

Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação

Animação facial por computador baseada em modelagem biomecânica

Autora: Renata Corrêa
Orientador: Prof. Dr. Léo Pini Magalhães
Co-orientador: Prof. Dr. José Mario De Martino

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica. Área de concentração: **Engenharia de Computação**.

Banca Examinadora

Prof. Dr. Léo Pini Magalhães DCA/FEEC/Unicamp
Prof. Dr. Jorge Carlos Lucero ICC/MAT/UnB
Prof. Dr. Clésio Luis Tozzi DCA/FEEC/Unicamp
Profa. Dra. Wu Shin-Ting. DCA/FEEC/Unicamp

Campinas, SP
Novembro/2007

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

Corrêa, Renata
C817a Animação facial por computador baseada em modelagem
biomecânica / Renata Corrêa. – Campinas, SP: [s.n.], 2007.

Orientadores: Léo Pini Magalhães, José Mario De Martino.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campi-
nas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Animação por computador. 2. Biomecânica. 3. Expres-
são facial I. Magalhães, Léo Pini. II. De Martino, José Mario.
III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engen-
haria Elétrica e de Computação. IV. Título.

Título em inglês: Computer facial animation based on biomechanical modeling

Palavras-chave em Inglês: Facial animation; Biomechanics; Facial expression

Área de concentração: Engenharia de Computação

Titulação: Mestre em Engenharia Elétrica

Banca examinadora: Clésio Luis Tozzi, Jorge Carlos Lucero, Wu Shin-Ting

Data da defesa: 07/11/2007

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Elétrica

COMISSÃO JULGADORA - TESE DE MESTRADO

Candidata: Renata Corrêa

Data da Defesa: 7 de novembro de 2007

Título da Tese: "Animação Facial por Computador Baseada em Modelagem Biomecânica"

Prof. Dr. Léo Pini Magalhães (Presidente):

Prof. Dr. Jorge Carlos Lucero:

Profa. Dra. Wu Shin-Ting:

Prof. Dr. Clésio Luiz Tozzi:

Léo Pini Magalhães
Jorge Carlos Lucero
Wu Shin Ting
Clésio Luiz Tozzi

Resumo

A crescente busca pelo realismo em personagens virtuais encontrados em diversas aplicações na indústria do cinema, no ensino, jogos, entre outras, é a motivação do presente trabalho. O trabalho descreve um modelo de animação que emprega a estratégia biomecânica para o desenvolvimento de um protótipo computacional, chamado SABiom. A técnica utilizada baseia-se na simulação de características físicas da face humana, tais como as camadas de pele e músculos, que são modeladas de forma a permitir a simulação do comportamento mecânico do tecido facial sob a ação de forças musculares. Embora existam vários movimentos produzidos por uma face, o presente trabalho restringiu-se às simulações dos movimentos de expressões faciais focalizando os lábios. Para validar os resultados obtidos com o SABiom, comparou-se as imagens do modelo virtual obtidas através do protótipo desenvolvido com imagens obtidas de um modelo humano.

Palavras-chave: Animação Facial, Biomecânica, Expressões da face.

Abstract

The increasing search for realism in virtual characters found in many applications as movies, education, games, so on, is the motivation of this thesis. The thesis describes an animation model that employs the biomechanics strategy for the development of a computing prototype, called SABiom. The method used is based on simulation of physical features of the human face, such as layers of the skin and muscles, that are modeled for simulation of the mechanical behavior of the facial tissue under the action of muscle forces. Although there are several movements produced by a face, the current work limits itself to the simulations of the facial expressions focusing the lips. To validate the results obtained from SABiom, we compared the images of the virtual model with images from a human model

Keywords: Facial Animation, Biomechanics, Facial expression.

*Ao Enrique, com amor, admiração e gratidão por sua compreensão, carinho,
presença e incansável apoio ao longo desse período*

Agradecimentos

A Deus por me dar força, saúde e sabedoria para a realização desse trabalho.

Aos orientador e co-orientador, professores Léo Pini Magalhães e José Mario De Martino, pela amizade, valiosos conselhos e sugestões, empenho e paciência ao longo do presente trabalho.

Aos professores Wu Shin-Ting e Jorge Lucero pelas sugestões e generosidade com que apontaram melhorias.

Aos meus pais, minhas irmãs Paula e Bruna, tios Lúcia e José Carlos, primos Elaine e Rodrigo, Aline, Guilherme, Tania e Julio pelo apoio durante esta jornada.

Aos amigos, Tiemi C. Sakata, Lucian M. Zaina, Andréa Lúcia B. V. Rodrigues, Maria Eliege, Denise Hippler, Fábio L. Caversan, Wilson R. M. Junior, Atlântico A. Pombo, Juliana Crepaldi e Maurício pelo apoio e valiosas dicas.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, pelo apoio financeiro.

Sumário

Lista de figuras	ix
Lista de tabelas	xi
Lista de abreviaturas	xii
1 Introdução	1
1.1 Estrutura do texto	2
2 Animação facial	4
2.1 Animação baseada em modelo tridimensional	5
2.2 Animação facial baseada em biomecânica	9
2.2.1 Pele	9
2.2.2 Músculos faciais	10
2.2.3 Ossos da face	13
2.2.4 Animação utilizando estratégia biomecânica	14
2.3 Considerações finais	19
3 Sistema de animação baseado em biomecânica	20
3.1 Modelagem da geometria da face virtual	20
3.2 Modelagem da movimentação facial	23
3.3 Modelo muscular	28
3.3.1 Músculos lineares	29
3.3.2 Músculos esfínter	33
3.4 Mandíbula	35
3.5 Considerações finais	36
4 Protótipo desenvolvido	37
4.1 SABiom	37

4.1.1	Estrutura de Dados Base	38
4.1.2	Pré-processamento	41
4.1.3	Entrada	43
4.1.4	Cálculos	45
4.1.5	Exibição	48
4.2	Considerações finais	49
5	Resultados obtidos	51
5.1	Casos de teste	52
5.1.1	Procedimentos adotados	52
5.1.2	Expressões faciais de alegria	53
5.1.3	Expressão facial de tristeza	57
5.1.4	Expressão facial de nojo	58
5.1.5	Expressão do beijo	60
5.2	Considerações finais	62
6	Comentários finais	63
	Referências bibliográficas	66

Lista de figuras

2.1	Parâmetro de definição facial (FDP), adaptado de Pockaj (2005)	7
2.2	Vértices capturados (DE MARTINO; MAGALHÃES; VIOLARO, 2006)	8
2.3	Relação entre força e deformação da pele, adaptada de Skalak e Chien (1987)	10
2.4	Músculos faciais, ilustração adaptada de Sobotta (2000)	12
2.5	Ossos faciais, adaptado de Sobotta (2000)	13
2.6	Mandíbula - adaptada de Gray (2000)	14
2.7	(a)Fibra muscular e (b) Músculo (PLATT; BADLER, 1981)	15
2.8	Contração muscular (WATERS, 1987)	16
2.9	Marcações faciais para obtenção dos dados (LUCERO; MUNHALL, 1999)	18
2.10	Fibra muscular (KÄHLER; HABER; SEIDEL, 2001)	19
3.1	Modelo geométrico Miraface	21
3.2	Modelo geométrico da face adaptado	21
3.3	Superfícies: pele, fáscia e ossos	22
3.4	Camadas: muscular e de gordura (LEE; TERZOPOULOS; WALTERS, 1995).	23
3.5	Ligação entre vértices (mola)	25
3.6	Prisma triangular que compõe as superfícies pele, fáscia e ossos	26
3.7	Músculos faciais, ilustração adaptada de Sobotta (2000)	29
3.8	Representação do músculo virtual	30
3.9	Modelo geométrico com os músculos modelados	31
3.10	Atuação da força no músculo linear	31
3.11	Distribuição de força muscular nos vértices do músculo virtual	32
3.12	Distribuição em função de cosseno	33
3.13	Atuação da força no músculo esfíncter	34
3.14	Vértice central do orbicular da boca	34
3.15	Representação dos vértices afetados na rotação	35
4.1	Divisões do SABiom	38

4.2	Modelo geométrico: (a) original e (b) refinado	39
4.3	Matrizes de: (1)coordenadas, (2)normais, (3)triângulos	40
4.4	Matrizes que contêm informações dos músculos	41
4.5	Pacote Pré-processamento expandido	42
4.6	Vértices das camadas que compõe o modelo geométrico	42
4.7	(a)Grafo do modelo geométrico, (b) Matriz de relacionamento entre os vértices e (c) matriz de coordenadas do vértice	43
4.8	Pacote Entrada expandido	44
4.9	Interface de controle desenvolvida	45
4.10	Pacote Cálculos expandido	46
4.11	Volume facial	47
5.1	Seqüência de etapas do procedimento adotado	52
5.2	(a) Músculos do sorriso discreto; (b) Sorriso discreto	54
5.3	Comparativo: expressão de alegria - sorriso discreto	55
5.4	(a) Músculos do meio sorriso; (b) Meio sorriso	56
5.5	Comparativo: expressão de alegria - meio sorriso	56
5.6	(a) Músculos da tristeza; (b) Tristeza	57
5.7	Comparativo: expressão de tristeza	58
5.8	(a) Músculos do nojo; (b) Nojo	59
5.9	Comparativo: expressão de nojo	60
5.10	(a) Músculos do beijo; (b) Movimento do beijo	61
5.11	Comparativo: expressão do beijo	61
5.12	Comparativo: expressão do beijo - visão lateral	62

Lista de tabelas

3.1	Músculos da face (SPENCE, 1991) e (DIO; AMATUZZI; CRICENTI, 2002).	30
5.1	Parâmetros empregados na simulação facial	53
5.2	Músculos ativos na expressão de alegria - sorriso discreto	54
5.3	Músculos ativos na expressão de alegria - meio sorriso	57
5.4	Músculos ativos na expressão de tristeza	58
5.5	Músculos ativos na expressão de nojo	59
5.6	Músculos ativos no movimento do beijo	60

Lista de abreviaturas

FFD Deformação de Forma Livre (*Freeform Deformation*)

RFFD Deformação de Forma Livre Racional (*Rational Freeform Deformation*)

AU Unidade de Ação (*Action Unit*)

FDP Parâmetros de Definição Facial (*Facial Definition Parameters*)

FAP Parâmetros de Animação Facial (*Facial Animation Parameter*)

EMG Eletromiografia

Capítulo 1

Introdução

Apesar da face representar uma pequena parte do corpo humano, ela é uma importante ferramenta para comunicação não verbal entre pessoas, pois a informação visual implícita em seus movimentos auxilia ou complementa a compreensão da mensagem que se deseja transmitir. Esses movimentos, que são os principais responsáveis pela grande importância da face na comunicação, podem ser classificados em articulatórios quando gerados durante a fala, por exemplo, a abertura da boca ao pronunciar a letra ‘a’, emocionais quando associados a expressões faciais que representam sentimentos, por exemplo, a expressão de tristeza onde os lábios são curvados formando um ‘u’ invertido, contorcidos quando representados por movimentos não usuais da face, por exemplo caretas e fisiológicos quando produzidos por movimentos associados à necessidade biológica, como por exemplo o piscar dos olhos (DE MARTINO, 2005).

Sem dúvida, um dos principais movimentos faciais é o emocional, produzido através da contração isolada ou combinada de músculos faciais, que possibilita a comunicação entre seres humanos desde os primeiros dias de vida. Expressões emocionais como alegria, tristeza, entre outras, geradas a partir de contrações musculares, utilizam algumas das partes da face consideradas expressivas, entre elas a boca. Esta é classificada como o elemento mais expressivo da face, devido ao grande número de músculos a ela relacionados, possibilitando que a mesma assuma uma grande variedade de formas (FLEMING; DOBBS, 1999).

Representar a riqueza de movimentos faciais no mundo virtual através da animação, sobretudo a movimentação de forma realista é uma tarefa difícil e ao mesmo tempo instigante que vem desafiando pesquisadores há vários anos. Desta forma, a representação virtual dos diversos movimentos faciais fez com que a animação facial se tornasse uma ampla área de pesquisa que reúne grandes esforços com propósitos de aplicações distintos, como por exemplo, na indústria de jogos, cinema, teleconferência, multimídia educacional, medicina, entre outros, os quais motivam o seu desenvolvimento (LEE; TERZOPOULOS, 2006), (OSTERMANN, 2002) e (KÄHLER, 2003).

A animação facial que, assim como a animação de um modo geral consiste em induzir a ilusão do movimento a partir da exibição de uma seqüência de imagens estáticas à uma frequência adequada, pode ser classificada em animação gerada por computador e animação assistida por computador (AZEVEDO; CONCI, 2003). A animação assistida por computador consiste em utilizar técnicas tradicionais de animação (desenho animado) onde os quadros são criados manualmente pelo animador. Já na animação gerada por computador são empregadas estratégias com o propósito de gerar os quadros automaticamente. Para gerar animações faciais por computador, diversas estratégias foram adotadas ao longo do tempo, entre elas: interpolação poses-chave, parametrização geométrica, parametrização *data-driven* e biomecânica, foco do presente trabalho.

A estratégia de animação facial chamada biomecânica, representa características da anatomia humana por meio de um equacionamento mecânico. Em outras palavras, a estratégia visa modelar características da face humana relativas aos ossos, músculos, pele e suas respectivas forças exercidas na movimentação da face. Uma interessante proposta que simula algumas características anatômicas da face como músculos, elasticidade das três camadas faciais que a compõe (pele, fásia e ossos) é o modelo de animação proposto por Lee, Terzopoulos e Walters (1995) e Lucero e Munhall (1999), que é empregado no presente trabalho.

O presente trabalho desenvolveu um protótipo computacional com uma interface interativa que possibilita ao animador configurar valores para as forças musculares, que são os parâmetros que desencadeiam o movimento da face. Através destas configurações é possível obter diversas animações de expressões faciais.

Com o objetivo de testar e validar o protótipo de animação desenvolvido no presente trabalho, foram adotadas configurações de forças musculares que possibilitassem uma análise comparativa com movimentos faciais reais da face. Para isso foram geradas expressões faciais a fim de estabelecer um parâmetro comparativo com os resultados obtidos do protótipo.

A próxima seção apresenta a organização deste trabalho, bem como a metodologia empregada para o seu desenvolvimento.

1.1 Estrutura do texto

O capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica com os principais trabalhos encontrados na literatura da área de interesse, na qual inicialmente são tratadas questões anatômicas da composição da face. Em seguida faz-se estudos sobre as diferentes estratégias que podem ser empregadas para a realização da animação facial, dentre elas a interpolação poses-chave, parametrização geométrica, parametrização *data-driven* e biomecânica. Por ser a estratégia empregada no desenvolvimento do presente trabalho enfatiza-se a estratégia biomecânica e assim apresenta-se os trabalhos mais signi-

ficativos encontrados na literatura que utilizam essa estratégia, além de conceitos importantes sobre as características da pele, ossos, músculos faciais e a mecânica da pele inerente à área de atuação da estratégia abordada.

Após o levantamento bibliográfico, é apresentado no capítulo 3 um detalhamento sobre o modelo de animação implementado. Embora técnicas sobre a criação do modelo geométrico não pertençam ao escopo do presente trabalho, apresentam-se as modificações e adaptações realizadas no modelo original. O modelo muscular utilizado que orienta a dinâmica da pele modelam músculos faciais dos tipos linear e esfíncter baseado em Lee, Terzopoulos e Walters (1995) e Lucero e Munhall (1999).

A implementação do protótipo computacional é descrita no capítulo 4 e consiste de um sistema interativo para realização de animação facial empregando a estratégia biomecânica. A especificação e o desenvolvimento do protótipo resultante desta especificação são apresentados em detalhe neste capítulo.

No capítulo 5 exploram-se análises realizadas no modelo empregado, os resultados obtidos de simulações com o protótipo desenvolvido e as avaliações comparativas desses resultados com movimentos capturados de um modelo humano.

Comentários finais são apresentados no capítulo 6, no qual são realizadas considerações sobre os resultados obtidos, analisando-os e apontando possíveis rumos da linha de pesquisa.

Capítulo 2

Animação facial

A criação de animações faciais é composta por duas etapas, a definição do modelo que representa a face e a aplicação de estratégias para realização da movimentação do modelo.

Por não pertencer ao escopo deste trabalho, a etapa de definição do modelo geométrico que representa a face virtual é apenas citada neste capítulo, não sendo apresentados detalhes sobre as técnicas para construção do modelo geométrico.

Entretanto, por pertencer ao escopo, a etapa da modelagem e realização da movimentação facial será abordada em detalhe. Conceitualmente, as estratégias de movimentação facial possuem dois contextos distintos, as animações faciais realizadas no espaço bidimensional e as realizadas no espaço tridimensional.

Em animações no espaço bidimensional utiliza-se largamente a técnica de *morphing*, onde ocorre a transformação (metamorfose) de uma representação facial em outra. Neste contexto, a face virtual pode ser representada por um modelo geométrico bidimensional ou por imagens (usualmente fotográficas).

Para se aplicar o *morphing*, é necessário além das representações faciais inicial e final, definir as principais regiões da face as quais deseja-se modificar (denominadas *regiões características*) através da utilização de, por exemplo, vetores (retas características). Neste caso, essas retas usualmente estão pré-definidas ou são especificadas interativamente pelo usuário. Após o procedimento de definição das regiões características na face inicial e final, as faces virtuais intermediárias são obtidas aplicando-se um fator de escala e considerando-se a distância entre os vértices ou *pixels* da região de influência à reta característica na representações inicial e final (BUTTFIELD, 2003).

Modelos de animação no espaço bidimensional não serão abordados neste documento, pois, o alvo almejado são os modelos de animação realizados no espaço tridimensional e que usualmente empregam técnicas que deformam a geometria tridimensional que representa a face.

As principais estratégias empregadas em modelos de animação realizadas no espaço tridimensi-

onal serão apresentadas na seção 2.1. Dentre elas, a estratégia biomecânica será abordada em maior detalhe na seção 2.2 por ser a estratégia empregada no presente trabalho.

2.1 Animação baseada em modelo tridimensional

Ao longo dos anos, diferentes estratégias têm sido propostas para animações faciais. Para realizar uma animação, a representação da face usualmente é composta por uma malha tridimensional de polígonos, cujos vértices podem sofrer deslocamentos ao longo do tempo, produzindo assim movimentação da face.

As estratégias adotadas para animação facial podem ser classificadas em quatro grandes categorias. São elas: interpolação de poses-chave, parametrização geométrica, parametrização *data-driven* e simulação biomecânica (DE MARTINO, 2005).

A interpolação de poses-chave, como o nome sugere, baseia-se na especificação de um conjunto de modelos geométricos apresentados em diferentes poses faciais, sendo necessárias no mínimo duas. A animação é realizada com o cálculo das poses intermediárias através da interpolação das posições dos vértices que compõem as poses-chave.

O trabalho de Erol e Güdükbay (2001) é um exemplo de abordagem que emprega a estratégia de interpolação de poses-chave. O sistema desenvolvido pré-define algumas poses-chave com expressões da face alegre, surpresa, brava e com nojo. O usuário pode combinar as poses-chave pré-definidas no sistema para criar expressões intermediárias da face, que são geradas através da interpolação das posições dos vértices utilizando uma função cosseno para suavizar a transição de uma posição até a próxima posição gerada.

Uma dificuldade encontrada na estratégia de interpolação de poses-chave é a necessidade de uma completa especificação do modelo geométrico em todas as poses-chave, para que se possa combiná-las na criação das poses intermediárias.

A fim de solucionar esta dificuldade, para realização da animação facial, a parametrização geométrica oferece um conjunto de mecanismos geométricos baseado em transformações como rotação, translação e mudança de escala. Utilizando um conjunto de parâmetros é possível calcular as posições dos vértices após a aplicação de uma seqüência de transformações.

Os parâmetros da estratégia de parametrização geométrica normalmente controlam características importantes em diferentes regiões da face para formação da expressão facial, como por exemplo, a abertura da boca, como resultado da rotação do maxilar, a abertura das pálpebras, a posição das sobrancelhas, entre outras. Desta forma, os movimentos são obtidos pela combinação das transformações geométricas aplicadas aos vértices da região a ser movimentada (OSTERMANN, 2002).

Uma técnica classificada como parametrização geométrica é a Deformação de Forma Livre (*Free-*

form Deformation) (FFD), através da qual um objeto poligonal imaginário flexível de controle envolve a superfície ou objeto de interesse na face com o objetivo de esculpi-la. Assim, uma relação entre os vértices do polígono de controle e os vértices dos polígonos da superfície da face é estabelecida.

Sederberg e Parry (1986) utilizaram FFD considerando um objeto de controle em formato de paralelepípedo com consistência análoga a um plástico flexível, que é encaixado em um ou mais objetos, os quais se deseja deformar. O objeto a ser modificado é considerado também flexível, de modo que se movimenta junto com o paralelepípedo de controle que o envolve. A fim de limitar a flexibilidade da deformação para impedir que ocorram situações que não retratam a realidade, pode-se impor restrições ao paralelepípedo de controle e conseqüentemente ao objeto a ser deformado.

Devido à necessidade de uma maior liberdade para manipulação do paralelepípedo de controle, Kalra et al. (1992) propôs uma extensão do trabalho de Sederberg e Parry (1986). A proposta denominada Deformação de Forma Livre Racional (*Rational Freeform Deformation*) (RFFD), provê um grau a mais de liberdade na manipulação da deformação através da alteração dos pesos dos pontos de controle do paralelepípedo. Desta forma, pode-se estabelecer que o deslocamento de um determinado ponto tenha mais influência na deformação de um objeto do que em outro. Propriedades físicas que simulam a elasticidade da pele também podem ser incorporadas através de um coeficiente aplicado à movimentação (KALRA et al., 1992).

A movimentação da pele ocorre devido a ações no paralelepípedo de controle colocado na região de interesse, ou seja, quando um determinado vértice do paralelepípedo de controle é deslocado, a relação entre o vértice deste e o vértice da face é mantida, desta forma, o movimento no vértice do paralelepípedo de controle provoca um movimento na malha facial (NOH; NEUMANN, 1998).

Ao utilizar FFD's e RFFD's apenas as partes do objeto imersas no paralelepípedo de controle são deformadas, assim para se propagar a deformação às regiões adjacentes com o intuito de produzir movimentações suaves, realiza-se uma interpolação entre os demais vértices adjacentes do objeto (SEDERBERG; PARRY, 1986) e (KALRA et al., 1992).

Ekman, Friesen e Hager (2003), criaram o Sistema de Codificação de Ação Facial (*Facial Action Coding System*) (FACS) para descrever e classificar as expressões faciais em função de ações musculares elementares, denominadas Unidade de Ação (*Action Unit*) (AU). As AU's representam movimentos obtidos com a atuação de um ou mais músculos, admitindo-se também que um músculo possa estar associado a duas ou mais AU's.

Baseando-se nas FACS o padrão MPEG-4, pode ser classificado como uma estratégia de parametrização geométrica. Este padrão estabelece 84 pontos característicos, denominados Parâmetros de Definição Facial (*Facial Definition Parameters*) (FDP), para a definição da geometria e animação da face, a figura 2.1 apresenta os FDP definidos pelo MPEG-4. Para o controle da animação utilizam-se parâmetros conhecidos como Parâmetros de Animação Facial (*Facial Animation Parameter*) (FAP), baseados nas AU's, que definem um conjunto básico de movimentos faciais que quando

combinados possibilitam a geração de um amplo conjunto de expressões faciais (OSTERMANN, 2002) e (KÄHLER, 2003). A partir da posição neutra, é possível gerar a animação facial através de parâmetros FAPs, que estabelecem os deslocamentos a serem aplicados aos FDPs.

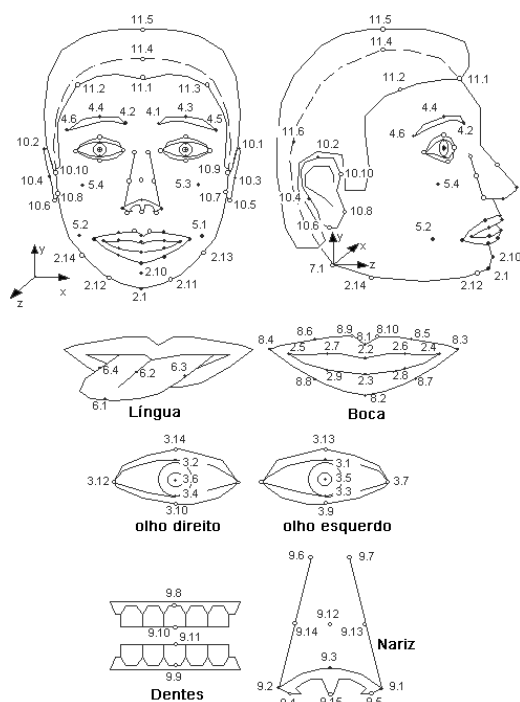


Fig. 2.1: Parâmetro de definição facial (FDP), adaptado de Pockaj (2005)

O padrão MPEG-4 define dois grandes grupos de FAPs, o de baixo nível e o de alto nível. Um FAP de baixo nível estabelece a translação ou rotação a ser aplicada a um FDP, estando associado a uma ação básica facial. Por sua vez, os parâmetros de alto nível estão associados ao posicionamento de um conjunto de FDPs sem que seja necessário especificar vários FAPs de baixo-nível (ISO, 2006).

Observa-se no trabalho de Pandzic (2002) uma abordagem que emprega o padrão MPEG-4, que tem como entrada uma face fonte (representação facial em sua posição neutra) e parâmetros que selecionam movimentos que se deseja alcançar. Obtém-se a movimentação facial através da aplicação de transformações de acordo com as FAPs associadas aos parâmetros selecionados.

Ainda no escopo da parametrização geométrica, o mecanismo de controle para expressões faciais de Byun e Badler (2002) utiliza um conjunto de parâmetros de alto nível FAPs que representa uma expressão facial na forma de um conjunto de ações de musculares. Esta aproximação utiliza uma biblioteca de parâmetros para gerar as expressões faciais pré-estabelecidas que foram capturadas de movimentos humanos, ou que foram criadas manualmente.

O trabalho precursor de Parke (1982) apresenta um modelo de animação onde os parâmetros podem ser inseridos interativamente ou através de arquivos. Os parâmetros de entrada podem configurar

cinco tipos de operações definidas neste modelo. As operações são: procedural, onde é possível configurar características dos olhos; interpolação, utilizada para configurar regiões da face que mudam de forma, dentre elas, a boca, testa, etc.; rotação, utilizada para abrir a boca; escalonamento, empregado para definir características de tamanho de regiões como largura do nariz, protusão da boca, etc.; posição de compensação, que move regiões de vértices como grupos, por exemplo, os cantos da boca, comprimento do nariz, entre outras.

Um desafio encontrado na estratégia de parametrização geométrica é a dificuldade em se estabelecer um conjunto adequado de parâmetros de controle e implementar um modelo de animação que utilize estes parâmetros e gere uma ampla variedade de movimentos faciais.

Na tentativa de encontrar parâmetros ideais que orientem o modelo que representa a face, a estratégia de parametrização *data-driven* utiliza como parâmetros, dados obtidos com equipamentos especiais de mensuração de ações humanas, como *scanners* tridimensionais, sensores de ações musculares, raios infra-vermelhos, entre outros.

Em De Martino (2005), cuja abordagem é a animação facial da fala para o português do Brasil, a simulação de movimentos é orientada através de parâmetros capturados de gravações de vídeo, realizadas com o auxílio de duas câmeras JVC KY27C sincronizadas e posicionadas em ângulo de 90° (DE MARTINO; MAGALHÃES; VIOLARO, 2006).

Para calibração da câmera utilizou-se um capacete especialmente desenvolvido pelo autor para se obter dados de pontos em regiões estratégicas da face para o movimento articulatório da fala. Assim marcou-se e monitorou-se, quatro pontos na face, no centro do lábio superior e inferior, no canto localizado entre os lábios e na região central do queixo, como marcados na figura 2.2. Posteriormente, mapeou-se o deslocamento desses vértices marcados para a face sintética, gerando-se o movimento facial virtual.

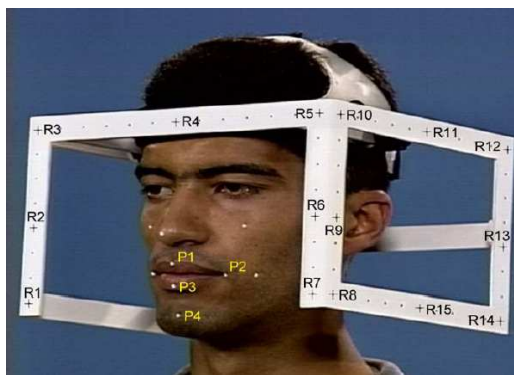


Fig. 2.2: Vértices capturados (DE MARTINO; MAGALHÃES; VIOLARO, 2006)

Na estratégia de parametrização *data-driven* a grande dificuldade é a impossibilidade de gerar movimentos que não foram previamente mensurados.

A fim de produzir animações realistas, a estratégia de simulação biomecânica tem como princípio básico a simulação de comportamentos da face utilizando propriedades físicas. Nesta estratégia, modelam-se músculos faciais como operadores aptos a desencadear a movimentação da face virtual. O tecido facial é usualmente representado por uma malha de polígonos que comportam-se como sistemas massa-mola, ou seja, cada ligação entre vértices comporta-se como uma mola, que procura simular as propriedades elásticas da pele humana.

Devido às dificuldades encontradas nas estratégias, interpolação de poses-chave, parametrização *data-driven* e parametrização geométrica, o presente trabalho adota a estratégia de animação biomecânica por permitir uma simulação da movimentação mais próxima da realidade física.

Alguns trabalhos significativos encontrados na literatura, que podem ser classificados na estratégia de animação biomecânica, serão comentados na próxima seção que também apresenta algumas características anatômicas da face, como a descrição da pele, músculos e ossos.

2.2 Animação facial baseada em biomecânica

É importante para a criação de sistemas de animação facial baseados em biomecânica a boa compreensão da estrutura anatômica da cabeça humana.

A anatomia da cabeça humana é composta de várias estruturas como, vasos sanguíneos, cartilagens, músculos, ossos, entre outras. Para a abordagem biomecânica em geral, quanto maior o número de características simuladas mais realista será o resultado obtido, porém, o acréscimo das características a serem simuladas implica em um aumento da complexidade computacional associada. Dessa maneira, a busca por produções de animações realistas, atualmente tem se concentrado em simular aspectos físicos e anatômicos de características da face, envolvendo músculos, pele e ossos.

O crânio, os músculos e a pele são as principais estruturas da cabeça que determinam a aparência do rosto, desta maneira, quando se deseja obter um sistema de animação realista, essas estruturas não podem deixar de ser consideradas no modelo de animação, embora detalhes como vasos sanguíneos, glândulas sebáceas, entre outros, não sejam usualmente simulados em trabalhos encontrados na literatura (KÄHLER, 2003).

2.2.1 Pele

Mecanicamente, a pele suporta os órgãos internos e os protege além de permitir uma considerável mobilidade ao corpo, devido à extensibilidade resultante das suas propriedades mecânicas. O tecido da pele é composto por colágeno, uma proteína fibrosa, mais elastina e queratina, que proporcionam flexibilidade à pele (ARUMNGAM; NARESH; SANJEEVI, 1994), (ELDEN, 1976).

De maneira simplificada a pele é composta por três camadas: a epiderme, a derme e a hipoderme. A epiderme (do grego *epi* acima e *derma* pele) é a camada externa da pele. A derme está situada logo abaixo da epiderme. A hipoderme, também conhecida como camada de gordura, é a camada interna da pele (DIO; AMATUZZI; CRICENTI, 2002).

A epiderme é a camada que reveste a superfície exterior do corpo, suas propriedades definem em grande parte as funções da pele. Sua espessura varia normalmente de 0,8 à 0,12 mm na maior parte do corpo, mas há algumas exceções como a planta do pé que pode atingir 1,4 mm e o rosto onde esta camada tem aproximadamente 0,02 mm de espessura (KÄHLER, 2003).

Segundo Dio, Amatuzzi e Cricenti (2002), em condições normais, a epiderme possui uma elevada capacidade regenerativa e a queratina, que é uma proteína presente em sua composição, é responsável pela impermeabilização da pele. A camada de derme possui em sua composição proteínas como fibras de colágenos e elastina que caracterizam as propriedades de resistência mecânica e elasticidade da pele. Já a hipoderme, que é a camada mais profunda da pele, é um tecido adiposo que pode atingir até 3 cm, constituindo-se na camada energética e que proporciona à pele, proteção contra traumas físicos.

Além de sua composição em três camadas, outra propriedade importante para simulação é a relação estabelecida entre a força aplicada à pele e deformação, conforme a figura 2.3. A resposta da pele submetida a uma força que a traciona, não é linear devido a característica visco-elástica de cada camada que a compõe. A natureza elástica, que é variável dependendo da camada da pele, está relacionada ao armazenamento de energia e à tendência em retornar ao estado natural quando modificada (SKALAK; CHIEN, 1987).



Fig. 2.3: Relação entre força e deformação da pele, adaptada de Skalak e Chien (1987)

2.2.2 Músculos faciais

Um sorriso, uma carranca, um nariz enrugado ou uma sobrancelha erguida podem significar uma mensagem sem palavras ou ainda fazer parte de uma conversação normal. As pessoas, continuamente

enviam esses sinais e os lêem em outras faces, geralmente sem qualquer pensamento consciente (KENDALL; CREARY, 1995). As expressões faciais são parte importante da linguagem diária, utilizadas para mostrar o humor ou sentimentos de um indivíduo, sem o uso de palavras. Para produzir essa importante habilidade de comunicação é necessária a atuação de músculos que estão localizados na face.

Os músculos da cabeça classificam-se em esqueléticos e cutâneos, devido a posição que ocupam. Os músculos esqueléticos são aqueles que permitem os movimentos da cabeça, do tronco e dos membros. Os músculos cutâneos do rosto são numerosos e servem para compor as expressões da face (músculos mímicos).

Os músculos faciais cutâneos agem isoladamente ou combinados, têm comportamento elástico e podem ser encontrados sobre o crânio, os ossos faciais, cavidades e cartilagens (BAGSHAW, 1994). Importantes para a composição de expressões faciais, os músculos cutâneos localizados sobre os ossos faciais são simulados no presente trabalho.

Inseridos na pele da face, os músculos são responsáveis por causar distorções através de suas contrações. Frequentemente o aparecimento de rugas na pele na direção perpendicular à linha de ação muscular ocorre quando são contraídos um ou mais músculos (KÄHLER, 2003).

A figura 2.4, ilustra os músculos modelados no presente trabalho, escolhidos devido à importância de suas ações para o propósito da representação de expressões faciais.

A maioria dos músculos é espelhada nos dois lados da face e seus comportamentos são correspondentes em ambos os lados. Diferentemente, o orbicular da boca é um músculo que circunda toda boca, não sendo espelhado. Ele forma uma intrincada estrutura que permite uma rica variedade de movimentações labiais, incluindo protrusão e retração dos lábios desempenhando uma importante função na articulação dos sons da fala.

Tendo como referências Dio, Amatuzzi e Cricenti (2002) e Ekman, Friesen e Hager (2003) foram realizados estudos sobre os locais de inserção e comportamentos dos músculos ativos na expressão facial.

O zigomático maior é um músculo originário no osso da bochecha (arco zigomático), que se insere no músculo orbicular da boca, próximo ao canto da boca. Sua ação é levantar obliquamente o canto da boca sendo um músculo característico da expressão de felicidade, pois sua contração compõe o movimento do sorriso. A combinação de seu movimento com a de outros músculos pode produzir variações de sorrisos, como por exemplo, a diferença entre um sorriso genuíno e um superficial.

No sorriso genuíno, quando uma pessoa realmente se sente feliz o zigomático maior contrai juntamente com o orbicular do olho, já no sorriso superficial isso não ocorre.

O músculo zigomático menor origina-se na parte lateral do osso da bochecha (arco zigomático) e se insere na pele do lábio superior. Sua ação faz com que a pele do lábio na região onde está inserido seja elevada lateralmente.

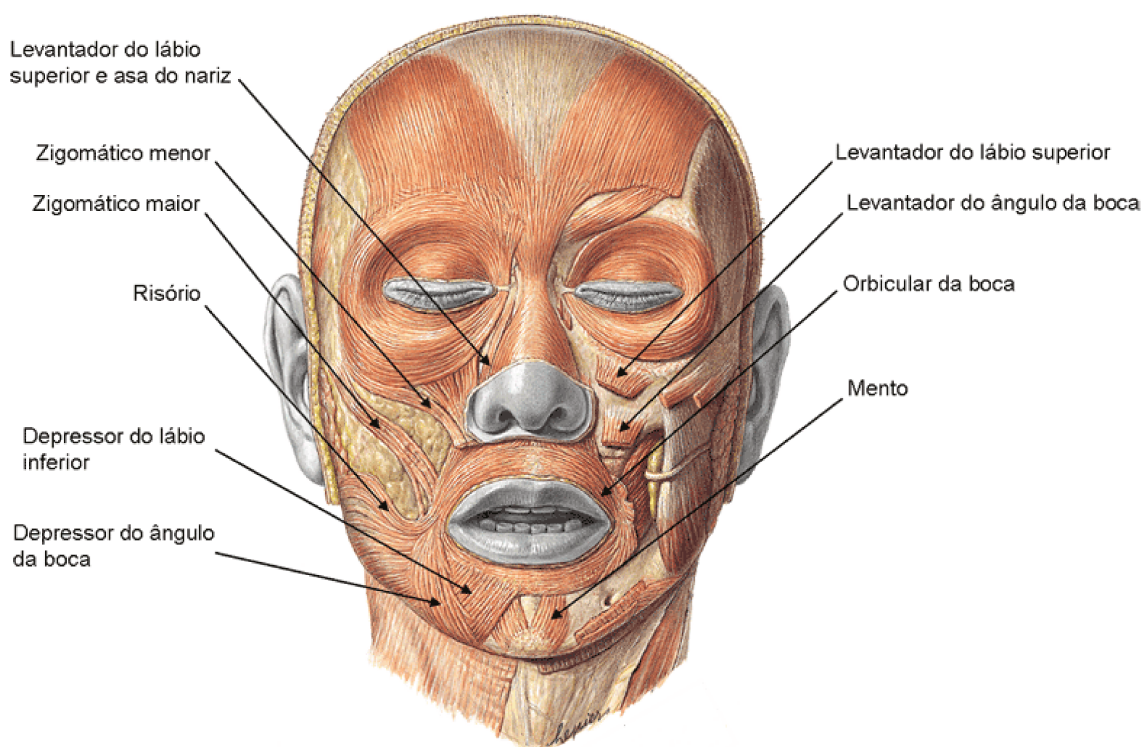


Fig. 2.4: Músculos faciais, ilustração adaptada de Sobotta (2000)

Já o levantador do ângulo da boca é um músculo que se origina na fossa canina da maxila e se insere próximo à pele da boca, sendo levemente oblíquo à direção do nariz. Ao ser contraído, puxa o lábio superior na direção vertical, produzindo um arredondamento da forma do lábio.

O levantador do lábio superior é um músculo sobre o lábio que tem duas partes relativamente independentes, a parte nasal e a parte lateral, denominadas levantador do lábio superior e levantador do lábio superior e asa do nariz. O músculo levantador do lábio superior é responsável por elevar o lábio superior de maneira levemente oblíqua na direção da bochecha. Já o músculo levantador do lábio superior e da asa do nariz quando contraído, além de elevar o lábio superior verticalmente sua função é esticar a asa nasal, enrugando o nariz.

Originário na fáscia, que é um tecido conectivo que envolve e separa toda e qualquer estrutura do nosso corpo, o músculo risório está inserido na pele próximo ao canto da boca e tem a função de puxar a boca lateralmente retraíndo seus cantos.

Os músculos depressores do ângulo da boca e lábio inferior originam-se na mandíbula e se inserem no músculo orbicular da boca e na pele do lábio inferior, respectivamente. A contração do músculo depressor do ângulo da boca curva os cantos da boca para baixo e forma nos lábios um "U" invertido, causando uma expressão freqüentemente associada à indicação da tristeza. Já o depressor do lábio inferior tem como resultado de sua ação puxar o lábio inferior perpendicularmente para baixo.

O músculo do mento origina-se na parte da mandíbula abaixo dos dentes frontais e insere-se na pele do queixo, sua ação é empurrar e inchar o queixo para cima enrugando e curvando os lábios, dando um aspecto arredondado ao lábio inferior, formando um "U".

Diferentemente dos músculos comentados, o orbicular da boca é um músculo esfíncter¹ localizado ao redor da boca. Sua extensiva conexão com os músculos que convergem para boca, faz com que sua ação forme e controle o tamanho da abertura da boca, além de movimentá-la durante a fala.

2.2.3 Ossos da face

O crânio é a parte da cabeça que abriga e protege o cérebro. Além disso, os ossos do crânio são associados com muitas outras características, como por exemplo, áreas onde os ossos seguram os músculos e ligamentos, orifícios através dos quais passam vasos sanguíneos, cavidades ósseas que são espaços vazios nos ossos e que permitem o acesso ao crânio. Algumas dessas características afetam a fisionomia da face devido à variação na espessura, tamanho, localização e forma.

A forma e as características do crânio determinam muitos dos detalhes da aparência de uma face e provêm a base para a característica da fisionomia. Patologista e biólogos podem reconstruir a aparência superficial da face à partir do crânio humano (EKMAN; FRIESEN; HAGER, 2003).

Os principais ossos da face humana podem ser visualizados na figura 2.5.

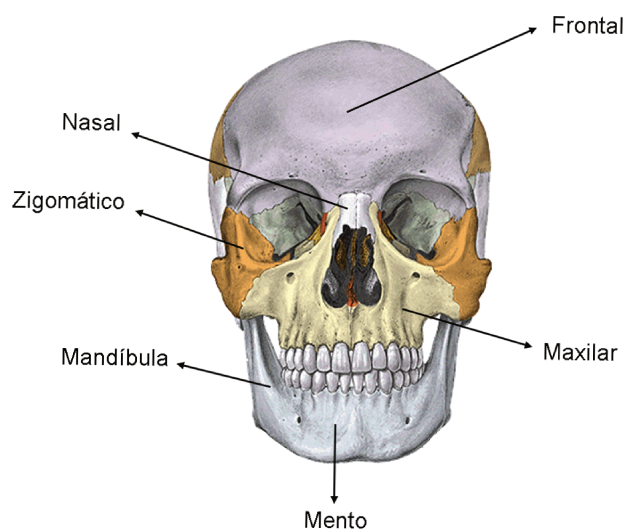


Fig. 2.5: Ossos faciais, adaptado de Sobotta (2000)

Um importante osso facial para aparência da face é o osso frontal, que suporta a parte superior da face sobre o globo ocular (SPENCE, 1991).

¹Músculo que circunda uma região e não possui extremidade fixa. A contração ocorre na direção do centro da região.

Assim como os músculos, a maioria dos ossos da face aparece aos pares, ou seja, é espelhado nos dois lados, como por exemplo, o osso do arco zigomático que é o responsável pelo formato da bochecha, ossos nasais que dão forma à parte superior do nariz, as maxilas que formam a arcada dentária superior, entre outros (KÄHLER, 2003).

A mandíbula, figura 2.6, é o maior, mais forte e o único osso móvel da face. Um de seus propósitos é servir como base aos dentes inferiores. Esse osso é composto por uma parte horizontal curvada, denominada corpo, e duas partes perpendiculares, denominadas ramos, que se unem ao corpo em um ângulo de aproximadamente 90 graus (GRAY, 2000).

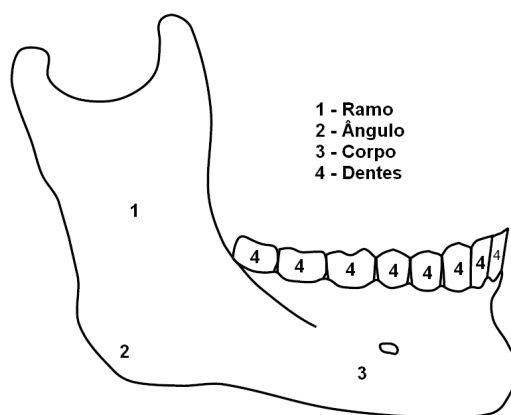


Fig. 2.6: Mandíbula - adaptada de Gray (2000)

Algumas expressões faciais necessitam em sua composição da atuação do movimento do osso da mandíbula, como por exemplo, a alegria quando produz um sorriso onde a boca entreabre-se.

2.2.4 Animação utilizando estratégia biomecânica

Utiliza-se o termo biomecânica para denominar a estratégia de modelagem que concilia aspectos anatômicos, como forma e posicionamento dos músculos, com aspectos mecânicos, como elasticidade da pele e o equilíbrio das forças que regem a dinâmica de um sistema, neste caso o modelo da face.

Encontram-se por volta dos anos 80 as primeiras iniciativas em se empregar a estratégia biomecânica para realização da animação facial. No trabalho de Platt e Badler (1981), simulam-se músculos lineares como um conjunto de fibras musculares localizadas na representação facial, onde essas fibras musculares são compostas por vértices fixos e móveis. Ao se aplicar forças aos músculos, todos os vértices móveis das fibras musculares se deslocarão devido à simulação de molas, sendo o deslocamento de acordo com a equação 2.1.

A figura 2.7 ilustra o músculo e a fibra muscular empregados em Platt e Badler (1981), observa-se em (a) que a fibra muscular é composta por três pontos que representam o vértice que está inserido

no osso (B), o vértice muscular (M) e os vértices localizados na pele (S). O conjunto destas fibras musculares forma um músculo como representado em (b).

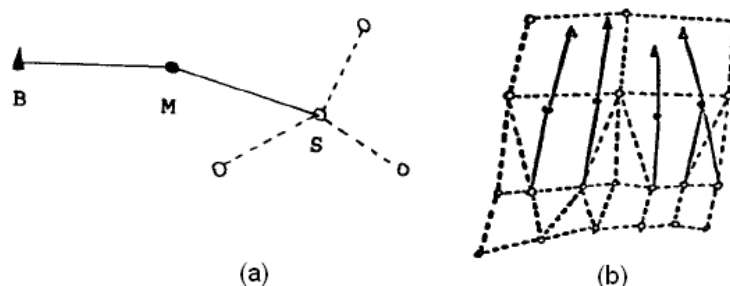


Fig. 2.7: (a)Fibra muscular e (b) Músculo (PLATT; BADLER, 1981)

$$dl = df/k \quad (2.1)$$

onde,

dl é o vetor posição do vértice deslocado;

df é a força aplicada à fibra muscular na direção do músculo;

k é a constante de mola.

O conceito de unidades de ação (AU's) também é utilizado no trabalho de Platt e Badler (1981). Uma AU armazena as informações de quais são os músculos e com qual intensidade devem contrair para alcançar movimentos previamente estabelecidos.

No trabalho de Waters (1987) define-se uma região radial de influência, pela qual a força muscular se propaga. Neste trabalho foi desenvolvido um modelo facial no qual os músculos comportam-se como operadores de deformações e são representados por vetores que possuem uma região de influência. Na contração muscular os vértices que se encontram na região de influência são atraídos em direção à origem do músculo, conforme ilustrado na figura 2.8.

Uz, Güdükbay e Özgüç (1998), basearam-se em Waters (1987), e propuseram um sistema para realização de animações da face representando a articulação da fala, no qual foram modelados trinta e quatro músculos associados a regiões de influência radial, como na figura 2.8. Neste trabalho, também é descrito um mecanismo para gerar expressões faciais no momento da fala através de *tags* que especificam a expressão facial associada a palavra a ser pronunciada e seu grau de expressão.

Empregando propriedades físicas da pele facial, Terzopoulos e Waters (1990) propuseram um modelo multi-camadas baseado na anatomia humana. O modelo é composto por três camadas providas de propriedades massa-mola, correspondentes às camadas de pele, gordura e músculos. Para

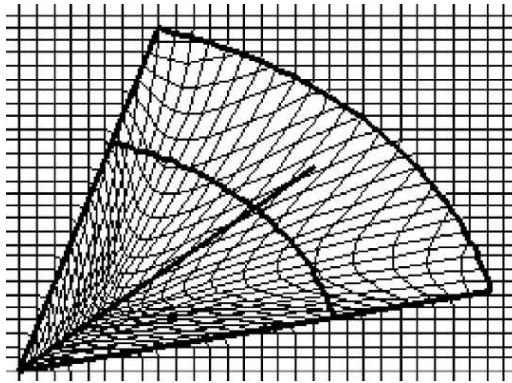


Fig. 2.8: Contração muscular (WATERS, 1987)

simular a elasticidade não linear, as molas que representam a camada de gordura são bifásicas, ou seja, seu coeficiente de mola é alterado de acordo com a deformação ocorrida. A configuração da malha na face desse modelo define aproximadamente 960 polígonos e 6500 molas.

Para simular numericamente o tecido facial foi empregado um equacionamento diferencial de segunda ordem, de acordo com a equação 2.2, (TERZOPOULOS; WATERS, 1990).

$$m_i \frac{d^2 \mathbf{p}_i}{dt^2} + \gamma_i \frac{d\mathbf{p}_i}{dt} + \mathbf{g}_i + \mathbf{q}_i = \mathbf{f}_i \quad (2.2)$$

onde para cada vértice i :

\mathbf{p}_i : posição tridimensional do vértice;

m_i : massa do vértice;

γ_i : coeficiente de amortecimento da malha;

\mathbf{g}_i : força mola resultante;

\mathbf{q}_i : força de preservação de volume resultante;

\mathbf{f}_i : força exercida pelo músculo.

As contrações sintéticas dos músculos, produzidas por forças musculares, são capazes de simular movimentos através das propriedades físicas embutidas no modelo de animação, como representado na equação 2.2, deformando a pele e produzindo expressões faciais. A força muscular responsável por iniciar o movimento facial é obtida através da análise de imagens, com marcações nas regiões de interesse. As imagens são adquiridas de gravações de vídeos com movimentos articulatorios (TERZOPOULOS; WATERS, 1990).

Posteriormente, Lee, Terzopoulos e Walters (1995), adaptaram o modelo para empregar apenas duas camadas (gordura e músculos) além de apresentar uma metodologia para obtenção da geometria

facial de forma automática, onde adapta-se uma malha genérica aos dados de uma face humana, capturados pelo uso de um *scanner*, e um algoritmo que procura por regiões salientes na face.

Os músculos são inseridos na pele e conectados por vértices que distribuem as forças aplicadas. Propriedades físicas como a elasticidade da pele são simuladas com a equação diferencial proposta por Terzopoulos e Waters (1990) e modificada por Lee, Terzopoulos e Walters (1995) (equação 2.3).

$$m_i \frac{d^2 \mathbf{p}_i}{dt^2} + \gamma_i \frac{d\mathbf{p}_i}{dt} + \mathbf{g}_i + \mathbf{q}_i + \mathbf{s}_i + \mathbf{h}_i = \mathbf{f}_i \quad (2.3)$$

onde para cada vértice i :

\mathbf{s}_i : força oposta à penetração no crânio;

\mathbf{h}_i : força de restauração.

Observa-se na equação 2.3 que, como melhoria, em relação à equação 2.2, foram acrescentadas duas forças de restrição, a força oposta à penetração do crânio (\mathbf{s}_i) e a força de restauração do vértice (\mathbf{h}_i). A força oposta à penetração do crânio busca impedir que a pele ultrapasse a camada de ossos e a força de restauração do vértice atua no sentido de manter os vértices da camada de fáscia (ver seção 3.1) em sua posição de repouso.

O presente trabalho emprega a equação 2.3 que será discutida mais detalhadamente no capítulo 3.

Embora tenham sido comentados alguns aspectos do modelo muscular e citada a força de restauração do vértice, no trabalho de Lee, Terzopoulos e Walters (1995), alguns aspectos ficaram obscuros. Para contornar tal dificuldade buscou-se na literatura outros trabalhos inspirados neste modelo de animação, e assim foi encontrado o trabalho de Lucero e Munhall (1999) que ajusta os parâmetros com dados obtidos em medidas experimentais. Para ativar e dirigir o modelo muscular este trabalho realiza gravações de Eletromiografia (EMG) que consiste em medida da atividade do músculo ao se produzir um determinado movimento facial. A força muscular aumenta gradativamente no tempo e é expressa pela equação 2.4 (LUCERO et al., 2005).

$$\tau^2 \frac{d^2 f}{dt^2} + 2\tau \frac{df}{dt} + f = \bar{f} \quad (2.4)$$

onde,

τ representa uma constante de tempo;

\bar{f} é a força final (de estado estacionário) a ser produzida sendo proporcional à integral do sinal de EMG;

f , $\frac{df}{dt}$ e $\frac{d^2 f}{dt^2}$ são a força muscular, sua derivada de primeira e segunda ordem respectivamente.

O trabalho relata testes visando comparar o movimento produzido pela face virtual com relação à face humana, obtida com o uso de um equipamento chamado OPTOTRAK que captura dados tridimensionais de posições definidas através de marcadores emissores de infravermelhos posicionados em pontos estratégicos da face. A figura 2.9 ilustra as posições onde as medidas foram realizadas, os círculos representam as marcações do OPTOTRAK e as cruces os pontos de inserção dos eletrodos para obtenção do EMG dos músculos levantador do lábio superior, levantador do ângulo da boca, zigomático maior, depressor do ângulo da boca, depressor do lábio inferior, mento e orbicular da boca (LUCERO; MUNHALL, 1999).



Fig. 2.9: Marcações faciais para obtenção dos dados (LUCERO; MUNHALL, 1999)

Outro trabalho classificado na estratégia biomecânica é o de Kähler (2003), que desenvolveu uma ferramenta que gera de maneira semi-automática, pois requer a interação do animador, a geometria facial e a disposição dos músculos. A ferramenta tem como entrada, dados de uma malha triangular representando a geometria da pele, tipicamente obtida com o uso de um *scanner*, e a partir dela pode-se ajustar estruturas fixas como a pele e móveis como a mandíbula e os músculos. Desta forma, é possível gerar animações faciais para faces virtuais com diferentes fisionomias.

Os músculos são fibras formadas por segmentos lineares, sendo que em cada um desses segmentos ajustam-se elipses (figura 2.10) com largura e altura que correspondem à extensão do músculo respectivamente na direção paralela e ortogonal à superfície da pele. A animação é alcançada através de um sistema massa-mola que conecta as camadas e dessa maneira os vértices da superfície da face sofrem influência da contração muscular (KÄHLER, 2003) e (KÄHLER; HABER; SEIDEL, 2001).

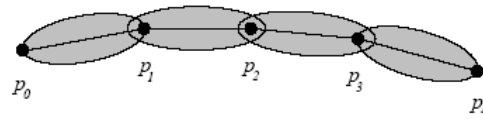


Fig. 2.10: Fibra muscular (KÄHLER; HABER; SEIDEL, 2001)

2.3 Considerações finais

As estratégias de animação empregadas em modelos tridimensionais e, em particular, a estratégia de modelagem biomecânica permitem a simulação de movimentos faciais de maneira realista.

Dentre os trabalhos apresentados nesse capítulo que empregam a estratégia biomecânica, existem duas referências principais: Lee, Terzopoulos e Walters (1995) e Lucero e Munhall (1999). O modelo de animação empregado no presente trabalho baseia-se em Lee, Terzopoulos e Walters (1995). Já o modelo muscular baseia-se em Lucero e Munhall (1999), frisando-se que o presente trabalho tem como foco a produção de animações de expressões faciais e o de Lucero e Munhall (1999) a percepção da fala virtual. Deve-se acrescentar que no presente trabalho, o modelo muscular não é orientado por medidas reais e sim por um animador que pode utilizar o sistema desenvolvido para ajustar o valor das forças musculares.

O modelo biomecânico empregado será abordado em detalhe no próximo capítulo, bem como o modelo muscular.

Capítulo 3

Sistema de animação baseado em biomecânica

A animação de uma face virtual pode ser classificada em duas correntes, uma baseada em modelo e outra baseada em imagem. A animação baseada em imagem utiliza transições de imagens fotográficas em diferentes posições para a realização da animação. Já a animação baseada em modelo utiliza um modelo geométrico para a representação da face virtual e a animação ocorre através da deformação da geometria. O presente trabalho situa-se na vertente baseada em modelo e descreve a superfície que representa a face como uma malha poligonal tridimensional de triângulos.

As expressões faciais são geradas utilizando um modelo de animação baseado em biomecânica. Essa estratégia de animação é inspirada em características da face humana e procura simular a dinâmica facial da pele e dos músculos.

Este capítulo apresenta o modelo geométrico adotado e descreve em detalhe a dinâmica da pele, o modelo muscular e o movimento do osso da mandíbula do modelo de animação utilizado.

3.1 Modelagem da geometria da face virtual

A representação da face virtual, no presente trabalho, é uma versão modificada do modelo poligonal Miraface desenvolvido no laboratório MiraLab da Universidade de Genebra e publicado pela ISO¹ como parte do software de referência do padrão MPEG-4 (DE MARTINO, 2005).

O modelo geométrico original é composto pela junção de formas geométricas triangulares resultando em uma malha de polígonos que representa a superfície da face, como ilustrado na figura 3.1.

Com o intuito de simular características adicionais da anatomia da face, o modelo geométrico foi adaptado refinando-se a malha poligonal que representa a face e adicionando-se mais malhas

¹Órgão de padronização internacional (ISO, 2006)

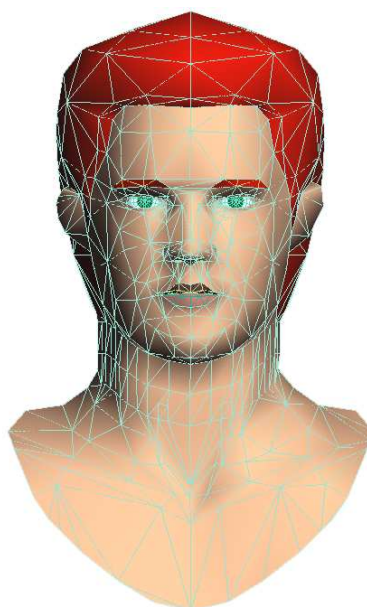


Fig. 3.1: Modelo geométrico Miraface

poligonais triangulares para simular as camadas da face, figura 3.2.

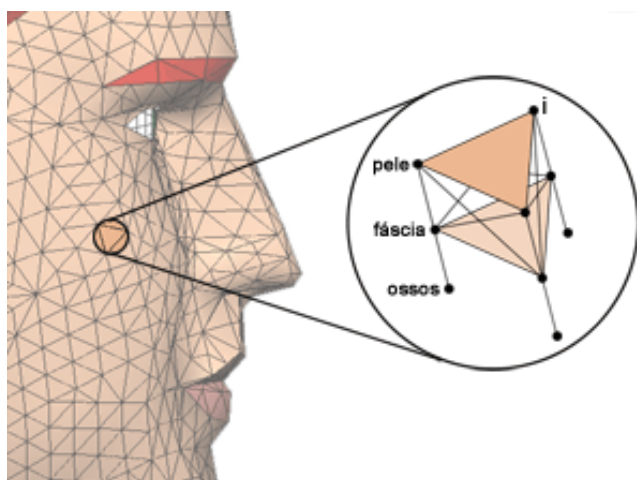


Fig. 3.2: Modelo geométrico da face adaptado

O refinamento, que é o aumento do número de vértices que compõem a malha e conseqüentemente o aumento no número de triângulos, tem como propósito deixar a região refinada mais sensível à movimentação de um vértice. Devido ao fato de possuir mais vértices vizinhos, ao ser deslocado um dado vértice influenciará mais vértices do que na malha original.

Vale ressaltar que do aumento no número de vértices influencia diretamente na quantidade de cálculo a ser realizado no modelo de animação, sendo assim, essa adaptação foi realizada com cautela

e apenas na região de interesse para animação, desta forma, manteve-se a estrutura original em regiões como cabelo, olhos, entre outros.

Outra adaptação foi a adoção de um modelo geométrico composto por três superfícies de malhas tridimensionais e duas camadas geradas pela conexão entre as superfícies, onde cada superfície representa um componente da anatomia humana, conforme a figura 3.3. A superfície externa representa a pele, a interna os ossos e a intermediária representa a fásia, que é o tecido conectivo que envolve e separa todas as estruturas do corpo humano (SPENCE, 1991).

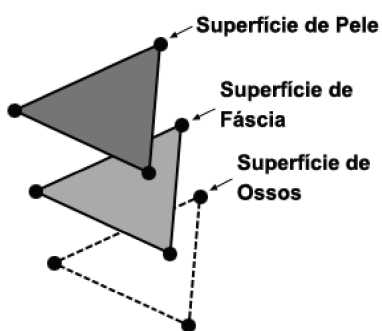


Fig. 3.3: Superfícies: pele, fásia e ossos

As superfícies de fásia e ossos foram geradas aplicando-se uma redução de escala na malha que representa a superfície de pele. Para que pudessem exercer um efeito conjunto criaram-se ligações entre as três superfícies simulando as camadas, muscular e de gordura.

Cada vértice da superfície de pele liga-se com todos os outros vértices vizinhos na mesma superfície e com os correspondentes na superfície de fásia, criando-se assim a camada de gordura.

Os vértices da superfície de fásia ligam-se com todos os outros vizinhos na mesma superfície e com os da superfície de pele, além de ligarem-se com os vértices correspondentes da superfície de ossos. Da junção da superfície de fásia e ossos obtém-se a camada de músculos.

Os vértices da superfície de ossos ligam-se apenas aos vértices correspondentes na superfície de fásia.

As camadas de gordura e músculo, além das superfícies pele, fásia e ossos podem ser visualizadas na figura 3.4.

Cada ligação entre vértices, comporta-se como uma mola, assim, se um vértice tem sua posição alterada as molas ligadas a ele sofrem a ação de uma força mola de compressão ou distensão podendo ocasionar um deslocamento dos vértices vizinhos. Desta maneira, há uma propagação de movimento na região afetada.

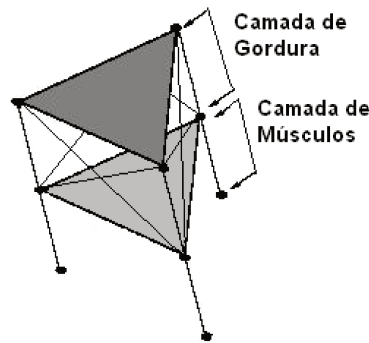


Fig. 3.4: Camadas: muscular e de gordura (LEE; TERZOPOULOS; WALTERS, 1995).

3.2 Modelagem da movimentação facial

Com o modelo geométrico adaptado a etapa seguinte iniciou-se com a construção do algoritmo responsável por realizar a movimentação da malha que representa a face. Este algoritmo é baseado na estratégia de animação biomecânica.

O modelo de animação utilizado também é conhecido como modelo massa-mola, pois a representação facial é composta por superfícies com vértices, aos quais são associados valores de massa e às suas ligações são associadas molas elásticas.

O comportamento dinâmico desse sistema massa-mola é modelado por um conjunto de forças que descrevem a movimentação da superfície em função da ação muscular.

O equacionamento da dinâmica de cada vértice i , realiza-se de acordo com a equação 3.1 baseada em Lee, Terzopoulos e Walters (1995), anteriormente citada no capítulo 2 e que será novamente comentada por ser o modelo dinâmico do movimento da pele empregado no presente trabalho.

$$m_i \frac{d^2 \mathbf{p}_i}{dt^2} + \gamma_i \frac{d\mathbf{p}_i}{dt} + \mathbf{g}_i + \mathbf{q}_i + \mathbf{s}_i + \mathbf{h}_i = \mathbf{f}_i \quad (3.1)$$

onde para cada vértice i ,

\mathbf{p}_i é a posição tridimensional do vértice;

m_i é a massa do vértice;

γ_i é o coeficiente de amortecimento da malha;

\mathbf{g}_i é o somatório das forças mola do vértice;

\mathbf{q}_i é a força de preservação de volume;

\mathbf{s}_i é a força oposta a penetração no crânio;

\mathbf{h}_i é a força de restauração;

\mathbf{f}_i é a força exercida pelo músculo.

O acionamento do modelo ocorre quando ativada uma contração muscular (\mathbf{f}_i), esta força provoca

um deslocamento dos vértices que circundam a região do músculo em questão e conseqüentemente forças-mola (\mathbf{g}_i) de compressão e relaxamento são geradas propagando-se pela malha, juntamente com as forças de restrição ($\mathbf{q}_i, \mathbf{s}_i, \mathbf{h}_i$) impostas a fim de manter a coerência com a anatomia humana.

A massa (m_i) e o coeficiente de amortecimento (γ_i) do vértice são fatores que estão diretamente relacionados à aceleração e velocidade, respectivamente. A malha de polígonos foi considerada uma superfície homogênea, desta forma, os fatores em todos os vértices são iguais, não existindo assim uma região mais sensível ao deslocamento do vértice.

A atribuição de valores referentes à massa e ao coeficiente de amortecimento basearam-se nas referências de Lee, Terzopoulos e Walters (1995) e Lucero e Munhall (1999) e desta forma foram adotados os seguintes valores:

- massa dos vértices: $m_i = 0,5$ gramas;
- coeficiente de amortecimento: $\gamma_i = 30$ dina \cdot s/cm.

Após a aplicação de uma força muscular, utilizando-se o método de Euler na equação 3.1 obtém-se uma nova configuração das malhas de polígonos após a movimentação dos vértices. O método de Euler permite que a cada iteração, em um intervalo de tempo Δt , sejam calculadas a aceleração do ponto em função da rede de forças, a velocidade em função da aceleração e a nova posição do vértice em função da velocidade, conforme a equação 3.2.

$$\mathbf{a}_i^{t+\Delta t} = \frac{1}{m_i} (\mathbf{f}_i^t - \gamma_i \mathbf{v}_i^t - \mathbf{g}_i^t - \mathbf{q}_i^t - \mathbf{s}_i^t - \mathbf{h}_i^t)$$

$$\mathbf{v}_i^{t+\Delta t} = \mathbf{v}_i^t + \Delta t \mathbf{a}_i^{t+\Delta t} \quad (3.2)$$

$$\mathbf{p}_i^{t+\Delta t} = \mathbf{p}_i^t + \Delta t \mathbf{v}_i^{t+\Delta t}$$

onde,

$\mathbf{a}_i^{t+\Delta t}$ é a aceleração;

$\mathbf{v}_i^{t+\Delta t}$ é a velocidade;

$\mathbf{p}_i^{t+\Delta t}$ a nova posição do vértice i , no dado intervalo.

Todos os valores são obtidos após um intervalo de tempo Δt . As condições iniciais são as posições dos vértices da malha em repouso, onde não há aceleração nem velocidade, ou seja, inicialmente são iguais a zero.

Dessa forma, a cada intervalo de tempo Δt , calcula-se para cada um dos vértices das malhas, que compõe as superfícies de pele e fáscia, sua nova posição. A camada que representa os ossos faciais é fixa, não sofrendo movimentação.

Cada ligação entre vértices, como já mencionado, comporta-se como uma mola, assim um vértice possui várias molas ligadas a ele. A componente g_i , na equação 3.1, é o somatório da atuação das forças mola ligadas ao vértice i simulando a elasticidade da pele humana. As características de uma mola dependem basicamente de seu coeficiente de elasticidade que indica o quanto a mola será sensível a um deslocamento aplicado e de seu comprimento, que é a distância de um vértice à outro (figura 3.5).

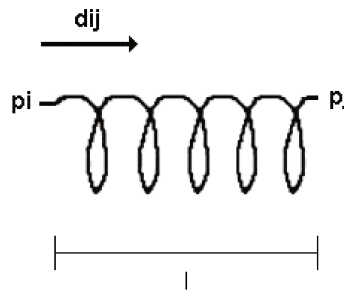


Fig. 3.5: Ligação entre vértices (mola)

A força mola do vértice i ocasionada pelo seu deslocamento, com relação aos vértices vizinhos j , com os quais i estabelece uma ligação é obtida de acordo com a equação 3.3.

$$\mathbf{g}_{ij} = c_{ij} (l - l_0) \mathbf{d}_{ij} \quad (3.3)$$

onde,

\mathbf{g}_{ij} é a força mola no vértice(i) em relação ao vértice(j);

c_{ij} é o coeficiente de flexibilidade da mola;

l_0 é o comprimento da mola em repouso;

l é o comprimento da mola após o deslocamento do vértice;

\mathbf{d}_{ij} é o vetor direção, calculado de acordo com a equação 3.4.

$$\mathbf{d}_{ij} = \frac{(\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j)}{l} \quad (3.4)$$

Sendo o cálculo do comprimento (l):

$$l = \|\mathbf{p}_j - \mathbf{p}_i\| = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2 + (z_j - z_i)^2} \quad (3.5)$$

Com o propósito de agregar realismo à simulação, considerou-se diferentes tipos de molas para as diferentes superfícies que compõem o tecido facial. Os coeficientes de mola (c_{ij}) atribuídos foram (LEE; TERZOPOULOS; WALTERS, 1995):

- pele: 60 *dina/cm*;
- camada de gordura: 30 *dina/cm*;
- fásia: 80 *dina/cm*;
- ossos: 10 *dina/cm*.

Como expresso anteriormente, a resultante da força mola que atua em um vértice i é o somatório das forças mola geradas a cada ligação com vértices vizinhos j , conforme a equação 3.6.

$$\mathbf{g}_i = \sum_{j=1}^n \mathbf{g}_{ij} \quad (3.6)$$

onde,

\mathbf{g}_i é a força mola resultante do vértice i ;

n é o número máximo de vértices ligados ao vértice i ;

\mathbf{g}_{ij} é a força mola do vértice i em relação ao vértice j .

Observa-se também da equação 3.1 as forças de restrição envolvidas no cálculo da movimentação dos vértices. Essas forças são de preservação de volume, de restrição à penetração ao crânio e de restauração da fásia.

A força de preservação de volume (\mathbf{q}_i), relacionada ao vértice i , é o somatório das forças exercidas na tentativa de manter o volume original dos prismas triangulares da camada de gordura (junção da superfície da pele com a fásia), figura 3.6.

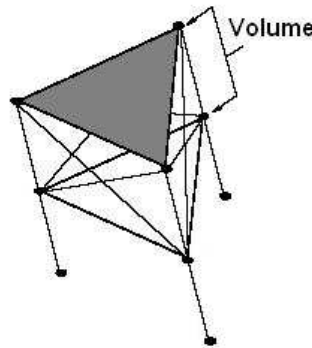


Fig. 3.6: Prisma triangular que compõe as superfícies pele, fásia e ossos

Para cada prisma j associado a um vértice i a força de preservação de volume é calculada de acordo com a equação 3.7.

$$\mathbf{q}_{ij} = k_1 (V_j - V_{j0}) \mathbf{n}_i + k_2 (\mathbf{r}_{ij} - \mathbf{r}_{ij0}) \quad (3.7)$$

onde,

k_1 e k_2 são constantes de força;

\mathbf{n}_i é a normal do vértice;

V_j e V_{j0} são respectivamente os volumes do prisma j após o deslocamento do vértice e em repouso (instante inicial).

\mathbf{r}_{ij} e \mathbf{r}_{ij0} são os vetores da posição do vértice i ao centróide do prisma j após o movimento e em repouso, respectivamente. Para obter esses vetores, calculou-se o centróide de acordo com a equação 3.8 e em seguida utilizou-se a equação 3.9.

$$\mathbf{t}_j = \frac{\sum_{k=1}^n \mathbf{P}_k}{n} \quad (3.8)$$

onde,

\mathbf{t}_j é o centróide do prisma j ;

n é o número de vértices que compõem o prisma; para o presente trabalho, como os polígonos são triangulares, esse valor é 6;

\mathbf{p}_k são os vértices da camada de fásia e pele que compõem o prisma.

$$\mathbf{r}_{ij} = \mathbf{p}_i - \mathbf{t}_j \quad (3.9)$$

onde,

\mathbf{r}_{ij} é o vetor da posição do vértice i ao centróide do prisma j ;

\mathbf{p}_i é a posição do vértice i ;

\mathbf{t}_j é o centróide do prisma.

Como um vértice i pertence à vários prismas, a força de preservação de volume (\mathbf{q}_i) da equação 3.1 é obtida de acordo com a equação 3.10.

$$\mathbf{q}_i = \sum_{j=1}^n \mathbf{q}_{ij} \quad (3.10)$$

onde,

\mathbf{q}_i é a força de preservação de volume resultante do vértice i ;

n é o número máximo de prismas compostos pelo vértice i ;

\mathbf{q}_{ij} é a força de preservação de volume do vértice i em relação ao prisma j .

A força oposta à penetração do crânio (\mathbf{s}_i) é uma força de restrição que se opõe à força aplicada ao vértice na direção dos ossos. Essa restrição busca impedir que ocorram deformações que não correspondem à realidade, por exemplo, um determinado vértice ser deslocado ultrapassando a camada que representa os ossos.

Desta forma, essa força de restrição só existirá se houver uma força na direção perpendicular a superfície de ossos, ou seja, se o produto escalar da força com relação a normal do vértice for menor do que zero ($\mathbf{f} \cdot \mathbf{n}_i < 0$), nessas condições a força de restrição é obtida conforme a equação 3.11.

$$\mathbf{s}_i = (\mathbf{f} \cdot \mathbf{n}_i) \cdot \mathbf{n}_i \quad (3.11)$$

onde,

\mathbf{f} é a força aplicada ao vértice i ;

\mathbf{n}_i é a normal do vértice i .

Diferentemente do trabalho de Lee, Terzopoulos e Walters (1995), após analisar o sentido dessa força de restrição de penetração do crânio, constatou-se que seu sentido deveria ser invertido para que essa força representasse uma reação à força aplicada na direção dos ossos.

Baseada no trabalho de Lucero e Munhall (1999), a última restrição é a força de restauração dos vértices (\mathbf{h}_i), essa componente tenta restaurar o vértice à sua posição inicial de repouso de acordo com a equação 3.12.

$$\mathbf{h}_i = k(\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_{i0}) \quad (3.12)$$

onde,

k é um coeficiente de escalonamento de restauração à posição do repouso;

\mathbf{p}_i e \mathbf{p}_{i0} são respectivamente as coordenadas tridimensionais do vértice após o deslocamento e em repouso.

Segundo Lucero e Munhall (1999), essa força de restrição liga os ossos à pele, e compensa parcialmente o cancelamento da componente de força entre o vértice da fáscia e os ossos do crânio. Ela é necessária para auxiliar o vértice a retornar à posição inicial, quando cessa a força muscular.

Por fim a componente f_i da equação 3.1 é a força muscular aplicada ao vértice que desencadeia o movimento e que sofre um aumento gradativo. Essa força será discutida em detalhe na seção 3.3.

3.3 Modelo muscular

Nesta seção serão apresentados aspectos anatômicos considerados relevantes para o presente trabalho e a respectiva acomodação destes aspectos ao modelo biomecânico utilizado. Os músculos abordados são subcutâneos, ou seja, aqueles inseridos na pele sendo que suas ações podem ser observadas através das expressões da face.

Os músculos faciais classificam-se de acordo com a ação das fibras musculares que os compõem, como segue (WATERS, 1990):

- Lineares: são compostos de duas extremidades sendo uma fixa e outra móvel, sua contração ocorre na direção do próprio músculo;
- Planares: comportam-se como um conjunto de músculos lineares que formam um plano;
- Esfíncter: não possuem extremidades e sua contração ocorre em direção a um ponto central.

Na região da boca, a qual o presente trabalho interessa-se em animar, encontram-se músculos do tipo linear e esfíncter. Os músculos planares encontrados, por exemplo, na região da testa (músculo frontal), não estão presentes na região da boca e por esse motivo não serão explorados.

3.3.1 Músculos lineares

Inspirando-se na anatomia da face humana e levando-se em consideração a relevância para o contexto do presente trabalho, foram modelados nove pares de músculos lineares, simétricos nos lados direito e esquerdo da face, e um músculo do tipo esfíncter, ilustrado na figura 3.7. Justificando a escolha dos músculos modelados, pode-se observar que são os músculos que estão mais próximos à pele e, por esse motivo, sua ação é visualizada com maior facilidade. Adicionalmente convergem para a região da boca, interesse central do presente trabalho.

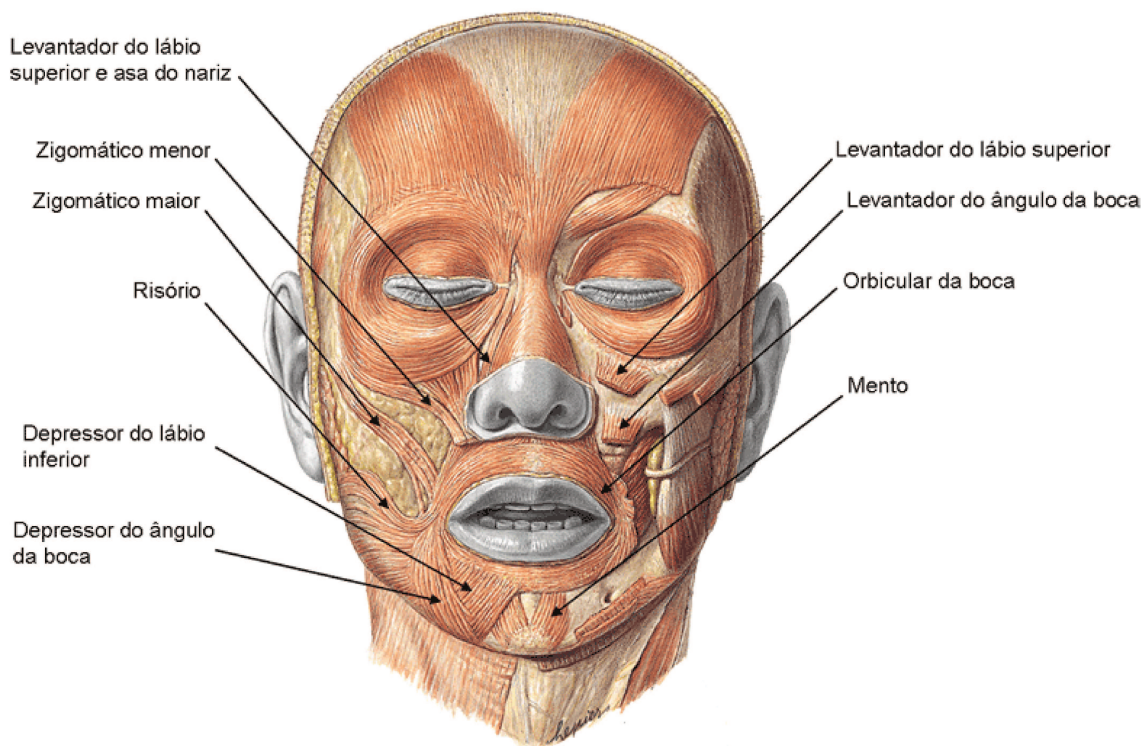


Fig. 3.7: Músculos faciais, ilustração adaptada de Sobotta (2000)

Modelou-se os músculos lineares através de volumes cilíndricos de influência conforme ilustrado na figura 3.8, onde d representa o raio do cilindro, orientados pelos valores das áreas citado em Lucero e Munhall (1999). O eixo destes cilindros é definido por uma reta determinada pelos vértices P e R , representando respectivamente a extremidade móvel e a extremidade fixa do músculo.

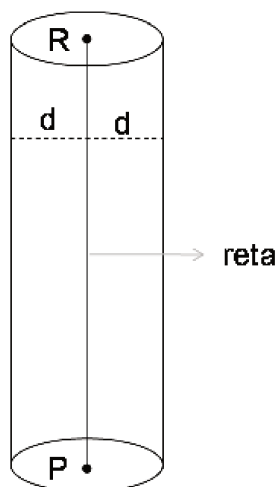


Fig. 3.8: Representação do músculo virtual

Para que a figura 3.9 não se tornasse demasiadamente poluída apenas os eixos dos cilindros de cada músculo virtual modelado no presente trabalho foram representados. Observa-se que a extremidade móvel dos músculos lineares localizam-se entre os limites dos lábios com a face e as extremidades fixas localizam-se ao longo da face. Os pontos ilustrados na face e observados na figura 3.9 representam os vértices que compõem a malha facial de pele.

A tabela 3.1 lista os músculos modelados.

<i>Músculos</i>	<i>Tipo</i>	<i>Ação</i>
Zigomático maior	Linear	Puxa o ângulo da boca para cima
Zigomático menor	Linear	Eleva o lábio superior
Levantador do ângulo da boca	Linear	Eleva o ângulo da boca
Levantador do lábio superior	Linear	Eleva o lábio superior
Levantador do lábio superior e asa do nariz	Linear	Eleva o lábio superior e enrugua o nariz
Risório	Linear	Puxa lateralmente o ângulo da boca
Depressor do ângulo da boca	Linear	Puxa o ângulo da boca para baixo
Depressor do lábio inferior	Linear	Deprime o lábio inferior
Mento	Linear	Contraí o lábio inferior
Orbicular da Boca	Esfíncter	Fecha e contraí o lábio

Tab. 3.1: Músculos da face (SPENCE, 1991) e (DIO; AMATUZZI; CRICENTI, 2002).

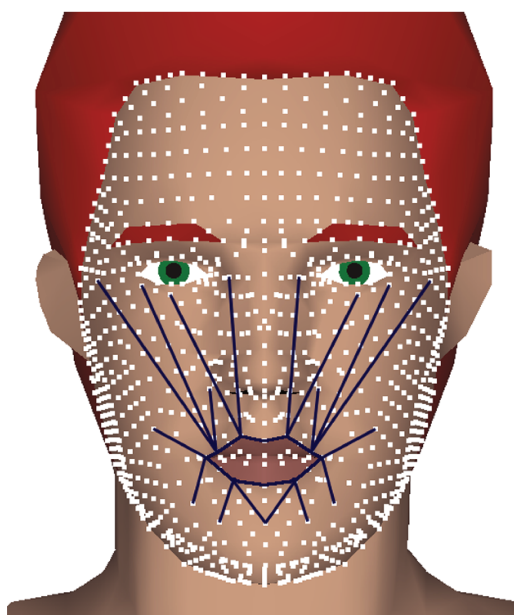


Fig. 3.9: Modelo geométrico com os músculos modelados

No modelo de animação implementado, a força muscular (f_i) é a responsável por desencadear a movimentação facial, impulsionando o deslocamento dos vértices da malha de polígonos, conforme a equação 3.1.

A ação das forças nos músculos lineares pode ser observada na figura 3.10, onde o vértice móvel P recebe a força f_p e no vértice fixo R tem-se uma força igual a zero com o intuito de mantê-lo imóvel.

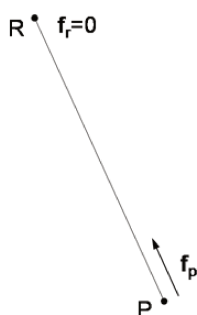


Fig. 3.10: Atuação da força no músculo linear

Os demais vértices contidos no volume de influência do músculo sofrem ação de forças derivadas de f_p conforme descrito a seguir. A figura 3.11 ilustra um plano de corte do cilindro associado ao músculo, contendo o vértice móvel P , o vértice fixo R e o ponto Q influenciado por este músculo.

O presente trabalho propõe que a força muscular seja distribuída ao longo do segmento de reta $\|\vec{PR}\|$ de acordo com a equação 3.13.

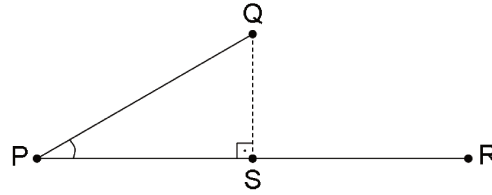


Fig. 3.11: Distribuição de força muscular nos vértices do músculo virtual

$$\mathbf{f}_s = \frac{\cos\left(\frac{\|\vec{PS}\| \cdot \pi}{\|\vec{PR}\|}\right) + 1}{2} \cdot \mathbf{f}_p \quad (3.13)$$

onde,

\mathbf{f}_s é a força muscular no ponto S ;

$\|\vec{PS}\|$ é a distância do vértice móvel ao ponto S ;

$\|\vec{PR}\|$ é o comprimento do músculo modelado;

\mathbf{f}_p é a força muscular no vértice P .

Como procedimento análogo calcula-se a força muscular no ponto Q de acordo com a equação 3.14.

$$\mathbf{f}_q = \frac{\cos\left(\frac{\|\vec{QS}\| \cdot \pi}{d}\right) + 1}{2} \cdot \mathbf{f}_s \quad (3.14)$$

onde,

\mathbf{f}_q é a força muscular no vértice Q ;

$\|\vec{QS}\|$ é a distância entre os pontos Q e S ;

d é o raio de influência do músculo;

\mathbf{f}_s é a força muscular no ponto S .

Assim a força \mathbf{f} (equação 3.1) aplicada em cada um dos vértices i influenciado pelo músculo é dada pela equação 3.15.

$$\mathbf{f} = \frac{\cos\left(\frac{\|\vec{QS}\| \cdot \pi}{d}\right) + 1}{2} \cdot \frac{\cos\left(\frac{\|\vec{PS}\| \cdot \pi}{\|\vec{PR}\|}\right) + 1}{2} \cdot \mathbf{f}_p \quad (3.15)$$

Para que a distribuição seja suavizada utilizou-se na interpolação a função cosseno, desta maneira, a força aplicada ao longo do músculo é distribuída como representado no gráfico da figura 3.12.

Observa-se que quanto menor a distância ao vértice P maior a influência e quanto mais distante menor é a influência da força muscular.

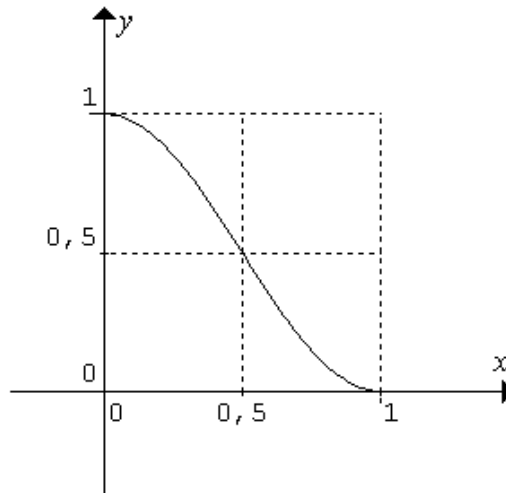


Fig. 3.12: Distribuição em função de cosseno

Baseado na formulação de Lucero e Munhall (1999), a equação 3.16 é utilizada para calcular o valor do módulo de f de um determinado músculo a partir do valor f_i definido pelo usuário.

$$\tau^2 \frac{d^2 f_i}{dt^2} + 2\tau \frac{df_i}{dt} + f_i = f \quad (3.16)$$

onde,

τ é um coeficiente de variação da força;

f_i é o módulo da força muscular no vértice;

f é o módulo da força muscular de entrada configurada pelo usuário do sistema.

3.3.2 Músculos esfínter

Um músculo do tipo esfínter não possui extremidades fixas e seu movimento ocorre em direção a seu centro imaginário. Na região dos lábios encontra-se o músculo orbicular da boca que é classificado como esfínter (figura 3.7).

Modelou-se o músculo orbicular da boca como uma seqüência de regiões cilíndricas análogas aos músculos lineares, com segmentos de retas centrais definidos pelos vértices dispostos na fronteira entre os lábios e a face como mostrado na figura 3.9, a diferença nesse músculo é que todos os vértices são móveis. No modelo geométrico empregado no presente trabalho encontra-se em sua composição catorze vértices móveis localizados entre o limite do lábio com a face.

Sendo um músculo esfínter, o deslocamento do orbicular da boca ocorre em direção a um centro imaginário que é obtido de acordo com a equação 3.17.

$$c = \frac{p_1 + p_2}{2} \quad (3.17)$$

onde,

c é o centro imaginário do orbicular da boca;

p_1 e p_2 são vértices do canto da boca, ilustrados na figura 3.13.

Ao ser contraído em direção ao seu centro, o músculo orbicular protrai. Para representar essa característica anatômica deslocou-se o centro imaginário na direção y (figura 3.15) de k unidades.

A ação das forças do músculo orbicular da boca pode ser observada na figura 3.13, onde o ponto central representa o centro imaginário do músculo e as setas a direção de contração dos vértices.

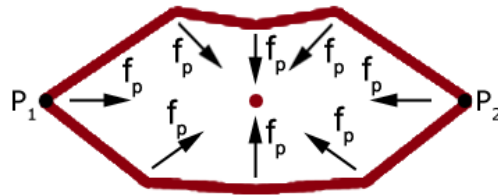


Fig. 3.13: Atuação da força no músculo esfínter

Devido às características do modelo geométrico que possui uma densidade de ligações não homogênea entres os vértices, configurou-se a força f_p utilizando a equação 3.18, proposta no presente trabalho. Para obter os coeficientes de escalonamento da força, adotou-se o vértice localizado no centro da boca como referência. O vértice de referência é ilustrado como P_m na figura 3.14.

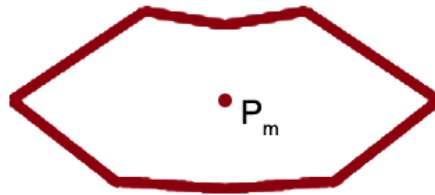


Fig. 3.14: Vértice central do orbicular da boca

$$f_p = \frac{d_c}{d_m} \cdot \frac{v}{v_m} \cdot f \quad (3.18)$$

onde,

d_m é a distância do vértice de referência ao centro imaginário;

d_c é a distância do vértice i ao centro imaginário;

v_m é a quantidade de ligações que o vértice de referência possui;

v é a quantidade de ligações que o vértice i possui;

f é a força configurada pelo usuário para o músculo orbicular da boca.

De maneira análoga aos músculos lineares, a força muscular f é aumentada gradativamente utilizando a equação 3.16.

3.4 Mandíbula

A rotação da mandíbula é um deslocamento importante para algumas expressões faciais, pois permite que a boca seja aberta. A simulação da atuação dos músculos não é capaz de representar esse movimento, pois ele requer que vértices que representem ossos sejam deslocados, o que não é realizado quando se movimentam músculos. Para simular este movimento, realizou-se a rotação dos vértices representados na figura 3.15 em torno do eixo de rotação.

Vale ressaltar que na figura 3.15 estão representados apenas os vértices da camada de pele, porém a rotação é aplicada também aos vértices que estão localizados na camada de fáscia e ossos.

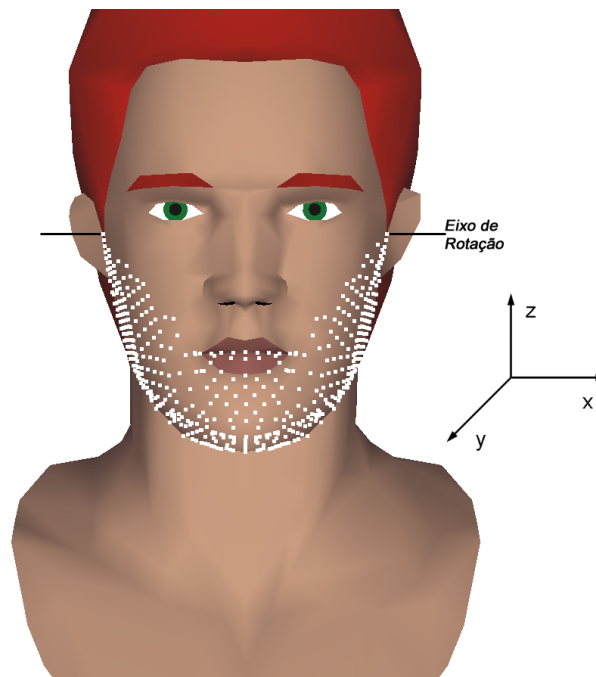


Fig. 3.15: Representação dos vértices afetados na rotação

Os pontos apresentados na figura 3.15 representam os vértices da região da mandíbula e foram obtidos manualmente.

3.5 Considerações finais

Neste capítulo foram descritos os conceitos que embasam o modelo de animação adotado.

Discutiu-se detalhes do modelo biomecânico baseado em Lee, Terzopoulos e Walters (1995), assim como as dificuldades encontradas nessa referência elucidadas em Lucero e Munhall (1999).

Também foram mostradas as alterações realizadas no modelo geométrico *Miraface* para adequá-lo ao modelo de animação adotado, além da modelagem do movimento do osso da mandíbula inspirado em De Martino (2003) e dos músculos faciais baseado em Lucero e Munhall (1999).

No próximo capítulo será apresentado o protótipo implementado que emprega os conceitos abordados.

Capítulo 4

Protótipo desenvolvido

Com o intuito de aplicar os conceitos apresentados nos capítulos anteriores, desenvolveu-se um protótipo computacional, baseado em simulação biomecânica, capaz de gerar, em uma cabeça virtual, expressões faciais semelhantes às humanas. Ao protótipo desenvolvido deu-se o nome de SABiom (Sistema de Animação Biomecânica).

Este capítulo descreve o SABiom de acordo com suas funcionalidades.

4.1 SABiom

Para explorar o SABiom foram realizadas macro divisões da implementação como citado a seguir:

- **Estruturas de Dados Base:** matrizes com dados que representam os músculos e a camada virtual da pele na face;
- **Pré-processamento:** procedimentos para obtenção de dados necessários ao sistema à partir da Estrutura de Dados Base;
- **Entrada:** interface com o usuário, responsável pela interação com o SABiom;
- **Cálculos:** responsável pelo cálculo das forças aplicadas a cada vértice;
- **Exibição:** responsável pela exibição das imagens obtidas como resultado das etapas anteriores.

A figura 4.1 ilustra uma representação de pacotes das macro divisões do protótipo desenvolvido. A Estrutura de Dados Base é composta por informações utilizadas pelos pacotes de Pré-processamento e Cálculos. O pacote de Pré-processamento utiliza informações da Estrutura de Dados Base e gera informações para o pacote de Cálculos. Já o pacote de Entrada necessita de uma interação com o usuário para produzir informações que serão empregadas em Cálculos. Finalmente o pacote de Cálculos processa os dados para produzir as

informações das novas posições dos vértices da cabeça virtual. Então o pacote de Exibição apresenta as imagens modificadas de forma à simular movimento.

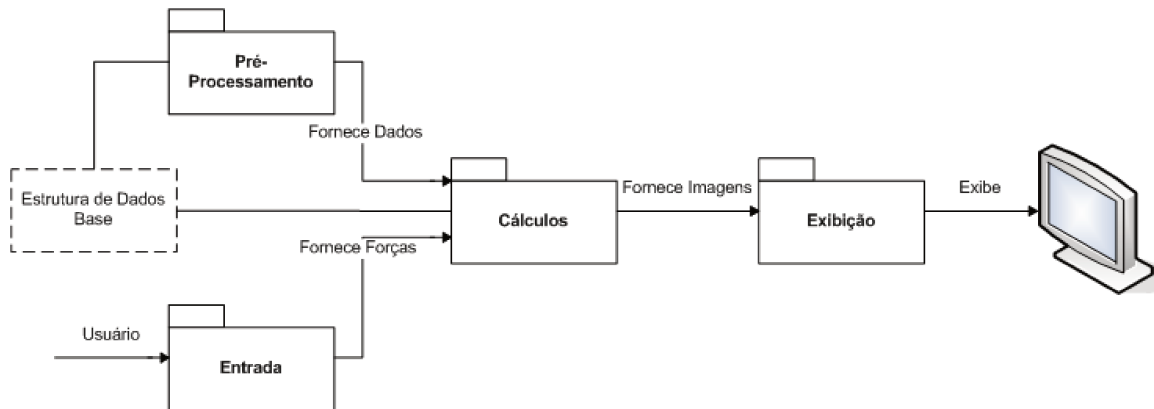


Fig. 4.1: Divisões do SABiom

Visando explorar o sistema desenvolvido, serão abordadas às divisões com detalhes estruturais e funcionais.

4.1.1 Estrutura de Dados Base

A Estruturas de Dados Base são matrizes em linguagem C que foram geradas à partir da importação do modelo geométrico especificado em VRML¹. Este modelo é derivado do modelo Miraface tendo sido refinado, como mostra a figura 4.2, com o software comercial 3DStudioMax.

Como resultado da conversão do modelo geométrico para a linguagem C, obteve-se um conjunto de matrizes, ilustradas na figura 4.3, que descrevem a representação da face da seguinte forma:

- (1) Estrutura que contém as coordenadas 3D de cada um dos vértices da face virtual. Essa matriz, armazena em cada linha as posições de um único vértice, sendo as colunas referentes às coordenadas x, y e z deste vértice;
- (2) Estrutura composta pelas coordenadas do vetor normal nos vértices. Nessa matriz cada linha armazena informações de um único vértice e cada coluna a coordenada do vetor normal nos eixos x, y e z;
- (3) Estrutura principal, organizada como uma matriz que armazena os triângulos formadores da face virtual. Cada linha da matriz armazena a informação de um único triângulo sendo que nas três primeiras colunas têm-se índices para a estrutura (1), ou seja dados que descrevem os vértices que compõem o triângulo, e nas três colunas seguintes, índices para as normais dos vértices que compõem o triângulo definido na estrutura (2).

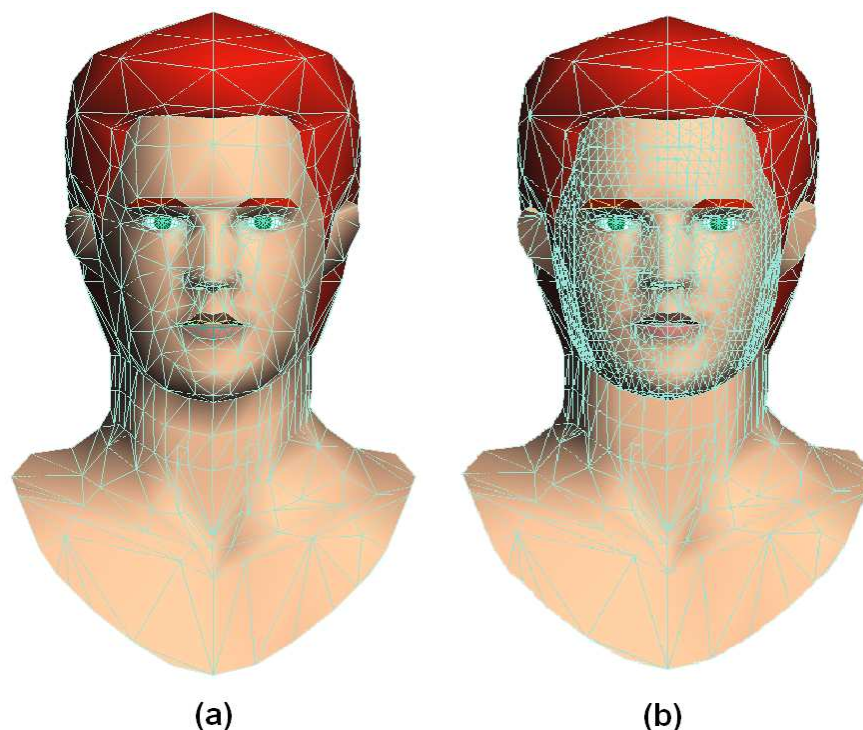


Fig. 4.2: Modelo geométrico: (a) original e (b) refinado

Além dos dados oriundos do modelo geométrico, necessita-se realizar a modelagem dos músculos. Desta forma, criou-se um modelo com dezenove músculos, sendo nove pares de músculos lineares (lado direito e esquerdo da face) e um músculo esfíncter. Os músculos lineares escolhidos foram: risório, zigomático maior, zigomático menor, levantador do ângulo da boca, levantador do lábio superior, levantador do lábio superior e asa do nariz, depressor do ângulo da boca, depressor do lábio inferior, mento. O músculo esfíncter, orbicular da boca, também foi modelado devido a sua significativa atuação na movimentação labial (SOBOTTA, 2000), (SPENCE, 1991) e (KENDALL; CREARY, 1995).

Os nove pares de músculos foram modelados como regiões cilíndricas orientadas por segmentos lineares compostos por dois vértices, sendo um deles fixo e o outro móvel. Desta maneira criou-se uma matriz de músculos lineares com dezoito linhas, uma para cada músculo, e duas colunas que contém os índices para a matriz de coordenadas dos vértices fixo e móvel, conforme a figura 4.4.

O músculo orbicular da boca, composto por um conjunto de segmentos lineares, onde todos os vértices são móveis, foi modelado como um vetor, veja figura 4.4, que contém índices para os vértices na matriz de coordenadas da pele.

Outra informação necessária ao sistema são os vértices influenciados pelos músculos. Estes vértices foram identificados considerando-se a região de influência associada ao músculo, conforme a

¹ *Virtual Reality Modeling Language*, para detalhes consultar (AMES; NADEAU; MORELAND, 1997)

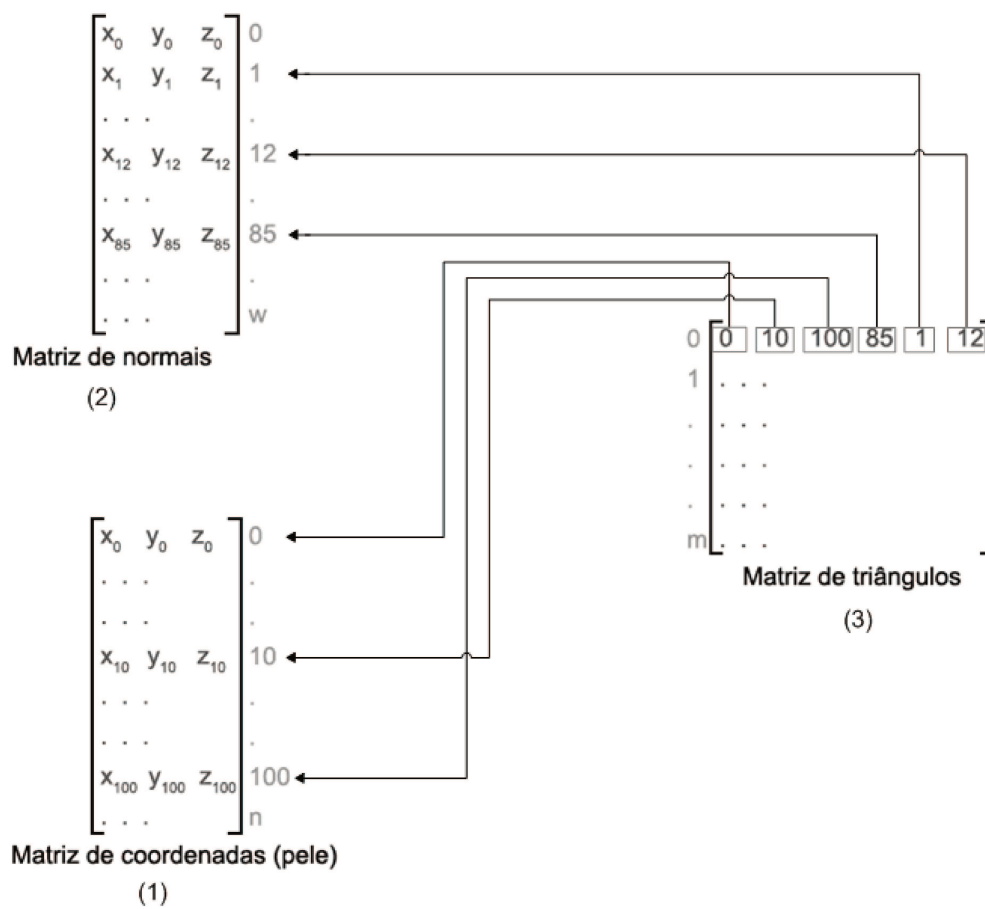


Fig. 4.3: Matrizes de: (1)coordenadas, (2)normais, (3)triângulos

seção 3.3.1. Desta forma, criou-se uma matriz de influência composta pelos índices das coordenadas dos vértices na pele, figura 4.4, influenciados pelo respectivo músculo.

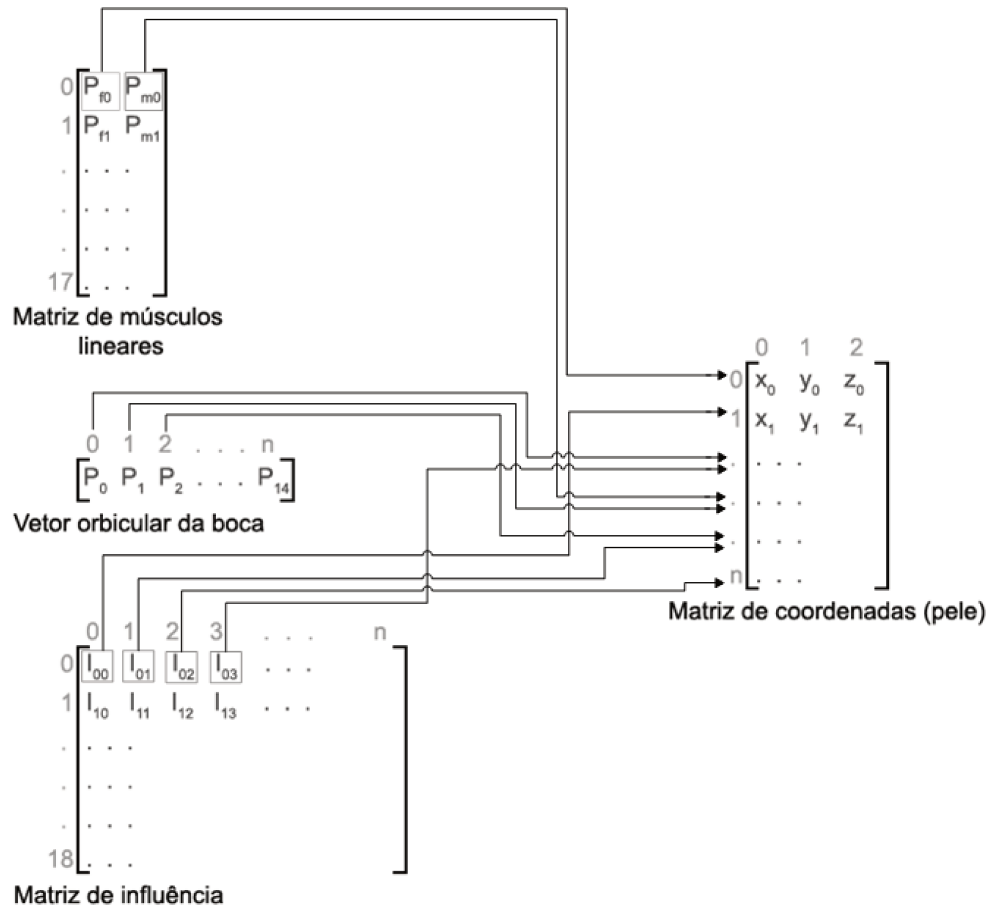


Fig. 4.4: Matrizes que contêm informações dos músculos

4.1.2 Pré-processamento

Algumas informações necessárias ao pacote que representa os Cálculos não são obtidas na Estrutura de Dados Base, desta maneira, o processo de obtenção dessas informações são realizados no Pré-processamento.

Na figura 4.5 pode-se observar as partes internas do pacote Pré-Processamento. Informações necessárias a esse pacote são fornecidas pela Estrutura de Dados Base para processamento e obtenção das matrizes com informações sobre os Vértices da Fáschia, Vértices de Ossos e Arestas das camadas da face.

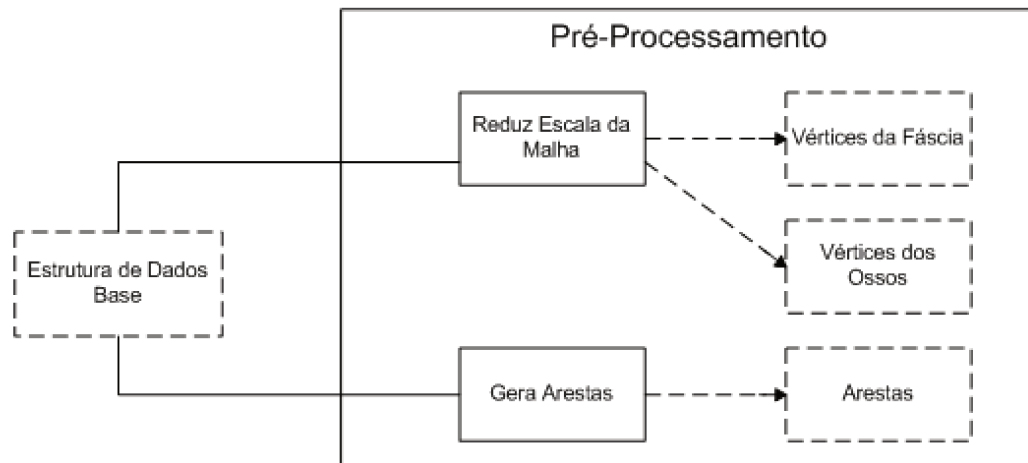


Fig. 4.5: Pacote Pré-processamento expandido

O modelo geométrico utilizado é um modelo geométrico multi-camadas (gordura e músculos), composto pelas superfícies que representam a pele, fáschia e osso. Da conversão do modelo geométrico obteve-se os vértices que representam a superfície de pele, sendo assim, necessitava-se obter a estrutura de dados que contém as coordenadas 3D dos vértices da superfície de fáschia e ossos.

Para esse propósito, criou-se um procedimento no Pré-processamento para realizar a redução da escala da malha que compõe a pele, figura 4.5. Para que a redução fosse realizada de maneira coerente, como a superfície é convexa, calculou-se o centróide da cabeça virtual e então aplicou-se coeficientes de redução da distância do centróide aos vértices gerando desta forma as coordenadas 3D dos vértices das superfícies de fáschia e ossos, como ilustrado na figura 4.6.

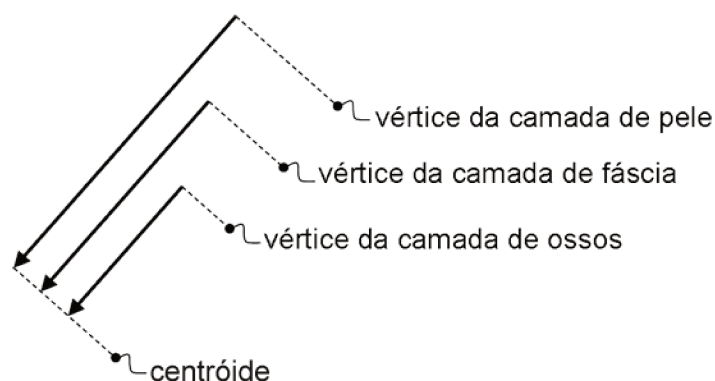


Fig. 4.6: Vértices das camadas que compõe o modelo geométrico

Obtidas as coordenadas 3D dos vértices das três superfícies, gerou-se os relacionamentos dos vértices (arestas), figura 4.5, considerando o modelo geométrico como um grafo com n pontos onde cada vértice estabelece um relacionamento, conforme ilustrado na figura 4.7(a).

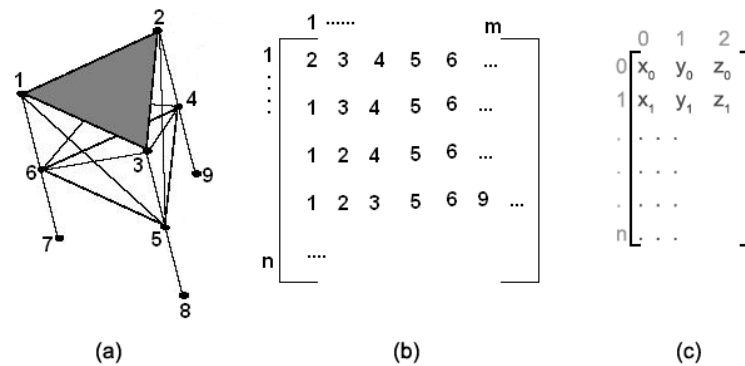


Fig. 4.7: (a) Grafo do modelo geométrico, (b) Matriz de relacionamento entre os vértices e (c) matriz de coordenadas do vértice

Para o presente trabalho a matriz de relacionamento entre os vértices, figura 4.7 (b), tem dimensão $n = 1857$ por 32. Cada linha é associada a um vértice e define até 32 outros vértices, aos quais o vértice da linha pode estar ligado. Esse valor máximo de ligações foi obtido experimentalmente para o modelo geométrico empregado.

Como os valores armazenados na matriz da figura 4.7 (b) são índices, eles serão sempre maior ou igual à 0, desta forma, para sinalizar que não há mais ligações, utilizou-se o valor -1 . Sendo assim, é possível percorrer os vértices e seus relacionamentos facilmente na matriz descrita.

4.1.3 Entrada

O pacote de *Entrada* é o responsável pela interação com o usuário através de uma *interface* gráfica. A figura 4.8 apresenta as divisões internas deste pacote.

Observa-se na figura 4.8 que o usuário inicia o processo através de uma *interface* de controle onde configura valores do módulo das forças musculares. Então essa informação configurada é empregada nos processos *Força Aplicada ao Músculo* e *Distribuição da Força Muscular*.

A *Força Aplicada ao Músculo* é um procedimento que identifica quais foram os músculos configurados e que, conseqüentemente, serão acionados no movimento, e então armazena na matriz *Força Muscular nos Vértices* o valor da força muscular no vértice móvel correspondente ao músculo.

Os demais vértices que estão na região do músculo, figura 3.8, também sofrem a ação da força muscular configurada. Para esse propósito, o processo *Distribuição da Força Muscular* calcula por interpolação, de acordo com a equação 3.14, o valor da força muscular nestes vértices e armazena na matriz *Força Muscular nos Vértices*.

A *interface* do presente sistema foi desenvolvida em linguagem Visual C++, figura 4.9, onde o animador pode configurar, através de *sliders*, o módulo da força que será aplicada à cada músculo,

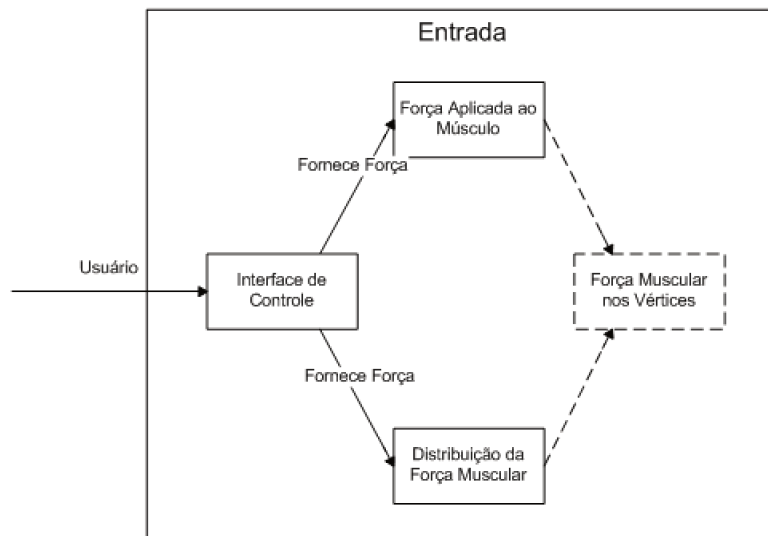


Fig. 4.8: Pacote Entrada expandido

além do ângulo de rotação aplicado à mandíbula.

Pequenas assimetrias como ao sorrir um dos lados do lábio estar alguns milímetros mais elevado que outro, ou alguns instantes entre a piscada de cada olho, são ações que podem gerar sensações de animações mais realistas (PARKE; WATERS, 1996). Focalizando este princípio desenvolveu-se uma interface com controles separados para os lados esquerdo e direito da face para cada um dos músculos modelados, pois desta maneira é possível simular uma situação em que um determinado músculo é mais contraído em um dos lados da face, figura 4.9.

Ainda observando a figura 4.9 nota-se os botões com as seguintes funcionalidades de controle do sistema:

- Fechar: possibilita o encerramento da execução da interface de controle;
- Executar: realiza a leitura dos valores de força configurados pelo usuário, executa os cálculos e mostra os resultados, ou seja, a transição do modelo geométrico em diferentes posições;
- Inicializa: inicializa todos os dados com os valores de repouso e mostra ao usuário o modelo geométrico em seu estado neutro, ou seja, inicial;
- Salvar: salva em arquivo os valores de força e rotação configurados pelo usuário;
- Abrir (representado pelo botão ‘...’): realiza a leitura de um determinado arquivo gravado pelo próprio sistema e carrega os valores de força configurados nos *sliders*.

As funcionalidades *salvar* e *abrir* foram criadas para permitir ao usuário, armazenar a configuração realizada e ter possibilidade de repetir ou criar novas animações a partir de uma animação existente. Desta maneira, o botão *salvar* aciona um procedimento que armazena o valor da força de cada um dos músculos para cada um dos lados da face.



Fig. 4.9: Interface de controle desenvolvida

O botão `executar` aciona procedimentos que realizam os cálculos para obtenção de imagens com a cabeça virtual em diferentes posições.

Quando se deseja que o modelo da cabeça virtual retorne ao estado inicial de repouso basta utilizar o botão `inicializa` para atribuir-se as posições de repouso aos vértices, configurar em zero o vetor de forças musculares.

4.1.4 Cálculos

Para obter a animação desejada o botão `executar`, figura 4.9, deve ser ativado e então os processos `Força Aplicada ao Músculo` e `Distribuição da Força Muscular` serão acionados, figura 4.8, além dos pacotes de `Cálculos` e `Exibição`.

O pacote de `Cálculos` expandido na figura 4.10, é responsável pela realização de todos os cálculos pertinentes à ação das forças aplicadas e pela obtenção das posições dos vértices após o deslocamento de acordo com a equação 3.1 de movimento.

Cada um dos processos internos do pacote de `Cálculos` (`Força Mola`, `Preservação de Volume`, `Penalização de Força`, `Restauração do Vértice` e `Incrementa Força Muscular`) recebe como entrada dados provenientes da `Estrutura de Dados Base` e dos pacote de `Pré-Processamento` e `Entrada`. Essas informações são processadas e a posição final de cada vértice é gerada a cada

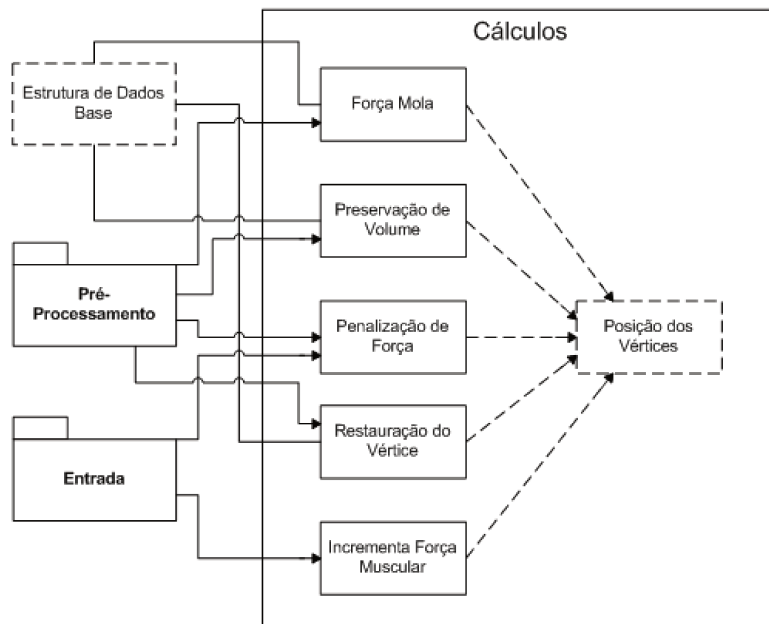


Fig. 4.10: Pacote Cálculos expandido

intervalo de simulação.

No processo *Força Mola*, calcula-se a força resultante em cada vértice das malhas através da equação 3.3. A toda aresta que compõe o modelo geométrico tem-se uma mola associada, sendo assim, a propagação do movimento dá-se devido ao deslocamento do vértice que resulta na movimentação da mola (aresta) e conseqüentemente desencadeia o deslocamento de outros vértices ligados a essa mola, que por sua vez, ocasiona a movimentação de outras molas e assim sucessivamente. Como as arestas trabalham como molas, a propagação do movimento é atenuada à medida que ficam mais distantes do músculo.

Como cada vértice possui mais de uma mola, calcula-se a força mola resultante através do somatório de todas as forças molas relacionadas ao vértice, dividido pelo número de molas do vértice, de acordo com o algoritmo 1.

Algoritmo 1 Cálculo da força mola em um vértice

```

força mola = 0 <- força mola no vértice
PARA cada mola associada ao vértice
   $c_m$  <- coeficiente de mola
   $c_f$  <- calcula-se o comprimento da mola após o deslocamento
   $c_i$  <- calcula-se o comprimento da mola inicial
  força mola += ( $c_m * (c_f - c_i)$ ) * direção da mola
FIM PARA

```

Além de serem compostas por triângulos, as superfícies de pele e fáschia também são ligadas entre

si formando um prisma que proporciona volume à face, como ilustrado na figura 4.11.

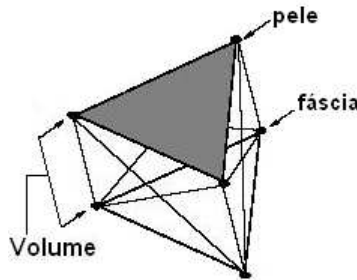


Fig. 4.11: Volume facial

O cálculo da Preservação de Volume, algoritmo 2, têm como propósito manter o volume do prisma que compõe o modelo geométrico, pois a cada alteração de um vértice o volume do prisma é alterado, aumentado ou diminuído de acordo com o deslocamento ocorrido no vértice. Para compensar a alteração no volume do prisma, essa rotina realiza os deslocamentos dos outros vértices influenciados pela ação do músculo de forma controlada, mantendo o volume da região (LUCERO; MUNHALL, 1999) e (LEE; TERZOPOULOS; WALTERS, 1995).

Algoritmo 2 Cálculo da preservação de volume em um vértice

```

fPreserVol = 0 <- força de preservação do volume
PARA cada prisma associado ao vértice
  k1 <- coeficiente de restituição do volume
  k2 <- coeficiente de restituição do centro de massa
  Vj0 <- volume inicial do prisma
  Vj <- volume do prisma após o deslocamento do vértice
  n <- vetor normal
  rij <- vetor posição do vértice ao centro de massa (repouso)
  r'ij <- vetor posição do vértice ao centro de massa (deslocado)
  fPreserVol += (k1 * (Vj - Vj0) * n) + (k2 * (rij - r'ij0))

```

FIM PARA

Para simplificar o cálculo estimou-se o volume considerando um prisma reto e o comprimento médio das arestas na camada de gordura.

O procedimento Penalização de Força, apresentado no algoritmo 3, calcula a força de restrição que tem como propósito impedir deformações de penetração dos ossos. Essa rotina utiliza valores de força aplicados ao vértice e a coordenada do vetor normal oriundo do modelo geométrico, ou seja, uma informação obtida da Estrutura de Dados Base.

Assim como o processo Penalização de Força, o procedimento de Restauração do Vértice é outra restrição à deformações indesejáveis do modelo, essa restrição estabelece um impedimento no deslocamento dos vértices da camada de fáscia, buscando mantê-los em suas posições

Algoritmo 3 Cálculo da penalização de força em um vértice

```

fPenaliza = 0 <- força de penalização
n <- vetor normal
f <- força aplicada ao vértice
SE ((f * n) < 0)
  fPenaliza = (f * n) * n
FIM SE

```

iniciais. Para isso, aplica-se uma constante de escalonamento ao deslocamento do vértice como descrito no algoritmo 4.

Algoritmo 4 Cálculo da restauração de força

```

fRestaura = 0 <- força de restauração
k <- constante de escalonamento da força
pi0 <- posição do vértice no repouso
pi <- posição do vértice após deslocamento
fRestaura = k * (pi - pi0)

```

O procedimento de incremento da força muscular ocorre de acordo com a equação 3.16 descrita na seção 3.3, onde a cada iteração a força muscular sofre um aumento gradativo baseado em Lucero e Munhall (1999), de acordo com o algoritmo 5.

Algoritmo 5 Aumento gradativo de força muscular

```

 $\tau$  <- coeficiente de incremento de força
fi <- força muscular de entrada, definida pelo usuário
t <- intervalo de tempo
f <- força muscular no vértice
 $f'' = 1/\tau^2 * (f_p - 2 \cdot \tau \cdot f' - f)$ 
f' += t · f''
f += t · f'

```

Definidas todas as rotinas dos módulos, criou-se o algoritmo 6 que é a junção de todas as rotinas descritas acima, a fim de obter as novas posições dos vértices do modelo geométrico.

O número de iterações está relacionado com a quantidade de imagens da face virtual, em diferentes posições, que se deseja obter. Essas imagens virtuais são armazenadas em listas. Além disso, necessita-se definir o intervalo de tempo em que se deseja obter a imagem modificada, o qual para o presente desenvolvimento, baseado em Lee, Terzopoulos e Walters (1995), é $\Delta t = 0,01$ segundos.

4.1.5 Exibição

Após as listas geradas pelo pacote `Cálculos` para que a animação ocorra, ou seja, as listas sejam exibidas, utiliza-se o recurso da biblioteca Glut chamado `double-buffer`. Esse recurso permite

Algoritmo 6 Movimentação Biomecânica

```

iterações = 0
ENQUANTO (iterações < n)
  m <- massa do vértice
  ca <- coeficiente de amortecimento
  tp <- intervalo de tempo
  f <- Cálculo do módulo da força muscular (Algoritmo 5)
  fi <- Força muscular na direção de contração do músculo
  fM <- Cálculo da força mola (Algoritmo 1)
  fV <- Cálculo da força de preservação de volume (Algoritmo 2)
  fP <- Cálculo da força de penalização de força (Algoritmo 3)
  fR <- Cálculo da força de restauração do vértice (Algoritmo 4)
  PARA cada vértice
    Aceleração = (1/m) * (fi - (ca * Velocidade) - fM - fV - fP - fR)
    Velocidade += (tp * Aceleração)
    Posição do vértice += (tp * Velocidade)
    Gera imagem com posição deslocada
  FIM PARA
  Guarda a imagem em uma lista de imagens
  iterações++
FIM ENQUANTO

```

que a aplicação opere com dois *buffers*, onde enquanto escreve-se uma lista em um dos *buffer* exibe-se o outro com a imagem pronta, esse processo ocorre simultaneamente e desta maneira a troca de imagens torna-se imperceptível ao olho humano, já que no momento em que se exibe o *buffer* sua imagem já está pronta, proporcionando a realização da animação.

Com o propósito de se observar com detalhes a animação realizada adicionou-se ao protótipo desenvolvido funcionalidades como a possibilidade de se repetir a animação ou ainda observar a animação de diferentes ângulos.

Para que a animação seja repetida pode-se utilizar o botão direito do *mouse*. Já para visualizar a cabeça virtual de diferentes ângulos, utiliza-se as teclas direcionais podendo aproximar ou afastar da câmera a cabeça virtual, além de rotacionar para direita ou esquerda.

4.2 Considerações finais

Foram abordados, neste capítulo, os detalhes estruturais e funcionais que compõem o sistema desenvolvido (SABiom). Para facilitar a compreensão da implementação dividiu-a em pacotes que posteriormente foram explorados internamente.

Estabelecendo-se um paralelo com o capítulo 3, e desta maneira é possível observar o modelo

biomecânico proposto colocado em prática.

No próximo capítulo serão abordados os resultados obtidos nas simulações realizadas. Apresenta-se também uma análise, do modelo de animação implementado e dos resultados obtidos nas simulações.

Capítulo 5

Resultados obtidos

Como já comentado, a expressão facial tem relevância significativa na tradução dos sentimentos e na comunicação entre pessoas. Os movimentos que geram as expressões podem ser classificados como voluntários ou instintivos (FLEMING; DOBBS, 1999). Os movimentos instintivos são produzidos inconscientemente e os voluntários são aqueles empregados conscientemente na tentativa de demonstrar um sentimento ao produzirem uma expressão facial. Precocemente as crianças descobrem o valor das expressões faciais para comunicação e passam a empregá-las a seu favor. Ao longo da vida o homem aperfeiçoa sua habilidade em interpretar as variações sutis da face, embora as experiências sociais o instigam algumas vezes a reter suas expressões faciais com o propósito de ocultar seus sentimentos. Todos os movimentos, voluntários ou instintivos, são resultados da contração de um conjunto de músculos da face, conhecidos como músculos da expressão facial.

Há três grandes regiões da face cujas características influenciam fortemente a expressão facial natural, são elas: sobrancelhas, olhos e boca. Essas partes também podem ser classificadas como formadores e modificadores de expressões. A boca é classificada como formador por produzir um conjunto significativo de expressões. Já os olhos e sobrancelhas são classificados como modificadores por possuírem a habilidade de alterar as expressões faciais criadas pela boca e produzir variações das mesmas (FLEMING; DOBBS, 1999).

Com o propósito de gerar animações de expressões faciais, o presente trabalho concentra-se na região da boca. Sendo assim, foram modelados músculos, como vistos no capítulo 3, que estão diretamente relacionados à movimentação dos lábios e regiões vizinhas.

Analisa-se neste capítulo o modelo de animação biomecânico implementado, além de apresentar-se a metodologia empregada para a realização dos testes no protótipo desenvolvido e uma comparação dos resultados obtidos através das situações de teste com um modelo humano.

5.1 Casos de teste

Para validar o sistema desenvolvido foram escolhidos alguns movimentos faciais para serem simulados como casos de teste. A seleção desses movimentos baseou-se em Kendall e Creary (1995) que em seu livro demonstram como identificar se um paciente tem paralisia facial e além disso como descobrir qual é o músculo paralisado. Para tanto são realizados movimentos expressivos do rosto (expressões faciais), que testam a ação de determinados músculos da face.

A escolha de expressões faciais para os casos de teste tem como intuito validar o modelo matemático utilizado além de demonstrar a ação dos músculos modelados.

Dados obtidos de medidas reais de movimentos faciais, ou seja, quais são os músculos e o quanto são contraídos em uma determinada movimentação facial não foram utilizados no presente trabalho. Desta maneira, os valores (módulo) atribuídos às forças musculares em cada um dos músculos modelados, que são os parâmetros de ativação utilizados no sistema desenvolvido, foram atribuídos *ad hoc*.

5.1.1 Procedimentos adotados

Para realização dos testes comparativos, inicialmente foram definidas as expressões faciais a serem simuladas, em seguida escolheu-se um modelo humano para realização dos movimentos faciais e então realizou-se uma sessão fotográfica com as posições finais dos movimentos escolhidos, no modelo humano. Desta forma, observando estas posições ajustou-se no sistema desenvolvido as forças atuantes dos músculos ativos e então obteve-se a imagem final do movimento no modelo sintético. A figura 5.1 ilustra o procedimento adotado.

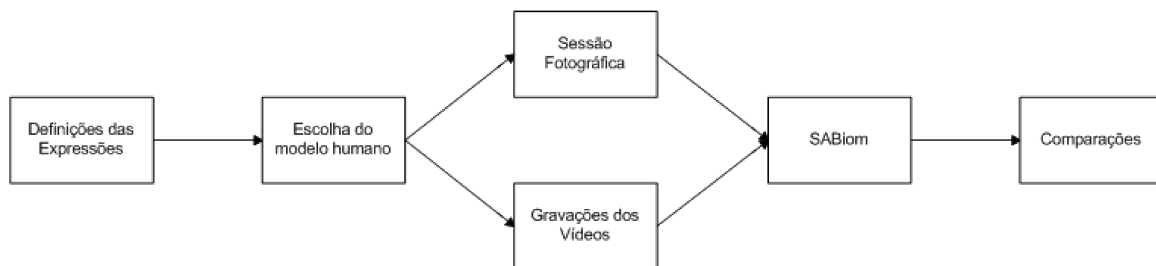


Fig. 5.1: Seqüência de etapas do procedimento adotado

As expressões faciais humanas são compostas por detalhes sutis que englobam toda a face e assim produzir uma expressão facial movimentando apenas uma região torna-se uma difícil tarefa para modelos humanos. Conseqüentemente como o propósito deste trabalho está centrado no estudo da movimentação na região do lábio, para realização das comparações recortou-se as imagens, fotográfica e do modelo sintético, de maneira que apenas a região da boca ficasse em evidência a fim de

evitar que características dos modificadores e da própria fisionomia influenciassem as comparações.

Além das imagens comparativas, para que se pudesse avaliar os movimentos realizados gravou-se vídeos com os mesmos movimentos faciais utilizados. Posteriormente com o auxílio do software iFinish da empresa Media 100 Inc. realizou-se a gravação e então obteve-se pequenos vídeos com os movimentos faciais. Para que pudessem ser avaliados, gerou-se uma seqüência de imagens com a cabeça virtual e então criou-se a animação do movimento.

As expressões faciais simuladas, discutidas neste capítulo são: alegria, tristeza, nojo e beijo. Os parâmetros empregados na simulação dos casos de teste realizados são fornecidos na tabela 5.1.

	<i>Parâmetros</i>	<i>Valor</i>
Massa	m_i	0.5
Coeficiente de Amortecimento	γ_i	30
Força Mola	c_{ij}	pele: 60
		gordura: 30
		fáscia: 80
		ossos: 10
Preservação de Volume	k_1	40
	k_2	120
Restauração do Vértice	k	20

Tab. 5.1: Parâmetros empregados na simulação facial

Como já comentado, os valores de força muscular obtidos são dados experimentais para simulação de testes no protótipo desenvolvido, não tendo sido obtidas de medidas de força do modelo humano, e assim não serão utilizadas unidades de força nas tabelas citadas nos casos de teste.

5.1.2 Expressões faciais de alegria

A expressão facial de alegria, representada pelo sorriso, pode assumir diferentes formas dependendo da intensidade com que os músculos atuam e se a boca está aberta ou fechada.

Segundo Martins (2003) uma das expressões, associadas à boca e aos lábios, que mais atrai atenções é o sorriso, que não é apenas sinal de humor ou satisfação, é também expressão de boa vontade, sinal de defesa ou mesmo de um pedido de desculpa.

Embora a expressão de alegria seja composta por uma combinação de músculos atuantes no lábio superior, o músculo de atuação mais significativa nessa expressão é o zigomático maior, também conhecido como músculo do sorriso, pois é o responsável por elevar o canto dos lábios formando a expressão de alegria (BOULOGNE, 1990) e (FLEMING; DOBBS, 1999).

No sorriso discreto os lábios arredondam-se para trás, um pouco para cima, mas mantêm-se unidos, não deixando aparecer os dentes (MARTINS, 2003). Para aquisição da imagem com o modelo humano solicitou-se que tracionasse o ângulo da boca para trás e para cima criando uma expressão de felicidade discreta (KENDALL; CREARY, 1995).

A figura 5.2 indica os músculos atuantes na face sintética para o caso do teste da expressão facial de alegria (sorriso discreto).

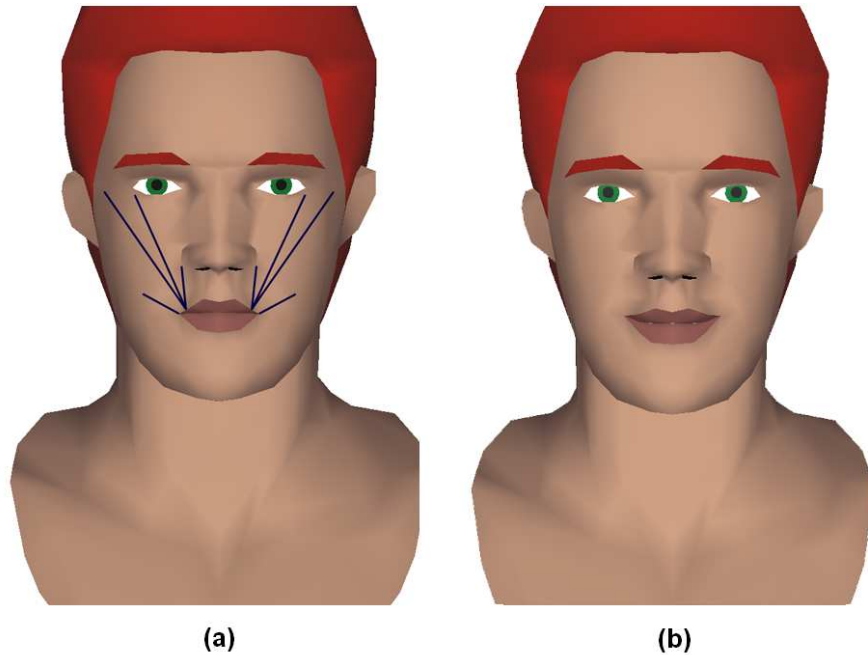


Fig. 5.2: (a) Músculos do sorriso discreto; (b) Sorriso discreto

No caso do teste do sorriso discreto, ou seja, sem abertura da boca, configurou-se a atuação dos músculos de acordo com a tabela 5.2.

<i>Músculos Ativos</i>	<i>Lado da face</i>	<i>Módulo da força muscular</i>
Risório	ambos	42
Zigomático maior	ambos	9
Zigomático menor	ambos	2
Depressor do lábio inferior	ambos	1
Mento	ambos	2
Levantador do lábio superior	ambos	1

Tab. 5.2: Músculos ativos na expressão de alegria - sorriso discreto

Embora o músculo mais contraído seja o risório, sem a atuação do zigomático maior não é possível

caracterizar a expressão de alegria. A figura 5.3 mostra os resultados obtidos com o modelo virtual e com o modelo humano.



Fig. 5.3: Comparativo: expressão de alegria - sorriso discreto

Observa-se que a construção geométrica dos lábios no modelo virtual é realizada pela junção de polígonos triangulares, dessa maneira sua forma não assume curvas tão suaves como em um modelo humano, mesmo assim o resultado obtido com o modelo virtual assemelha-se ao formato dos lábios no modelo humano, figura 5.3.

Em seguida, mantendo-se a expressão de alegria realizou-se um segundo caso de teste, um sorriso com a boca aberta mostrando os dentes.

Para atingir esse resultado, além da ação muscular permitindo que os cantos da boca sejam retraídos em direção às orelhas, há também a atuação da mandíbula que faz com que a boca seja levemente aberta (OSTERMANN, 2002).

Com o intuito de testar a nova expressão solicitou-se ao modelo humano que tracionasse o ângulo da boca para cima e para fora além de abrir a boca (sorrir mostrando os dentes) como um meio sorriso (KENDALL; CREARY, 1995).

No meio sorriso são observados os dentes superiores e a boca entreabre-se, para simulação dessa expressão; além da atuação dos músculos torna-se necessário que os vértices que representam a mandíbula rotacionem em relação ao eixo da mandíbula, que é uma reta estabelecida na altura dos ouvidos. A figura 5.4 ilustra os músculos envolvidos nessa expressão.

Para reproduzir a mesma expressão do modelo humano no modelo virtual, necessitou-se aumentar as forças aplicadas aos músculos utilizados na expressão anterior, isso para que mesmo rotacionando a mandíbula (abrindo a boca) o lábio superior se mantivesse tracionado para cima dando um aspecto de alegria. A tabela 5.3 contém os valores configurados para os músculos.

A figura 5.5 mostra os resultados obtidos para o meio sorriso com os dois modelos.

Características como o formato dos dentes, exposição da gengiva ao sorrir e o quanto ela é exposta pertencem a cada indivíduo. Nota-se através da figura 5.5, que essas características distinguem-se no modelo humano e virtual, apesar disso, o resultado obtido assemelha-se ao comparado, tendo em vista que o comparativo concentra-se no formato dos lábios e na produção do movimento nos modelos e

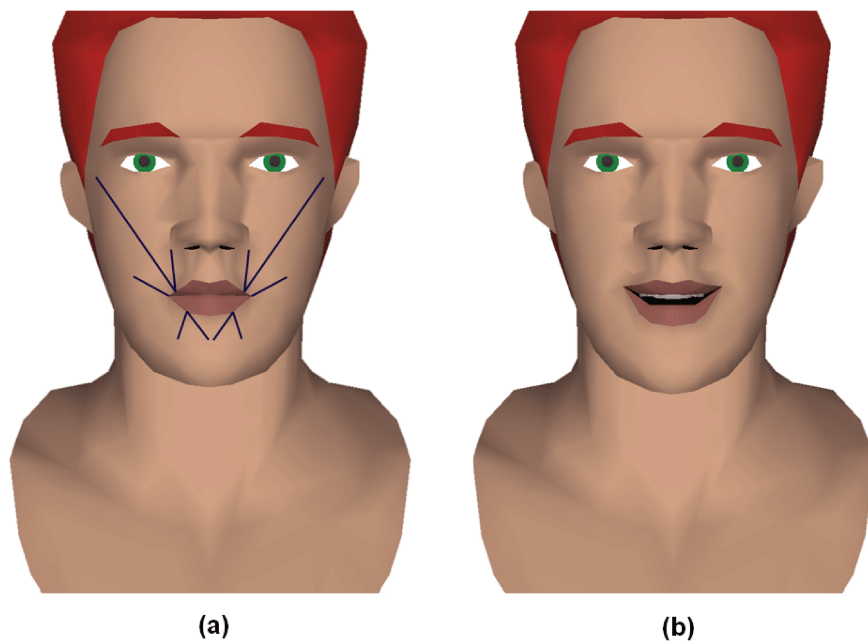


Fig. 5.4: (a) Músculos do meio sorriso; (b) Meio sorriso

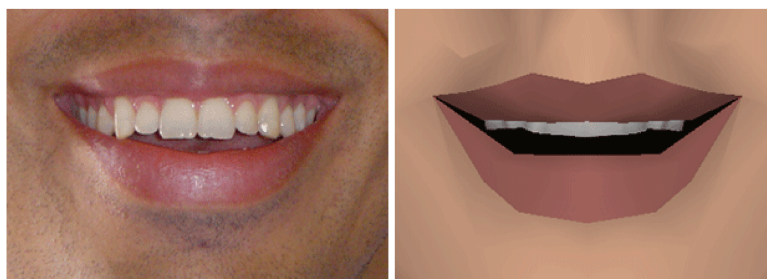


Fig. 5.5: Comparativo: expressão de alegria - meio sorriso

<i>Músculos Ativos</i>	<i>Lado da face</i>	<i>Módulo da força muscular</i>
Risório	ambos	44
Zigomático maior	ambos	10
Levantador do ângulo da boca	ambos	3
Depressor do lábio inferior	ambos	1
Mento	ambos	1

Tab. 5.3: Músculos ativos na expressão de alegria - meio sorriso

nesse dois aspectos observamos várias semelhanças em ambos os modelos.

5.1.3 Expressão facial de tristeza

Podendo assumir variações dependendo de sua intensidade, a expressão de tristeza consiste no terceiro caso de teste do presente trabalho.

Para o caso de teste descrito, o propósito era que os lábios formassem um arco com os cantos curvados para baixo e embora a atuação mais significativa seja dos músculos que movimentam o lábio inferior (depressores e mento), foi de fundamental importância a atuação do músculo levantador do ângulo da boca para que se atingisse o formato curvilíneo do lábio superior nesse movimento. A figura 5.6 ilustra os músculos atuantes no modelo virtual para esta expressão.

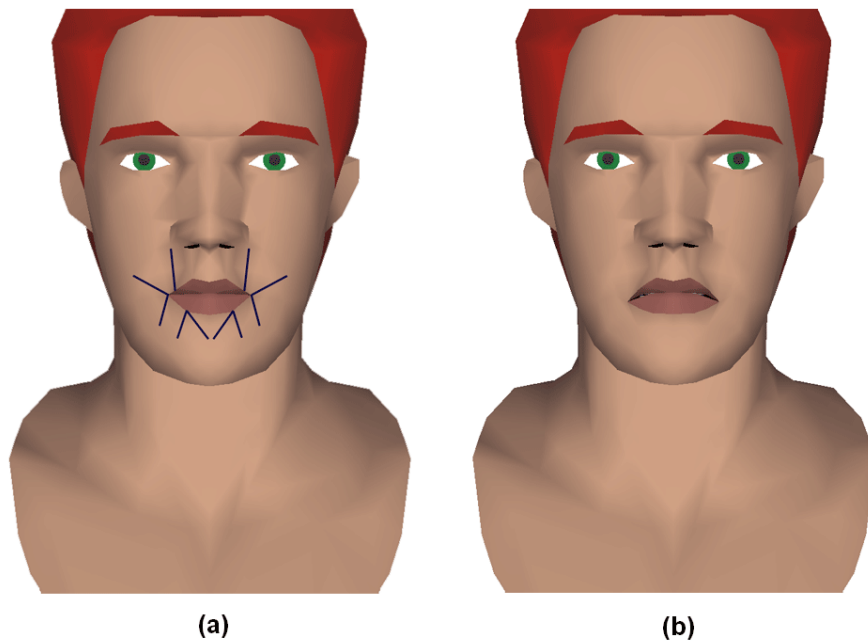


Fig. 5.6: (a) Músculos da tristeza; (b) Tristeza

A tabela 5.4 apresenta os músculos ativos e os valores de força muscular configurados para a expressão de tristeza.

<i>Músculos Ativos</i>	<i>Lado da face</i>	<i>Módulo da força muscular</i>
Risório	ambos	9
Levantador do ângulo da boca	ambos	1
Depressor do ângulo da boca	ambos	40
Depressor do lábio inferior	ambos	6
Mento	ambos	3

Tab. 5.4: Músculos ativos na expressão de tristeza

O movimento almejado para o caso de teste da expressão de tristeza não é um movimento simples para modelos humanos adultos, pois tende-se a ter uma maior flexibilidade nos músculos envolvidos neste movimento quando se é criança. Para a realização desse teste, solicitou-se ao modelo humano que tracionasse o ângulo da boca formando um arco invertido, ou seja, que se tracionasse os cantos da boca para baixo (KENDALL; CREARY, 1995).

Nota-se que o músculo de atuação mais significativa nesse movimento é o depressor do ângulo da boca, pois é o responsável por tracionar os cantos dos lábios para baixo.



Fig. 5.7: Comparativo: expressão de tristeza

No modelo humano há a formação de rugas no queixo devido ao fato dessa região ser protraída para que seja possível atingir a curvatura do lábio inferior. Observa-se que a curvatura e o formato dos lábios provocados pela tração muscular são semelhantes ao observado no modelo humano (CORRÊA; MAGALHÃES; DE MARTINO, 2006).

5.1.4 Expressão facial de nojo

Na expressão classificada como nojo a boca realiza um movimento assimétrico, levantando e curvando o lábio superior em um dos lados (OSTERMANN, 2002).

Para se atingir o movimento desejado solicitou-se ao modelo humano que tracionasse o ângulo da boca diretamente para cima como se fosse mostrar apenas o dente canino em um único lado da face (KENDALL; CREARY, 1995).

Pode-se visualizar na figura 5.8, os músculos acionados com o intuito de produzir um movimento semelhante no modelo virtual.

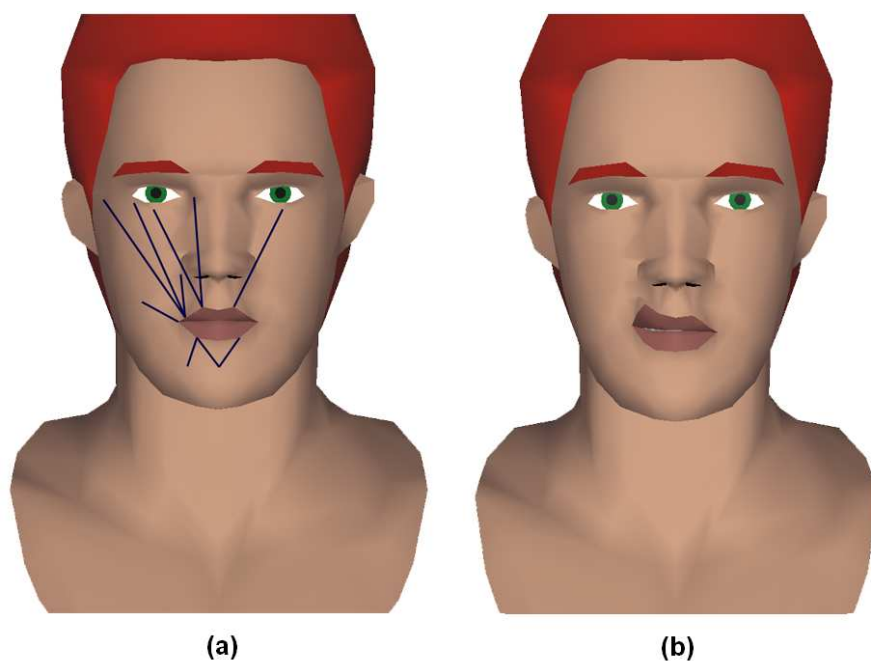


Fig. 5.8: (a) Músculos do nojo; (b) Nojo

A tabela 5.5 lista os músculos ativos nesse movimento bem como as forças musculares atribuídas.

<i>Músculos Ativos</i>	<i>Lado da face</i>	<i>Módulo da força muscular</i>
Zigomático maior	esquerdo	9
Zigomático menor	esquerdo	14
Levantador do ângulo da boca	esquerda	1
Levantador do lábio superior	ambos	1
Levantador do lábio superior e asa do nariz	esquerdo	2
Risório	esquerdo	6
Mento	direito	1
Mento	esquerdo	2
Depressor do lábio inferior	esquerdo	3

Tab. 5.5: Músculos ativos na expressão de nojo

O músculo levantador do lábio superior é o músculo que faz com que o lábio superior aumente

seu volume. Este é um músculo com atuação limitada à boca, pois poucas expressões envolvem o aumento do lábio superior, mas em conjunto com outros músculos é importante na formação da expressão de nojo (FLEMING; DOBBS, 1999).

Visualiza-se na figura 5.9, os resultados obtidos com os modelos humano e virtual.



Fig. 5.9: Comparativo: expressão de nojo

Observa-se no resultado obtido no modelo virtual a forma do lábio não seja tão curva quanto no modelo humano, devido ao fato da composição do modelo geométrico, anteriormente comentada, ser uma junção de polígonos. Porém a ação produzida pela atuação dos músculos resultando na pequena abertura dos lábios é bastante semelhante em ambos os modelos.

5.1.5 Expressão do beijo

O caso de teste realizado para validar o músculo orbicular da boca, que é um músculo da boca extremamente móvel (FLEMING; DOBBS, 1999), consiste no movimento dos lábios no beijo.

Para testar a atuação do músculo orbicular da boca solicitou-se ao modelo humano que fechasse os lábios fazendo uma protrusão para frente como ao beijar ou assobiar (KENDALL; CREARY, 1995).

A figura 5.10(a) ilustra o músculo atuantes nesse movimento.

Observa-se através da tabela 5.6 a atuação do músculo o orbicular da boca que faz com que todo o lábio seja deslocado em direção a um centro imaginário.

<i>Músculos Ativos</i>	<i>Lado da face</i>	<i>Módulo da força muscular</i>
Orbicular da boca	-	8.0

Tab. 5.6: Músculos ativos no movimento do beijo

Como apresentado na seção 3.3.2, os coeficientes de escalonamento da força muscular foram obtidos através da equação 3.18. No presente trabalho o vértice de referência adotado, localizado no centro dos lábios, encontra-se à 0.042 de distância do centro imaginário do músculo orbicular da

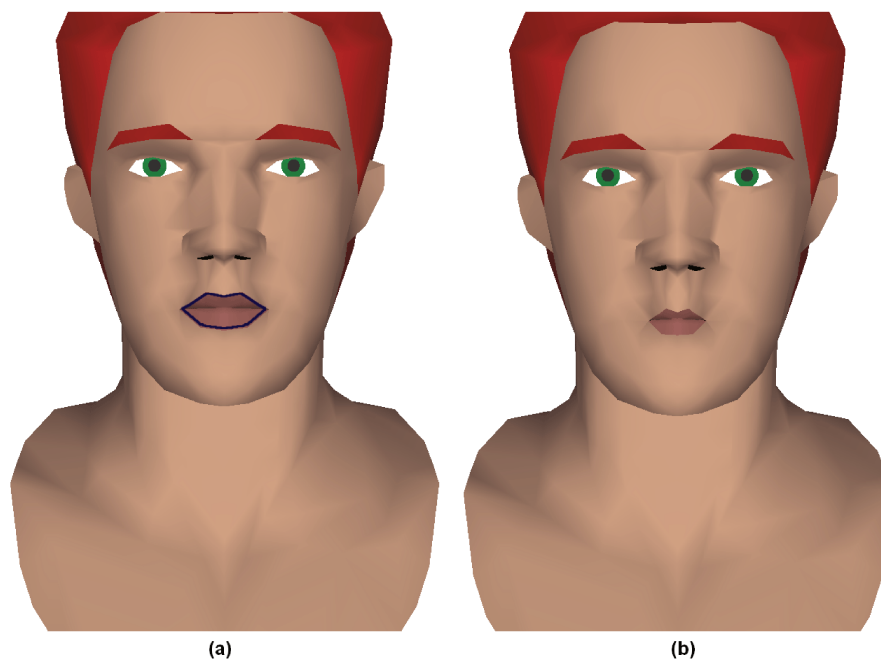


Fig. 5.10: (a) Músculos do beijo; (b) Movimento do beijo

boca, além disso esse vértice possui 7 ligações com outros vértices. Substituindo esses valores têm-se a equação 5.1.

$$f(x) = \frac{d_c}{0.042} \cdot \frac{v}{7} \cdot 1 \quad (5.1)$$

onde,

d_c é a distância do vértice i ao centro imaginário;

v é a quantidade de ligações que o vértice i possui.

As figuras 5.11 e 5.12 demonstram os resultados obtidos para a comparação. O modelo humano e virtual na figura 5.12 podem ser visualizados lateralmente com o propósito de demonstrar a protusão da região do lábio nesse movimento.

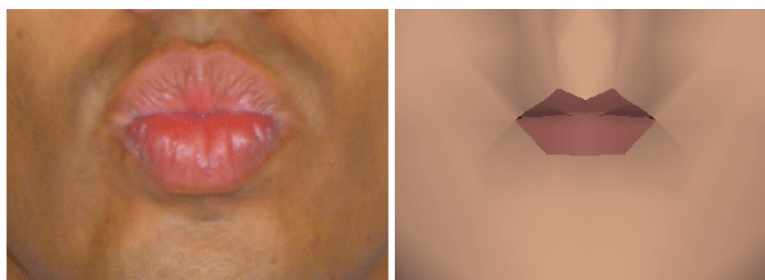


Fig. 5.11: Comparativo: expressão do beijo



Fig. 5.12: Comparativo: expressão do beijo - visão lateral

Analisando a figura 5.11, pode-se observar a diferença no volume dos lábios do modelo humano com relação ao virtual. Apesar disso, observamos que ao tracionar os lábios em direção a um ponto central a boca faz com que essa região seja protraída, assim como no modelo humano.

5.2 Considerações finais

A análise realizada no modelo de animação demonstrou a importância das forças empregadas e seu comportamento coerente com a realidade.

A atuação dos dezenove músculos modelados pode ser observada nos casos de teste apresentados, uns com ações maiores outros menores, porém todos com uma importante atuação na composição do movimento almejado.

Analisando-se o formato dos lábios, sem a preocupação com detalhes como volume dos lábios, arcada dentária, entre outros, ao tracionar os músculos notou-se que os resultados obtidos com o modelo virtual são bastante próximos aos reais, o que demonstra o futuro promissor da abordagem adotada.

No próximo capítulo encontram-se os comentários finais sobre a estratégia adotada e o protótipo desenvolvido.

Capítulo 6

Comentários finais

A contínua expansão de aplicações, envolvendo personagens virtuais, como apresentadores, tutores e vendedores, etc., faz com que o aprimoramento de técnicas para a realização da animação facial torne-se uma área de pesquisa crescente.

Diversos detalhes compõem uma simulação realista da face humana, como por exemplo, a expressão facial que usualmente relata um comportamento humano, o movimento articulatorio produzido no movimento da fala, o movimento da cabeça limitado pelo pescoço, entre outros. O presente trabalho concentrou-se na simulação dos movimentos dos lábios durante a expressão facial. Com este intuito, explorou-se uma estratégia de animação classificada como biomecânica, que tem se mostrado promissora, por se tratar de modelos de animação que representam características anatômicas e dinâmicas da face.

Para se escolher qual estratégia adotar, inicialmente realizou-se uma pesquisa sobre as diferentes abordagens encontradas na literatura, classificadas como interpolação poses-chave que possui a necessidade de uma completa especificação à cada pose-chave, a parametrização geométrica cuja dificuldade é encontrar um conjunto de parâmetros adequados que produzam os movimentos desejados, a parametrização *data-driven* que produz apenas movimentos previstos que dependem de parâmetros que foram obtidos da mensuração de movimentos previamente especificados, e a biomecânica que possui como característica uma eficiente produção de movimentos faciais através de um equacionamento mecânico que simula características anatômicas como por exemplo a elasticidade da pele.

Considerando a estratégia de animação biomecânica, um modelo freqüentemente abordado na literatura e que também foi amplamente explorado no presente trabalho é a abordagem proposta por Lee, Terzopoulos e Walters (1995). Esse modelo descreve através de um equacionamento o equilíbrio entre forças que acionam e que restringem o movimento facial.

Encontrou-se durante o estudo do trabalho de Lee, Terzopoulos e Walters (1995) algumas dificuldades de interpretação, como por exemplo, da modelagem da atuação dos músculos e da força

de restrição que restaura o vértice da fáschia. A dúvida sobre a força de restrição que restaura o vértice da fáschia foi elucidada através do trabalho de Lucero e Munhall (1999) que embora descreva uma abordagem de aplicação diferente do presente trabalho emprega o mesmo modelo proposto por Lee, Terzopoulos e Walters (1995). O modelo muscular proposto por Lucero e Munhall (1999), onde a força muscular é incrementada a cada instante de tempo até atingir seu valor máximo sendo esse valor configurado por sinais EMG, foi adotado no presente trabalho, no entanto com valor máximo sendo configurado manualmente.

Com o intuito de contribuir no âmbito das animações faciais desenvolveu-se um protótipo computacional chamado SABiom, Sistema de Animação Biomecânica, que implementa um modelo de animação baseado em Lee, Terzopoulos e Walters (1995) e Lucero e Munhall (1999).

Com o sistema SABiom desenvolvido realizou-se uma série de simulações afim de analisar as forças que compõem o modelo de animação.

Também utilizando o protótipo desenvolvido, ajustou-se experimentalmente valores para as forças musculares afim de realizar movimentos que simulam expressões faciais, a escolha dos casos de teste adotados foi baseada em relatos encontrados em Kendall e Creary (1995) onde os autores testam a atuação de músculos faciais através de movimentos da face. O intuito dos casos de teste realizados no presente trabalho foi a visualização da atuação dos músculos modelados.

Os resultados obtidos nos casos de teste comentados em particular no capítulo 5, mostram o potencial do SABiom para futuras pesquisas na área de animação facial.

Dificuldades como, o valor de força muscular que deve ser aplicada a um músculo durante um movimento, a escolha da estratégia para validar o protótipo desenvolvido, encontrar um modelo humano com flexibilidade facial suficiente para produzir os movimentos desejados compatíveis com a situação real, puderam ser contornadas. E como resultado obteve-se movimentos faciais com um modelo virtual para os casos de teste do movimento do beijo, alegria, tristeza e nojo.

A característica exploratória deste trabalho levou à abertura de um leque de possibilidades de pesquisa e trabalhos futuros. Diretamente relacionados ao tema do trabalho, pode-se destacar:

- Integração da estratégia *data-driven* para automatização do protótipo desenvolvido com a obtenção dos parâmetros de entrada do sistema (forças musculares). Por exemplo através da utilização de imagens ou medidas de eletromiografia muscular.
- A implementação de músculos distribuídos por toda face, a fim de obter um conjunto completo movimentos faciais que compõem as expressões, com atuações não apenas dos lábios mas também dos olhos, sobrancelhas, etc.
- A utilização da estratégia biomecânica implementada para a simulação do movimento articulatorio da fala. Para tanto necessita-se perseguir o estudo da atuação muscular na produção de

visemas ¹.

Observa-se que ainda há um extenso caminho à pesquisa neste área, principalmente com o propósito do aumento do grau de realismo das animações faciais produzidas.

¹Visema é o padrão de movimentação articulatória visível associado a um ou mais segmentos da fala

Referências Bibliográficas

AMES, A. L.; NADEAU, D. R.; MORELAND, J. L. *The VRML 2.0 sourcebook (2nd ed.)*. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, Inc., 1997. ISBN 0-471-16507-7.

ARUMNGAM, V.; NARESH, M. D.; SANJEEVI, R. Effect of strain rate on the fracture behaviour of skin. *The Journal of Biosciences*, v. 19, n. 3, p. 307–313, Setembro 1994.

AZEVEDO, E.; CONCI, A. *Computação Gráfica: Teoria e Prática*. [S.l.]: Elsevier, 2003.

BAGSHAW, C. R. *Muscle Contraction*. [S.l.]: Chapman & Hall, 1994.

BOULOGNE, G. B. D. de. *The mechanism of human facial expression*. [S.l.]: Cambridge University Press, 1990.

BUTTFIELD, A. A new approach to rapid image morphing, for lip motion synthesis. In: *Twenty-Sixth Australian Computer Science Conference*. [S.l.: s.n.], 2003.

BYUN, M.; BADLER, N. I. Facemote: qualitative parametric modifiers for facial animations. In: *SCA '02: Proceedings of the 2002 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation*. [S.l.: s.n.], 2002.

CORRÊA, R.; MAGALHÃES, L. P.; DE MARTINO, J. M. Sistema de animação facial biomecânica. In: *SEMINFO*. [S.l.: s.n.], 2006.

DE MARTINO, J. M. *Animação Facial Sincronizada com a Fala: Visemas Dependentes do Contexto Fonético para o Português do Brasil*. Tese (Doutorado) — Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, UNICAMP, Campinas, SP, Julho 2005.

DE MARTINO, J. M.; MAGALHÃES, L. P.; VIOLARO, F. Facial animation based on context-dependent visemes. *Computer & Graphics*, v. 30, n. 6, p. 971–980, 2006.

DIO, L. J. A. D.; AMATUZZI, M. M.; CRICENTI, S. V. Sistema muscular. In: DIO, L. J. A. D. (Ed.). *Tratado de anatomia sistêmica aplicada*. [S.l.]: Editora Atheneu, 2002. p. 187–216.

EKMAN, P.; FRIESEN, W. V.; HAGER, J. C. *DataFace Homepage*. [S.l.], 2003. <http://www.face-and-emotion.com/>.

ELDEN, H. R. *Biophysical Properties of the Skin*. [S.l.]: John Wiley & Sons, Inc., 1976.

EROL, F.; GÜDÜKBAY, U. An interactive facial animation system. In: SKALA, V. (Ed.). *WSCG 2001 Conference Proceedings*. [S.l.: s.n.], 2001.

FLEMING, B.; DOBBS, D. *Animating facial features and expressions*. Rockland, MA, USA: Charles River Media, Inc., 1999. ISBN 1-886801-81-8.

GRAY, H. *Anatomy of the human body. On-line 20th ed.* [S.l.], Philadelphia: Lea and Febiger; Bartleby.com, 2000. <http://www.bartleby.com/107/>. Re-edited by Warren H. Lewis.

ISO, I. *ISO/IEC 14496*. [S.l.], 2006. <http://www.iso.org>.

KALRA, P. et al. Simulation of facial muscle actions based on rational free form deformations. In: KILGOUR, A.; KJELLD AHL, L. (Ed.). *Computer Graphics Forum (EUROGRAPHICS '92 Proceedings)*. [S.l.: s.n.], 1992. v. 11, n. 3, p. 59–69.

KENDALL, F. P.; CREARY, E. K. *Músculos, provas e funções*. [S.l.]: Editora Manole, 1995.

KÄHLER, K. *A head model with anatomical structure for facial modeling and animation*. Tese (Doutorado) — Universität des Saarlandes, Saarbrücken, Alemanha, Maio 2003.

KÄHLER, K.; HABER, J.; SEIDEL, H.-P. Geometry-based muscle modeling for facial animation. In: *GRIN'01: No description on Graphics interface 2001*. Toronto, Ont., Canada, Canada: Canadian Information Processing Society, 2001. p. 37–46. ISBN 0-9688808-0-0.

LEE, S.-H.; TERZOPOULOS, D. Heads up!: biomechanical modeling and neuromuscular control of the neck. In: *SIGGRAPH '06: ACM SIGGRAPH 2006 Papers*. [S.l.: s.n.], 2006. ISBN 1-59593-364-6.

LEE, Y.; TERZOPOULOS, D.; WALTERS, K. Realistic modeling for facial animation. In: *SIGGRAPH '95: Proceedings of the 22nd annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. [S.l.: s.n.], 1995. p. 55–62.

LUCERO, J. C. et al. Empirical modeling of human face kinematics during speech using motion clustering. *Journal of the Acoustical Society of America*, v. 118, n. 1, p. 405–409, Maio 2005.

LUCERO, J. C.; MUNHALL, K. G. A model of facial biomechanics for speech production. *Journal of the Acoustical Society of America*, v. 106, n. 5, p. 2834–2842, Novembro 1999.

MARTINS, O. M. P. *Olga Pombo Homepage*. [S.l.], 2003. http://www.educ.fc.ul.pt/docentes/opombo/hfe/lugares/naoverbal/expressao_facial.htm.

NOH, J.; NEUMANN, U. *A Survey of Facial Modeling and Animation Techniques*. [S.l.], 1998.

OSTERMANN, J. Face animation in mpeg-4. In: PANDZIC, I. S.; FORCHHEIMER, R. (Ed.). *MPEG-4 Facial Animation - The Standard, Implementation and Applications*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2002. p. 17–40.

PANDZIC, I. S. Facial animation framework for the web and mobile platforms. In: *Web3D '02: Proceeding of the seventh international conference on 3D Web technology*. New York, NY, USA: ACM Press, 2002. p. 27–34. ISBN 1-58113-468-1.

PARKE, F. I. Parameterized models for facial animation. In: . [S.l.]: IEEE Computer Graphics and Applications, 1982. p. 61–68.

PARKE, F. I.; WATERS, K. *Computer Facial Animation*. [S.l.]: A K Peters, 1996.

PLATT, S. M.; BADLER, N. I. Animating facial expressions. In: *SIGGRAPH '81: Proceedings of the 8th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. New York, NY, USA: ACM Press, 1981. p. 245–252. ISBN 0-89791-045-1.

POCKAJ, R. *Roberto Pockaj's Home Page*. Disponível em: <http://www.dsp.dist.unige.it/pok/>, Acesso em: 26 de agosto de 2005.

SEDERBERG, T. W.; PARRY, S. R. Free-form deformation of solid geometric models. In: *SIGGRAPH '86: Proceedings of the 13th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. [S.l.: s.n.], 1986.

SKALAK, R.; CHIEN, S. Skin mechanics. In: MCGRAW-HILL (Ed.). *Handbook of Bioengineering*. [S.l.]: Y. Lanir, 1987. p. 11.1–11.25.

SOBOTTA, J. *Atlas de Anatomia Humana*. [S.l.]: Guanabara Koogan, 2000.

SPENCE, A. P. *Anatomia humana básica*. [S.l.]: Manole, 1991.

TERZOPOULOS, D.; WATERS, K. Physically-based facial modelling, analysis, and animation. *The Journal of Visualization and Computer Animation*, v. 1, n. 2, p. 73–80, Março 1990.

UZ, B.; GÜDÜKBAY, U.; ÖZGÜÇ, B. Realistic speech animation of synthetic faces. In: *CA '98: Proceedings of the Computer Animation*. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 1998. p. 111. ISBN 0-8186-8541-7.

WATERS, K. A muscle model for animation three-dimensional facial expression. In: *SIGGRAPH '87: Proceedings of the 14th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. [S.l.: s.n.], 1987. p. 17–24. ISBN 0-89791-227-6.

_____. Topic outline for facial animation tutorial. In: *SIGGRAPH '90: state of the art in facial animations*. Course Notes 26: ACM Press, 1990.