido em mais 7 capítulos, conforme descrito a seguir:

- Capítulo 2 - Transformações Integrais Invariáveis: Uma série de transformadas (Fourier, Mellin do tipo 1, Mellin do tipo 2, Fourier Mellin do tipo 1 e Fourier Mellin do tipo 2) são apresentadas e é discutido o uso de propriedades características das mesmas para se fazer comparações entre imagens e auxiliar à navegação de robôs;
- Capítulo 3 - Transformação SIFT (Scale Invariant Features): Descritores SIFT são muito utilizados quando se deseja encontrar regiões em comum entre diferentes imagens. A base teórica e as aplicações da transformação SIFT são aqui vistas. A técnica SIFT será utilizada no auxílio à navegação e exploração em vários momentos do presente trabalho;
- Capítulo 4 - Registro e Correspondência de Imagens: Um breve panorama sobre técnicas de registro e correspondência de imagens pode ser conferido aqui;
- Capítulo 5 - Sistema Experimental: O sistema experimental sobre o qual o presente trabalho foi desenvolvido é apresentado;
- Capítulo 6 – Algoritmos para Exploração e Navegação Propostos: Este capítulo descreve as implementações desenvolvidas ao longo deste

trabalho. Diversos métodos são propostos com o objetivo de se explorar um ambiente navegando pelo mesmo com auxílio de uma câmera;

- Capítulo 7 - Experimentos e Resultados: Experimentos que ilustram e investigam os métodos propostos são vistos;
- Capítulo 8 – Conclusões e Trabalhos Futuros: Conclusões sobre os métodos empregados e breve descrição sobre possíveis trabalhos futuros;