NAIST-IS-MT0751096

修士論文

眼筋モデルを用いた
視線方向に基づく眼瞼アニメーションの生成

原田　甫

2009年 2月 5日

奈良先端科学技術大学院大学
情報科学研究科 情報処理学専攻

本論文は奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科に
修士 (工学) 授与の要件として提出した修士論文である。

原田　甫

審査委員：

千原 國宏 教授　　（主指導教員）
湊 小太郎 教授　　（副指導教員）
眞鍋 佳嗣 准教授　（副指導教員）
池田 聖　助教　　（副指導教員）

眼筋モデルを用いた
視線方向に基づく眼瞼アニメーションの生成*

原田　甫

内容梗概

映画，ゲームなどのアプリケーションにおける顔表情のアニメーションでは，目周辺の表現がその写実性に大きく関与するため重要である．眼球運動と眼瞼の変形は眼筋を介して連動しているが，従来これらの動きは独立に扱われていたため，生成される顔表情に違和感が生じる問題があった．

本研究は眼筋モデルにより視線方向に応じて眼瞼形状が変形する写実性の高い顔表情アニメーションを生成することを目的とする．眼瞼部の変形のために，筋肉パラメータと呼ばれる筋力の強度を入力とし，筋力周辺の変形を出力とするWatersの線形筋モデルを拡張し，眼筋構造に即した眼筋モデルを構築する．線形筋モデルは影響範囲内にあるすべての頂点が同一方向に変位するが，眼筋モデルは眼瞼板によって，形状をある程度保持した状態で変形するという眼瞼の特性を考慮し，頂点の座標によって変位方向を変化させる．眼球の回転角と眼瞼部上の特徴点の変位量を関連付け，視線方向を入力とした眼瞼部のアニメーションを自動生成する．本論文では，提案手法を用いた実験を行い，眼筋モデルを用いた視線方向と眼瞼の連動が顔表情アニメーションの写実性の向上に有効であることを確認した．

キーワード

コンピュータグラフィックス，顔表情アニメーション，筋肉モデル，眼筋構造

* 奈良先端科学技術大学院大学　情報科学研究科　情報処理学専攻　修士論文，NAIST-IS-MT0751096, 2009年2月5日.

Generation of Eyelid Animation along with Eye Movement Based on Eye Muscle Model*

Hajime Harada

Abstract

On facial animations for applications like movies and video games, expressions around eyes are important for theirs reality. Anatomically, eye movements and deformations of eyelids are synchronized by the eye muscle structure, but both have been treated independently in the past researches.

In this research, we aim to generate more real facial animations to model the eye muscle structure clarified in the anatomy, and to model the skin geometry variation associated with eye direction. For generation of eyelid animations, the eye muscle model, obtained to expand the Waters' linear muscle model, is inserted to palpebral part of the CG facial model. To associate the rotating angle of eyeball with the muscle's ratio of expansion and contraction, the eyelid animations are generated automatically using eye directions as inputs. The proposed method was implemented and succeeded to generate facial animations with synchronization of eye directions and eyelids deformations.

Keywords:

computer graphics, facial animation, muscle model, eye muscle structure

* Master's Thesis, Department of Information Processing, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, NAIST-IS-MT0751096, February 5, 2009.

目 次

第 1 章　緒論 **1**

第 2 章　研究背景 **4**

2.1. 視線方向と顔表情 4

2.2. 顔表情アニメーション 5

2.3. 顔表情アニメーションと視線方向 9

2.4. 本研究の位置づけ 10

第 3 章　眼瞼アニメーションの生成 **13**

3.1. 眼筋構造 13

3.2. 眼筋構造のモデル化 14

3.3. Waters の線形筋モデル 15

3.3.1　特徴点の変位を用いた筋肉パラメータの算出 16

3.4. 眼筋モデル 17

3.4.1　特徴点の変位を用いた筋肉パラメータの算出 19

3.5. 眼瞼と視線方向の関連付け 19

第 4 章　実験 **21**

4.1. 実験用システムの構築 21

4.1.1　顔ポリゴンモデル 21

4.1.2　筋肉モデルの設定 22

4.1.3　実行環境 22

4.2. 筋肉パラメータと眼球回転角の関連付け 24

4.3. 眼瞼アニメーションの生成 25

4.4. 結果 26

4.5. 考察 31

第 5 章　結論 **32**

謝辞 **33**

参考文献 **34**

図 目 次

1.1 Image-based Facial Animation for “ The Matrix Reloaded ” . . . 2

2.1 The Faces of ”The Polar Express” 5
2.2 顔の 3 次元モデルに基づく表情の記述と合成 8
2.3 A Muscle Model for Animating Three-dimensional Facial Expression 11
2.4 Eyes Alive 11
2.5 High-Fidelity Avatar Eye-Representation 12

3.1 眼筋構造 13
3.2 眼筋による眼球運動と眼瞼部の連動の仕組み 14
3.3 眼球運動からの眼瞼部変位の推定 15
3.4 モデル化の概要 15
3.5 線形筋モデル 17
3.6 眼筋モデル 18

4.1 顔ポリゴンモデルの作製 22
4.2 Waters の線形筋モデルの実装 23
4.3 眼筋モデルの実装 23
4.4 眼瞼部の特徴点 24
4.5 眼瞼部特徴点の変位量の計測 25
4.6 視線方向:上方 15 ° 27
4.7 視線方向:下方 15 ° 28
4.8 視線方向:上方 7.5 ° 29
4.9 視線方向:下方 7.5 ° 30

表 目 次

2.1 AU(Action Unit) 7

4.1 実行環境 24
4.2 眼瞼部特徴点の変位量 (鉛直成分) 26

第1章　緒論

コンピュータグラフィックス (CG) による人体の写実的な表現は様々な分野から望まれており，特に顔の表情に関しては CG の発展当初から，重要課題のひとつとして位置づけられ，多くの研究がなされてきた [1][2]．最先端の CG 研究の成果が応用される分野として代表的なのは映画である [3](図 1.1)．現在では実写との合成はもちろんのこと，映像すべてが CG で制作された作品も珍しくない．映画における CG はオフライン計算が可能であり，計算コストよりも品質が重要視される．その一方で，ゲームやインタラクティブコンテンツといった分野においては，実時間での計算が必要不可欠であるため，品質と共に計算コストの削減が重要である．顔表情アニメーションの研究においては，品質を重視し高精度のシミュレーションを行うもの，ある程度の品質を保ちながら計算時間の短縮を図るものなど，その用途に合わせて多角的なアプローチがなされている [4][5]．

また，人間はコミュニケーション時において，言語情報の他に，ノンバーバル情報を用いることはよく知られており，とりわけ複雑なコミュニケーション時においては，ノンバーバル情報が相対的に重要な役割を果たしている [6]．中でも顔表情と視線方向は，感情などの感性情報を話者に伝達する機能を持ち，とりわけ重要である [7]．顔表情と視線方向には，解剖学的見地から関連性があることが示されているが [8]，物理的なモデル化がされておらず，CG による顔表情の研究においても，両者の関連を反映するものは類がない．実際の CG アニメーション制作において，様々な顔表情アニメーションに関する研究結果が手法として用いられているが，CG キャラクタの視線方向と顔表情の同期は，制作者の手作業によるところが大きく，その自動化によって作業時間の短縮が見込まれる．

本研究は，眼筋モデルによって視線方向に応じた眼瞼形状の変形を表現し，写実性の高い顔表情アニメーションを生成することを目的とする．眼瞼アニメーショ

図 1.1 Image-based Facial Animation for “ The Matrix Reloaded ”

ンの生成のために，従来広く用いられている Waters の線形筋モデル [9] を拡張し，眼筋構造に即した眼筋モデルを構築する．線形筋モデルは頂点変位の影響範囲内にあるすべての頂点の変位方向が同一であり，その移動量は線形筋モデルの導入点との距離に依存し，各頂点は滑らかに変位する．しかし，眼瞼部内には眼瞼板と呼ばれる板状の組織が存在するため，眼瞼部はある程度形状を保持したまま変位するという特徴があり，また変位は眼球に沿った方向に発生する．表情筋を想定して作られた線形筋モデルではこれらの特徴を表現するのは困難である．眼筋モデルは眼瞼板の構造を考慮し，領域によって変位方向を変化させ，また眼球に沿った曲線方向へに変位させることで眼瞼部の挙動を写実的に表現する．眼球の回転角と眼瞼部変位量を関連付けることで，視線方向の変化に応じて眼瞼部のアニメーションが自動的に生成される．

本論文の構成は，2 章で顔表情アニメーション，顔表情と視線方向に関する先行研究を紹介するとともに本研究の位置づけを述べる．3 章では，解剖学的に明らかにされている眼球周辺の筋肉構造を元に，提案する眼筋モデルの詳細を示し，

視線方向に応じた眼瞼アニメーション生成の手法について述べる．4 章では提案手法の有効性を検証するために行った実験とその結果を述べるとともに結果について考察し，5 章で総括を行う．

第2章　研究背景

本章では，本研究の背景について述べる．2.1 節では顔表情と視線方向の重要性と両者の関連性示し，2.2 節では顔表情アニメーションの生成手法に関する先行研究を，2.3 節では視線方向を交えた顔表情アニメーションに関する研究を紹介する．それらを踏まえて，2.4 節において本研究の位置づけを行う．

2.1. 視線方向と顔表情

人間はコミュニケーションにおいて，言葉や文字などの言語情報だけでなく，視線方向や顔表情，ジェスチャーなどのノンバーバル情報を利用している [6]．心理学の分野の研究では，人間は迅速かつ正確に他者の顔が発する情報を処理する機能を持つことが示されている [10]．殊に顔表情に関しては，怒り，悲しみ，驚きなどの基本的なカテゴリに分類されることが多いが，実際は，意図的に作られたものもあれば自発的に表出されたものもあり，同じカテゴリー内でもさまざまな種類に分類できるほど多様かつ微妙なもので，人はコミュニケーションを行う際に，より粒度の細かな分類を行っている [11][12]．また一方で吉川らは，人間の顔の知覚において，顔表情と視線方向が相互作用して解釈されることを明らかにした [7] これは，人間が表情，視線方向を含めた「顔」に対して非常に高い関心を持つことを示しており，CG における顔においても，その再現性が重要であると考えられる．

また，解剖学的な見地からは，眼球運動，すなわち視線方向をつかさどる眼筋は眼瞼部の挙動にも関与しており，両者は連動することが示されている [8]．眼筋の構造については第 3 章でその詳細を述べる．

これらより，視線方向と顔表情の連動は顔表情アニメーションの写実性に大き

く関与するものと考えられるが，両者の関連性をモデル化した研究は稀有である．

2.2. 顔表情アニメーション

CG による顔表情アニメーションは主に，顔ポリゴンモデルの幾何学的な変形によって表現される．すなわち，ポリゴンモデルの各頂点の変位をいかに行うかが，アニメーションの写実性を決定する大きな要素であると言える．

人間の動作や表情を直接 CG キャラクタの動作に反映させる手法としてモーションキャプチャシステムが挙げられ [13]，ゲームや映画制作において頻繁に利用されている [14][15]．図 2.1 は映画「The Polar Express」のモーションキャプチャの様子である．アクターの顔表面の特徴点に光学式マーカを配置し，様々な顔表情に対してその変位を計測して CG キャラクタを構成する顔ポリゴンモデルの頂点変位に反映させる．

図 2.1 The Faces of ”The Polar Express”

しかしながら，実際の制作現場ではマーカ移動量の計測により各種のモーションを収集した後，キャラクタの動きに反映させるめに手作業による多大なポスト処理が必要となる．顔表情のモーションキャプチャにおいても，顔面に配置できるマーカの数には限界があるため，マーカを配置していない部分に関しては，補間によって実現せざるを得ない．また，瞼や唇などの表現の繊細な部分に関しては，モーションキャプチャによる効果は発揮されずこれらはの動作は制作者の主観によって手動で動作を与えているのが現状である．

一方で，パラメータの操作や顔表情の組み合わせなどで表情合成，顔表情アニメーションの生成を行うのための研究も数多くなされてきており，その成果の一つとして代表的に挙げられるのが，Ekman らによって開発された AU(Action Unit) の概念に基づく FACS(Facial Action Coding System) である [16]．AU は「人間の視覚機能で識別可能な顔表情動作の最小単位」として定義され，解剖学的な特性とは独立したものである．AU を表 2.1 に示す．FACS は AU の組み合わせで顔表情を表現する手法であり，少数のパラメータ操作から様々な顔表情を表現することが可能であることから，計算量が少なく，対象となる顔が異なっても同じパラメータの適用で同等の変化を得られるという利点があり，現在でも表情合成システムの構築に広く利用されている．図 2.2 は FACS を用いた表情合成の例である [17]．しかしこういった利点の一方，AU はそのほとんどが静的な形状変化の記述であり，FACS で表現できる表情は静的なものに留まり，動的な表情変化の描写はできないという問題がある．その他，AU は様々な顔表情から主観的に人間が分類・定義したものであるために，合成された顔表情はどこか人工的で不自然な印象を与える．また，AU の組み合わせによってはどんな感情を表しているのか読み取りにくくなる，解剖学的に取り得ない動きの組み合わせとなる，といった複数感情の合成に対する障害も存在する．これは AU を用いた合成手法のみでは，基本 6 表情 (怒り，嫌悪，恐怖，幸福，悲しみ，驚き)[10] のような特徴的な顔表情以外の微妙な表情リアリティにおいて限界があることを示している．

表 2.1 AU(Action Unit)

AU No.	AU の内容	AU No.	AU の内容
1	眉の内側を上げる	24	唇を押しつける
2	眉の外側を上げる	25	顎を下げずに唇を開く
4	眉を下げる	26	顎を下げて唇を開く
5	上瞼を上げる	27	口を大きく開く
6	頬を持ち上げる	28	唇を吸い込む
7	瞼を緊張させる	29	下顎を突き出す
8	唇を互いに接近させる	30	顎を左右にずらす
9	鼻にしわを寄せる	31	歯を食いしばる
10	上唇を上げる	32	唇を噛む
11	鼻唇溝を深める	33	息を吹きかける
12	唇両端を引上げる	34	頬を膨らます
13	唇を鋭く引上げる	35	頬を吸い込む
14	えくぼを作る	36	舌で頬や唇を膨らます
15	唇両端を下げる	37	唇を舐める
16	下唇を下げる	38	鼻孔を開く
17	オトガイを上げる	39	鼻孔を狭める
18	唇をすぼめる	41	上瞼を下げる
19	舌を見せる	42	薄目にする
20	唇両端を横に引く	43	閉眼する
21	首を緊張させる	44	細目にする
22	唇を突き出す	45	まばたく
23	唇を固く閉じる	46	ウィンクする

※ No.3 と No.40 は欠番

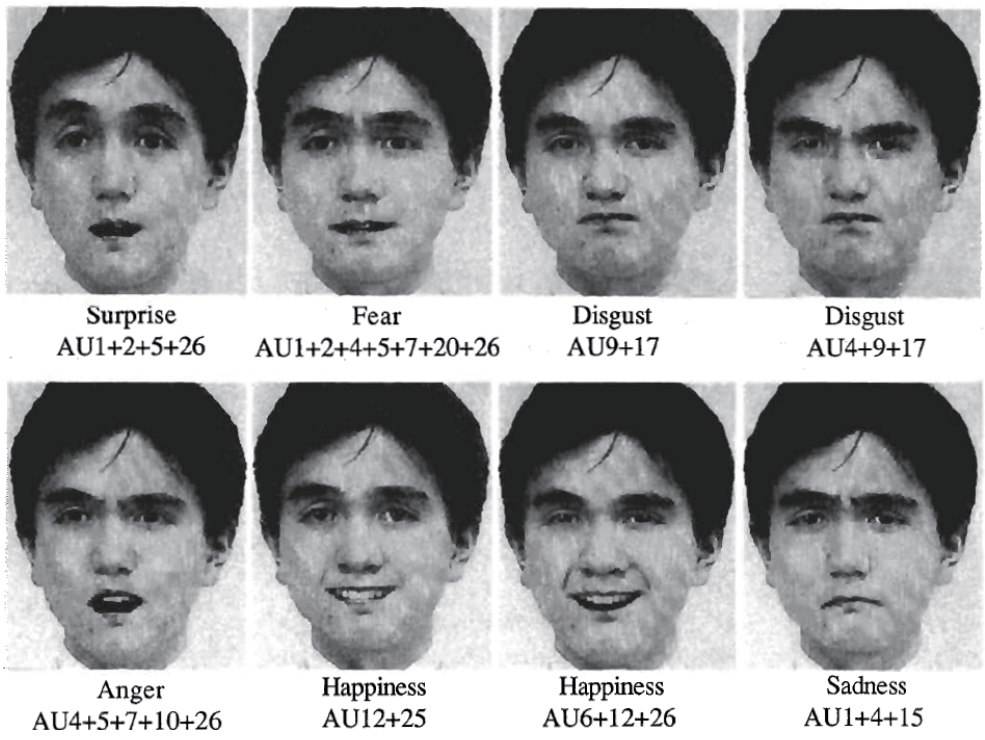


図 2.2 顔の 3 次元モデルに基づく表情の記述と合成

FACS では描写ができないとされる動的な表情変化を表現するために考案されたのが筋肉モデルを用いる手法である．その代表的なものとして Waters のモデルが挙げられる [9]．Waters は，顔の表情変化をつかさどる表情筋を模した筋肉モデルを構築し，これを用いることで，静的な記述である AU を補間し，動的な表情変化を表現した．図 2.3 は筋肉モデルによって表情変化した顔 CG である．筋肉モデルは，筋肉の収縮や弛緩によって引き起こされる皮膚表面の移動を模擬することによって，顔ポリゴンモデルで示された皮膚表面のポリゴン頂点の移動方向や，移動量を算出し，一端が骨に付着し，もう一端が皮膚に付着している線状の筋肉をモデル化した線形筋モデルと，皮膚との接点を持たない環状の筋肉をモデル化した括約筋モデルがある．筋肉モデルに関する詳細は第 3 章で述べる．Waters のモデルは現在も多くの顔表情生成の研究に応用されている [5][18]．前述のモーションキャプチャによって顔特徴点の変位を計測し，特徴点以外のポリゴン頂点の変位を Waters の筋肉モデルを用いて補間したもの [19][20] や，筋肉モデ

ルの他，皮膚，皮下脂肪，頭蓋の各モデルで階層構造を構成し，顔面の加齢をシミュレーションしたもの [21]，皮膚構造を考慮し，筋肉モデルによる変形でシワを生成するもの [22][23] などその用途は多岐におよび，汎用性が高いことが認められる．しかしながら，Waters の筋肉モデルは皮膚表面近くに存在する表情筋のみに焦点を当てており，眼球運動や眼瞼の変形をつかさどる眼筋は一切考慮されていない．Waters の研究を基礎とした数多くの顔表情関連研究においても同様に，眼筋に着目し，眼球運動と皮膚構造変形の関連をモデル化したものは見られない．これは，Waters の筋肉モデルが，前述の AU を基本として構成され，顔表情のみに焦点が当てられることに起因する．

2.3. 顔表情アニメーションと視線方向

視線方向と顔表情の両者に注目した数少ない研究に Lee らの研究がある [24]．Lee らは二者間の対面コミュニケーション時の視線方向の計測を行うことで，不随意状態における注視時間，注意方向の分布，眼球の回転速度などの眼球運動モデルを作成し，顔表情のモーションとの合成によって顔表情アニメーションの生成を行った (図 2.4)．モデルは高速な眼球運動であるサッカードの特性に焦点を当て，心理学および認知科学の先行研究によって示された眼球運動に関する知見と一致するものであった．しかし，Lee らの研究は主に計測結果に根ざした実際の眼球運動モデルを構築することを主な目的としており，顔表情のモーション計測はモデルの精度をあげるという補足的意味合いが強く，また顔表情と視線方向の同時計測は行われておらず，両者の関係を示していない．

また，これらとは異なるアプローチとして，視線方向と眼瞼部の形状変化の連動が人間の知覚に与える，CG キャラクタのリアリティに対する効果の検証がなされている．Steptoe らは，視線方向に伴って眼球周辺の皮膚の形状を変化させるアバタを作成し (図 2.5)，視線方向と眼瞼部の形状変化の連動が，視線方向の知覚精度に与える影響を評価した [25]．視線方向と皮膚の形状変化に関連を与えることで，被験者はより正確にアバタの視線方向を識別できることを確認し，アバタのリアリティにおけるその有用性を示した．しかしながら，アバタは既存の

3 次元 CG，モーションの作成ソフトを用いて制作されており，視線方向と皮膚形状の変化をモデル化したものではない．

2.4. 本研究の位置づけ

眼筋構造に着目し，視線方向と眼瞼部の連動を表現した顔表情アニメーションを生成する手法は確立されていない．本論文では，眼筋構造をモデル化し，視線方向と眼瞼部の挙動を関連付けることで，視線方向を入力としたより写実的な顔表情アニメーションを自動生成する手法を提案する．

図 2.3 A Muscle Model for Animating Three-dimensional Facial Expression

図 2.4 Eyes Alive

図 2.5 High-Fidelity Avatar Eye-Representation

第3章　眼瞼アニメーションの生成

本章では，視線方向と連動した眼瞼アニメーション生成のための手法について述べる．提案手法では，Waters の線形筋モデルを拡張した眼筋モデルを構築し，眼瞼部の形状と眼球の回転角を関連付けることにより，眼筋アニメーションを生成する．

3.1. 眼筋構造

本研究で取り扱う眼筋は，上直筋と上眼瞼挙筋，下直筋，下瞼板筋である．図 3.1 に眼筋構造の概略図を示す．

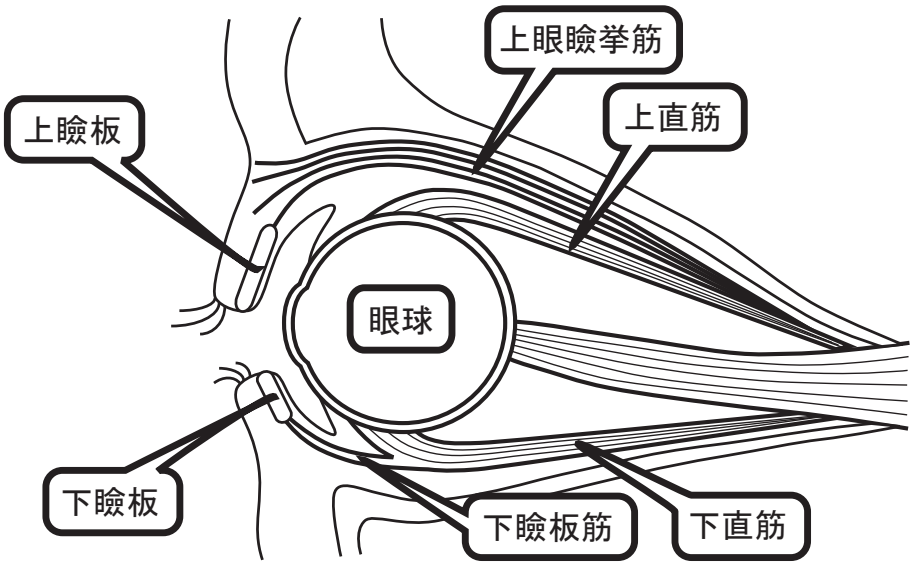


図 3.1　眼筋構造

上直筋と下直筋は，両端が頭蓋と眼球の上部，下部に付着し，収縮と弛緩によっ

て眼球の上下方向への回転を発生させる．上眼瞼挙筋は，頭蓋と上瞼板に付着しており，上瞼の上下動の起因となる．下瞼板筋は下直筋から派生して下瞼板に付着し，下瞼を上下させる．

また，これらの眼筋は動眼神経による支配を受け，動眼神経上枝により上直筋と上眼瞼挙筋，動眼神経下枝によって下直筋と下瞼板筋の各組の伸縮が連動するように神経信号を受け取る．上直筋，下直筋は上下方向の眼球回転を発生させ，上眼瞼挙筋と下瞼板筋は上下瞼の変位を引き起こすため，これらの眼筋は眼球運動と眼瞼部の形状変化の連動をつかさどる．図 3.2 に連動の概略を示す．

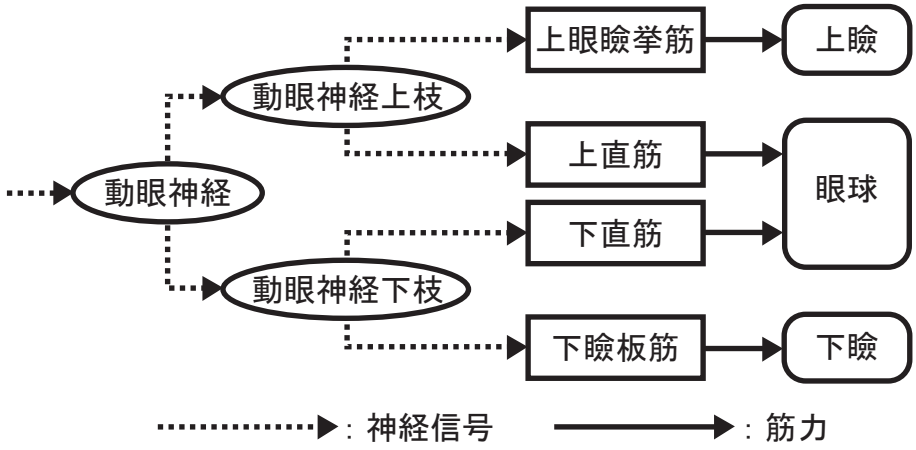


図 3.2 眼筋による眼球運動と眼瞼部の連動の仕組み

また眼瞼部の変位は，上眼瞼挙筋，下瞼板筋の伸縮によって，眼瞼の内部に存在する上下の瞼板が移動することにより発生する．そのため，眼瞼部は瞼板の影響を受け，ある程度形状を保持したまま変位するという特性を持つ．

3.2. 眼筋構造のモデル化

前節，図 3.2 で示した通り，眼球運動と眼瞼部の連動は動眼神経による，神経信号によって引き起こされる．よって入力を眼球の回転角としたとき，図 3.3 に示す経緯で眼瞼部の変位量が推定される．しかしながら，動眼神経の神経信号と眼筋筋力を正確に計測することは困難である．

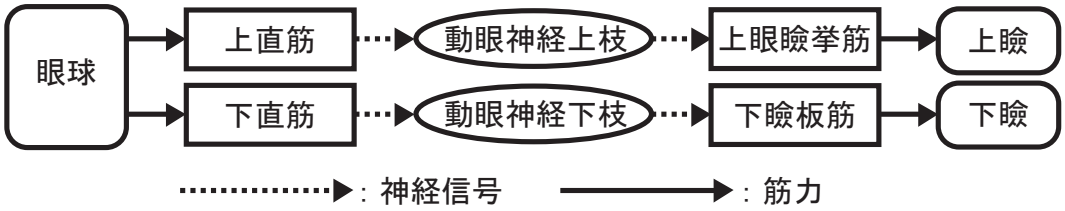


図 3.3 眼球運動からの眼瞼部変位の推定

そこで本研究では図 3.4 に示す通り，眼球の回転角と眼瞼部変位の関連を筋肉パラメータに置き換えることで眼筋構造をモデル化する．眼瞼部の変形には Waters の線形筋モデルを拡張した眼筋モデルを構築し，これを用いる．眼筋モデル，筋肉パラメータに関しては後節に詳細を示す．

図 3.4 モデル化の概要

3.3. Waters の線形筋モデル

Waters の線形筋モデルは多くの関連研究で使用されている顔表情アニメーションに適した簡易モデルで，筋力によって顔モデルの各頂点の変位が関数によって与えられる図 3.5 にその概念図を示す．線形筋モデルは指定された影響範囲 (扇形 V_1-$P_\mathrm{r}P_\mathrm{s}$ 内) を持ち，筋肉の両端点 (V_1,V_0) は固定される．影響範囲内の任意の頂点 P は与えられた関数により，V_1 方向に移動する．各頂点の変位$\boldsymbol{d}$ は以下の式で与えられる．

$$\boldsymbol{d} = P - P' = k \cdot a \cdot r \cdot \frac{PV_1}{|\,PV_1\,|} \tag{3.1}$$

上式における a は円周方向への影響強度を示すパラメータであり，

$$a = \cos(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{a_2}{a_1}) \tag{3.2}$$

で表される．a_2 は V_1V_0 と V_1P のなす角である．また，r は放射方向への影響強度を示すパラメータで，

$$r = \begin{cases} \cos\left(\frac{\pi}{2} \cdot \left(1 - \frac{|PV_1|}{R_\mathrm{s}}\right)\right) & P \in \text{領域}\,(V_1 - P_\mathrm{m}P_\mathrm{n}) \\ \cos\left(\frac{\pi}{2} \cdot \left(\frac{|PV_1| - R_\mathrm{s}}{R_\mathrm{f} - R_\mathrm{s}}\right)\right) & P \in \text{領域}\,(P_\mathrm{m}P_\mathrm{n}P_\mathrm{r}P_\mathrm{s}) \end{cases} \tag{3.3}$$

で示される．つまり線形筋モデルによる頂点の変位は，角 a_2 が小さいほど大きく，また頂点 P が弧 $P_\mathrm{m}P_\mathrm{n}$ に近いほど大きくなる．また，領域 $(P_\mathrm{m}\ P_\mathrm{n}\ P_\mathrm{r}\ P_\mathrm{s})$ において，変位の減衰が開始，終了する．

線形筋モデルを決定するのに必要なパラメータは，端点 V_1，V_0，の座標，影響範囲 a_1 の角度，変位の減衰領域を定める R_s，R_f ですべて適用する顔モデルの構造に依存して決定する．頂点 P が定まれば各パラメータ a_2，r が決定し，未知であるのは筋肉パラメータ k のみである．つまり筋肉パラメータ k の推定ができれば線形筋モデルによる各頂点の変位が確定する．

3.3.1 特徴点の変位を用いた筋肉パラメータの算出

筋肉パラメータは顔表面上の特徴点の変位を利用することで算出できる．線形筋モデルにおける円周方向，放射方向の影響強度を表すパラメータがそれぞれa_t，r_t である特徴点P_tの変位$\boldsymbol{d}_t$を用いると，この際の筋肉パラメータk_tは式 3.1 の変形から，

$$k_t = \frac{|\ \boldsymbol{d}_t\ |}{a_t \cdot r_t} \tag{3.4}$$

で算出できる．筋肉パラメータが求められれば，同一の線形筋モデルの影響範囲にあるすべての頂点の変位は一意に決定する．

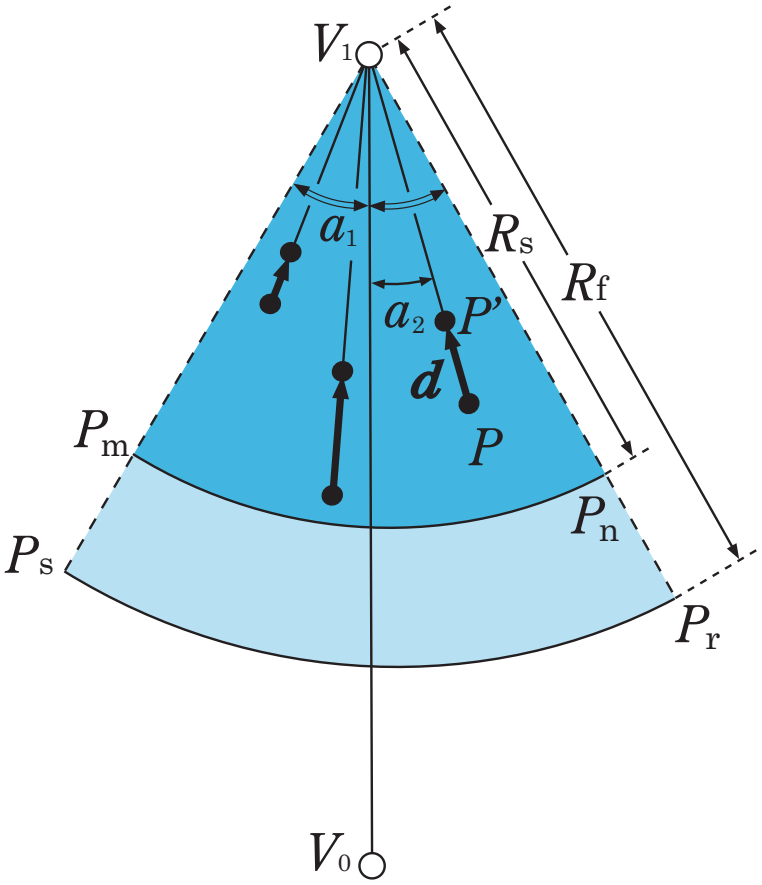


図 3.5　線形筋モデル

3.4. 眼筋モデル

本研究では前述の線形筋モデルを拡張した眼筋モデルを作成，使用する．線形筋モデルは表情筋での使用を前提としているため，眼筋による変形を扱う本研究には適さない．図 3.1 で示したとおり，眼瞼部には瞼板があり，これを筋肉が引くことで変形が起こる．よって，影響範囲内にあるすべての頂点を一点方向に引く線形筋モデルを，瞼板によって瞼部形状がある程度保持されるように拡張する．図 3.6 に眼筋モデルの概念図を示す．

眼筋モデルは二重の楕円体構造の影響範囲を持ち，任意の頂点の変位は以下の

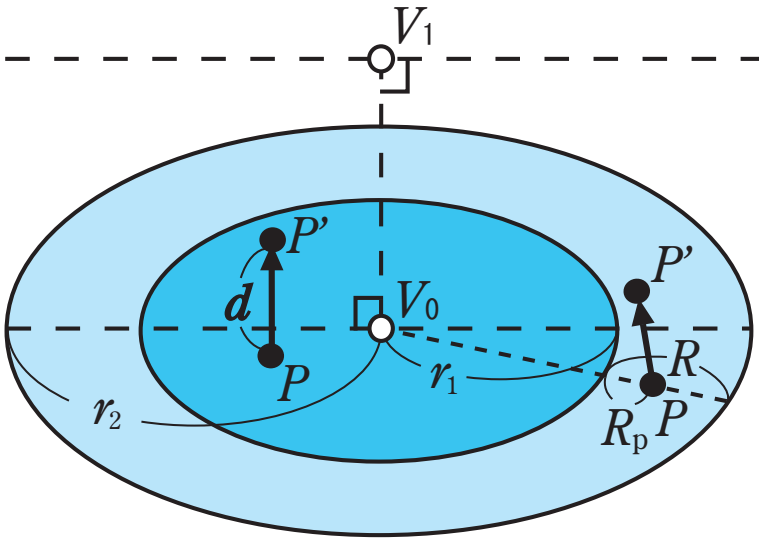


図 3.6 眼筋モデル

式で与えられる．

$$\boldsymbol{d} = k \cdot a \cdot \boldsymbol{v} \tag{3.5}$$

上式における a は変位量を示すパラメータで，

$$a = \begin{cases} 1 & P \in \text{内側楕円体} \\ \cos(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{R_\mathrm{p}}{R}) & P \in \text{外側楕円体} \end{cases} \tag{3.6}$$

で示される．つまり内側の楕円体内の頂点は一定の変位量を，外側の楕円体内の頂点は外側の楕円体に近くなるにつれて変位が減衰する．$\boldsymbol{v}$は頂点の変位方向を表すパラメータで，

$$\boldsymbol{v} = \begin{cases} \frac{V_0V_1}{|V_0V_1|} & P \in \text{内側楕円体} \\ \frac{V_0V_1}{|V_0V_1|} \cdot \frac{R_\mathrm{p}}{R} + \frac{PV_1}{|PV_1|} \cdot \frac{1-R_\mathrm{p}}{R} & P \in \text{外側楕円体} \end{cases} \tag{3.7}$$

で示される．内側の楕円体内の頂点は一定の方向に変位し，外側の楕円体内の頂

点は外側の楕円体に近くなるにつれて変位方向が内側へ変化する．k は筋肉パラメータで，その扱いは Waters の線形筋モデルと同様である．

3.4.1 特徴点の変位を用いた筋肉パラメータの算出

Waters の線形筋モデルを同様に，眼筋モデルの筋肉パラメータは顔表面上の特徴点の変位から算出できる．眼筋モデルにおける変位量，変位方向を表すパラメータがそれぞれa_t，$\boldsymbol{v}_t$ である特徴点P_tの変位$\boldsymbol{d}_t$を用いると，この際の筋肉パラメータk_tは式 3.5 の変形から，

$$k_t = \frac{\mid \boldsymbol{d}_t \mid}{\mid \boldsymbol{v}_t \mid \cdot a_t} \tag{3.8}$$

で求められる．筋肉パラメータが決定すれば，影響範囲にあるすべての頂点の変位は一意に決まる．

3.5. 眼瞼と視線方向の関連付け

視線方向と眼瞼部形状の連動は，視線方向を眼球の回転角とし，前節で述べた筋肉パラメータとの関連付けによって実現する．筋肉パラメータは特徴点の移動量から算出するが，本研究では，眼瞼上の特徴点の変位を計測し，これを用いる．ある眼球回転角 θ_i に対応する筋肉パラメータ k_i を，眼瞼特徴点の変位$\boldsymbol{d}_i$を計測し，式 3.8 より，

$$k_i = \frac{\mid \boldsymbol{d}_i \mid}{\mid \boldsymbol{v} \mid \cdot a} \qquad (i = 1, 2, \cdots, N) \tag{3.9}$$

で算出することで，N 個の眼球回転角 θ_i に対して各々対応した筋肉パラメータ k_i が得られる．ここで $\theta_i < \theta_t < \theta_{i+1}$ である眼球回転角 θ_t が与えられたとき，対応する筋肉パラメータ k_t は既知の筋肉パラメータ k_i，k_{i+1} による線形補間を行うことで，得られる．

$$k_t = (1 - \frac{\theta_t - \theta_i}{\theta_{i+1} - \theta_i})k_i + \frac{\theta_t - \theta_i}{\theta_{i+1} - \theta_i}k_{i+1} \tag{3.10}$$

k_t が決まれば，眼球回転角が θ_t のときの眼瞼部の変位 d_t は式 3.5 より

$$\boldsymbol{d}_t = k_t \cdot a \cdot \boldsymbol{v} \tag{3.11}$$

で求められる．つまり，$\theta_1 < \theta_2 < \cdots < \theta_N$ とすると，$\theta_1 < \theta_t < \theta_N$ であるすべての眼球回転角 θ_t について補間より眼瞼部の変位$\boldsymbol{d}_t$が得られ，視線方向に依存した眼瞼アニメーションが生成される．

第4章　実験

本章では，提案手法の有効性を評価するため行った実験について述べる．

- 眼筋モデルを眼瞼部に実装した顔ポリゴンモデル
- Waters の線形筋モデルを眼瞼部に実装した顔ポリゴンモデル
- 筋肉モデルを実装していない顔ポリゴンモデル

の 3 つの顔ポリゴンモデルにおいて視線方向を変化させた眼瞼アニメーションの出力を行い，実写と合わせて比較する．

4.1. 実験用システムの構築

4.1.1 顔ポリゴンモデル

実験で使用する顔ポリゴンモデルは，コニカミノルタ社製の非接触三次元デジタイザ VIVID910 を用いて，顔の三次元形状を取得して用いる．本研究では，眼球周辺に特化した眼瞼アニメーションを生成するため，顔の三次元形状のうち，眼の周辺を切り出す．切り出した三次元形状に顔のテクスチャをマッピングし，別途作製した眼球のポリゴンモデルをと合成して，これを顔ポリゴンモデルとして使用する (図 4.1)．顔ポリゴンモデルの眼瞼部は，視線が水平方向の状態，すなわち眼球の回転角が 0 °の状態である．顔ポリゴンモデルの頂点数は約 3 万点である．

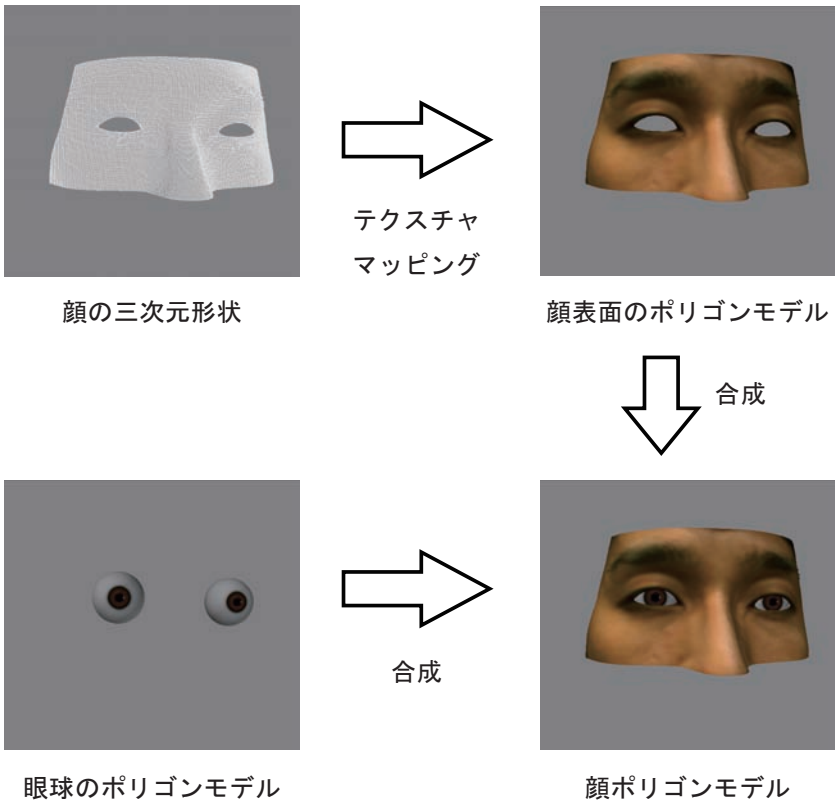


図 4.1 顔ポリゴンモデルの作製

4.1.2 筋肉モデルの設定

前章で示した Waters の線形筋モデル，眼筋モデルを図 4.2，4.3 に示す通り，各々顔ポリゴンモデルの眼瞼部 4 点に配置する．図中の青で示されているのが，前章で述べた各筋肉モデルの影響範囲，赤い点が端点である．前節で述べた通り，両筋肉モデルとも筋肉パラメータを除く各パラメータは顔ポリゴンモデルの形状に依存するため，手動で与える．

4.1.3 実行環境

実験を行ったコンピュータ環境およびソフトウェア環境を表 4.1 に示す．

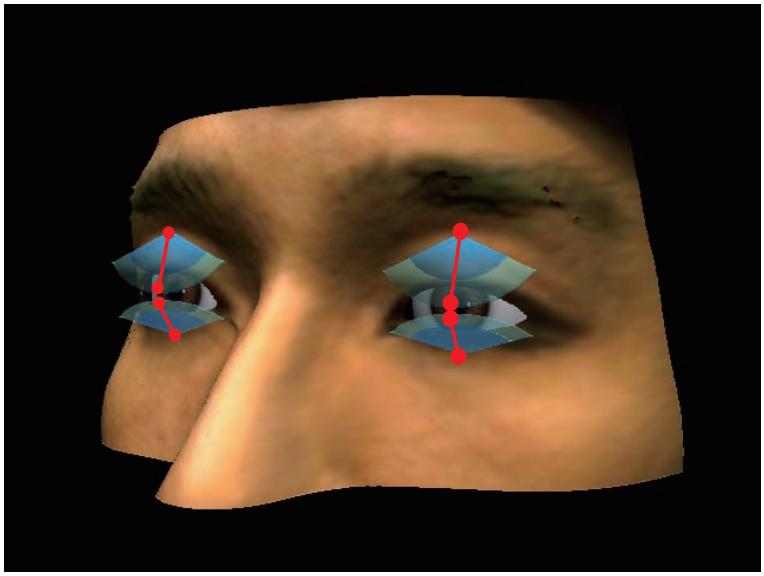


図 4.2 Waters の線形筋モデルの実装

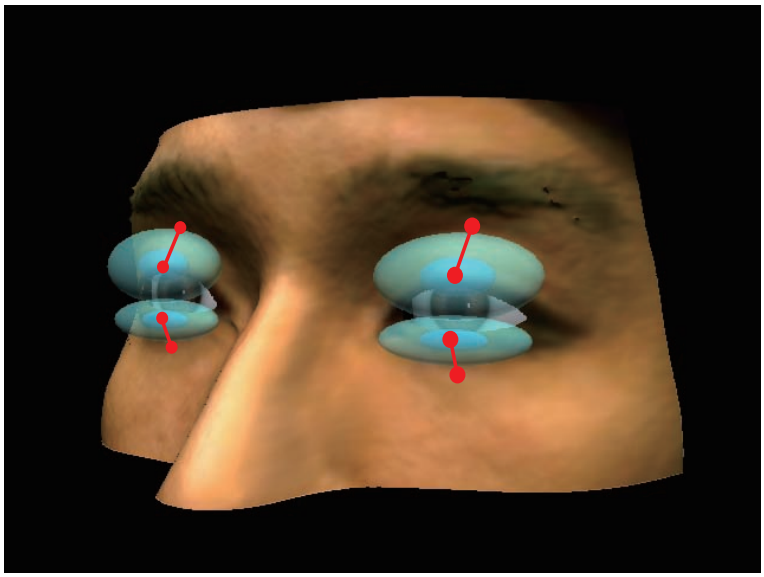


図 4.3 眼筋モデルの実装

表 4.1 実行環境

CPU	Intel Pentium M processor 2.00GHz
メモリ	510MB
GPU	ATI MOBILITY RADEON X300
GPU メモリ	128MB
OS	Microsoft Windows XP
プログラミング言語	C/C++
コンパイラ	Microsoft Visual Studio .NET 2003
Graphics API	OpenGL

4.2. 筋肉パラメータと眼球回転角の関連付け

筋肉パラメータと眼球回転角の関連付けに計測結果を用いるため，眼瞼部特徴点の変位量を計測した．計測対象となる眼瞼部の特徴点は左右の上眼瞼，下眼瞼の先端部である (図 4.4)．計測は頭部を固定し，眼球回転角が 0 °，上方 15 °，下

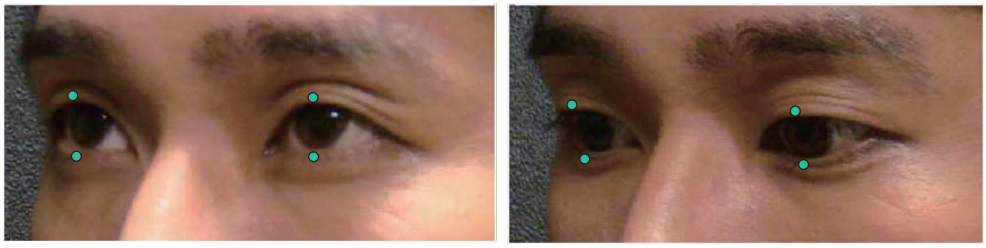


図 4.4 眼瞼部の特徴点

方 15 °の 3 通りの場合の顔画像をカメラで取得し，それらの差分より各特徴点の鉛直方向の変位量を計算する．計測環境を図 4.5 に示す．なお，計測前には眼瞼部の位置にキャリブレーションボードを配置し，カメラによる計測画像のピクセルと長さを対応付けた．計測結果は表 4.2 の通りである．眼球回転角は上方回転を，変位は鉛直上向きを正とする．この結果を用いて 3.3 節で示したとおり，眼瞼と視線方向を関連付ける．各筋肉モデルは，顔ポリゴンモデルに実装した段階ですべての頂点の変位方向は決定しているため，計測した特徴点に対応する顔ポリゴンモデルの頂点の鉛直方向の変位量を与えることで筋肉パラメータが求めら

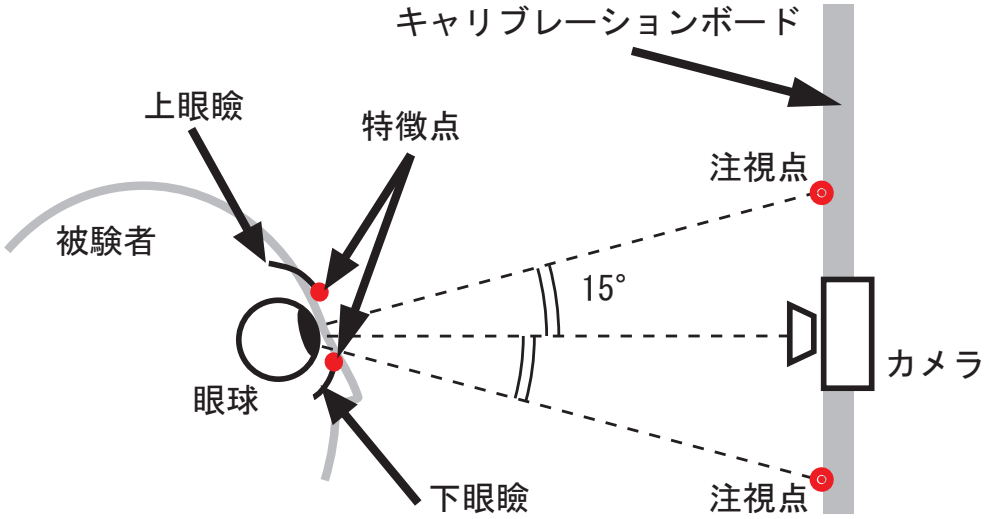


図 4.5 眼瞼部特徴点の変位量の計測

れ，すべての頂点の変位量も決定する．

4.3. 眼瞼アニメーションの生成

眼瞼と視線方向を関連付けた各顔ポリゴンモデルに眼球回転角を与えることで眼瞼アニメーションを生成する．顔ポリゴンモデルは

- 眼筋モデルを眼瞼部に実装した顔ポリゴンモデル
- Waters の線形筋モデルを眼瞼部に実装した顔ポリゴンモデル
- 筋肉モデルを実装していない顔ポリゴンモデル

の 3 種類である．与える視線方向は，計測結果を直接反映させた上方 15 °，下方 15 °と，補間を用いる上方 7.5 °，下方 7.5 °の 4 方向である．視線方向は顔ポリゴンモデルの眼球を直接回転させることで表現する．

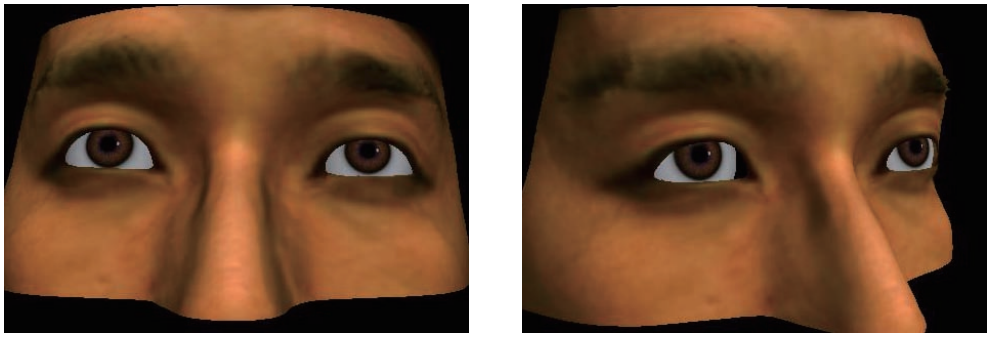
表 4.2 眼瞼部特徴点の変位量 (鉛直成分)

眼球回転角	左上眼瞼	右上眼瞼	平均値
15 °	1.8mm	2.1mm	1.9mm
-15 °	-2.9mm	-3.0mm	-3.0mm

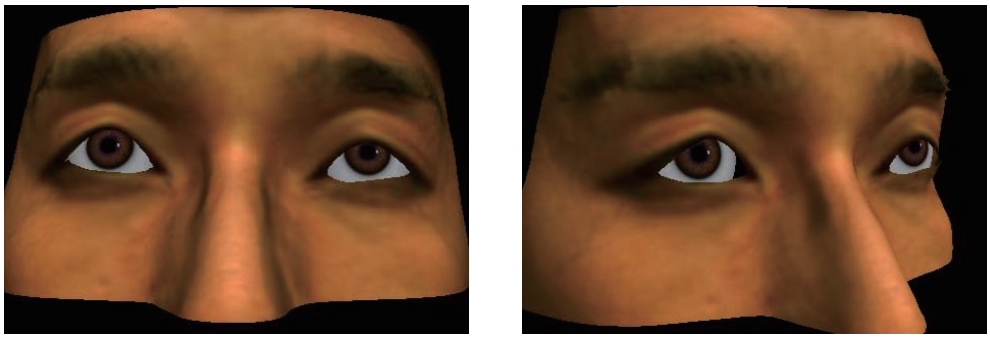
眼球回転角	左下眼瞼	右下眼瞼	平均値
15 °	1.2mm	0.8mm	1.0mm
-15 °	-1.5mm	-1.4mm	-1.4mm

4.4. 結果

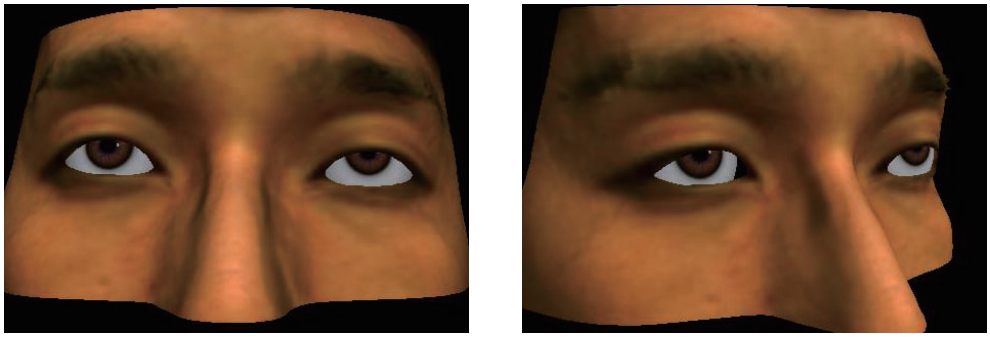
結果画像を以下に示す．図 4.6，4.7 は計測した値を元に筋肉パラメータを直接算出した，眼球回転角が上方，下方 15 °の各顔ポリゴンモデルと実画像，また図 4.8，4.9 は筋肉パラメータを補間して得られた，眼球回転角が上方，下方 7.5 °の各ポリゴンモデルと実画像である．



眼筋モデルを実装した顔ポリゴンモデル



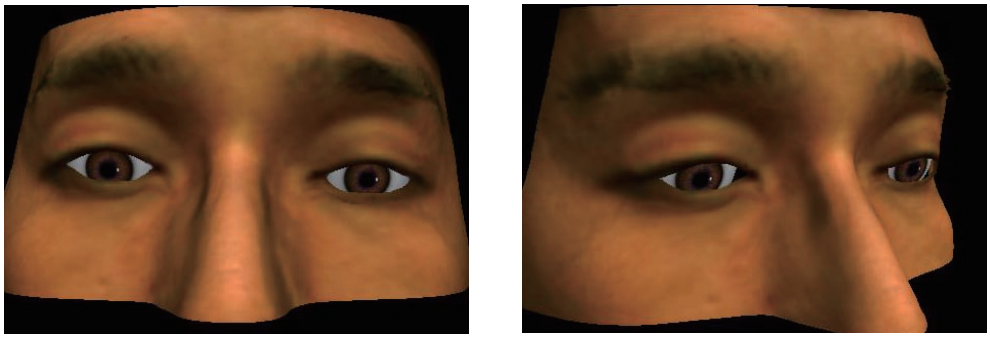
線形筋モデルを実装した顔ポリゴンモデル



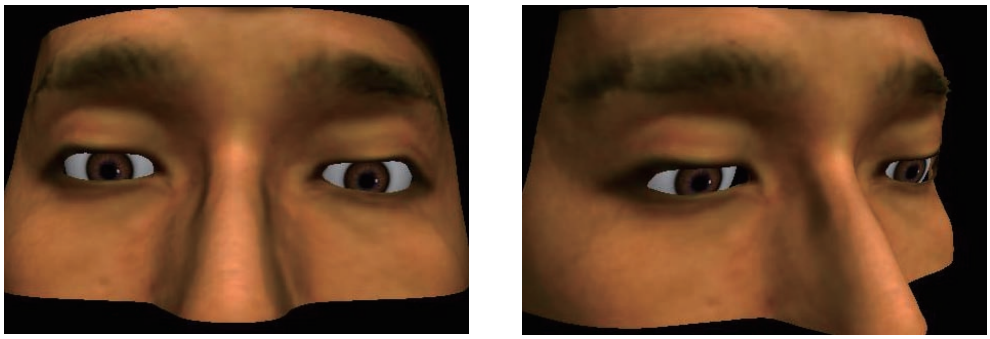
筋肉モデルを実装していない顔ポリゴンモデル

実画像

図 4.6 視線方向:上方 15 °

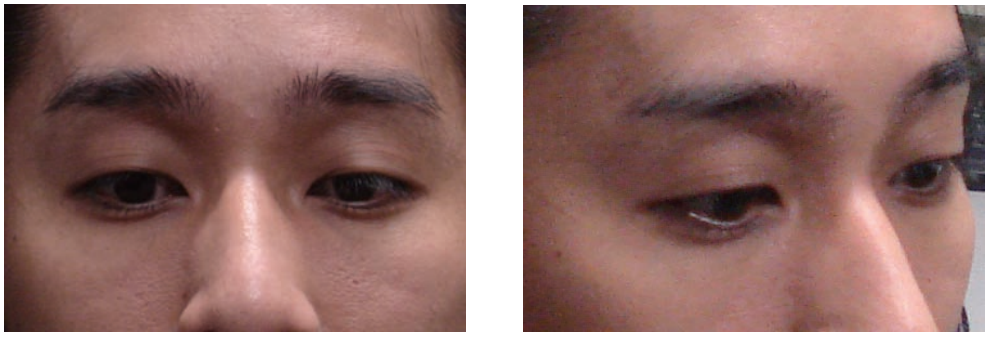


眼筋モデルを実装した顔ポリゴンモデル



線形筋モデルを実装した顔ポリゴンモデル

筋肉モデルを実装していない顔ポリゴンモデル



実画像

図 4.7 視線方向:下方 15 °

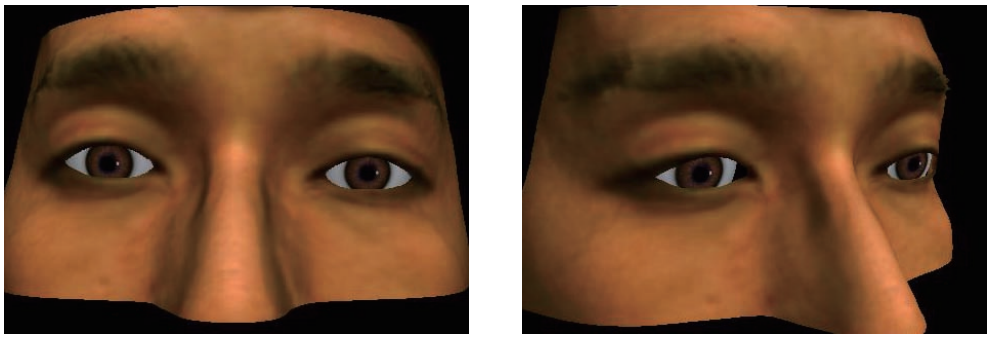
眼筋モデルを実装した顔ポリゴンモデル

線形筋モデルを実装した顔ポリゴンモデル

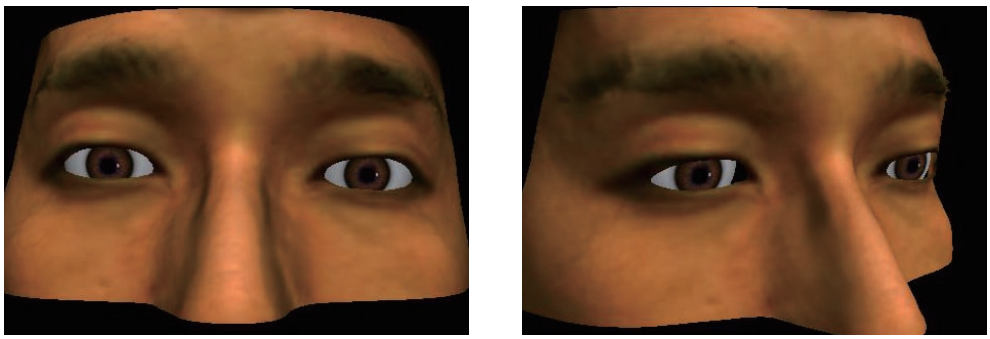
筋肉モデルを実装していない顔ポリゴンモデル

実画像

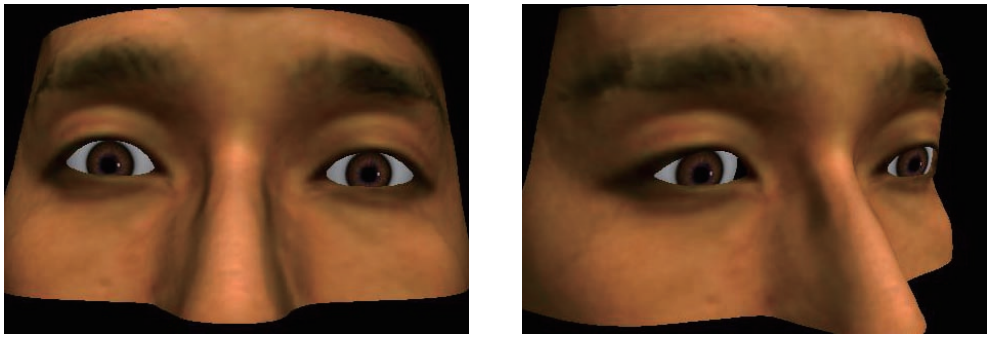
図 4.8 視線方向:上方 7.5 °



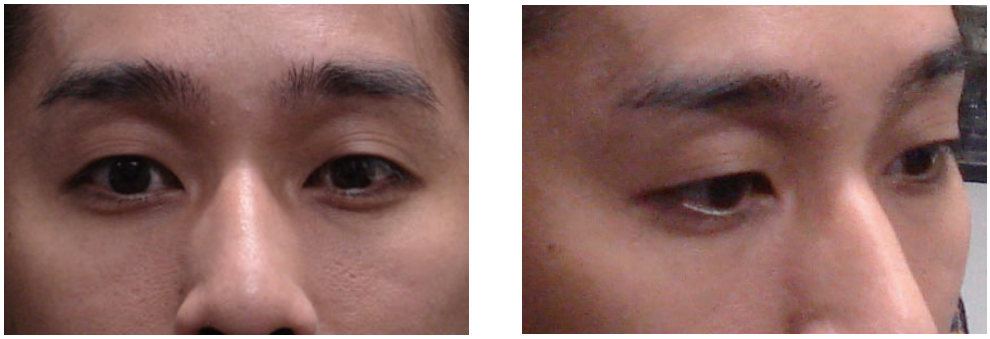
眼筋モデルを実装した顔ポリゴンモデル



線形筋モデルを実装した顔ポリゴンモデル



筋肉モデルを実装していない顔ポリゴンモデル



実画像

図 4.9 視線方向:下方 7.5 °

4.5. 考察

筋肉モデル実装の 2 つの顔ポリゴンモデル，未実装の顔ポリゴンモデルの比較によって，虹彩と上下眼瞼の位置関係から，眼筋構造のモデル化による視線方向と眼瞼の連動が顔表情の自然な表現に有効であることが確認された．筋肉モデル未実装の顔モデルは不自然な印象である．

筋肉モデルを実装した 2 つの顔ポリゴンモデルと実画像の比較から，線形筋モデルはすべての頂点を一点方向に引く力によって頂点を変位させるという性質から，実画像と比べて眼瞼部のラインが変形していることがわかる．一方で提案した眼筋モデルを実装した顔ポリゴンモデルは，眼瞼部の形状が維持され眼瞼板の構造を表現できている．

眼球回転角が上下 7.5 °の，眼筋モデルを実装した顔ポリゴンモデルと実画像の比較から，補間によって得られた，計測していない眼球回転角の結果も自然な表現がなされている．

上記より本論文において提案した，眼筋構造のモデル化による視線方向と眼瞼部の連動と眼筋モデルは，写実的な顔表情アニメーションの生成に有効であると考えられる．

また，眼筋モデルを実装した顔ポリゴンモデルは表 4.1 に示した実行環境において，40fps 前後のフレームレートで描画が可能であった．これはリアルタイムの描画に十分耐えうるものであり，インタラクティブコンテンツなどの実時間での描画を要するコンテンツにも応用可能である．

第5章　結論

本論文では，眼筋構造をモデル化し，眼球回転角と眼瞼部の変位を関連付け，視線方向に依存した顔表情アニメーションの生成手法を提案した．従来，顔表情アニメーションの研究で広く用いられている Waters の線形筋モデルを眼瞼板を考慮して拡張し，眼瞼部変位の特徴を模した眼筋モデルを提案した．

実験では，提案した眼筋モデル，Waters の線形筋モデルを実装した顔ポリゴンモデル，筋肉モデル未実装の顔ポリゴンモデル，実画像を比較した．結果から，眼筋構造のモデル化による視線方向と眼瞼部の連動が写実的な顔表情アニメーションを生成する手法としての有効性が示された．また，提案した眼筋モデルが眼瞼部の変位において，従来モデルよりも有効であることを示した．

今後は，現在手動で与えている眼筋モデルの各種パラメータの自動設定が望まれる．使用する顔ポリゴンモデルの形状，眼球の中心座標等を入力することで眼筋モデルのパラメータが推定できれば，より実用的な顔表情アニメーションの生成手法になりうると考えられる．

謝辞

本研究の機会を与えてくださり，またその遂行において貴重な御指導，御鞭撻をいただきました情報科学研究科像情報処理学講座千原國宏教授に心より御礼申し上げます．副指導教官として貴重な御助言をいただきました生命機能計測学講座湊小太郎教授に深く感謝いたします．本研究の問題設定の段階より本論文を執筆するに至るまで，多岐にわたり的確で本質的な御指導，御助言をいただきました副指導教官の像情報処理学講座眞鍋佳嗣准教授に深謝いたします．ミーティングや発表練習において数多くの御助言，御検討をいただきました副指導教官の像情報処理学講座池田聖助教に心より感謝いたします．本研究を遂行するにあたり，あらゆる面において綿密な御指導，御指摘，御協力をいただきました像情報処理学講座井村誠孝助教に厚く御礼申し上げます．研究について貴重な御助言をいただきました像情報処理学講座，浦西友樹研究員，桐島俊之研究員に感謝の意を表します．日頃より研究活動を様々な形で御支援，御協力いただきました像情報処理学講座山田真絵秘書に心より感謝いたします．研究活動や日常生活において多くの御協力をいただきました像情報処理学講座博士後期課程および前期課程のみなさま，そして諸先輩に深く感謝いたします．

参考文献

[1] 竹原卓真, 野村理朗 編: 「顔」研究の最前線, 北大路書房（2004）

[2] F. I. Parke and K. Waters: Computer Facial Animation Second Edition, AKPeters (2008)

[3] G. Borshukov, D. Piponi, O. Larsen, J. Lewis and C. Tempelaar-Lietz: Universal capture - Image-based facial animation for "The Matrix Reloaded", ACM SIGGRAPH Sketches & Applications（2003）

[4] C. Kouadio, P. Poulin and P. Lachapelle: Real-Time Facial Animation Based Upon a Bank of 3D Facial Expressions, Proc. Computer Animation, pp.128-136 (1998)

[5] Y. Zhang, Edmond C. Prakash, and E. Sung: A New Physical Model with Multilayer Architecture for Facial Expression Animation Using Dynamic Adap-tive Mesh, IEEE TRANSACTIONS ON VISUALIZATION AND COMPUTER GRAPHICS, pp.339-352 (2004)

[6] M. F. Vargas: Louder Than Words? An Introduction to Nonverbal Communication, Iowa State University Press（1987）

[7] 吉川佐紀子: 社会的注意と感情の認知-視線・表情の相互作用, 失語症研究 21(2), pp.103-112（2001）

[8] W. Kahle, W. Platzer, and H.Leonhardt, 越智淳三 訳: 解剖学アトラス, 文光堂 (1992)

[9] K. Waters: A muscle model for animating three dimensional facial expression, ACM SIGGRAPH Computer Graphics, pp.17-24 (1987)

[10] P. Ekman and W. V. Friesen: Unmasking the face, Prentice-Hall (1975)

[11] 西尾修一, 小山謙二: 目と口の動きの時間的差異に基づく笑いの分類基準, 信学論 Vol.J80-A No.8, pp.1316-1318 (1997)

[12] 内田英子, 四倉達夫, 森島繁生, 山田寛, 大谷淳, 赤松茂: 高速度カメラを用いた顔面表情の動的変化に関する分析, 信学技報 HIP99-76, pp.1-6, (2000)

[13] A. Menache: Understanding Motion Capture for Computer Animation and Video Games, Morgan Kaufmann (1995)

[14] D. Bennett: The Faces of "The Polar Express", ACM SIGGRAPH Courses (2005)

[15] D. Birlew: Onimusha(TM) 3: Demon Siege Limited Edition, BradyGAMES (2004)

[16] P. Ekman and W. V. Friesen: Facial Action Coding System, Consulting Psychologist Press（1977）

[17] 崔昌石, 原島博, 武部幹: 顔の 3 次元モデルに基づく表情の記述と合成, 信学論 (A) Vol.J73-A No.7, pp.1270-1280 (1990)

[18] 安善女主, 小沢慎治: 顔画像からの筋肉パラメータの推定とそれに基づく他人の表情生成, 信学論, pp.2081-2089 (2005)

[19] 久保尋之, 柳澤博昭, 前島謙宣, 森島繁生: 表情筋制約モデルを用いた少ない制御点の動きからの表情合成, 日本顔学会誌 Vol.6 No.1, pp.61-69 (2006)

[20] B. Choe, H. Lee, H. Ko: Performance-driven muscle-based facial animation, In Proceedings of Computer Animation vol.12, pp.67-79 (2001)

[21] 豊島周, 千代倉弘明, 小林正弘: リアルタイム弾性シミュレーションを応用した人体顔面加齢シミュレーション, 第 19 回 NICOGRAPH 論文コンテスト論文集 (2003)

[22] 坂東洋介，倉立尚明，西田友是: シワを考慮した顔の表情のシミュレーション，情報処理学会グラフィクスと CAD 研究会, pp.27-32 (2001)

[23] Y. ZHANG, T. SIM: Realistic and Efficient Wrinkle Simulation Using an Anatomy-based Face Model with Adaptive Refinement, Computer Graphics International, pp.3-10. (2005)

[24] S. P. Lee, J. B. Badler and N. I. Badler: Eyes Alive, ACM SIGGRAPH, pp.637-644 (2002)

[25] W. Steptoe and A. Steed: High-Fidelity Avatar Eye-Representation, Virtual Reality Conference VR'08 IEEE, pp.111-114 (2008)

[26] 日本視覚学会 編: 視覚情報処理ハンドブック, 朝倉書店 (2000)