



Clarissa Codá dos Santos Cavalcanti Marques

**Animação 3D em Tempo Real com Análises
Harmônicas e Modal**

Tese de Doutorado

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Matemática do Departamento de Matemática da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Matemática

Orientador: Prof. Thomas Lewiner

Rio de Janeiro
Junho de 2012



Clarissa Codá dos Santos Cavalcanti Marques

**Animação 3D em Tempo Real com Análises
Harmônicas e Modal**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Matemática do Departamento de Matemática do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Thomas Lewiner

Orientador

Departamento de Matemática — PUC-Rio

Prof. Adailson Peixoto da Silva

Instituto de Matemática — UFAL

Prof. Aura Conci

Instituto de Computação — UFF

Prof. Rodrigo Penteado Ribeiro de Toledo

Instituto de Matemática — UFRJ

Prof. Alex Laier Bordignon

Instituto de Matemática — UFF

Prof. Anselmo Antunes Montenegro

Instituto de Computação — UFF

Prof. José Eugênio Leal

Coordenador do Centro Técnico Científico — PUC-Rio

Rio de Janeiro, 25 de Junho de 2012

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

Clarissa Codá dos Santos Cavalcanti Marques

Graduou-se em Ciência da Computação na Universidade Federal de Alagoas, UFAL, em 2004. Obteve o mestrado em Matemática pela Universidade Federal de Alagoas, UFAL, em 2007.

Ficha Catalográfica

Marques, Clarissa Codá dos Santos Cavalcanti

Animação 3D em Tempo Real com Análises Harmônicas e Modal / Clarissa Codá dos Santos Cavalcanti Marques; orientador: Thomas Lewiner. — Rio de Janeiro : PUC-Rio, Departamento de Matemática, 2012.

v., 94 f: il. ; 29,7 cm

1. Tese (Doutorado em Matemática) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Matemática.

Inclui referências bibliográficas.

1. Matemática – Tese. 2. Animação. 3. Visualização de música. 4. GPU. 5. Análise harmônica. 6. Análise modal. 7. Modelos articulados. 8. Esqueletos. 9. Skinning. 10. Harmônicos de variedade. 11. Computação gráfica. I. Lewiner, Thomas. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Matemática. III. Título.

CDD: 510

Agradecimentos

Em primeiro lugar, à Deus por tudo. Foram vários os momentos de provas, mas em todos me ergueu com Suas Divinas mãos. Sem esquecer obviamente de agradecer pela bênção chamada João Gabriel, a quem carrego aqui no ventre, recebida no final deste trabalho.

Ao meu marido Julio Daniel, por todo amor, carinho e força, sem contar com as essenciais discussões sobre o tema deste trabalho. Fonte de uma inteligência e de uma bondade indescritível que faz com que meu amor e admiração só cresça a cada dia. Muito obrigada amor!

Aos meus amados pais, Severino e Dilze, e irmãos, Gustavo e Fernando, pelo carinho, encorajamento, e confiança que nunca deixaram de ter em todos os meus 30 anos. Me apoiaram e não permitiram que me abalasse nos momentos mais difíceis de todo esse tempo. São modelos de ética e profissionalismo, que tanto admiro e tento incorporar no meu dia-a-dia. Resumindo, formam a base que me sustenta e na qual me inspiro.

Às minhas cunhadas, Alessandra Marinho e Ana Maria Menezes, pela amizade e apoio sempre que precisei.

Ao meu orientador Thomas Lewiner, pela orientação e por toda a paciência ao longo de todo o doutorado. Pela compreensão, amizade e palavras de incentivo em diversos momentos. Aproveito para pedir desculpas pelas eventuais teimosias, risos.

Aos professores e funcionários do Departamento da PUC, em especial à Creuza e a Kátia, por toda ajuda e paciência durante o doutorado.

Aos amigos da PUC com quem passei bons e divertidos momentos: Débora Mondaini, João Paixão, Leandro Moreira, Pablo Víncius, Renata Thomaz e Yuri Ki. Em especial à Lis Ingrid, dona de uma eterna e contagiante alegria, que me aturou, me acompanhou e deu força em todos os momentos em que mais precisei.

Aos meus grandes e queridos amigos do IMPA que mesmo, às vezes, distantes sempre se tornavam presentes deixando os dias mais leves e felizes: Cristina, Emílio, Ives, e Pietro.

Às vezes, no decorrer da vida, Deus nos presenteia com irmãos que apesar de não terem vindo dos mesmos pais, o carinho e a cumplicidade são os mesmos. E Ele me deu como irmã, Maria Andrade. À ela, fica todo meu agradecimento por estes anos de amizade sincera, cumplicidade, apoio e carinho!

Aos professores que fizeram parte desta banca por todos os valiosos comentários.

Finalmente, agradeço à PUC-Rio/VRAC e CAPES pelo apoio financeiro.

Resumo

Marques, Clarissa Codá dos Santos Cavalcanti; Lewiner, Thomas. **Animação 3D em Tempo Real com Análises Harmônicas e Modal**. Rio de Janeiro, 2012. 94p. Tese de Doutorado — Departamento de Matemática, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Ainda hoje a animação de caracteres tridimensionais é um processo manual. Aplicações como jogos de computadores, ou capturas de movimentos para efeitos especiais em filmes requerem incessante intervenções do artista, que praticamente guia os movimentos a cada passo. Nesses exemplos as ferramentas disponíveis oferecem geralmente edição de detalhes, ou no espaço ou no tempo. Essa tese utiliza duas abordagens analíticas ao processo de animação: harmônica e modal, permitindo descrever movimentos com poucos controles. O resultado destas animações é mostrado em tempo real para o usuário graças às suas implementações na GPU. Em particular, permite escolher os parâmetros de controle através de galerias animadas em tempo real ou ainda usar as frequências da música para guiar a animação.

Palavras-chave

Animação ; Visualização de música ; GPU ; Análise harmônica ; Análise modal ; Modelos articulados ; Esqueletos ; Skinning ; Harmônicos de variedade ; Computação gráfica.

Abstract

Marques, Clarissa Codá dos Santos Cavalcanti; Lewiner, Thomas (Advisor). **Real-Time 3D Animation with Harmonic and Modal Analyses**. Rio de Janeiro, 2012. 94p. D.Sc. Thesis — Departamento de Matemática, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Animation of three-dimensional characters is still a mostly manual process. Applications such as computer games and motion capture for special effects in movies require continuous intervention from the artist, who needs to guide the movement almost step by step. In such examples the available tools provide controls mainly over local details, either in space or in time. This thesis uses two analytical frameworks to deal with the process of animation: harmonic and modal analyses, allowing the description of movements with a reduced set of controls. A GPU implementation of the resulting animations allows for real-time rendering of those. In particular, it allows applications such as interactive control tuning through design galleries animated in real-time or three-dimensional music visualization. Particularly, it allows the choice of control parameters through the use of animated galleries in realtime and the use of music frequencies to guide the animation.

Keywords

Animation ; Music Visualization ; GPU ; Harmonic analysis ; Modal analysis ; Articulated models ; Skeletons ; Skinning ; Manifold harmonics ; Computer graphics.

Sumário

Notações	10
1 Introdução	13
2 Animação com Harmônicos de Variedade	19
2.1 Transformada de Fourier	19
2.2 Harmônicos de Variedades	21
2.3 Transformações harmônicas em variedades	23
3 Corpos articulados	25
3.1 Corpos rígidos	25
3.2 Juntas elásticas	27
3.3 Forças	33
3.4 Movimentos do corpo rígido	37
3.5 Formulação matricial com matrizes adjuntas	42
3.6 Análise da dualidade entre velocidades e forças	48
4 Dinâmica de corpos articulados	50
4.1 Equações de Newton-Euler sem restrições	50
4.2 Restrições de velocidade	52
4.3 Forças das juntas elásticas	55
4.4 Espaço de movimentos possíveis	58
4.5 Análise Modal	62
5 Animação com Análise Modal	69
5.1 Análise Modal controlada por um sinal sonoro	69
5.2 Tratamento de esqueletos complexos	69
5.3 Skinning modal	71
6 Aspectos computacionais	73
6.1 Edição de filtros	73
6.2 Galeria	75
6.3 Efeitos complementares	78
6.4 Implementação na GPU do filtro harmônico	79
6.5 Implementação na GPU do filtro modal	80
6.6 Detalhes de implementação	82
7 Resultados	84
7.1 Harmônicos de Variedade	84
7.2 Análise Harmônica combinada com Modal	87
8 Conclusão e trabalhos futuros	90
Referências Bibliográficas	92

Lista de figuras

1.1	Modelo do dinossauro ao som de uma música pop.	14
1.2	Deformação dos modelos tridimensionais sob Análise Harmônica e Modal.	14
2.1	Decomposição e reconstrução de sinais.	20
2.2	Conversão do domínio de tempo, no domínio de frequências pela Transformada de Fourier.	20
2.3	Elementos geométricos para os coeficientes do Laplaciano discreto.	23
2.4	Deformação de um modelo 3D de acordo com as amplitudes da música.	24
3.1	Referencial local S_b e referencial global S_o .	25
3.2	Sistemas de coordenadas alinhado aos eixos de simetria de uma barra cilíndrica.	27
3.3	Movimento dos corpos de um modelo de mão.	27
3.4	Exemplo de sistema de coordenadas numa junta.	28
3.5	Junta de Revolução: corpo b_i em verde, corpo b_j em bordô, e a junta em branco.	29
3.6	Junta Prismática: corpo b_i em verde, corpo b_j em bordô, e a junta em branco.	30
3.7	Junta Cilíndrica: corpo b_i em verde, corpo b_j em bordô, e a junta em branco.	30
3.8	Junta Esférica: corpo b_i em verde, corpo b_j em bordô, e a junta consiste em uma esfera na interseção dos dois corpos.	31
3.9	Junta de revolução permitindo rotação apenas no eixo \vec{z} .	31
3.10	Torque e força aplicados em um ponto P de um corpo.	34
3.11	O vetor posição do ponto P até um i -ésimo ponto do corpo com massa m_i e velocidade \vec{v}_i .	35
3.12	Torque τ produzido por uma junta de revolução.	36
3.13	Relação de um ponto Q no referencial S_b ao referencial S_o .	38
3.14	O movimento realizado pelo referencial do corpo S_b relativo ao referencial inercial S_o .	40
3.15	Modelo com três corpos conectados e seus referenciais.	44
3.16	Força generalizada $\hat{\mathbf{f}}$ sobre o corpo.	45
3.17	Braço mecânico e um corpo: referenciais S_o , S_b pertencentes ao braço e referencial S_c do corpo.	46
3.18	Distância das origens do referencial S_c ao referencial S_b , $-O_c^b$.	47
3.19	Força resultante $\hat{\mathbf{f}}_o$ equivalente ao somatório das forças $\hat{\mathbf{f}}_i$ de cada corpo b_i .	47
4.1	Parte do dedo do modelo da mão se desconectando durante um movimento.	52
4.2	Exemplos de Movimentos admissíveis de um laço de 4 e 9 corpos, respectivamente.	54

4.3	Transformações de velocidade para juntas no laço de 4 corpos.	54
4.4	Sentido das forças correspondentes a cada junta j_i , $i \in 1, 2, 3$.	55
4.5	Transformações de velocidade forças das juntas para os corpos no laço de 4 corpos.	57
4.6	Subespaço de movimentos possíveis de uma junta esférica.	59
4.7	Subespaço de movimentos possíveis de uma junta de revolução.	59
4.8	Método SVD.	60
4.9	Método QR.	60
4.10	Exemplo de laços modelados com 4, 16 e 8 corpos, respectivamente.	61
4.11	Sistema de coordenadas locais de corpos e juntas.	62
4.12	Forças das juntas j_k e j_{k-1} do modelo do cavalo.	63
4.13	À esquerda ilustramos o cavalo em sua posição de equilíbrio e à direita com as patas da frente reposicionadas por um movimento de marcha.	66
4.14	Ilustração do trigésimo e segundo modos normais. O trigésimo modo é ilustrado no quadro mais à esquerda, enquanto no quadro à direita podemos ver o segundo modo normal.	67
4.15	Combinação dos modos 2 e 30 do modelo do Smurf.	67
4.16	Modo adicional onde o modelo balança a cabeça.	68
4.17	Na figura 4.17(a) ilustramos o cavalo em uma posição de equilíbrio, e na figura 4.17(b) à direita, mostramos a pata oscilando em torno de uma nova posição de equilíbrio.	68
5.1	Destaque a uma junta com mais de dois corpos no modelo do cavalo.	70
5.2	Combinação dos pares de corpos conectados a uma mesma junta.	70
5.3	Skinning da malha da mão.	72
5.4	Renderização do skinning do modelo da mão.	72
6.1	Filtro de combinações entre as funções de transferência e amplificação. A curva em cinza para a transferência corresponde ao mapeamento direto de $\xi = \sqrt{\Lambda_{t(\xi)}}$.	74
6.2	Filtro como a combinação das funções de transferência e de amplificação para os harmônicos do modo normal.	74
6.3	Galeria inicial do modelo polvo e suas respectivas funções de amplificação e transferência. A frequência do som é ilustrada na parte de baixo na figura.	77
6.4	Fragment Shader para o filtro dos harmônicos da variedade.	81
6.5	Fragment Shader para o filtro dos harmônicos no modal.	83
7.1	Galeria depois de uma reprodução dos itens 1, 4 e 5 da figura 6.3 nesta ordem de leitura.	85
7.2	Visualização de música rock no armadillo.	85
7.3	Zebra em um único modo de frequência 0.213596 Hz e amplitude 1.5.	87
7.4	Simulando a deformação do laço sob uma música de forró.	88
7.5	Modelo do Smurf ao som de MPB.	88
7.6	Zebra sob a influência de uma música francesa.	88

Notações

\cdot	Derivada em relação ao tempo	39
$\ddot{}$	Segunda derivada em relação ao tempo	42
$\tilde{s}(\xi)$	Transformada de Fourier de uma função $s(t)$	19
ξ	Frequência de som	19
ν	Frequência da malha	24
\star_k	Estrela de Hodge em k-formas	22
d_k	Derivada exterior em k-formas	22
$\bar{\Delta}$	Operador Laplaciano de de-Rham	22
Δ	Operador Laplaciano simétrico	23
H_ν	Autovetor de Δ , associado à frequência ν	23
Λ_ν	Autovalor de Δ , associado à frequência ν	23
φ	Filtro de amplificação das harmônicas da malha	24
a	Função de amplificação	24
t	Função de transferência	73
Φ	Operador de mapeamento entre ξ e ν	73
β_{ij}	Ângulos opostos a aresta formada pelos vértices i e j	22
b_i	Corpo b_i	25
j_k	Junta j_k	32
S_b	Referencial S relativo ao corpo b	25
x, y, z	Eixos coordenados	26
$\theta_x, \theta_y, \theta_z$	Ângulos de rotação em torno dos eixos x, y, z, \dots	26
$P, Q, \dots V$	Pontos	31
P_b^o	Ponto P do corpo b em coordenadas do referencial S_o	31
O_b	Origem do referencial S_b	38
Ω_b^o	Matriz de rotação do referencial S_b relativo ao referencial S_o	38
\vec{v}	Vetor v	28

χ_b^a	Transformação do referencial S_b ao referencial S_a	31
χ_*	Definição da transformação χ para vetores.....	37
n_b	Número de corpos do sistema.....	32
n_j	Número de juntas do sistema.....	32
nr_i	Número de restrições impostas por uma junta j_i	32
n_t	Número de restrições total do sistema.....	32
F_i^{j+}	Conjunto das juntas que contém o corpo b_i como sucessor.....	55
F_i^{j-}	Conjunto das juntas que contém o corpo b_i como antecessor....	55
m	Massa de um corpo.....	26
k	Coefficiente de rigidez.....	63
\mathbf{J}	Matriz de momento de inércia.....	26
\mathbf{J}_{ij}	Componente ij da matriz momento de inércia \mathbf{J}	26
\mathbf{p}	Momento linear.....	33
\mathbf{f}	Força linear.....	33
τ	Torque.....	33
\mathbf{L}	Momento angular.....	33
\mathbf{L}_P	Momento angular em um ponto P	33
v	Velocidade linear.....	40
ω	Velocidade angular.....	39
$\omega \times$	Tensor velocidade angular.....	39
α	Aceleração angular.....	42
C	Centro de massa de corpo.....	33
$\hat{\mathbf{p}}$	Posição generalizada.....	26
$\hat{\mathbf{f}}$	Força generalizada.....	36
${}^c\hat{\mathbf{f}}$	Força de amortecimento em coordenadas generalizadas.....	57
$\hat{\mathbf{v}}$	Velocidade generalizada.....	40
$\hat{\mathbf{v}}_{ab}^c$	Velocidade do corpo b relativa ao corpo a em coordenadas de S_c	44
Γ^f	Matriz de restrição de força associada a junta.....	55
Γ^m	Matriz de restrição de movimento associada a junta.....	30
\mathbf{Ad}_χ	Matriz adjunta associada a transformação χ	43
\mathbf{Ad}_χ^{-1}	Inversa da matriz adjunta associada a transformação χ	43
\mathbf{G}	Matriz de restrição de velocidades.....	53
\mathbf{R}	Matriz de restrição de forças.....	56
\mathbf{N}	Matriz geradora do espaço nulo de \mathbf{G}	58

C	Matriz de coeficientes de amortecimento	57
M	Matriz de massa projetada no espaço nulo	64
K	Matriz de rigidez projetada no espaço nulo	64
U	Matriz de autovetores do problema $\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K}$	64
\mathbf{u}_i	Autovetor associado ao modo normal i	64
λ_i	Autovalor associado ao modo normal i	65
η	Vetor de autovetores projetados no espaço nulo	64
ν	Vetor de frequências naturais no modelo 3D	65
μ	Vetor de amplitudes	65
γ	Vetor de fases	65
M_b	Matriz de transformação do corpo b	71
δ_b^i	Peso do vértice v_i associado ao skinning do corpo b	71
$\tilde{x}\tilde{y}\tilde{z}$	Textura contendo as amplitudes harmônicas da malha	79
d_{xyz}	Textura contendo a soma das amplitudes harmônicas da malha ..	79
H_k	Textura contendo os autovetores do laplaciano discreto	79
ϕ	Textura 1D contendo as frequências do som, as funções de transferência e de amplificação	80