

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



Diogo Menezes Duarte

**RECONSTRUÇÃO DO ESPAÇO TRIDIMENSIONAL A PARTIR DA
DEFORMAÇÃO DE TEXTURA DE IMAGENS**

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: Jorge Luís Nunes e Silva Brito

Rio de Janeiro
Abril de 2006



Diogo Menezes Duarte

**Reconstrução do Espaço Tridimensional a partir da
Deformação de Textura de Imagens**

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. Raul Queiroz Feitosa

Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica - PUC-Rio

Prof. Jorge Luís Nunes e Silva Brito

Co-orientador

UERJ

Prof. Guilherme Lucio Abelha Mota

UERJ

Prof. Sidnei Paciornik

Departamento de Ciências dos Materiais e Metalurgia – PUC-Rio

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 06 de Abril de 2006

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

Diogo Menezes Duarte

Graduou-se em Engenharia Elétrica (Sistemas e Computação) na UERJ (Universidade do Estado do Rio de Janeiro) em 2003.

Ficha Catalográfica

Duarte, Diogo Menezes

Reconstrução do Espaço Tridimensional a partir da Deformação de Textura de Imagens / Diogo Menezes Duarte; orientador: Raul Queiroz Feitosa; co-orientador: Jorge Luís Nunes e Silva Brito – Rio de Janeiro: PUC, Departamento de Engenharia Elétrica, 2006.

121 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. Processamento digital de imagens. 3. Visão Computacional. 4. Textura. 5. Deformação de Textura. 6. Forma a partir da textura. 7. Estimativa da transformação afim. 8. Reconstrução tridimensional. 9. Reconstrução de cena. 10. Filtros de Gabor. I. Feitosa, Raul Queiroz. II. Brito, Jorge Luís Nunes e Silva. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia elétrica. IV. Título

CDD: 621.3

Agradecimentos

Aos meus pais, Tonho e Lu, pelo carinho, amor e apoio incondicional em tudo.

Às minhas queridas irmãs Dani, Taty e Thaissa, pelo amor e por aturarem meu mau humor nas fases mais “divertidas” deste trabalho.

Aos meus amigos e amigas, irmãos de coração, que agüentaram minha ausência em muitos momentos (talvez eles tenham gostado pois só sabia falar de texturas). Tentar citar nomes aqui seria injusto pois com certeza acabaria esquecendo de alguém, além do que boa parte de minha memória foi tomada por nomes de autores de artigos. Mas saibam que não esqueço do sorriso de nenhum de vocês.

Ao meu orientador Raul, pela preocupação quase que paterna, amizade, força e ajuda em todas as fases deste trabalho assim como ao meu co-orientador Prof. Nunes.

Ao CNPq e a PUC-Rio, pelos auxílios concedidos.

Aos grandes amigos, irmãos do LVC: Rodrigo, Vá (Vanessa), Japa-boy (André), Thiago e Clara. Pelas horas de trabalho, companheirismo, piadas, em longos cafés, em bares, alegrias, tristezas etc etc etc.

Ao Fabian Graefe, da universidade de Braunschweig – Alemanha, pela ajuda no início deste trabalho e atual amizade, além de piadas internacionais.

Ao pessoal da 442 da PUC, Manuel, Isnarde e cia, sempre dispostos a nos ajudar.

Aos autores Ruth Rosenholtz e Boaz Super, pela ajuda em dúvidas sobre seus trabalhos. Em especial também a autora Angeline Loh, pela amigável troca de e-mails com dúvidas e idéias.

Resumo

Duarte, Diogo Menezes; Feitosa, Raul Queiroz. **Reconstrução do Espaço Tridimensional a partir da Deformação de Textura de Imagens**. Rio de Janeiro, 2006, 121p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O presente trabalho apresenta um estudo sobre técnicas de construção de um modelo tridimensional de objetos a partir unicamente da informação de textura. Estas técnicas são baseadas na medida da deformação da textura ao longo de uma superfície, obtendo assim a orientação do vetor normal à superfície em cada ponto. De posse da orientação é possível construir um modelo tridimensional do objeto. São avaliados três métodos. O primeiro emprega Filtros de Gabor e momentos de segunda ordem como medida de textura e os outros dois estimam a transformação afim entre recortes de igual tamanho na imagem. A estimativa da transformação afim tem ênfase especial neste trabalho por ser um passo fundamental no algoritmo que mede a deformação da textura. Os métodos foram validados em diferentes etapas, de forma a avaliar: estimativa da transformação afim; decomposição em ângulos; e reconstrução do modelo 3D a partir do mapa de orientação, também conhecido como mapa de agulhas. A avaliação experimental foi realizada com imagens sintéticas e fotos de objetos reais. Os resultados mostram a aplicabilidade, dificuldades e restrições dos métodos analisados.

Palavras-chave

Processamento digital de imagens; Visão Computacional; textura; deformação de textura; forma a partir da textura; estimativa da transformação afim; reconstrução tridimensional; reconstrução de cena; Filtros de Gabor.

Abstract

Duarte, Diogo Menezes; Feitosa, Raul Queiroz. **Scene Reconstruction using Shape from Texture**. Rio de Janeiro, 2006, 121p. Msc. Dissertation – Department of Electrical Engineering, Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro.

The current work presents a study about methods for 3D object shape reconstruction based on their texture information. These methods, called “Shape from Texture”, measure texture deformation along object surface, obtaining the orientation in each point of the image. Having the orientation in each point (a needle map) it is possible to construct the object 3D model. Three methods are studied in this dissertation. One of these methods uses Gabor Filters and second order moments, and other two that estimate the affine transform between images patches. The affine estimation problem gets emphasis in the present work since it is an essential step in most Shape from Texture algorithms. The methods were tested in separate steps: evaluate the affine transform estimation; the decomposition of the affine matrix in slant and tilt angles; and the 3D model reconstruction using the needle map. Both synthetic and real images were used on the experiments. The results clearly show the applicability, difficulties and restrictions of the investigated methods.

Keywords

Digital Image Processing; Computer Vision; texture; texture deformation; Shape from X; Shape from Texture; affine transform estimate; 3D reconstruction; scene reconstruction; Gabor filters.

Sumário

1 Introdução	15
1.1 Reconstrução do espaço tridimensional	16
1.2 Objetivo	18
1.3 Organização da dissertação	18
2 Trabalhos Relacionados	19
2.1 Visão Estéreo (<i>Shape from Stereopsis</i>)	19
2.2 Forma a partir da intensidade (<i>Shape from Intensity</i>)	21
2.3 Forma a partir do Movimento (<i>Shape from Motion/Vídeo</i>)	23
2.4 Forma a partir do Foco (<i>Shape from Focus/Defocus</i>)	23
2.5 Forma a partir de sensores de distância (<i>Shape from Range Sensor</i>)	24
2.6 Forma a partir da textura (<i>Shape from Texture</i>)	24
2.6.1 Estimativa da orientação de planos inclinados	25
2.6.2 Estimativa da forma de superfícies curvas	27
3 Conceitos Básicos	29
3.1 Afinal, o que é textura?	29
3.1.1 Homogeneidade e isotropia	30
3.2 Modelo de Projeção Ortográfica	31
3.3 Representação do espaço 3D através da orientação	32
3.4 Modelo de transformação geométrica	33
3.4.1 Decomposição do modelo de transformação por SVD	34
4 Metodologia	36
4.1 Método de Super e Bovik	37
4.1.1 Filtros de Gabor	38
4.1.2 Convolução com os filtros e momentos de segunda ordem	42
4.1.3 Momentos canônicos	45
4.1.4 Projeção da textura	46
4.1.5 Cálculo da orientação	46

4.2. Método de Rosenholtz e Malik	48
4.2.1 Construção dos <i>espectrogramas</i>	49
4.2.2 Análise diferencial	50
4.3. Método de Loh e Zisserman	54
4.3.1 Transformação para textura isotrópica	54
4.3.2 Cálculo da rotação	56
4.3.3 Transformação final	58
4.4 Algoritmo completo de reconstrução de superfícies	58
4.4.1 Extração de recortes	59
4.4.2 Segmentação dos pontos de interesse	61
4.4.3 Seleção de modelo frontal	62
4.4.4 Estimativa da transformação afim	62
4.4.5 Reconstrução do modelo 3D	63
5 Descrição dos experimentos	64
5.1. Decomposição da transformação afim na presença de ruído	66
5.2 Estimativa da transformação afim	71
5.3 Reconstrução da forma de superfícies	79
5.3.1 Método de Super e Bovik	80
5.3.2 Reconstrução da forma da superfície usando a estimativa da transformação afim de Loh	88
5.3.3 Estudo de caso	97
5.4 Avaliação Final dos experimentos	106
6 Conclusão	108
6.1 Trabalhos futuros	109
7 Referências	111
Apêndice I Tabelas extras dos experimentos da estimação da transformação afim	116
Anexo I Derivação das equações de Super e Bovik	120

Lista de figuras

Figura 1 – Exemplo de cena complexa.	15
Figura 2 – Matriz $M \times N \times 3$ que representa uma imagem digital colorida.	16
Figura 3 - Exemplo de objeto texturizado.	17
Figura 4 - O problema da fusão binocular: no diagrama da esquerda temos apenas um ponto e seu homólogo facilmente encontrado. No da direita temos quatro pontos e seus homólogos podem ser qualquer um dos quatro.	20
Figura 5 - Exemplos de pares estereoscópios.	21
Figura 6 - Exemplos de imagens onde o sombreamento evidencia a noção de profundidade.	22
Figura 7 – Exemplos de texturas. Texturas naturais: mar (a) e grama cortada (b). Texturas sintéticas (c) e (d), que possuem distribuição idêntica de intensidade, porém diferem-se no arranjo espacial.	29
Figura 8 – Exemplos de textura. Textura homogênea (a) e textura isotrópica (b).	31
Figura 9 – Ilustração de projeções. (a) Perspectiva. (b) Ortográfica.	32
Figura 10 - Representação da orientação por slant e tilt.	32
Figura 11 – Exemplo de Transformação T_M passo a passo. (a) imagem original. (b) após rotação por θ . (c) compressão de (b) por slant . (d) rotação de (c) por tilt .	33
Figura 12 - Cilindro sintético com textura senoidal aplicada.	37
Figura 13 - Exemplos de Filtros de Gabor no domínio espacial. (a) e (b), parte real e imaginária, respectivamente, de um filtro tendo $F=12$ ciclos/imagem, $\kappa=1$ e $\Phi=0^\circ$. (c) e (d), parte real e imaginária, respectivamente, de um filtro tendo $F=32$ ciclos/imagem, $\kappa=1/2$ e $\Phi=45^\circ$.	41
Figura 14 - Transformadas de Fourier dos Filtros de Gabor. (a) $F=12$ ciclos/imagem, $\kappa=1$ e $\Phi=0^\circ$. (b) $F=32$ ciclos/imagem, $\kappa=1/2$ e $\Phi=45^\circ$.	41

Figura 15 - Diagrama do método de Rosenholtz e Malik.	53
Figura 16 - Transformação de uma textura em sua versão isotrópica.	54
Figura 17 - Transformada de Fourier da versão isotrópica da primeira imagem (a) e da segunda (b).	56
Figura 18 - Transformada de Fourier em coordenadas polares da versão isotrópica da primeira (a) e da segunda (b) imagem.	57
Figura 19 - Sinais obtidos a partir da média das transformadas de Fourier nas coordenadas polares. (a) primeira imagem e (b) segunda imagem.	57
Figura 20 – Exemplo de extração de recortes de uma imagem.	59
Figura 21 – Exemplo de detecção de pontos de interesse. As marcações “+” representam os pontos de interesse detectados pelo método de Lowe.	60
Figura 22 – Grupos de pontos de interesse encontrados pelo método de Lowe e segmentados por <i>K-means</i> . (a) grupo de pontos que representam bem os elementos de textura. (b) grupo que representa mal os elementos de textura (concentrados nas bordas da bola de golfe).	61
Figura 23 – Exemplo de modelo frontal extraído da imagem.	62
Figura 24 - (a) Mapa de agulhas. (b) Modelo 3D reconstruído usando método de Kovesi.	63
Figura 25 - Exemplo de superfície de erro para o <i>tilt</i> . <i>Theta</i> é fixo para todas as combinações.	65
Figura 26 - Superfície de erro do <i>slant</i> para decomposição na presença de ruído. Variância = 0.0001, <i>theta</i> = 0°.	68
Figura 27 - Superfícies de erro do <i>slant</i> para decomposição na presença de ruído. Variância = 0.01, <i>theta</i> = 0°.	69
Figura 28 - Superfícies de erro do <i>tilt</i> para decomposição na presença de ruído. Variância = 0.0001, <i>theta</i> = 0°.	70
Figura 29 - Superfícies de erro do <i>tilt</i> para decomposição na presença de ruído. Variância = 0.01, <i>theta</i> = 0°.	70
Figura 30 - Diagrama da avaliação visual do erro do método.	72
Figura 31 - Texturas de Brodatz utilizadas nos experimentos. (a) D18, (b) D20, (c) D95, (d) D101 e (e) D103.	72

Figura 32 - Diferença absoluta entre transformações afim geradas (T_M) e a matriz identidade.	74
Figura 33 - Diferença entre matriz original T_M e estimada T_R' para a textura D95 usando o método de Rosenholtz.	75
Figura 34 - Diferença entre matriz original T_M e estimada T' para a textura D95 usando o método de Loh.	75
Figura 35 - Superfície de erro para o <i>slant</i> para a textura D95, usando o método de Ruth Rosenholtz. $\theta = 0^\circ$.	76
Figura 36 - Superfície de erro para o <i>tilt</i> para a textura D95, usando o método de Ruth Rosenholtz. $\theta = 0^\circ$.	77
Figura 37 - Superfície de erro para o <i>slant</i> para a textura D95, usando o método de Angeline Loh. $\theta = 30^\circ$.	77
Figura 38 - Superfície de erro para o <i>tilt</i> para a textura D95, usando o método de Angeline Loh. $\theta = 30^\circ$.	78
Figura 39 - Exemplos de estimativas da transformação afim. (a) Recorte original. (b) Recorte com uma transformação afim A aplicada. (c) Aplicação da transformada inversa \hat{A} (estimada pelo método de Loh) sobre o recorte (b).	79
Figura 40 – (a) imagem sintética de um cilindro texturizado com o ponto frontal encontrado demarcado.(b) Mapa de agulhas obtido pelo método de Super.	81
Figura 41 - (a) Modelo 3D a partir do mapa de agulhas da figura anterior. (b) Modelo 3D com a textura sobreposta.	82
Figura 42 - (a) imagem real de uma bola de golfe com ponto frontal indicado. (b) mapa de agulhas obtido pelo método de Super.	83
Figura 43 - Modelo 3D a partir do mapa de agulhas (estimado pelo método de Super) da bola de golfe.	84
Figura 44 - Modelo 3D da figura anterior com a textura sobreposta.	85
Figura 45 - Imagem sintética de uma superfície irregular com ponto frontal indicado.	85
Figura 46 - Mapa de agulhas obtido pelo método de Super.	86
Figura 47 - (a) Modelo 3D a partir do mapa de agulhas (estimado pelo método de Super) da superfície irregular. (b) Modelo 3D com a textura sobreposta.	87

Figura 48 – Exemplo de grupos de pontos de interesse cujo ponto frontal é distinto para cada. (a) Grupo 1. (b) Grupo 2.	88
Figura 49 - Resultados obtidos para a imagem de um cilindro sintético. (a) Imagem original com pontos frontais selecionados indicados. (b) Mapa de agulhas.	89
Figura 50 – Cilindro sintético com as normais sobrepostas.	90
Figura 51 - Modelo 3D reconstruído a partir do mapa de agulhas.	90
Figura 52 – Modelo 3D com a textura sobreposta.	91
Figura 53 - Imagem de uma bola de golfe com ponto frontal selecionado indicado.	91
Figura 54 - Mapa de agulhas encontrado	92
Figura 55 – Bola de golfe com as normais sobrepostas.	92
Figura 56 - Modelo 3D reconstruído a partir do mapa de agulhas da bola de golfe.	93
Figura 57 – Modelo 3D da figura anterior com a textura sobreposta.	94
Figura 58 - Superfície sintética irregular com pontos frontais selecionados indicados.	94
Figura 59 - Mapa de agulhas da figura anterior	95
Figura 60 – Superfície irregular com as normais sobrepostas.	95
Figura 61 - (a) Modelo 3D reconstruído a partir do mapa de agulhas. (b) Modelo 3D com a textura sobreposta.	96
Figura 62 – Cena real de uma colheita.	97
Figura 63 – Exemplo de modelagem do conteúdo da caçamba.	98
Figura 64 – (a) Primeira imagem da câmara da colheitadeira com ponto frontal detectado pelo método de Super. (b) Primeira imagem com o ponto frontal determinado manualmente para o algoritmo <i>SFT</i> com estimativa afim de Loh.	99
Figura 65 – (a) Modelo tridimensional da primeira imagem da câmara da colheitadeira obtido a partir do mapa de agulhas oriundo do método de Super. (b) O mesmo modelo com a textura sobreposta.	100
Figura 66 - (a) Modelo tridimensional da primeira imagem da câmara da colheitadeira obtido a partir do mapa de agulhas oriundo do algoritmo <i>SFT</i> com estimativa afim de Loh. (b) O mesmo modelo com a textura sobreposta.	101

Figura 67 - (a) Segunda imagem da câmara da colheitadeira com ponto frontal detectado pelo método de Super. (b) Segunda imagem com o ponto frontal determinado manualmente para o algoritmo *SFT* com estimativa afim de Loh. 102

Figura 68 – (a) Modelo tridimensional da segunda imagem da câmara da colheitadeira obtido a partir do mapa de agulhas oriundo do método de Super. (b) O mesmo modelo com a textura sobreposta. 103

Figura 69 – (a) Modelo tridimensional da segunda imagem da câmara da colheitadeira obtido a partir do mapa de agulhas oriundo do algoritmo *SFT* com estimativa afim de Loh. (b) O mesmo modelo com a textura sobreposta. 104

Figura 70 – As duas imagens segmentadas da câmara da colheitadeira. 105

Lista de tabelas

Tabela 1 - Algoritmo <i>SFT</i> de Super e Bovik.	48
Tabela 2 - Erros (em graus) da decomposição da transformação afim por <i>SVD</i> na presença de ruído.	67
Tabela 3 - Erros calculados (em graus) para o método de Ruth Rosenholtz.	73
Tabela 4 - Erros calculados (em graus) para o método de Angeline Loh.	73
Tabela 5 - Erros da decomposição da transformação afim por <i>SVD</i> na presença de ruído. Versão completa da Tabela 2.	116
Tabela 6 – Continuação da Tabela 5.	117
Tabela 7 - Erros calculados (em graus) para o método de Ruth Rosenholtz.	118
Tabela 8 - Erros calculados (em graus) para o método de Angeline Loh.	119