

1

Introdução

1.1.

Motivação

A motivação para este estudo advém de um problema real de diversas aplicações em robótica, qual seja, o posicionamento preciso de robôs em ambientes dinâmicos. Manipuladores robóticos são empregados há décadas em ambientes industriais e nestas aplicações geralmente não há necessidade de uma calibração do manipulador devido ao baixo nível de precisão necessária e ao fato de toda sua área de trabalho compreender posições fixas. É o caso, por exemplo, de robôs que pintam carros em uma fábrica de automóveis. Porém, há aplicações em que a precisão é fundamental, como a inserção de componentes eletrônicos em uma placa de circuitos. Nesses casos, existe a necessidade de uma calibração do manipulador para compensar os erros de fábrica e aumentar a precisão. Métodos de calibração de manipuladores foram estudados por especialistas, tendo como uma das mais importantes referências o livro *Fundamentals of Manipulator Calibration* de Mooring, Roth e Driels (1991).

Certas tarefas executadas por manipuladores robóticos requerem que este reconheça sua área de trabalho e tome decisões baseado neste reconhecimento. É o caso de um manipulador robótico utilizado em intervenções submarinas. Tal manipulador desce a profundidades perigosas ao ser humano e deve fazer tarefas em um ambiente que muda a cada vez em que ele é transportado à sua área de trabalho. As dificuldades envolvidas no processo de calibragem de um manipulador em ambientes completamente mutáveis é um problema complexo e pouco tratado na literatura, motivando fortemente este estudo.

1.2.

Objetivos do Trabalho

Os objetivos principais deste trabalho são:

- Estudar técnicas de calibragem de manipuladores seriais robóticos, modelagem cinemática direta e inversa.
- Estudar técnicas de visão computacional, especificamente modelos de câmeras, reconhecimento de padrões e métodos de rastreamento de pontos.
- Buscar métodos de posicionamento da extremidade do manipulador em relação ao seu ambiente de trabalho por uso de câmeras
- Aplicar as técnicas estudadas na calibração de um manipulador real, fazendo simulações para demonstrar a viabilidade de aplicar as técnicas em um ambiente real.

1.3.

Descrição do Trabalho

É comum, em aplicações industriais de manipuladores robóticos, a programação de braços mecânicos por rastreamento de trajetórias, na qual um operador programa onde cada junta deverá se posicionar em períodos subsequentes do tempo. Desta forma, o manipulador poderá repetir os movimentos e efetuar a mesma tarefa repetidamente. Tal metodologia é suficiente para tarefas repetitivas onde o ambiente não muda e os objetos manipulados são movidos para posições constantes.

Porém, nem todas as atividades são realizadas em ambientes constantes e imutáveis. Este trabalho trata de um manipulador robótico com seis graus de liberdade (TA-40), utilizado para efetuar intervenções submarinas em painéis de controle submersos a profundidades perigosas à presença humana. A cada vez que há necessidade de intervenção, o manipulador é posicionado sobre um veículo

submarino robótico (Veículo Operado Remotamente - ROV) que o transporta até a área de trabalho. Uma vez atingido o seu destino, o submarino se fixa no local e permite que o manipulador realize suas tarefas.

Devido a questões que vão desde correntes marítimas até a imprecisão do operador que manipula o submarino robótico, a posição absoluta da base o manipulador em relação a sua área de trabalho nunca é igual à posição de uma intervenção submarina anterior. Assim, a programação por simples rastreamento de trajetórias não se aplica. Atualmente, faz-se a teleoperação do manipulador, na qual a movimentação do sistema robótico é executada em modo manual, e o operador trabalha em uma arquitetura mestre-escravo controlando direta e continuamente as posições do manipulador. Para essas tarefas é necessário apenas que o sistema possua repetibilidade suficiente, uma vez que quaisquer erros absolutos de posicionamento são visualmente compensados pelo operador humano. Define-se aqui repetibilidade como a capacidade de um sistema sair e retornar, com o menor erro possível, a uma posição arbitrária de seu volume de trabalho, sendo portanto uma medida de precisão relativa. A precisão absoluta mede os erros de posicionamento em relação a um referencial fixo na base do manipulador. A Figura 1 apresenta esquematicamente a diferença entre repetibilidade e precisão absoluta.

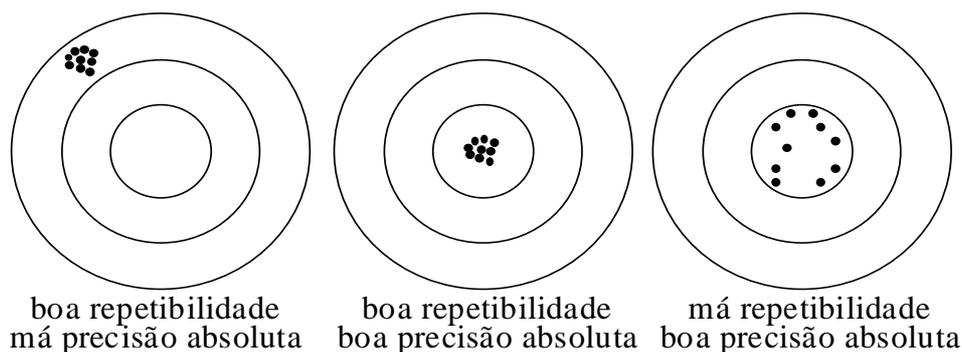


Figura 1: Repetibilidade e precisão absoluta

Em vista da aplicação direta do TA-40 em tarefas subaquáticas, percebe-se que ambas as técnicas de programação de manipuladores citadas anteriormente são impraticáveis ou insatisfatórias. A técnica na qual um operador humano ensina as trajetórias ao robô é impossibilitada devido a alta variabilidade do

ambiente. O manipulador, a cada vez que for levado ao seu ambiente de trabalho, deve ser treinado para um novo posicionamento, e portanto, perde-se toda a versatilidade. O método de teleoperação atribui ao robô uma precisão absoluta baixa, devido a própria deficiência da percepção humana.

Este trabalho segue tendências modernas de automação, as quais vêm colocando uma crescente ênfase em robôs guiados por sensores e programação off-line, automatizando total ou parcialmente muitas das tarefas a serem executadas. Sensores, como câmeras ligadas a um sistema de visão computacional detectam diferenças entre a posição real do manipulador e a posição desejada. Estas diferenças são então enviadas para os controladores para que estes corrijam a trajetória pré-programada. Os comandos de movimento do manipulador são programados off-line por um sistema de CAD. As trajetórias podem então ser testadas em um ambiente gráfico virtual, sem a necessidade de se ativar o robô. Assim, tarefas podem ser programadas à distância, sem o uso do robô, permitindo maior velocidade na validação de trajetórias para resolver problemas. Este estudo visa resolver o problema de calibração focado no manipulador TA-40, porém as técnicas de calibração aplicadas poderão ser utilizadas em outros manipuladores robóticos e em outros sistemas de posicionamento em ambientes diversos.

Para viabilizar estas técnicas é necessário que o robô tenha não apenas boa repetibilidade como também boa precisão absoluta, o que geralmente é difícil de ser alcançado em sistemas robóticos de grandes dimensões. Não é incomum que o modelo geométrico do robô, originário do projeto inicial deste durante sua fabricação, se diferencie do modelo real devido a tolerâncias de construção. Estas diferenças de modelo provocam perda de precisão e só podem ser revertidos a partir da calibração.

Calibragem de robôs é um processo no qual a precisão absoluta do sistema é melhorada através de modificações em seu software de controle de forma a compensar erros. Para melhor ajustar o modelo geométrico de um robô por calibragem, uma quantidade suficiente de medições precisa ser realizada. Essas medições consistem em posições das juntas internas do robô e de coordenadas de um ou mais pontos da estrutura do sistema em relação a um sistema de coordenadas designado. Técnicas de calibragem podem ser aplicadas especificamente para calibrar apenas a extremidade do manipulador, apenas sua

base (ou seja, no caso de intervenções submarinas, a posição do veículo submarino que contém o robô), apenas a posição de uma ferramenta acoplada a extremidade do manipulador, ou qualquer combinação dos três.

O processo de calibração pode ser dividido em quatro etapas distintas:

- Determinação do modelo matemático que representa a geometria e o movimento do manipulador (modelagem cinemática).
- Medições de posição e orientação da extremidade do manipulador em coordenadas do mundo (medidas de posição).
- Identificação das relações entre os ângulos das juntas e as posições da extremidade do robô (Identificação cinemática)
- Modificação dos comandos de controle para permitir que as tarefas sejam completadas com sucesso (Compensação Cinemática)

As etapas de seleção de modelo, identificação e compensação foram estudadas (Meggiolaro et al. M., 1999a; Meggiolaro M., 2000a), com a proposição de uma técnica denominada GEC (*Geometric and Elastic Error Compensation*) que modela qualquer tipo de erro no manipulador de uma forma unificada, apresentando melhores resultados em relação aos métodos tradicionais. O método GEC foi aplicado com sucesso, por exemplo, em dois sistemas robóticos, um manipulador capaz de posicionar pacientes em hospitais (Meggiolaro et al. M., 1998) e um manipulador hidráulico Schilling Titan II (Meggiolaro et al. M., 1999b) melhorando significativamente a precisão absoluta destes sistemas

Como o TA-40 tem sua base móvel, faz-se necessária uma calibração desta base em relação ao mundo sempre que o manipulador for ativado. A abordagem para esta calibração passa pelo uso de imagens do local. A calibragem por um sistema de câmeras é potencialmente rápida, automatizada e não-invasiva ao volume de trabalho. Há dois tipos de configuração para sistemas de medição baseados em imagens. O primeiro é fixar câmeras no ambiente próximo ao da tarefa que possam visualizar uma referência de calibragem presa na extremidade do robô. O segundo tipo de configuração é montar uma câmera ou um par de câmeras na extremidade do manipulador. A configuração de câmeras móveis

presas na extremidade do manipulador resolve o conflito entre alta precisão e grande volume de trabalho visualizável.

O uso de câmeras para calibração do manipulador passa por três estágios:

- Reconhecimento de padrões
- Acompanhamento de padrões
- Recuperação da cinemática da câmera

O primeiro estágio dedica-se a encontrar padrões nas imagens que sejam robustos a rotação, translação, mudança de escala e ruído. Diversos métodos são utilizados para este fim, sendo que o mais robusto é a identificação de cantos nas imagens. Este método, porém, dificulta o estágio seguinte, no qual se procura relacionar os mesmos pontos em imagens seguidas. É comum utilizar correlação para fazer este tracking, porém esta não é robusta a rotação ou a mudanças de escala, o que torna ambos os métodos insatisfatórios.

Para identificação dos pontos e posterior rastreamento será utilizada a Transformada de Propriedades Invariantes a Escala (SIFT-Scale Invariant Feature Transform) desenvolvido por David G Lowe (LOWE D. G, 2004), que descobre padrões em imagens subsequentes e dá a cada ponto um conjunto de parâmetros para que estes possam ser descobertos em imagens subsequentes. Este método é robusto a rotação, translação, escala e ruído, permitindo a sua aplicação neste trabalho.

A última etapa da calibração da câmera visa encontrar a distância dos pontos capturados com relação à câmera, bem como obter a posição e orientação da câmera em relação ao mundo. Uma vez que a câmera está instalada na extremidade do manipulador, obtêm-se assim a posição e orientação da extremidade em relação à base, bem como as distâncias dos pontos vistos à extremidade. O algoritmo utilizado para tanto se chama triangulação.

Após a calibragem do sistema, tarefas de teleoperação automática ou semi-automática são factíveis. Além disso, o conhecimento da posição absoluta do manipulador e do ambiente de trabalho ao seu redor permite gerar um sistema de visualização 3-D virtual que reflita as configurações do sistema em tempo real. Visualização virtual permite ao teleoperador visualizar áreas obscurecidas

utilizando câmeras virtuais. As câmeras virtuais também permitem magnificar as bordas de peças a serem inseridas, facilitando a execução destas tarefas. Em manipuladores com sensores de força e torque em sua extremidade, é possível ainda visualizar no próprio ambiente virtual medições de forças de contato entre o robô e o equipamento, como pode ser visto em um sistema de ambientes virtuais desenvolvido para o uso em tarefas de manutenção em usinas nucleares (Meggiolaro M., 1999). A partir da teoria e dos conhecimentos apresentados nesta dissertação, será possível viabilizar a operação de manipuladores robóticos em ambientes reais dinâmicos de forma facilitada.

1.4.

Organização da Dissertação

Esta dissertação está dividida em seis capítulos, descritos a seguir:

O capítulo 2 resume toda a teoria necessária para o processo de calibração de um manipulador robótico. Este capítulo explica com detalhes os conceitos básicos de modelagem cinemática de manipuladores planos, incluindo as equações de Rodrigues, Transformações Homogêneas e Convenção de Modelagem de Denavit-Hartenberg. Também apresenta as técnicas de calibração e de compensação de erros que serão utilizadas posteriormente para a calibragem do TA-40. Por fim, neste capítulo são discutidos os requisitos e o método para se obter a cinemática inversa de manipuladores.

O Capítulo 3 inclui a teoria e os conceitos de visão computacional que serão utilizados para fazer o reconhecimento do ambiente de trabalho e o posicionamento da base do manipulador em relação ao mundo. Entre os tópicos abordados estão o Modelo de Câmera, explicitado pelos parâmetros intrínsecos e extrínsecos, bem como uma técnica de Calibração da Câmera. Também neste capítulo, encontra-se um método de emparelhamento de pontos em imagens obtidas por câmeras distintas (algoritmo SIFT) e o algoritmo de triangulação necessário para posicionar o manipulador.

O Capítulo 4 descreve ao caso particular do manipulador TA-40, empregando as técnicas e algoritmos descritos nos capítulos dois e três para fazer a calibragem total deste manipulador. O capítulo se divide em uma rápida

apresentação do manipulador TA-40, seguido da descrição do modelo de Denavit-Hartenberg para o mesmo. Em seguida, é demonstrada a aplicação dos algoritmos de calibração para encontrar as matrizes de erro. Por fim, mostra-se o uso das técnicas de visão computacional para obter o posicionamento da base do manipulador.

O Capítulo 5 possui resultados de diversas simulações feitas para testar os algoritmos no caso específico do TA-40.

O Capítulo 6 é composto de observações e comentários dos resultados e propostas de novos projetos.