

**Sérgio Alvares Rodrigues de
Souza Maffra**

**Propagação de Som em
Ambientes Acústicos Virtuais
Bidimensionais**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

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

Rio de Janeiro
Março de 2003



Sérgio Alvares Rodrigues de Souza Maffra

**Propagação de Som em Ambientes
Acústicos Virtuais Bidimensionais**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Informática do Departamento de Informática da PUC-Rio

Orientador: Prof. Marcelo Gattass
Co-Orientador: Prof. Luiz Henrique de Figueiredo

Rio de Janeiro
Março de 2003



Sérgio Alvares Rodrigues de Souza Maffra

**Propagação de Som em Ambientes
Acústicos Virtuais Bidimensionais**

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

Prof. Marcelo Gattass

Orientador

Departamento de Informática — PUC-Rio

Prof. Luiz Henrique de Figueiredo

Co-Orientador

Instituto Nacional de Matemática Pura e Aplicada (IMPA)

Prof. Emanuel Paiva de Oliveira Costa

Centro de Estudos em Telecomunicações — PUC-Rio

Prof. Luiz Fernando Campos Ramos Martha

Departamento de Engenharia Civil — PUC-Rio

Prof. Waldemar Celes Filho

Departamento de Informática — PUC-Rio

Prof. Ney Augusto Dumont

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico —

PUC-Rio

Rio de Janeiro, 28 de Março de 2003

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

Sérgio Alvares Rodrigues de Souza Maffra

Graduou-se em Engenharia de Computação na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, onde deu continuidade a seus estudos no curso de mestrado do departamento de Informática. Durante seu tempo na PUC-Rio, atuou em diversos projetos dos laboratórios Matmídia, no departamento de Matemática, e Tecgraf, no departamento de Informática.

Ficha Catalográfica

Maffra, Sérgio Alvares Rodrigues de Souza

Propagação de Som em Ambientes Acústicos Virtuais Bidimensionais/ Sérgio Alvares Rodrigues de Souza Maffra; orientador: Marcelo Gattass; co-orientador: Luiz Henrique de Figueiredo. — Rio de Janeiro : PUC, Departamento de Informática, 2003.

[10], 96 f. il. ; 29,7 cm

1. Dissertação (mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Informática.

Inclui referências bibliográficas.

1. Informática – Teses. 2. Traçamento de feixes. 3. Áudio 3D. 4. Ambientes Virtuais. 5. Propagação do som. 6. Difração. 7. Decomposição do espaço em células convexas. I. Gattass, Marcelo. II. Figueiredo, Luiz Henrique. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Informática. IV. Título.

CDD: 004

Para os meus pais.

Agradecimentos

Aos meus orientadores, pelo apoio, pelos conselhos e pela confiança em mim depositada.

Aos membros da banca, pelo incentivo, pelos comentários e pelas correções que ajudaram a melhorar a qualidade deste trabalho.

A Sérgio Gattáss, pelo fornecimento de plantas de arquitetura que serviram de exemplos neste trabalho.

À CAPES e à PUC-Rio pelo apoio financeiro, sem o qual este trabalho não seria possível.

Ao Tecgraf e a seus membros, por todas as oportunidades que me ofereceram e por tudo que me ensinaram.

Ao professor Geovan Tavares e aos membros do laboratório Matmídia, onde comecei a desenvolver meus primeiros programas.

Aos amigos, companheiros desde o começo da graduação. Os momentos de diversão, os trabalhos, as provas, a competição, as intermináveis discussões e os vários finais de semana gastos na PUC não serão esquecidos.

A Fabíola, minha irmã, por ter transformado meus rabiscos nas figuras contidas neste trabalho.

À minha família, por tudo.

Resumo

Maffra, Sérgio Alvares; Gattass, Marcelo; Figueiredo, Luiz Henrique. **Propagação de Som em Ambientes Acústicos Virtuais Bidimensionais**. Rio de Janeiro, 2003. 96p. Dissertação de Mestrado — Departamento de Informática, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Durante muito tempo, a simulação computacional de fenômenos acústicos tem sido utilizada principalmente no projeto e estudo da acústica de ambientes. Recentemente, no entanto, podemos ver um maior interesse na utilização dessas simulações como forma de aumentar a sensação de imersão em ambientes virtuais. De forma geral, podemos dizer que um ambiente acústico virtual deve ser capaz de realizar duas tarefas: simular a propagação do som em um ambiente e ser capaz de reproduzi-lo com seu conteúdo espacial, isto é, reproduzi-lo de forma a permitir o reconhecimento da direção de propagação do som. Esta dissertação trata desses dois assuntos. São revistos os algoritmos mais comuns para o cálculo da propagação do som e, brevemente, as formas utilizadas para reproduzir áudio com conteúdo espacial. Também é apresentada a implementação de um ambiente acústico virtual, baseado nos algoritmos de *beam tracing*, que simula a propagação do som em ambientes bidimensionais. Como grande parte do cálculo de propagação é realizada em uma etapa de pré-processamento, o ambiente acústico virtual implementado trata apenas de fontes fixas no espaço. Os caminhos de propagação calculados são compostos de reflexões especulares e difrações do som.

Palavras-chave

Traçamento de feixes, Áudio 3D, Ambientes virtuais, Propagação do som, Difração, Decomposição do espaço em células convexas

Abstract

Maffra, Sérgio Alvares; Gattass, Marcelo; Figueiredo, Luiz Henrique. **Propagation of Sound in Two-Dimensional Virtual Acoustic Environments**. Rio de Janeiro, 2003. 96p. MSc. Dissertation — Departamento de Informática, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

For a long time, computational simulation of acoustic phenomena has been used mainly in the design and study of the acoustic properties of concert and lecture halls. Recently, however, there is a growing interest in the use of such simulations in virtual environments in order to enhance users' immersion experience. Generally, we can say that a virtual acoustic environment must be able to accomplish two tasks: simulating the propagation of sound in an environment and reproducing audio with spatial content, that is, in a way that it allows the recognition of the direction of sound propagation. These tasks are the topic of the present dissertation. We begin with a revision of the most common algorithms for the simulation of sound propagation and, briefly, of the reproduction of audio with spatial content. We then present the implementation of a virtual acoustic environment, based on beam tracing algorithms, which simulates the propagation of sound waves in two-dimensional environments. As most of the computation is made in a pre-processing stage, the virtual acoustic environment implemented is appropriate only for spatially fixed sound sources. The propagation paths computed are made of specular reflections and of diffractions.

Keywords

Beam tracing, 3D Audio, Virtual environments, Sound propagation, Diffraction, Decomposition of space into convex cells

Conteúdo

1	Introdução	1
2	Modelando a Propagação do Som	3
2.1	Método das Fontes Virtuais	5
2.2	Ray Tracing e Beam Tracing	5
3	Reproduzindo Áudio com Informação Espacial	12
3.1	Indicadores de Posição	12
3.2	Sistemas de Reprodução de Áudio 3D	13
4	Implementação de um Ambiente Acústico Virtual	18
4.1	Construção do Ambiente	18
4.2	Representação dos Feixes	34
4.3	Traçadores de Feixes	50
4.4	Cálculo dos Caminhos de Propagação	57
4.5	Reprodução de Áudio	61
5	Exemplos	63
5.1	Interpretando os Resultados	63
5.2	Exemplo 1 - Difração	65
5.3	Exemplo 2 - Difração versus Reflexão Especular	66
5.4	Exemplo 3 - Edifício Residencial	67
5.5	Medidas de Desempenho	77
6	Conclusão	89
6.1	Trabalhos Futuros	90
	Referências Bibliográficas	91

Lista de Figuras

2.1	Caminhos de Propagação e Fontes Virtuais	4
2.2	Feixes Provenientes de uma Fonte Direcional e sua <i>Beam Tree</i>	7
2.3	Feixes de Difração 3D e 2D	8
2.4	Construção de Caminhos de Propagação sobre <i>Beam Trees</i>	9
3.1	Caminhos de Propagação do Som e Cones de Confusão	12
3.2	VBAP: Selecionando um Conjunto de Alto-falantes	15
4.1	Definição de um Ambiente	19
4.2	Como a Ordem dos Oclusores Afeta a Visibilidade	19
4.3	Percorrendo uma Decomposição em Células Convexas	21
4.4	Grafo de Adjacência de Células de um Ambiente	22
4.5	Particionamento Recursivo do Plano e sua Árvore BSP	24
4.6	Oclusores que Podem Gerar um Número Quadrático de Células	25
4.7	Algoritmo para Decomposição do Ambiente em Células Convexas	28
4.8	Interseção de Retas Suporte	29
4.9	Fragmentação de um Feixe	31
4.10	Triangulação de um Ambiente	32
4.11	CrITÉrio Local para Remoção de Arestas	33
4.12	Remoção de Arestas da Triangulação	34
4.13	Comparação entre Diferentes Decomposições em Células	35
4.14	Comparação entre Diferentes Decomposições em Células	36
4.15	Sistema de Coordenadas de um Feixe	38
4.16	Construindo um Feixe	39
4.17	Operação de Pertinência	40
4.18	Detecção de Interseção entre Oclusores e Feixes	41
4.19	Caso Especial de Interseção	42
4.20	Cálculo da Interseção entre Feixes e Oclusores	43
4.21	Feixes de Transmissão	43
4.22	Feixes de Reflexão	45
4.23	Verificando a Existência de Regiões de Sombra	47
4.24	Associando Feixes de Difração a Regiões Convexas	48
4.25	Representação Projetiva de um Feixe 3D Piramidal	49
4.26	Invalidando a Interação entre Feixes de Transmissão e Arestas	51
4.27	Invalidando a Interação entre Feixes de Reflexão e Arestas	52
4.28	Procedimento para Construção de uma <i>Beam Tree</i>	54
4.29	Atribuindo Diferentes Prioridades aos Feixes	57
4.30	Construção dos Caminhos de Propagação	59
4.31	Alguns Parâmetros do Cálculo da Atenuação por Difração	61
5.1	Exemplo 1 - Ambiente	66
5.2	Exemplo 1 - Feixes Obtidos sem (a) e com (b) Difração	67
5.3	Exemplo 1 - Resultados sem Difração	68
5.4	Exemplo 1 - Resultados com Difração	69

5.5	Exemplo 1 - Caminhos de Propagação	70
5.6	Exemplo 2 - Amplitude da Frente de Onda (SPL)	71
5.7	Exemplo 2 - Intensidade Sonora (SIL)	72
5.8	Exemplo 2a - Caminhos sem Difração até a Posição 1	73
5.9	Exemplo 2b - Caminhos com Difração até a Posição 1	74
5.10	Exemplo 2a - Caminhos sem Difração até a Posição 2	75
5.11	Exemplo 2b - Caminhos com Difração até a Posição 2	76
5.12	Exemplo 3a - Amplitude de Pressão e Intensidade Sonora	78
5.13	Exemplo 3a - Caminhos de Propagação (a)	79
5.14	Exemplo 3a - Caminhos de Propagação (b)	80
5.15	Exemplo 3a - Caminhos de Propagação (c)	81
5.16	Exemplo 3b - Amplitude de Pressão e Intensidade Sonora	82
5.17	Exemplo 3b - Caminhos de Propagação (a)	83
5.18	Exemplo 3b - Caminhos de Propagação (b)	84
5.19	Exemplo 3b - Caminhos de Propagação (c)	85
5.20	Construção de Feixes - Ambiente de Quarteirões	87
5.21	Construção de Feixes - Ambiente do Exemplo 2	88
5.22	Tempo Gasto na Construção de Caminhos de Propagação	88