

**Anselmo Antunes
Montenegro**

**Reconstrução de cenas a
partir de imagens através de
escultura do espaço por
refinamento adaptativo**

TESE DE DOUTORADO

**DEPARTAMENTO DE INFORMÁTICA
Programa de Pós-graduação em
Informática**

Rio de Janeiro
Setembro de 2003

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



Anselmo Antunes Montenegro

**Reconstrução de cenas a partir de imagens
através de escultura do espaço por
refinamento adaptativo**

Tese de Doutorado

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em In-
formática do Departamento de Informática da PUC como
parte dos requisitos parciais para obtenção do título de
Doutor em Informática

Orientador: Prof. Marcelo Gattass
Co-Orientador: Prof. Paulo Cezar Pinto Carvalho

Rio de Janeiro
Setembro de 2003



Anselmo Antunes Montenegro

**Reconstrução de cenas a partir de imagens
através de escultura do espaço por
refinamento adaptativo**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Informática do Departamento de Informática do Centro Técnico Científico da PUC como parte dos requisitos parciais para obtenção do título de Doutor em Informática aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Marcelo Gattass

Orientador

Departamento de Informática — PUC

Prof. Paulo Cezar Pinto Carvalho

Co-Orientador

Departamento de Informática — PUC

Prof. Manuel Menezes de Oliveira Neto

Instituto de Informática - UFRGS

Prof. Luis Carlos Pacheco R. Velho

Instituto de Matemática Pura e Aplicada - IMPA

Prof. Waldemar Celes Filho

Departamento de Informática - Puc-Rio

Prof. Marcelo de Andrade Dreux

Departamento de Engenharia Mecânica - Puc-Rio

Prof. Ney Augusto Dumont

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico —
PUC

Rio de Janeiro, 12 de Setembro de 2003

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

Anselmo Antunes Montenegro

Graduou-se em Informática pela Universidade Federal Fluminense – UFF. Obteve o título de Mestre em Informática pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – Puc-Rio na área de Computação Gráfica.

Ficha Catalográfica

Montenegro, Anselmo Antunes

Reconstrução de cenas a partir de imagens através de escultura do espaço por refinamento adaptativo/ Anselmo Antunes Montenegro; orientador: Marcelo Gattass; co-orientador: Paulo Cezar Pinto Carvalho. — Rio de Janeiro : PUC, Departamento de Informática, 2003.

v., 196 f: il. ; 30 cm

1. Tese (doutorado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Informática.

Inclui referências bibliográficas.

1. Informática – Teses. 2. Escultura do espaço 3. Coloração de voxels 4. Reconstrução volumétrica 5. Modelagem baseada em imagens I. Gattass, Marcelo. II. Carvalho, Paulo Cezar Pinto. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Informática. IV. Título.

CDD: 004

Aos meus pais, Henrique e Selma.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, a Deus, por ter me dado vida e por permitir que eu possa aprender um pouco mais a cada instante.

Aos meus pais, pelo amor e carinho que me deram e por me ajudarem em todos os momentos da minha vida.

A toda a minha família, por todos os momentos que passamos juntos.

Ao meu padrinho e avô Cecílio (in memoria), que me despertou o interesse pelo estudo e pela leitura.

À Geiza por ter estado sempre a meu lado e me incentivado a progredir cada vez mais.

Aos meus orientadores Marcelo Gattass e Paulo Cezar Pinto Carvalho, sem os quais este trabalho jamais teria sido concluído. Agradeço-lhes por todos os ensinamentos que me passaram nestes últimos anos, e por terem me ajudado a amadurecer um pouco mais como pesquisador e ser humano.

Ao Prof. Luiz Velho pela chance de poder desenvolver um trabalho que culminou nesta tese e pelas valiosas sugestões e incentivos.

Ao Prof. Manuel Menezes de Oliveira Neto por todas as sugestões e críticas que foram essenciais para o aprimoramento deste trabalho, assim como a toda banca examinadora.

Ao Prof. Luiz Satoru Ochi da UFF por ter me iniciado como pesquisador, meu eterno agradecimento.

À CAPES que me propiciou a bolsa, fundamental para a realização desse trabalho.

Ao Tecgraf pela ajuda técnica e financeira, além de me permitir crescer profissionalmente.

Ao Visgraf e ao IMPA que forneceram todo o ambiente necessário à conclusão deste trabalho.

Aos meus amigos Flávio Szenberg (TeCGraf) e Fábio Franco (Visgraf) por terem colaborado significativamente para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos amigos do Visgraf e TeCGraf que colaboraram direta e indiretamente para o desenvolvimento deste trabalho e pelos vários momentos de descontração que juntos compartilhamos.

E finalmente, a todas as outras pessoas que aqui não foram mencionadas mas que foram importantes em algum momento da minha vida.

Resumo

Montenegro, Anselmo Antunes; Gattass, Marcelo; Carvalho, Paulo Cezar Pinto. **Reconstrução de cenas a partir de imagens através de escultura do espaço por refinamento adaptativo.** Rio de Janeiro, 2003. 196p. Tese de Doutorado — Departamento de Informática, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A reconstrução de cenas a partir de imagens tem recebido, recentemente, grande interesse por parte dos pesquisadores das áreas de visão computacional, computação gráfica e modelagem geométrica. Várias são as suas aplicações como, por exemplo, modelagem de objetos a partir de imagens, construção de ambientes virtuais e telepresença.

Dentre os métodos que têm produzido bons resultados na reconstrução de cenas a partir de imagens, podemos destacar aqueles que se baseiam em algoritmos de *Escultura do Espaço*. Tais técnicas procuram determinar quais são os elementos, em uma representação volumétrica do espaço da cena, que satisfazem um conjunto de restrições fotométricas impostas por um conjunto de imagens. Uma vez determinados, tais elementos volumétricos são coloridos de modo que reproduzam as informações fotométricas nas imagens de entrada, com uma certa margem de tolerância especificada com base em critérios estatísticos.

Neste trabalho, investigamos o emprego de técnicas utilizadas em visualização no desenvolvimento de métodos de escultura do espaço. Como resultado, propomos um método por refinamento adaptativo que trabalha sobre espaços de reconstrução representados através de subdivisões espaciais. Tal método é capaz de realizar o processo de reconstrução de modo mais eficiente, empregando esforços proporcionais às características locais da cena, que são descobertas à medida em que a reconstrução é realizada.

Finalmente, avaliamos a qualidade e a eficiência do método proposto, com base em um conjunto de resultados obtidos através de um sistema de reconstrução de objetos que utiliza imagens capturadas por *webcams*.

Palavras-chave

Escultura do Espaço; coloração de voxels; reconstrução volumétrica; modelagem baseada em imagens.

Abstract

Montenegro, Anselmo Antunes; Gattass, Marcelo; Carvalho, Paulo Cezar Pinto. . Rio de Janeiro, 2003. 196p. PhD. Thesis — Departamento de Informática, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The reconstruction of scenes from imagens has received special attention from researchers of the areas of *computer vision*, *computer graphics* and *geometric modeling*. As examples of application we can mention image-based scene reconstruction, modeling of complex "as-built" objects, construction of virtual environments and telepresence.

Among the most successful methods used for the reconstruction of scenes from images are those based on Space Carving algorithms. These techniques reconstruct the shape of the objects of interest in a scene by determining, in a volumetric representation of the scene space, those elements that satisfy a set of photometric constraints imposed by the input images. Once determined, each photo-consistent element is colored according to the photometric information in the input images, in such a way that they reproduce the photometric information in the input images, within some pre-specified error tolerance.

In this work, we investigate the use of rendering techniques in space carving methods. As a result, we propose a method based on an adaptive refinement process which works on reconstruction spaces represented by spatial subdivisions. We claim that such method can reconstruct the objects of interest in a more efficient way, using resources proportional to the local characteristics of the scene, which are discovered as the reconstruction takes place.

Finally, we evaluate the quality and the efficiency of the method based on the results obtained from a reconstruction device that works with images captured from webcams.

Keywords

Space Carving; voxel coloring; volumetric reconstruction; scene reconstruction; image based modeling.

Conteúdo

1	Introdução	12
2	Uma revisão em reconstrução volumétrica de cenas	17
2.1	Introdução	17
2.2	Reconstrução baseada em silhuetas	17
2.3	Reconstrução através de foto-consistência	22
2.4	Coloração de voxels	23
2.5	Escultura do espaço (<i>Space Carving</i>)	31
2.6	Variações	41
3	Técnicas de visualização aplicadas à Escultura do Espaço	53
3.1	Introdução	53
3.2	Alguns aspectos pouco explorados	53
3.3	Processamento no espaço das imagens	55
3.4	Processamento no espaço da cena	56
4	Escultura do espaço no espaço da cena	81
4.1	Introdução	81
4.2	Registro	82
4.3	Uso de silhuetas na reconstrução	87
4.4	Tratamento da visibilidade	90
4.5	Determinação dos voxels foto-consistentes	93
4.6	Atribuição de cor aos voxels	102
4.7	Algoritmo	103
4.8	Análise	104
5	Escultura do espaço através de refinamento adaptativo	105
5.1	Motivação	106
5.2	Alguns trabalhos anteriores	108
5.3	Representação adaptativa do espaço de reconstrução	110
5.4	Escultura de cenas em espaços representados através de octrees	113
6	Implementação do sistema	129
6.1	Calibração das câmeras	130
6.2	Câmera Tsai x Câmera OpenGL	133
6.3	Calibração do fundo da cena	135
6.4	Segmentação com base em mapas de intervalos de confiança	137
6.5	Reconstrução	138
7	Resultados	139
7.1	Introdução	139
7.2	Análise qualitativa	148
7.3	Análise em função da resolução	162
7.4	Análise do algoritmo EERA nos diferentes níveis de refinamento	165

7.5	Análise do teste estatístico baseado em limiares locais	171
7.6	Análise de desempenho	175
8	Conclusões e trabalhos futuros	180
8.1	Conclusões e comentários finais	180
8.2	Trabalhos futuros	184

Lista de Figuras

1.1	Etapas de um processo de reconstrução	14
2.1	Envoltória visual inferida	18
2.2	Coloração de voxels	25
2.3	Determinação da visibilidade	30
2.4	Exemplo de aplicação do método de coloração de voxels	31
2.5	Teorema do subconjunto	35
2.6	Câmeras consideradas em uma varredura para um determinado voxel.	39
2.7	GVC-IB e GVC-LDI	45
2.8	Projeção das texturas no espaço da cena	46
2.9	Refinamento	47
2.10	Exemplos de shuffle transforms	50
3.1	Superfície no interior de um voxel	56
3.2	Planos de referência	58
3.3	Mapeamento de textura sobre uma superfície	59
3.4	Mapeamento projetivo de textura	59
3.5	Amostragem acima do limite de Nyqvist	69
3.6	Amostragem abaixo do limite de Nyqvist	70
3.7	Pré-filtragem	72
3.8	Mapeamentos não-afins	73
3.9	Filtros gaussianos elípticos	77
3.10	Mipmap	78
4.1	Projeção de uma imagem em um plano de referência	82
4.2	Imagens tomadas de um modelo sintético	86
4.3	Imagens projetadas sobre um plano de referência no espaço da cena	86
4.4	Segmentação do objeto nas imagens	89
4.5	Complementariedade entre a envoltória fotométrica (photo hull) e envoltória visual (visual hull).	89
4.6	Mapas de visibilidade projetados sobre um plano de referência no espaço da cena	93
5.1	Espaço de reconstrução representado por voxels.	105
5.2	Coloração através de refinamento. Figura obtida de [52]. (a) - reconstrução com perdas; (b) - reconstrução correta; (c) - diferença	110
5.3	Representação através de octrees	113
5.4	Coloração em uma octree	114
5.5	Varredura de planos em uma octree	118
5.6	Número de planos em cada nível de resolução	119
5.7	Células interceptadas por um plano de varredura. As células em tom escuro são as células ativas, as em tom mais claro são células já avaliadas.	120

5.8	Imagens projetadas em diferentes níveis de resolução	121
6.1	Imagem do sistema	129
6.2	Processo de reconstrução	130
6.3	Padrão de calibração	130
6.4	Resultado da calibração das câmeras do sistema	132
6.5	Sistemas de coordenadas utilizados na OpenGL e no método de Tsai	134
7.1	Dado I - AI - Imagens de entrada	142
7.2	Dado I - AI - Imagens segmentadas	143
7.3	Dado II - Dolphins - Imagens de entrada	144
7.4	Dado II - Dolphins - Imagens de segmentação	145
7.5	Dado III - Tigre - Imagens do objeto e da segmentação	146
7.6	Dado IV - Dino - Imagens do objeto e da segmentação	147
7.7	Reconstrução do dado I através do algoritmo EEEI	149
7.8	Reconstrução do dado I através do algoritmo EEEC	150
7.9	Reconstrução do dado I através do algoritmo EERA	151
7.10	Reconstrução do dado II através do algoritmo EEEI	152
7.11	Reconstrução do dado II através do algoritmo EEEC	153
7.12	Reconstrução do dado II através do algoritmo EERA	154
7.13	Reconstrução do dado III através do algoritmo EEEI	155
7.14	Reconstrução do dado III através do algoritmo EEEC	156
7.15	Reconstrução do dado III através do algoritmo EERA	157
7.16	Reconstrução do dado IV através do algoritmo EEEI	158
7.17	Reconstrução do dado IV através do algoritmo EEEC	159
7.18	Reconstrução do dado IV através do algoritmo EERA	160
7.19	Voxels classificados como não visíveis	161
7.20	Comparação entre os diversos métodos no níveis de resolução 6x64 e 128x128.	163
7.21	Comparação entre os diversos métodos no níveis de resolução 6x64 e 128x128.	164
7.22	Estágios de refinamento de 4 a 8 da reconstrução do dado I através do algoritmo EERA.	167
7.23	Estágios de refinamento de 5 a 8 da reconstrução do dado II através do algoritmo EERA.	168
7.24	Estágios de refinamento de 5 a 8 da reconstrução do dado III através do algoritmo EERA.	169
7.25	Estágios de refinamento de 5 a 8 da reconstrução do dado IV através do algoritmo EERA.	170
7.26	Resultado da aplicação dos algoritmos para diferentes níveis de significância do teste estatístico proposto no capítulo 5	173
7.27	Resultado da aplicação dos algoritmos para diferentes níveis de significância do teste estatístico proposto no capítulo 5	174

Lista de Tabelas

2.1	Esquema de atualização dos rótulos da octree	21
2.2	Coloração de Voxels em Multiresolução x Coloração de Voxels Original. Os experimentos de Prock foram realizados em uma SGI O2 R5000 de 200 Mhz.	48
2.3	Classificação dos algoritmos	52
7.1	Resultado da aplicação do algoritmo EEEI na reconstrução do dado I	176
7.2	Resultado da aplicação do algoritmo EEEC na reconstrução do dado I	176
7.3	Resultado da aplicação do algoritmo EERA na reconstrução do dado I	176
7.4	Resultado da aplicação do algoritmo EEEI na reconstrução do dado II	177
7.5	Resultado da aplicação do algoritmo EEEC na reconstrução do dado II	177
7.6	Resultado da aplicação do algoritmo EERA na reconstrução do dado II	177
7.7	Resultado da aplicação do algoritmo EEEI na reconstrução do dado III	178
7.8	Resultado da aplicação do algoritmo EEEC na reconstrução do dado III	178
7.9	Resultado da aplicação do algoritmo EERA na reconstrução do dado III	178
7.10	Resultado da aplicação do algoritmo EEEI na reconstrução do dado IV	179
7.11	Resultado da aplicação do algoritmo EEEC na reconstrução do dado IV	179
7.12	Resultado da aplicação do algoritmo EERA na reconstrução do dado IV	179

Ó Shariputra, forma nada mais é do que vazio, vazio nada mais é do que forma; Assim, forma é vazio, vazio é forma.

**Diálogo entre o Bodhisattva Avalokiteshvara e o Arhat
Shariputra, *Sutra do Coração*.**