

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



Ilana Nigri

**Comparação entre controles *look-and-move* e servo-visual
utilizando transformadas SIFT em manipuladores do tipo
*eye-in-hand***

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da PUC-Rio como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências da Engenharia Elétrica

Orientador: Raul Queiroz Feitosa
Co-orientador: Marco Antonio Meggiolaro

Rio de Janeiro
Junho de 2009



Ilana Nigri

Comparação entre Controles *look-and-move* e servo-visual Utilizando Transformadas SIFT em Manipuladores do Tipo *eye-in-hand*

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.

Dr. Raul Queiroz Feitosa
Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

Dr. Marco Antônio Meggiolaro
Co- Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica

Dr. Mauro Speranza Neto

Departamento de Engenharia Mecânica

Dr. Fernando César Lizarralde
COPPE/UFRJ

Prof. José Eugenio Leal
Coordenador Setorial do Centro
Técnico Científico

Rio de Janeiro, 03 de junho de 2009

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

Ilana Nigri

Graduou-se em Engenharia de Controle e Automação na PUC-Rio (Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro) em 2007.

Ficha Catalográfica

Nigri, Ilana

Comparação entre controles look-and-move e servo-visual utilizando transformadas SIFT em manipuladores do tipo eye-in-hand / Ilana Nigri ; orientador: Raul Queiroz Feitosa ; co-orientador: Marco Antonio Meggiolaro. – 2009. 109 f. : il. (color.) ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)– Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2000.

Inclui bibliografia

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Manipulador robótico. 3. Sistemas eye-in-hand. 4. Controle look-and-move. 5. Controle servo-visual. 6. Transformações SIFT. I. Feitosa, Raul Queiroz. II. Meggiolaro, Marco Antonio. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. IV. Título.

CDD: 621.3

Ao meu avô.

Agradecimentos

A Deus.

Ao meu orientador Dr. Raul Queiroz Feitosa pelos ensinamentos transmitidos e pelo auxílio constante.

Ao meu co-orientador Dr. Marco Antonio Meggiolaro pela convivência diária, auxiliando, ensinando e participando não só no mestrado, mas também dos 5 anos de graduação.

Ao CNPq, à PUC-Rio e à Petrobras pelas ferramentas que possibilitaram realizar todos os experimentos na mais alta qualidade.

Aos meus pais que souberam entender minha ausência, sem deixar de me apoiar todos os dias.

Ao meu irmão que sempre esteve presente, alegrando os meus dias mais difíceis.

A minha avó maravilhosa, que sempre tinha uma palavra de incentivo.

Aos meus amigos do Laboratório de Robótica, por estarem sempre dispostos a me ajudar: Júlio, Alexandre, Camila, Gui Franco, Gui Porto, Esguerda, Fabiano, Pet, Tico, Michel, Emo, Mourão, Paulete

Aos meus amigos do LVC pelo companheirismo e incentivo: Dário, Gilson, Paula, Cecília e Denis.

Aos meus queridos amigos da dança, minha segunda família.

Resumo

Nigri, Ilana; Feitosa, Raul Queiroz; Meggiolaro, Marco Antonio. **Comparação entre controles *Look-and-Move* e Servo-Visual utilizando transformadas SIFT em manipuladores do tipo *eye-in-hand***. Rio de Janeiro, 2009, 109p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Visão Computacional pode ser utilizada para calibrar e auto-localizar robôs. Existem diversas aplicações de auto-localização e controle aplicadas a manipuladores industriais e robôs móveis. Em particular, o controle visual pode ser útil em intervenções submarinas, nas quais um manipulador robótico é acoplado a um ROV (Veículo de Operação Remota) para execução de tarefas em grandes profundidades, como o manuseio de válvulas de equipamentos como manifolds. Este trabalho tem como objetivo desenvolver e implementar técnicas de controle visual para auto-localização e posicionamento de manipuladores robóticos. Assume-se que o manipulador possui uma câmera presa em sua extremidade (configuração *eye-in-hand*). Duas técnicas de controle visual são estudadas: *look-and-move* e servo-visual, que diferem entre si pela realimentação do controle. A primeira utiliza sensores de posição, a partir de uma única imagem capturada no início da movimentação. A segunda utiliza diversas imagens capturadas durante o processo. A principal contribuição deste trabalho está no uso da transformada SIFT, robusta a rotações, translações, mudança de escala e iluminação, para obter e correlacionar pontos-chave entre as imagens de referência e capturadas em tempo real. A metodologia é validada experimentalmente através de um manipulador robótico baseado na estrutura mecânica de uma mesa $x-y-\theta$. Um sistema eletrônico é utilizado como interface entre o robô e o software de controle, onde estão implementadas todas as técnicas propostas. Testes iniciais são realizados com imagens de objetos circulares, sem o uso de transformações como o SIFT. Em seguida, são feitos testes com a imagem de um painel real de um manifold, utilizando transformadas SIFT para determinar a localização do manipulador em relação ao painel e controlá-lo até uma pose desejada. Os resultados mostram que o desempenho do controle servo-visual depende muito do tempo de processamento de cada imagem, ao contrário do *look-and-move*. No entanto, o controle servo-visual apresenta erros finais de posicionamento muito menores. O método

SIFT é apropriado para uso em ambos os controles, desde que a resolução das imagens seja alta o suficiente para evitar correlações falsas.

Palavras-chaves

Manipulador robótico; sistemas *eye-in-hand*; controle *look-and-move*; controle servo-visual; Transformações SIFT.

Abstract

Nigri, Ilana; Feitosa, Raul Queiroz; Meggiolaro, Marco Antonio. **Comparison between look-and-move and visual servo control using SIFT transforms in eye-in-hand manipulator systems.** Rio de Janeiro, 2009, 109p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Computer vision can be used to calibrate and self-localize robots. There are many applications in self-localization and control applied to industrial manipulators and mobile robots. In particular, visual control can be useful in submarine interventions, where a robotic manipulator is mounted on a Remote Operated Vehicle (ROV) to execute tasks at high depths, such as handling manifold valves. This work has the objective to develop and implement visual control techniques to self-localize and position robotic manipulators. It is assumed that a monocular camera is attached to the robot end-effector (eye-in-hand configuration). Two visual control techniques are studied: look-and-move and visual servo control. Their main difference is related to the adopted feedback sensors. The first technique uses position sensors with the aid of a single image captured at the beginning of the robot movement. The second technique relies on several images captured in real time during the robot movement. The main contribution of this work is the use of the SIFT transform, robust to rotation, translation, changes in scale and illumination, to obtain and correlate key-points between reference images and images captured in real time. The methodology is experimentally validated using a manipulator based on the mechanical structure of an x - y - θ coordinate table. An electronic system was developed to control the robot through a software in a computer, where were implemented all the techniques proposed. Preliminary tests are performed on simple circular-shaped objects, without the need for SIFT transforms. Next, tests are performed with a photo of an actual manifold panel typically used in submarine interventions, using SIFT transform to find the localization of the manipulator with respect to the panel. The results show that the performance of the visual servo control depends on the image processing time, unlike the look-and-move. However, the visual-servo control presents smaller positioning errors. The SIFT method is appropriate for both controls, since image resolution be high enough to avoid false matching.

Keywords

Robotic manipulator; eye-in-hand; look-and-move control; visual servo control; SIFT Transform.

Sumário

1	Introdução	16
2	Visão Computacional	20
2.1.	Processamento da imagem	20
2.1.1.	Parâmetros extrínsecos	21
2.1.2.	Parâmetros intrínsecos	23
2.1.3.	Modelo da câmera	24
2.1.4.	Calibração da Câmera	24
2.2.	SIFT (<i>Scale Invariant Feature Transform</i>)	26
2.2.1.	Detecção dos pontos chave	27
2.2.2.	Eliminação dos pontos chave “fracos”	29
2.2.3.	Determinação da orientação dos pontos chave	29
2.2.4.	Cálculo dos descritores dos pontos chave	30
2.2.5.	Pareamento	31
3	Controle Visual	33
3.1.	Arquiteturas de Controle	34
3.1.1.	Controle <i>look-and-move</i> baseado em pose	35
3.1.2.	Controle <i>look-and-move</i> baseado em imagem	35
3.1.3.	Controle servo-visual baseado em pose	36
3.1.4.	Controle servo-visual baseado em imagem	36
3.2.	Cinemática Inversa	37
3.2.1.	Jacobiano de um manipulador plano de 2 graus de liberdade	37
3.2.2.	Jacobiana de um manipulador genérico	39
3.3.	Controle PID	40
3.4.	Integração da Visão Computacional no Controle	42
4	Sistema Experimental	44
4.1.	Sistema mecânico	45

4.2. Modelo Matemático da Mesa XY θ	48
4.3. Sistema eletrônico	53
4.3.1. Sistema com realimentação por sensores de posição (Controle <i>Look-and-Move</i>)	55
4.3.2. Sistema com realimentação por imagem (Controle Servo-Visual)	55
4.4. <i>Software</i> de controle	57
4.5. Processamento da Imagem	62
4.6. Equacionamento do sistema com alvo circular	62
4.7. Equacionamento do sistema com alvo 2D genérico	67
5 Resultados	72
5.1. Experimento 1: Teste frontal utilizando como alvo círculo	73
5.2. Experimento 2: Teste lateral utilizando como alvo círculo	83
5.3. Experimento 3: Teste frontal utilizando como alvo painel	87
5.4. Experimento 4: Teste lateral utilizando como alvo painel	93
6 Conclusões	101
7 Referências Bibliográficas	103
Apêndice I	105
Apêndice II	107
Apêndice III	109

Lista de figuras

Figura 1 - Manipulador TA-40	17
Figura 2 - Modelo de Projeção da Câmera	21
Figura 3 - Transformação do sistema de coordenadas do mundo para sistema de coordenadas da câmera	22
Figura 4 - Resultado do método SIFT aplicado a uma imagem	27
Figura 5 - Gaussianas aplicadas a cada oitava, e a partir de suas subtrações surgem as DOG's (Diferença-de-Gaussianas)	28
Figura 6 - Detecção dos máximos e mínimos nas diferenças entre gaussianas (DOG's)	29
Figura 7 - Orientação dos pontos da vizinhança (esquerda), e descritor do <i>keypoint</i> (direita)	30
Figura 8 - Descritor dos pontos	31
Figura 9 - Resultado do algoritmo de detecção de pontos correspondentes (Lowe, 2004)	32
Figura 10 - Esquema de um sistema genérico	33
Figura 11 - Controle <i>look-and-move</i> baseado em pose	35
Figura 12 - Controle <i>look-and-move</i> baseado em imagem	36
Figura 13 - Controle servo-visual baseado em pose	36
Figura 14 - Controle servo-visual baseado em imagem	37
Figura 15 - Manipulador planar de 2 graus de liberdade	38
Figura 16 - Movimentações infinitesimais de um manipulador genérico	40
Figura 17 - Esquema do Sistema Experimental	44
Figura 18 - Manipulador TA-40	45
Figura 19 - Mesa Coordenada XY θ	46
Figura 20 - Motoredutor <i>Banebots</i>	46
Figura 21 - Acoplamento mecânico entre os eixos do motor e da mesa	47
Figura 22 - Esquema da Mesa XY θ	47
Figura 23 - Câmera Logitech utilizada para aquisição das imagens	48
Figura 24 - Parâmetros do Manipulador	49
Figura 25 - Placa eletrônica	54

Figura 26 - Controlador de Velocidade <i>Banebots</i>	54
Figura 27 - Tela principal do <i>software</i>	58
Figura 28 - Janela de seleção da imagem de referência (controle baseado em imagem)	59
Figura 29 - Janela de distâncias desejadas do objeto de interesse (controle baseado em pose)	59
Figura 30 - Esquema dos testes com disco	63
Figura 31 - Imagem obtida da câmera com disco deslocado do centro	64
Figura 32 - Vista frontal e superior do disco	65
Figura 33 - Pontos chaves (x_o, y_o) encontrados pelo algoritmo SIFT sobre o objeto alvo	68
Figura 34 – Esquema do experimento utilizando objetos 2D	69
Figura 35 – Resolução em <i>pixels versus</i> tempo de processamento do algoritmo SIFT	73
Figura 36 - Vista superior do experimento 1, para teste frontal utilizando círculo vermelho como alvo	74
Figura 37 - Vista inicial do experimento 1 e 2	75
Figura 38 - Vista final do experimento 1	75
Figura 39 - Gráfico da posição real e desejada <i>versus</i> tempo (controle <i>look-and-move</i> baseado em pose), experimento 1	77
Figura 40 - Gráfico da posição real, desejada e percebida pela câmera através do software, <i>versus</i> tempo (controle servo-visual baseado em pose), experimento 1	78
Figura 41 - Gráfico de características <i>versus</i> tempo (controle <i>look-and-move</i> baseado em imagem), experimento 1	79
Figura 42 - Gráfico de características <i>versus</i> tempo (controle servo-visual baseado em imagem), experimento 1	79
Figura 43 - Comparação entre as técnicas de controle pelo gráfico posição <i>versus</i> tempo, experimento 1	81
Figura 44 - Imagem inicial, deseja e resultantes nas quatro técnicas de controle, experimento 1	82
Figura 45 - Vista superior do experimento 2 para teste lateral utilizando círculo vermelho como alvo	83

Figura 46 - Imagem desejada do experimento 2	84
Figura 47 - Comparação entre as técnicas de controle pelo gráfico posição <i>versus</i> tempo, experimento 2	85
Figura 48 - Imagem inicial, desejada, e resultantes nas quatro técnicas de controle, experimento 2	86
Figura 49 - Vista superior do experimento 3 para teste frontal utilizando como alvo o painel 2D	87
Figura 50 - Imagem frontal do painel para o experimento 3	88
Figura 51 - Imagem inicial do experimento 3 utilizando como alvo o painel 2D	88
Figura 52 - Esquema entre a posição atual, desejada e de referência	89
Figura 53 - Comparação entre as técnicas de controle pelo gráfico posição <i>versus</i> tempo, experimento 3	91
Figura 54 - Imagem inicial, desejada e resultantes nas quatro técnicas de controle, experimento 3	93
Figura 55 - Vista superior do experimento 4 para teste lateral utilizando painel 2D como alvo	94
Figura 56 - Imagem lateral do painel	94
Figura 57 - Imagem inicial do experimento 4 utilizando como alvo o painel 2D	95
Figura 58 - Gráfico da posição real, desejada e percebida pela câmera através do software <i>versus</i> tempo para o controle servo-visual caso (A), experimento 4	97
Figura 59 - Gráfico da posição real, desejada e percebida pela câmera através do software <i>versus</i> tempo para o controle servo-visual caso (B), experimento 4	98
Figura 60 - Comparação entre as técnicas de controle pelo gráfico posição <i>versus</i> tempo, experimento 4	99
Figura 61 - Imagem inicial, desejada e resultantes nas quatro técnicas de controle, experimento 4	100

Lista de tabelas

Tabela 1 - Parâmetros enviados através da porta serial à eletrônica desenvolvida	56
Tabela 2 - Posições reais e relativas obtidas no experimento 1, para as quatro técnicas de controle, associada a valores desejadas $x_d = 10cm$, $y_d = 10cm$, $\theta_d = 0^\circ$, $i_r = i_R = 195pixels$ e $i_a = 10pixels$	76
Tabela 3 - Posições reais e relativas obtidas no experimento 2, para as quatro técnicas de controle, associada a valores desejados $x_d = 7,5cm$, $y_d = 16cm$, $\theta_d = 0^\circ$, $i_r = i_R = 285pixels$ e $i_a = -161pixels$	84
Tabela 4 - Posições reais e relativas obtidas no experimento 3 para quatro técnicas de controle, associada a valores desejados $x_d = 10cm$, $y_d = 10cm$, $\theta_d = 0^\circ$, $x_{reld} = 9cm$, $y_{reld} = 10cm$ e $\theta_{reld} = 0^\circ$	90
Tabela 5 - Posições reais e relativas obtidas no experimento 4 para quatro técnicas de controle, associada a valores desejados $x_d = 8cm$, $y_d = 15cm$, $\theta_d = 30^\circ$ e $x_{reld} = 8cm$, $y_{reld} = 15cm$ e $\theta_{reld} = 20^\circ$	95