



Miguel Angelo Gaspar Pinto

**Posicionamento e Calibração de
um Manipulador Robótico Submarino
com Uso de Visão Computacional**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-
graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de
Engenharia Elétrica da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Ricardo Tanscheit
Co-Orientador: Prof. Marco Antonio Meggiolaro

Rio de Janeiro
Agosto de 2006



Miguel Angelo Gaspar Pinto

**Posicionamento e Calibração de um
Manipulador Robótico Submarino com
Uso de Visão Computacional**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Ricardo Tanscheit
Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

Prof. Marco Antonio Meggiolaro
Co-Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. Raul Queiroz Feitosa

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

Prof. Pedro Magalhães Guimarães Ferreira

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

Prof. José Franco Machado do Amaral
UERJ

Prof. José Eugenio Leal
Coordenador Setorial do Centro
Técnico Científico

Rio de Janeiro, 31 de agosto de 2006

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Miguel Angelo Gaspar Pinto

Graduou-se em Engenharia de Controle e Automação (Pontifícia Universidade Católica) em 2004. Trabalhou por meio ano na área de controle antes de começar mestrado na área de Processamento de Sinais e Controle na Pós-Graduação da PUC-Rio. Suas áreas de interesse abrangem robótica, controle de sistemas, visão computacional e inteligência artificial.

Ficha Catalográfica

Pinto, Miguel Angelo Gaspar

Posicionamento e calibração de um manipulador robótico submarino com uso de visão computacional / Miguel Ângelo Gaspar Pinto ; orientador: Ricardo Tanscheit ; co-orientador: Marco Antonio Meggiolaro. – Rio de Janeiro : PUC, Departamento de Engenharia Elétrica, 2006.

106 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Robótica. 3. Calibragem. 4. Visão computacional. 5. Controle. 6. Inteligência artificial. 7. Reconhecimento de padrões. 8. Rastreamento. I. Meggiolaro, Marco Antonio. II. Tanscheit, Ricardo. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. VI. Título.

CDD: 621.3

À minha família por todo o apoio.

Agradecimentos

- À CAPES, pelo apoio financeiro;
- Ao orientador Marco Antônio Meggiolaro, pela oportunidade;
- Ao orientador Ricardo Tansheit, pelo apoio;
- Ao professor Raul Feitosa, pela parte de visão computacional;
- À PUC-Rio pelo seu excelente corpo acadêmico que me deu as bases para este estudo;
- À minha família, que próxima ou distante, me incentivou nessa jornada;

Resumo

Pinto, Miguel A.G; Tanscheit, Ricardo (Orientador). **Posicionamento e Calibração de um Manipulador Robótico Submarino com Uso de Visão Computacional**. Rio de Janeiro, 2006. 106p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Muitos dos robôs industriais utilizados atualmente seguem uma programação baseada em rastreamento de trajetórias. O robô é guiado por um operador humano para localizações fixas onde ele atuará. Esses movimentos são, então, gravados na linguagem de programação residente no controlador do robô, de forma que este seja capaz de repetir as tarefas. Este método pode ser suficiente para, por exemplo, movimentar objetos entre locais fixos. Como o robô está treinado para se movimentar em posições fixas, todas as partes do manipulador, bem como todos os objetos que serão manipulados devem estar em posições bem definidas, ou uma nova programação deverá ser feita. Outra metodologia é a de teleoperação, na qual a movimentação de sistemas robóticos é executada em modo manual, no qual 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 um alto grau de repetibilidade, uma vez que quaisquer erros absolutos de posicionamento são visualmente compensados pelo operador humano. Porém em certas aplicações robóticas essas técnicas de programação de manipuladores são impraticáveis ou insatisfatórias. A primeira vem a ser impraticável no caso de alta variabilidade do ambiente onde a tarefa está sendo feita. O segundo método atribui ao robô uma precisão absoluta baixa, devido a própria deficiência da percepção humana. Este trabalho segue pelas 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, sem a necessidade de ativar o robô, permitindo maior velocidade em sua validação e na resolução de problemas. Apresentam-se neste trabalho metodologias e técnicas para o posicionamento do manipulador utilizando-se, para tanto, câmeras em sua extremidade. Uma vez posicionado o manipulador em relação ao espaço de coordenadas do mundo, é possível deslocá-lo com segurança e precisão em sua área de trabalho, o que é imprescindível para automatização de tarefas complexas. O trabalho está concentrado nas aplicações de técnicas de visão computacional à calibração de manipuladores. Como estudo de caso utiliza-se uma situação real, de um manipulador submarino de seis graus de liberdade, para intervenções submarinas em plataformas de petróleo. Abordam-se a calibração de câmeras, reconhecimento de padrões, correlação de padrões em imagens distintas, estereoscopia, cinemática direta e inversa de manipuladores e a união de todas estas técnicas para o posicionamento do manipulador em sua área de trabalho.

Palavras-chave

Robótica; Calibragem; Visão Computacional; Controle; Inteligência Artificial; Reconhecimento de Padrões; Rastreamento.

Abstract

Pinto, Miguel A.G; Tanscheit, R. (Advisor). **Positioning and Calibration of a Underwater Robotic Manipulator with Use of Computacional Vision**. Rio de Janeiro, 2006. 106p. MSc Dissertation – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontificia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Many of today's industrial robots are still programmed to follow trajectories. The robot is guided by a human operator to the desired fixed application locations. These motions are recorded and are later edited, within the robotic language residing in the robot controller, and played back, for the robot to be able to repetitively perform its task. This methodology is enough to move objects between fixed locations. As the robot is trained to move within fixed positions, all manipulator parts, as well as all the objects which will be manipulated need to be in well defined positions, otherwise another program is needed. Another methodology would be teleoperation, where the robotic system's movements are executed in manual mode, having the operator working in a master-slave architecture, controlling direct and continuously the positions of the robot. For these tasks it is needed only for the system to have enough repeatability, once any absolute positioning errors can be visually compensated by the human operator. On the other side, in certain robotic applications, both programming techniques are either not practical or inefficient. The first, where the human operator teaches the trajectories to the robot, is not possible when there is high variance in the environment where the task is being performed. The second method, the teleoperation, has low absolute accuracy, due the deficiencies of human perception. This project follows modern tendencies of automation, which give increasing emphasis on robots guided by sensors and off-line programming, partially or completely automating many of the tasks to be executed. Sensors such as cameras eload to a system of computational vision detect differences between the actual and desired position of the manipulator. This information is sent to controllers to correct the pre-programated trajectory. The manipulator movement commands are programmed off-line by a CAD system, without need even to turn on the robot, allowing for greatest speed on its validation, as well as problem solving. This work presents methodologies and techniques which allow the precise positioning of the manipulator using cameras in its end-effector. Once it is positioned in relation with the world frame, it is possible to move the manipulator with safety and precision its work area, as is needed for automation of complex tasks. This work is focused on computational vision techniques applied for manipulator calibration. It is based on a real case of a subsea manipulator of six degrees of freedom, used for underwater interventions in oil exploring platforms. The subjects treated in this work include camera calibration, pattern recognition, position tracking, stereopsis, direct and inverse manipulator kinematics and the union of all techniques for manipulator positioning in the work area.

Keywords

Robotics; Calibration; Computacional Vision; Control; Artificial Intelligence; Pattern Recognition; Tracking.

Sumário

1. Introdução	14
1.1. Motivação	14
1.2. Objetivos do Trabalho	15
1.3. Descrição do Trabalho	15
1.4. Organização da Dissertação	20
2. Modelagem Cinemática para Calibração de Manipuladores	22
2.1. Introdução	22
2.2. Conceitos Básicos de Cinemática	23
2.3. Convenção de Modelagem de Denavit-Hartenberg	25
2.4. Método Clássico de Calibração de Manipuladores	29
2.5. Eliminação de Erros Redundantes	34
2.6. Representação Física dos Erros Redundantes	36
2.7. Medidas Parciais da Posição da Extremidade	37
2.8. Cinemática Inversa	38
2.8.1. Solubilidade	39
3. Visão Computacional	41
3.1. Introdução	41
3.2. Modelagem da Câmera	42
3.2.1. Modelo Pinhole	42
3.2.2. Parâmetros Intrínsecos	43
3.2.3. Parâmetros Extrínsecos	45
3.3. Calibração de Câmera	47
3.4. Emparelhamento de Pontos	49
3.4.1. Detecção de Extremos no Espaço de Escalas	50
3.4.2. Localização Precisa de Pontos-Chaves	53
3.4.3. Atribuição de Orientação	54
3.4.4. Descritor Local da Imagem	55
3.4.5. Invariância à Luminosidade	57
3.4.6. Relacionamento de Pontos-Chaves em Imagens Distintas	57
3.5. Reconstrução	58
4. Aplicação ao Manipulador TA-40	60
4.1. Introdução	60
4.2. Descrição do Manipulador	61
4.3. Cinemática do Manipulador	62
4.3.1. Juntas 1 e 2	62
4.3.2. Juntas 2 e 3	63
4.3.3. Juntas 3 e 4	64
4.3.4. Juntas 4 e 5	64
4.3.5. Juntas 5 e 6	66
4.3.6. Juntas 6	66
4.3.7. Parâmetros de Denavit-Hartenberg	67
4.4. Calibragem do Manipulador	68

4.5. Cinemática Inversa	70
4.6. Visão Computacional	74
4.7. Câmera	75
4.8. Correlação de Pontos	75
4.9. Calibragem da Base	78
5. Resultados	80
5.1. Introdução	80
5.2. Simulação Cinemática	80
5.2.1. Cinemática Direta-Inversa	80
5.2.2. Jacobiana de Identificação	81
5.3. Simulações em Visão	83
5.3.1. Triangulação em Distâncias	83
5.3.2. Triangulação em Função da Resolução	85
5.3.3. Simulação de Calibração da Base	86
6. Conclusões e Sugestões	89
6.1. Contribuições do Trabalho	89
6.2. Sugestões para Trabalhos Futuros	90
7. Referências Bibliográficas	92
8. Apêndice A	94
8.1. Posição da Extremidade	94
8.2. Jacobiana de Identificação	95
9. Apêndice B	104

Lista de figuras

Figura 1 – Repetibilidade e precisão absoluta	16
Figura 2 – Coordenadas de referência dos diversos subsistemas (elos)	23
Figura 3 – Parâmetros de Denavit-Hartenberg	27
Figura 4 – Translação e Rotação do sistema devido ao erro no i-ésimo elo	30
Figura 5 – Erros Generalizados para i-ésimo Elo	31
Figura 6 – Esquema de Compensação de Erro	32
Figura 7 – Combinação linear de erros translacionais	36
Figura 8 – Combinação linear de erros translacionais	37
Figura 9 – Representação do modelo pinhole	42
Figura 10 – Geometria do modelo pinhole	43
Figura 11 – Modificações ao modelo pinhole com base na escala e cisalhamento dos pixels das câmeras. Figura (a) mostra os pixels segundo o modelo pinhole, figura (b) mostra um sistema mais realista onde escalas dos eixos x e y se diferenciam, figura (c) mostra o problema de cisalhamento	43
Figura 12 – Modelo pinhole modificado	44
Figura 13 – Transformação de coordenadas do mundo para a câmera	46
Figura 14 – Plataforma de Calibração	48
Figura 15 - Transformação do quadro do mundo para o quadro da câmera	48
Figura 16- Visão de um mesmo objeto em câmeras distintas deslocadas por uma distância fixa	49
Figura 17 – Imagem (à esquerda) submetida a gaussiana (no meio) e à diferença-do-gaussiano (à direita)	51
Figura 18 – Representação do procedimento de obtenção de diferentes diferenças de gaussianas para diversas octavas da imagem	52
Figura 19 – Máximo e mínimo das imagens de Diferença-do-Gaussiano são detectados comparando o pixel (marcado por X) com seus 26 vizinhos em 3x3 regions nas escalas corrente e adjacentes (marcados por círculos)	52
Figura 20 – Histograma de orientação do ponto-chave	55
Figura 21 – Ilustração da computação de descritores de pontos-chaves	56
Figura 22 – Triangulação	59
Figura 23 – TA40 e miniatura utilizada como “mestre” na tele-operação	61
Figura 24 – TA-40 e seu sistema de coordenadas	62
Figura 25 – Juntas 1 e 2	63
Figura 26 – Juntas 2 e 3	63
Figura 27 – Juntas 3 e 4	65
Figura 28 – Juntas 4 e 5	65
Figura 29 – Juntas 5 e 6	66
Figura 30 – Junta 6	67
Figura 31 – Eixos O_2, O_3 e O_4 sobre a forma de cinemática inversa de dois graus de liberdade	71
Figura 32 a/b – Imagem de painel obtidas com 10 segundos de diferença durante tarefa	76

Figura 33 a/b – Imagem de painel com os pontos obtidos pelo algoritmo SIFT	77
Figura 34 – Correlação de pontos	77
Figura 35 – Esquema do algoritmo para uma distância fixa, z	84
Figura 36 – Simulação de triangulação em função de distância de objetos à câmera	85
Figura 37 – Visões da simulação de calibração da base, com manipulador configurado com $\theta_1=26^\circ$, $\theta_2=30^\circ$, $\theta_3=20^\circ$, $\theta_4=47^\circ$, $\theta_5=60^\circ$, $\theta_6=43^\circ$	87
Figura 38 – Visões de simulação de calibração da base, com manipulador configurado com $\theta_1=15^\circ$, $\theta_2=-3^\circ$, $\theta_3=-10^\circ$, $\theta_4=10^\circ$, $\theta_5=128^\circ$, $\theta_6=0^\circ$	87
Figura 39 – Visões de simulação de calibração da base, com manipulador configurado com $\theta_1=0^\circ$, $\theta_2=90^\circ$, $\theta_3=-90^\circ$, $\theta_4=0^\circ$, $\theta_5=90^\circ$, $\theta_6=0^\circ$	88
Figura 40 – Sistema de coordenadas do TA-40	94
Figura 41 – Imagens de Calibração tiradas da câmera esquerda e direita	104
Figura 42 – Pontos obtidos nas bordas da imagem	104
Figura 43 – Posição das câmeras em relação ao tabuleiro	105

Lista de tabelas

Tabela 1 – Tabela de Parâmetros DH	67
Tabela 2 – Resultados da simulação de cinemática direta-inversa	81
Tabela 3 – Resultados da simulação com a Jacobiana de Identificação	82
Tabela 4 – Resultados da simulação de triangulação em distâncias	84
Tabela 5 – Medida de erro de triangulação a partir da resolução e distância da câmera (erros em milímetros).	85
Tabela 6 – Resultados da simulação de Calibração da Base	88

Abreviações

ROV	Veículo Submarino Robótico
TA-40	Manipulador Robótico Submarino
GEC	Compensação de Erros Elásticos e Geométricos
SIFT	Transformada de Propriedades Invariantes à Escala
DH	Denavit-Hartenberg