

Fábio Markus Nunes Miranda

**Volume rendering of unstructured hexahedral
meshes**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Dissertation presented to the Postgraduate Program in Informatics, of the Departamento de Informática, PUC-Rio as partial fulfillment of the requirements for the degree of Mestre em Informática.

Advisor: Prof. Waldemar Celes

Rio de Janeiro
September 2011



Fábio Markus Nunes Miranda

**Volume rendering of unstructured hexahedral
meshes**

Dissertation presented to the Postgraduate Program in Informatics, of the Departamento de Informática do Centro Técnico Científico da PUC-Rio, as partial fulfillment of the requirements for the degree of Mestre.

Prof. Waldemar Celes

Advisor

Departamento de Informática — PUC-Rio

Prof. Marcelo Gattass

Department of Computer Science — PUC-Rio

Prof. Thomas Lewiner

Department of Mathematic — PUC-Rio

Prof. Luiz Henrique de Figueiredo

Instituto Nacional de Matemática Pura e Aplicada (IMPA)

Prof. José Eugenio Leal

Coordinator of the Centro Técnico Científico — PUC-Rio

Rio de Janeiro, September 5, 2011

All rights reserved.

Fábio Markus Nunes Miranda

Fabio Markus Miranda graduated from Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) with a B.Sc. in Computer Science in 2009. While at UFMG, he received scholarships from CNPq in the bioinformatics area and later Finep. In 2009, he started the graduate program in Computer Science at PUC-Rio. In 2010 he joined the Computer Graphics Technology Group (Tecgraf), contributing to the group's work for Petrobras.

Bibliographic data

Miranda, Fábio Markus

Volume rendering of unstructured hexahedral meshes / Fábio Markus Nunes Miranda ; advisor: Waldemar Celes. — 2011.

47 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Informática)-Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

Inclui bibliografia

1. Informática – Dissertação. 2. Renderização volumétrica. 3. Malha de hexaedros. 4. Malha não estruturada. 5. Integral do raio. I. Celes, Waldemar. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Informática. III. Título.

CDD: 004

Acknowledgments

To my family, my adviser, my friends and colleagues.
To CAPES and Tecgraf for the financial support.

Resumo

Miranda, Fábio Markus; Celes, Waldemar. **Renderização volumétrica de malha não estruturada de hexaedros**. Rio de Janeiro, 2011. 47p. Dissertação de Mestrado — Departamento de Informática, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Importantes aplicações de engenharia usam malhas não estruturadas de hexaedros para simulações numéricas. Células hexaédricas, comparadas com tetraedros, tendem a ser mais numericamente estáveis e requerem um menor refinamento da malha. Entretanto, visualização volumétrica de malhas não estruturadas é um desafio devido a variação trilinear do campo escalar dentro da célula. A solução convencional consiste em subdividir cada hexaedro em cinco ou seis tetraedros, aproximando uma variação trilinear por uma inadequada série de funções lineares. Isso resulta em imagens inadequadas e aumenta o consumo de memória. Nesta tese, apresentamos um algoritmo preciso de visualização volumétrica utilizando *ray-casting* para malhas não estruturadas de hexaedros. Para capturar a variação trilinear ao longo do raio, nós propomos usar uma integração de quadratura. Nós também propomos uma alternativa rápida que melhor aproxima a variação trilinear, considerando os pontos de mínimo e máximo da função escalar ao longo do raio. Uma série de experimentos computacionais demonstram que nossa proposta produz resultados exatos, com um menor gasto de memória. Todo algoritmo é implementado em placas gráficas, garantindo uma performance competitiva.

Palavras-chave

Renderização volumétrica; Malha de hexaedros; Malha não estruturada; Integral do raio;

Abstract

Miranda, Fábio Markus; Waldemar Celes (Advisor). **Volume rendering of unstructured hexahedral meshes**. Rio de Janeiro, 2011. 47p. MSc Dissertation — Departamento de Informática, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Important engineering applications use unstructured hexahedral meshes for numerical simulations. Hexahedral cells, when compared to tetrahedral ones, tend to be more numerically stable and to require less mesh refinement. However, volume visualization of unstructured hexahedral meshes is challenging due to the trilinear variation of scalar fields inside the cells. The conventional solution consists in subdividing each hexahedral cell into five or six tetrahedra, approximating a trilinear variation by an inadequate piecewise linear function. This results in inaccurate images and increases the memory consumption. In this thesis, we present an accurate ray-casting volume rendering algorithm for unstructured hexahedral meshes. In order to capture the trilinear variation along the ray, we propose the use of quadrature integration. We also propose a fast approach that better approximates the trilinear variation to a series of linear ones, considering the points of minimum and maximum of the scalar function along the ray. A set of computational experiments demonstrates that our proposal produces accurate results, with reduced memory footprint. The entire algorithm is implemented on graphics cards, ensuring competitive performance.

Keywords

Volume Rendering; Hexahedral Mesh; Unstructured Mesh; Ray Integral;

Contents

1	Introduction	11
2	Related Work	15
2.1	Ray integration	15
2.2	Hexahedral meshes	16
3	Accurate Volume Rendering of Hexahedral Meshes	18
3.1	Ray integration	18
3.2	Integration intervals	20
3.3	Data structure	21
3.4	Ray traversal	22
3.5	Isosurfaces	22
3.6	Algorithm Overview	23
4	Fast Volume Rendering of Hexahedral Meshes	25
4.1	Ray integration	25
4.2	Integration intervals	26
5	Results	27
5.1	Rendering quality	27
5.2	Time results	34
6	Conclusion	36
7	Bibliography	37
A	Control point texture	39
B	2D Pre-integration table texture	41
C	Unstructured Tetrahedral Meshes	42
C.1	Ray integration	42
C.2	Data structure	42
C.3	Traversal	43
C.4	Algorithm Overview	43
D	Regular data	44
D.1	3D Pre-integration table texture	45
D.2	Data structure	45
D.3	Algorithm Overview	46

List of Figures

1.1	Meshes types.	11
1.2	Volume rendering examples. ¹	12
1.3	An example of a transfer function	12
1.4	Example of four transfer functions on a MRI dataset.	13
3.1	Example of scalar field variation inside a hexahedral cell: (a) Maximum and minimum values of a trilinear function along the ray inside an hexahedron; (b) Transfer function represented by a piecewise linear variation.	21
3.2	Isosurface rendering of the Atom9 dataset.	23
4.1	Piecewise linear functions, considering the maximum and minimum values of a trilinear scalar function.	25
5.1	Bucky dataset isosurfaces.	28
5.2	Rendering on a synthetic model composed by on hexahedron.	29
5.3	Images of the Bucky model.	30
5.4	Images of the Bluntfoot model.	31
5.5	Achieved images using a synthetic model.	33
5.6	Volume rendering of the Bluntfoot Dataset.	35
D.1	Structured ray-casting steps.	44
D.2	Structured ray-casting, using the same number of steps.	45

List of Tables

3.1	Data structure for one hexahedral cell.	21
3.2	Ray-casting Algorithm	24
5.1	Rendering times and memory footprint of the subdivision scheme and our proposal.	34
A.1	Control point texture algorithm	40
C.1	Data structure for one tetrahedral cell.	42
C.2	Ray-casting Algorithm	43
D.1	3D pre-integration table algorithm	46
D.2	Structured data post-classification ray-casting algorithm	46
D.3	Structured data pre-integration ray-casting algorithm	47

*I seldom end up where I wanted to go, but
almost always end up where I need to be.*

Douglas Adams, *The Hitchhiker's Guide to the Galaxy*.