



Rodrigo Marques Almeida da Silva

**Simulação e Visualização de Oceano em Tempo Real
Utilizando a GPU**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Informática da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Informática.

Orientador: Prof. Bruno Feijó

Rio de Janeiro

Março de 2010



Rodrigo Marques Almeida da Silva

**Simulação e Visualização de Oceano em Tempo Real
Utilizando a GPU**

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. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Bruno Feijó

Orientador

Departamento de Informática – PUC-Rio

Prof. Alberto Raposo

Departamento de Informática – PUC-Rio

Prof. Esteban Walter Gonzalez Clua

Departamento de Informática – UFF

Prof. Laércio Ferracioli

Departamento de Física – UFES

Prof. José Eugênio Leal

Coordenador(a) Setorial do Centro

Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 26 de março de 2010

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

Rodrigo Marques Almeida da Silva

Graduou-se em Engenharia de Computação pela Universidade Federal do Espírito Santo em 2008. No período de 2004 – 2008, trabalhou no laboratório ModeLab desenvolvendo sistemas de simulação. Trabalhou no laboratório Tecgraf em 2008 e, desde 2009 trabalha no laboratório de computação gráfica da universidade (VisionLab) desenvolvendo sistemas de realidade virtual e aumentada e visualização científica.

Ficha Catalográfica

Silva, Rodrigo Marques Almeida da

Simulação e Visualização de Oceano em Tempo Real Utilizando a GPU / Rodrigo Marques Almeida da Silva; orientador: Bruno Feijó. – Rio de Janeiro: PUC-Rio, Departamento de Informática, 2010.

v., 156 f: il. ; 30 cm

1. Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Informática.

Incluí referências bibliográficas.

1. Informática – Teses. 2. CUDA. 3. Simulação. 4. Transformada de Fourier. 5. Iluminação de água. 6. Perlin Noise. 7. Nível de detalhe. I. Feijó Bruno. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Informática. III. Título.

CDD: 004

*Á Deus, meus pais, meus irmãos,
minha noiva, meus avós e tios.*

Agradecimentos

À minha família e amigos, pelo grande apoio, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

À minha noiva Ana Paula Sperandio, por sempre me dar força para lutar.

Aos companheiros do VisionLab, em especial a Pablo Bioni.

Ao meu orientador Bruno Feijó, pela grande dedicação e incentivo à pesquisa.

Ao professor Laércio Ferracioli, por ter me introduzido ao método da pesquisa ainda na graduação.

Ao VisionLab pelo auxílios concedidos.

Ao CNPq pelo apoio financeiro.

Resumo

Marques Almeida da Silva, Rodrigo; Feijó, Bruno. **Simulação e Visualização de Oceano em Tempo Real usando a GPU**. Rio de Janeiro, 2010. 156p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Informática, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A geração de cenas realísticas de fenômenos naturais em tempo real é uma das mais importantes áreas de pesquisa para aplicações em jogos e simuladores. No início da computação gráfica para tempo real, a maioria das aplicações tratava a superfície da água como um plano com uma textura. Essa abordagem produz uma visualização muito pouco realística da superfície da água, além de não reproduzir o comportamento hidrodinâmico correto da água. Nesse contexto, muitos grupos de pesquisa desenvolveram técnicas para a visualização realística da superfície da água, contudo, a maioria desses trabalhos foca no processo *off-line* e poucos tratam da questão em tempo real. No entanto, os recentes avanços no desempenho do hardware permitiram a utilização de técnicas tradicionalmente usadas em *off-line* para o escopo de tempo real, porém não há uma pesquisa-guia que descreva tais técnicas e faça uma análise comparativa das mesmas. Sendo assim, sem tal pesquisa-guia é muito difícil escolher a melhor técnica para um hardware específico ou se determinada técnica provê o controle de simulação necessário para uma aplicação específica. Nesse contexto, a presente pesquisa analisa as técnicas mais importantes para visualização e simulação de oceano em tempo real, utilizando a unidade de processamento gráfico como o processador principal. Além disso, ela realiza uma análise comparativa de desempenho de cada técnica e estuda os prós e contras delas. Ainda, alguns métodos *off-line* clássicos são adaptados para uso na GPU.

Palavras-chave

CUDA; Simulação; Transformada de Fourier; Iluminação de água; Perlin Noise; Nível de detalhe; Projected Grid; Radial Lod; GeoClipMap.

Abstract

Marques Almeida da Silva, Rodrigo; Feijó, Bruno (advisor). **Real-time Ocean Simulation and Visualization using GPU**. Rio de Janeiro, 2010. 156p. MSc. Dissertation - Departamento de Informática, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The synthesis of realistic natural scenes in real time is one of the most important research areas for applications in games and simulators. In the beginning of real-time computer graphics, most of the applications treated water surface as a textured plane. This approach produces a very low realistic rendering of the water surface and does not reproduce the correct hydrodynamics behaviour of the water. So, a lot of research groups developed techniques for realistic water rendering, most of them for off-line processes and a few for real-time use. However, current improvements on hardware performance allow the usage of traditional off-line techniques for real-time purposes, but there is no research work that describes these techniques and makes a comparative analysis of them. Then, without this comparative analysis, it is very difficult to choose the best technique for a specific hardware or to decide if a particular technique provides the simulation control that a certain application needs. In this context, the present research work analyses the most important techniques for real-time ocean water simulation and visualization using the graphics processor unit as a main processor. Moreover, it makes a performance comparative analysis of each technique and analyses the pros and cons of them. Furthermore, some classic off-line methods are adapted for GPU use.

Keywords

CUDA; Simulation; Fourier Transform; Water lighting; Perlin Noise; Level of Detail; Projected Grid; Radial Lod; GeoClipMap.

Sumário

1. Introdução	19
1.1. Objetivos	21
1.2. Estrutura da Dissertação	23
2. Trabalhos Relacionados	24
3. Técnicas de Nível de Detalhe	28
3.1. GeoClipMap LoD	32
3.2. Radial Grid Lod	41
3.3. Projected Grid Lod	44
3.3.1. Problemas do Mapeamento Pós-Perspectivo	49
3.3.2. Reescalamento do plano pós-perspectivo	52
3.3.3. Algoritmo	54
4. Modelos e Técnicas de Simulação de Malha	57
4.1. Simulações no espaço do Tempo	58
4.1.1. Simulação Clássica	58
4.1.2. Modelo de Ondas de Gerstner	60
4.2. Simulações no espaço da frequência	63
4.2.1. FFT 64	
4.2.2. Perlin Noise	70
5. Técnicas de Iluminação	74
5.1. Iluminação sobre e debaixo d'água	75
5.2. Reflexão	75
5.3. Refração	77
5.3.1. Névoa submersa	78

5.4.Fresnel	79
5.4.1.Técnicas de Implementação	81
5.4.2.Variação dos índices de refração	82
5.5.Cáusticas	83
5.6.Espuma	85
5.7.Deformação subaquática	86
6.Desenvolvimento	88
6.1.CUDA	88
6.2.DirectCompute	89
6.3.Arquitetura	89
6.3.1.Subsistemas de gerência de recursos	91
6.3.2.Subsistemas de simulação	91
6.3.3.Subsistemas de Visualização	92
6.3.4.Subsistemas de Análise de Desempenho	93
6.3.5.Subsistemas de <i>LoD</i>	93
6.3.6.Subsistemas de <i>Log</i>	94
6.3.7.Subsistema catalogador de arquivos	94
6.4.Efeitos adicionais	94
6.5.Utilização conjunta de <i>CUDA</i> e <i>MicrosoftDirectX</i>	95
6.6.Pipeline de Simulação e Renderização	96
6.7.Desenvolvimento e Execução	99
7.Resultados	107
7.1.Metodologia de Teste de Desempenho	107
7.2.Metodologia de Análise Estatística	110
7.3.Testes de Simulação na <i>CPU</i>	111
7.4.Testes de Simulação na <i>GPU</i>	114
7.5.Testes de Variação de Harmônicas de Gerstner	117

7.6. Testes de Nível de Detalhe	122
7.7. Testes Totais	124
7.8. Análise de Complexidade e Viabilidade	126
7.9. Imagens das técnicas	130
Conclusão e Trabalhos Futuros	135
Trabalhos Futuros	137
Referências Bibliográficas	138
Anexo 1 – Tabelas de Teste	144
Anexo 2 – Código do <i>Shader</i> de Iluminação	149
Glossário	151

Lista de figuras

Figura 1: Imagem de simulador baseado em Delta3De usando ondas de Gerstner computadas na GPU (McDowell, 2009) (cortesia MS&T Magazine)	20
Figura 2: Renderização de superfície de oceano usando Hydrax/Ogre3D (González, 2009)	21
Figura 3: Visualização Realística de Oceano do sistema desenvolvido	22
Figura 4: Linhas de Simulação de Oceano	26
Figura 5: Quantização de Amostras	28
Figura 6: Funcionamento de <i>LoD</i>	30
Figura 7: a) Função Original b) Interpolador Linear c) Interpolador Cúbico	32
Figura 8: Anéis do GeoClipMap	32
Figura 9: GeoClipMap (Asirvatham & Hoppe, 2005)	33
Figura 10: Funcionamento do <i>GeoClipMap</i>	35
Figura 11: Formação de Ranhuras	40
Figura 12: Transformação do Radial LoD	41
Figura 13: Modelagem do <i>Projected Grid</i>	45
Figura 14: Grade no Espaço Pós-Perspectivo	47
Figura 15: Problemas da Projeção	49
Figura 16: Remapeamento da Transformação Perspectiva	50
Figura 17: Métodos de Cálculo do Vetor de Visão do Projetor	52
Figura 18: Cálculo da Matriz M_{range} (Johanson, 2004)	54
Figura 19: Resultado da Técnica de <i>Projected Grid</i> (Johanson, 2004)	55
Figura 20: Modelo de ondas	58
Figura 21: Tipos de Movimentação de Ondas (Finch, 2005)	60
Figura 22: Ondas Clássicas, Trocoidais	61

Figura 23: Mapa de Altura gerado pela <i>IFFT</i>	65
Figura 24: Simulação das Ondas com <i>IFFT</i>	69
Figura 25: a) Função Harmônica b) Função Noise	70
Figura 26: Oitavas da função Noise 1D	71
Figura 27: Soma da função Noise 1D e 2D	72
Figura 28: Reflexão da câmera (Hu et al., 2004)	76
Figura 29: Refração da Câmera	77
Figura 30: Nevoa submersa exponencial	79
Figura 31: Modelo de Reflexão	79
Figura 32: Variação do Coeficiente de Fresnel (Johanson, 2004)	80
Figura 33: a) Reflexão total, b) Refração e Reflexão Normal, c) Refração Total	81
Figura 34: Fresnel Bump Map Texture (Hu et al.,2006)	81
Figura 35: Efeitos da variação do índice de refração com a temperatura	83
Figura 36: Cáustica no fundo de uma piscina	84
Figura 37: Cáusticas (Jos Starm,1996)	85
Figura 38: Deformação subaquática	87
Figura 39: Arquitetura do Motor OceanEngine	90
Figura 40: Pipeline de funcionamento das técnicas convencionais (Johanson, 2004)	96
Figura 41: Pipeline de Simulação e Visualização	97
Figura 42: Sistema de teste de simulação	108
Figura 43: Opções de linha de comando do sistema de simulação	109
Figura 44: Gráfico de desempenho da Simulação na <i>CPU</i>	112
Figura 45: Gráfico de desempenho da Simulação na <i>GPU</i>	115
Figura 46: Gráfico de desempenho da Simulação na <i>GPU</i> em escala logarítmica	115
Figura 47: Gráfico de desempenho da Variação do Número de Harmônicas de Gerstner	118

Figura 48: Gráfico de desempenho da Variação do Número de Harmônicas de Gerstner em escala logarítmica	118
Figura 49: Gráfico de desempenho de Gerstner com a troca de memória na <i>GPU CUDA</i>	120
Figura 50: Gráfico de desempenho de Gerstner com a troca de memória na <i>GPU CUDA</i> em escala logarítmica	121
Figura 51: Gráfico de desempenho dos algoritmos de <i>LoD</i>	123
Figura 52: Gráfico de desempenho da combinação dos algoritmos	125
Figura 53: Gráfico dos pontos de análise dos algoritmos	130

Lista de tabelas

Tabela 1: Algoritmo de Geração do GeoClipMap (Oceano)	36
Tabela 2: Algoritmo de Desenho GeoClipMap	39
Tabela 3: Algoritmo de Geração do <i>Radial LoD</i>	43
Tabela 4: Algoritmo de Desenho do <i>Radial LoD</i>	44
Tabela 5: Algoritmo de Geração do <i>Projected Grid</i>	48
Tabela 6: Função Noise 1D	71
Tabela 7: Função Noise 2D	71
Tabela 8: Variação dos Índices de Refração	82
Tabela 9: Exemplo do programa CUDA para simulação de Gertstner	100
Tabela 10: Atualização de h_k, t	102
Tabela 11: Código para computação do Método da <i>FFT</i>	103
Tabela 12: Código da geração de normais via diferenças	104
Tabela 13: Código HLSL da técnica Perlin Noise	104
Tabela 14: Fluxograma de Execução	105
Tabela 15: Resultados da Simulação na <i>CPU</i>	111
Tabela 16: Resultados da Simulação na <i>GPU</i>	114
Tabela 17: Resultados da Variação do Número de Harmônicas de Gerstner	117
Tabela 18: Resultados de Gerstner com a troca de memória na <i>GPU CUDA</i>	119
Tabela 19: Resultados das Técnicas de nível de detalhe	123
Tabela 20: Resultados dos Testes Totais	124
Tabela 21: Tabela de Viabilidade das Técnicas	129
Tabela 22: Imagens das técnicas	131
Tabela 23: Resultados da Variação do Número de Harmônicas de Gerstner [Bruto]	144
Tabela 24: Resultados da Simulação na <i>CPU</i> [Bruto]	145
Tabela 25: Resultados da Simulação na <i>GPU</i> [Bruto]	146
Tabela 26: Resultados LoD [Bruto]	146
Tabela 27: Resultados Totais [Bruto]	147

Tabela 28: Resultados de Gerstenr com a mudança de memória <i>CUDA</i> [Bruto]	147
Tabela 29: Código do Shader de Iluminação (linguagem HLSL)	149

Lista de equações

Equação 1: Ponto de um Mapa de Altura em um plano	31
Equação 2: Equação de recorrência do tamanho das grades	35
Equação 3: Tamanho da grade	35
Equação 4: Número de Vértices da grade	35
Equação 5: Dimensão de Anel	36
Equação 6: Número de Vértices por Anel	36
Equação 7: Equações do Radial LoD	41
Equação 8: Escolha dos parâmetros do Radial LoD	42
Equação 9: Expressão dos planos de controle do Projected Grid	45
Equação 10: Expressão do ponto projetado (Pós-Perspectivo)	46
Equação 11: Ponto projetado (Mundo)	46
Equação 12: Matriz M_{range}	53
Equação 13: Matriz do projetor	55
Equação 14: Coordenada vertical de uma harmônica clássica	59
Equação 15: Coordenada vertical da simulação clássica	59
Equação 16: Posição, Binormal e Tangente	59
Equação 17: Normal da simulação clássica	60
Equação 18: Função da posição de um vértice no tempo(t) (Gerstner)	61
Equação 19: Vetores Normais, Binormais e Tangentes (Gerstner)	62
Equação 20: Altura definida em termos da frequência	65
Equação 21: Normal definida em termos da frequência	66
Equação 22: Espectro da função h	66
Equação 23: Espectro de Philips	67
Equação 24: Altura no tempo zero (FFT)	67
Equação 25: Amplitude da onda no tempo t (FFT)	67
Equação 26: Deslocamento Horizontal (FFT)	68
Equação 27: Função Noise com múltiplas oitavas	72
Equação 28: Equação de Iluminação do Oceano	74

Equação 29: Expressão geral da névoa submersa	78
Equação 30: Expressão da névoa submersa exponencial	78
Equação 31: Termo de Fresnel	80
Equação 32: Vetor de transmissão	84
Equação 33: Contribuição de Espuma nas ondas	86
Equação 34: Estimador de media	111
Equação 35: Estimador de variância	111
Equação 36: Cálculo do intervalo de confiança	111

Há momentos em que a maior sabedoria é parecer não saber nada.

Sun Tzu, *A Arte da Guerra*.