

顔画像からの筋肉パラメータの算出と それに基づく表情顔画像の合成

慶應義塾大学大学院 理工学研究科 開放環境科学専攻

2008 年度

安 善 娃

目次

第1章	序論	1
1.1	顔とは	2
1.2	顔に関する研究	3
1.2.1	心理学	3
1.2.2	医学	3
1.2.3	工学	4
1.3	顔表情合成の関連研究	5
1.3.1	顔表面情報を用いる顔表情の合成	5
1.3.2	顔筋肉情報を用いる顔表情の合成	5
1.3.3	顔モデル	6
1.4	研究の目的	8
1.5	論文の構成	9
第2章	筋肉顔モデル	11
2.1	顔の筋肉と表情	12
2.2	提案する筋肉顔モデルの構成	13
2.2.1	線形筋	14
2.2.2	括約筋	15
2.3	提案する筋肉顔モデルの表情生成のメカニズム	17
2.3.1	線形筋	17
2.3.2	括約筋	19
2.3.3	表情生成メカニズムの検証	20
2.4	総括	22
第3章	フィッティングによる個人表情顔モデルの生成	23
3.1	概要	24
3.2	平静顔モデルの作成	25

3.3	顔部位の特徴点および顔筋肉の特徴点の設定	26
3.3.1	顔部位の特徴点の設定	26
3.3.2	顔筋肉の特徴点の設定	27
3.4	顔部位の特徴点の抽出	28
3.5	個人平静顔モデルの生成	30
3.6	個人表情顔モデルの生成	32
3.7	総括	33
第4章	筋肉パラメータによる表情顔画像の合成	34
4.1	概要	35
4.2	括約筋モデルの判定	37
4.3	正規化	38
4.4	筋肉パラメータの算出	39
4.4.1	線形筋	39
4.4.2	括約筋	40
4.5	表情顔画像の合成	41
4.6	総括	43
第5章	実験	44
5.1	概要	45
5.2	実験1：従来顔モデルを用いた従来手法による表情顔画像の合成	47
5.3	実験2：筋肉顔モデルを用いた提案手法による表情顔画像の合成	60
5.4	総括	70
第6章	本手法の応用事例	71
6.1	他人の表情顔画像の合成	72
6.2	平均表情顔画像の合成	75
6.3	時間方向の内挿による中間表情顔画像の合成	77
第7章	結論	79
謝辞		82
参考文献		84
付録		89

目次

1.1	表情顔画像の合成の流れ	9
2.1	表情筋肉の断面 ([50] より引用)	12
2.2	筋肉顔モデル	13
2.3	線形筋モデル (x - y 軸)	15
2.4	線形筋モデル (x - z 軸)	15
2.5	括約筋モデルの種類	16
2.6	線形筋の構造 (x - y 軸)	18
2.7	筋肉の影響程度のパラメータ	18
2.8	括約筋の構造 (x - y 軸)	19
2.9	線形筋を用いた基本表情	20
2.10	目と口の表情	21
3.1	個人表情顔モデルの生成の流れ	24
3.2	平静顔モデル	25
3.3	顔部位の特徴点 $F.P.(model)$ の位置	26
3.4	顔筋肉の特徴点 $M.P.(model)$ の位置	27
3.5	顔部位の特徴点の抽出の流れ	28
3.6	個人平静顔モデルの生成	30
3.7	個人表情顔モデルの生成	32
4.1	表情顔画像の合成の流れ	35
4.2	$m.d.(neut.)$ と $m.d.(expr.)$	37
4.3	顔モデルの座標の正規化	38
4.4	表情顔画像の合成の結果例	41
4.5	表情顔画像の合成の結果例	42

5.1	入力画像の例	45
5.2	実験 1：人物ごと - 表情顔画像の合成結果 (1/2)	48
5.3	実験 1：人物ごと - 表情顔画像の合成結果 (2/2)	49
5.4	実験 1：幸福 - 表情顔画像の合成結果および筋肉パラメータ (1/6)	50
5.5	実験 1：驚き - 表情顔画像の合成結果および筋肉パラメータ (2/6)	51
5.6	実験 1：悲しみ - 表情顔画像の合成結果および筋肉パラメータ (3/6)	52
5.7	実験 1：恐怖 - 表情顔画像の合成結果および筋肉パラメータ (4/6)	53
5.8	実験 1：怒り - 表情顔画像の合成結果および筋肉パラメータ (5/6)	54
5.9	実験 1：嫌悪 - 表情顔画像の合成結果および筋肉パラメータ (6/6)	55
5.10	実験 1：表情ごとの筋肉パラメータ	56
5.11	人物 A：連続画像を用いた表情顔画像の合成結果	58
5.12	人物 C：連続画像を用いた表情顔画像の合成結果	59
5.13	実験 2：従来手法と提案手法の比較 - 目と口の開閉の表情顔画像の合成結果	60
5.14	実験 2：正面および側面画像 - 目と口の開閉の表情顔画像の合成結果 . . .	61
5.15	実験 2：表情顔画像の合成結果	62
5.16	評価 1：主観評価 1	63
5.17	評価 2：主観評価 2	64
5.18	評価 3：図 5.15 の表情 3 の筋肉パラメータ	65
5.19	提案手法による連続画像を用いた表情顔画像の合成	67
5.20	従来手法および提案手法による連続画像を用いた表情顔画像の合成結果 .	68
5.21	図 5.20 の右目の縦横比	69
6.1	本人と他人の表情顔画像の合成の流れ	72
6.2	本人と他人の表情顔画像の合成結果	73
6.3	人物 A の個人平静顔モデルを用いた他人の表情顔画像	74
6.4	幸福：平均表情顔画像の合成結果	75
6.5	基本表情の合成結果の比較	76
6.6	幸福：中間表情顔画像の合成	77
6.7	悲しみ：中間表情顔画像の合成	77
6.8	驚き：中間表情顔画像の合成	78

表目次

2.1	筋肉名	14
5.1	主観評価の結果	47

第 1 章

序 論

1.1 顔とは

人は相手の顔を見て、それが誰であるかを認識できる。また、性別やおおよその年齢を推測することや、表情を読むことでその人の感情や心理状態を認識することもできる。

人のコミュニケーションは、言語による言語コミュニケーション (Verbal Communication) と、言語によらない非言語コミュニケーション (Nonverbal Communication) に分かれる。コミュニケーションで交わされるメッセージ全体のうち、65% から 93% 程度が非言語が担っているといわれている [1]。Mehrabian は、好意表現に関する心理実験により、言葉により獲得されるのは 7% に過ぎず、38% が声により獲得され、55% が顔の表情により獲得されることを示した [2]。このことから、顔は非言語的な情報を相手に効果的に伝達できるメディアとして重要な役割を担っているといえる。

1.2 顔に関する研究

顔に関する研究は工学のみならず，心理学や人類学，医学，美容，芸術など様々な分野で注目を集めていて，数多く行われている．ここでは，分野ごとの顔に関する研究事例を示す．

1.2.1 心理学

心理学での顔に関する研究は，表情変化による心理状態の判断やうつ病のような心理的な病気の判断を目指す研究などが行われている．人物の魅力や年齢，特異性に関する研究も行われている．例えば，平均顔を変形させた合成顔を用いて，魅力，年齢，特異性を関連づけた実験が行われている [3]．

表情に関する研究も活発に行われている．Ekman & Friesen は，意図的に作った表情を分類した結果，得られる感情カテゴリはきわめて安定していることを見出した [4]．彼らによれば，表情は幸福，悲しみ，驚き，恐怖，怒り，嫌悪のカテゴリに分類される．また，これらのカテゴリは普遍的であって，文化を越えて人々に共通に理解されることを示している．上記に述べた6種類の表情（幸福，悲しみ，驚き，恐怖，怒り，嫌悪）は基本表情と呼ばれ，様々な研究に用いられている．彼らはまた，表情の記号化法 (FACS: Facial Action Coding System) を開発した [5]．FACS は，解剖学的にみて互いに独立しており，しかも視学的に識別可能な最小単位たる 44 個の顔面の動きの単位 (AU: Action Unit) から成り立っている．これは，AU の動きの組み合わせで顔表情を記述するシステムであり，顔表情の分析と生成の研究に大きな影響を与えた．

1.2.2 医学

医学での顔に関する研究は，形成外科や歯科，耳鼻科などの様々な分野で，手術前の診断および手術後の回復度においての客観的な判定を目指す研究などが行われている [6, 7, 8]．その1つとして，顔面神経麻痺の診断がある．顔面神経麻痺の診断は，原因疾患の診断，顔面運動 (麻痺の程度) の評価，障害部位の診断，障害程度 (予後) の診断よりなる [9]．顔面運動の評価法は，顔面のいくつかの部位に注目した表情運動をさせて点数化して評価する手法と，顔面全体の表情運動の印象から評価する手法がある．日本では前者の1つである日本顔面神経研究会制度の 40 点法 [10] が用いられるが，外国では後者の代表である House-Brackmann 法 [11] が用いられる．しかしながら，これらの評価法は医者の主観的判断による手法なので，客観的な評価法が必要である．そこで，マーカ法 [12] やモアレ法 [13]，オプティカルフロー法 [14] などが試みられている．

1.2.3 工学

工学での顔に関する研究は、顔からの情報をコンピュータが取得し、その情報を用いて人と機械あるいは人間同士の円滑なコミュニケーションを目指す研究が盛んに行われている [15]. ここでは、顔の認証、認識・抽出、顔画像の符号化、合成に関する研究事例を示す。

- 顔の認証

顔情報を用いたバイOMETRICS認証は人間にとって非常に親しみのある技術である。顔照合のために用いられる代表的なアルゴリズムとしては、主成分分析により求めた固有顔 (eigenface) を用いる手法 [16] や制約相互部分空間による手法 [17] などが提案されている。また、認証精度を改善するため、指紋などの他の認証手段とともに顔情報を用いる開発が進められている。

- 顔の認識・抽出

顔の認識・検出の目的は多岐にわたる。例えば、顔の検出 [69]、顔方向の推定 [19]、顔部位の検出 [20]、視線方向の検出 [21] などがある。表情認識では、FACS[5] を利用するもの [22] やオプティカルフロー [23] を用いた手法などが提案されている。

- 顔画像の符号化

テレビ電話やテレビ会議をターゲットにした画像符号化の手法として、大関ら [24] は「知的符号化」を提案した。これは、対象を顔画像に限定し、顔の向きや表情のパラメータを送信側で抽出して伝送し、受信側で顔画像を合成することにより、超低ビットレートでの画像伝送や画像の記述・合成を行うことを目的としている。

- 顔画像の合成

コンピュータグラフィックス (CG) による顔表情の合成に関する研究が活発に行われている。しかし、CG 分野で一般的に行われているような専用モデラ (3ds Max, Maya など) による極めてリアルな人物の生成は、顔モデルの作成に多くの時間を必要とし、多様な表情を作成する場合など、人的・時間的コストが莫大なものになってしまう。また、コミュニケーション・メディアやヒューマンインタフェースの応用の観点から顔画像の合成に関する研究も行われている。そこで、頭部の3次元形状モデルを用い、このモデルを変形させることにより表情を作り出す手法が提案されている。

本論文では、見本となる顔画像の表情に基づく表情顔画像の合成を目的とする。そこで、1.3 節では顔表情合成に関する研究を紹介する。

1.3 顔表情合成の関連研究

顔表情合成の手法は数多く提案されているが、顔表面情報を用いる手法 [25, 26, 27, 28, 29] と顔筋肉情報を用いる手法 [30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 45, 46] に分けられる。

顔表面情報を用いる表情の合成では、顔表面の幾何学的な移動量を推定することによって表情を記述する仕組みが用いられる。顔表面情報を用いる手法は、意図する表情を表出させるための規則が点の移動によってのみ定義され、比較的容易であるが、個人差の吸収が困難である。一方、顔筋肉情報を用いる表情の合成では、筋肉情報に基づいて筋肉を伸縮させることによって表情を記述する仕組みが用いられる。顔筋肉情報を用いる手法は実際の表情表出に近い顔表情の合成が実現可能であり、筋肉の配置を変更することで様々な顔の造作に対応することができる。しかし、筋肉情報を表す各種パラメータの調整が微妙かつ困難であり、試行錯誤に依存するところが多い。そこで、1.3.1 節と 1.3.2 節では、それぞれの研究を紹介する。

顔表情合成の結果は 3 次元の顔モデルを用いて表すのが一般的である。そこで、1.3.2 節では顔モデルについて紹介する。

1.3.1 顔表面情報を用いる顔表情の合成

顔表面情報を用いる顔合成は、以下のように様々な手法が提案されている。

崔らは表情の記述法として FACS[5] を利用し、36 種類の AU をコンピュータに実装し、表情画像の作成を実現している [25]。磯野らは表情カテゴリの変化に関する一般的な知識を用いて、2 つの表情の対応する特徴点の座標の差分として取得し、ある人物の任意表情の 3 次元構造の復元を行った [26]。また、モーションキャプチャを用いて特徴点の変位を求めることにより、表情画像を合成する手法が提案されている [27, 28, 29]。

1.3.2 顔筋肉情報を用いる顔表情の合成

顔筋肉情報を用いる顔合成の手法は、筋肉パラメータの指定による表情合成 [30, 31, 32, 33, 34, 35, 36] と入力顔画像から表情の抽出による表情合成 [38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46] に分けられる。

筋肉パラメータの指定による手法

Waters[30] と Zhang[31] は筋肉パラメータを指定することで様々な表情を合成する手法を提案している。さらに、Waters が提案したモデル [30] を改良した手法 [32, 33] や発

話を目的に口周辺の筋肉を増やした手法 [34, 35] , 表情のリアリティを増すためにしわを追加した手法 [36] などが提案されている。これらは、映画やゲームなどのエンターテイメント用として利用できると思われる。しかしながら、この手法は、表情合成の際に適切な筋肉パラメータを与えるためには試行錯誤が必要となり、自動に適切な筋肉パラメータを与えることは困難と思われる。

テレビ会議やエージェントアバターシステムなどの人間同士が対話を行うようなアプリケーションでは適応的に筋肉パラメータを定める必要があり、見本となる顔画像の表情変化に基づいて筋肉パラメータを求めたほうが個人差が反映された自然な表情が合成できると思われる。

顔画像から求めた筋肉情報による手法

顔合成を行う際に、入力顔画像から筋肉情報を求める手法は数多く提案されている。この手法では、顔の特徴点を抽出することで表情を合成するのが一般的である。しかしながら、すべての特徴点を正確に抽出するのは難しいため、被験者の顔に特徴線 [38] を描いたり、マーカ [39, 40] を貼ったり、モーションキャプチャ [41, 42] を用いて特徴点の抽出の精度を上げ、筋肉情報を求める手法が提案されている。Terzopoulos と Waters は顔に特徴線を描き、Snakes [37] を用いて特徴線との変位から筋肉パラメータの推定手法を提案した [38]。石川らはマーカを貼って [39, 40] マーカの移動量から顔面筋パラメータを推定する手法を提案した。また、倉立らは顔の動きを顔に貼り付けた赤外線マーカの動きをモーションキャプチャシステムにより獲得した [41, 42]。顔に特徴線などの情報がある場合は、特徴がはっきりしている目や口などのみならず、特徴がはっきりしていない頬や額などの顔部位の特徴や動きを求めやすい。しかしながら、顔に特徴線を描いたりすることは被験者の負担となり、オペレータにより位置がずれるおそれがある。

このような問題点を解決するために、顔に何もつけずに筋肉情報を求める手法も提案されている。佐藤らはマーカを貼らずに顔面筋モデルを用いて顔表情の合成を行った [43, 44] が、顔形状モデルの整合のために顔構成要素の端点や顔の輪郭上の頂点 35 個を手入力しなければならない。石川らはマーカを貼らずにオプティカルフローを用いて顔表情の移動量を推定し、ニューラルネットを用いて顔面筋パラメータの自動推定を行った [45, 46]。しかしながら、学習データとして使用していない人物には適用が困難であり、個人ごとに学習が必要である。

1.3.3 顔モデル

顔表情合成の結果は 3 次元の顔モデルを用いて表すのが一般的である。

顔表面情報を用いる手法では、顔モデルの頂点群の移動により表情顔画像を合成するた

め、各頂点の3次元座標と頂点同士を連結するリンク情報によって構成されるワイヤフレームモデルが用いられる。一方、顔筋肉情報を用いる手法では、主に筋肉を用いて表情顔画像を合成するために筋肉を持つ顔モデルが用いられる。

筋肉を持つ顔モデルとしては、Watersにより提案された顔モデル [30] が多くの研究に用いられている。そして、Watersが提案したモデルを改良した顔モデルも数多くある。例えば、筋肉の数を増やした手法 [32] や顔モデルに髪を追加した手法 [33]、発話を目的に口周辺の筋肉を増やした手法 [34, 35]、表情のリアリティを増すためにしわを追加した手法 [36] などが提案されている。また、独自に筋肉の配置を決めた顔モデルも数多く提案されている [38, 39, 40, 43, 44, 45, 46]。

他に、筋肉の代わりに NURBS(non-uniform rational B-spline) を用いて顔モデルの表情顔画像を合成する手法も提案されている [48, 49]。

顔モデルの筋肉としては主に線形筋と括約筋が用いられるが、顔画像から筋肉パラメータを求める従来手法では、線形筋の作用は妥当に実現されている。一方、括約筋の作用を実現するために目と口の周りに多数の線形筋を半径方向に配置したり [32, 33, 34, 38, 43]、円周方向に配置していた [39, 40, 45, 46]。これらは多数の線形筋を用いるため、線形筋ごとの筋肉パラメータを求めることが困難である。

1.4 研究の目的

本研究では、見本となる顔画像の表情に基づく表情顔画像の合成を目的とする。詳細には、個人(被験者)の表情顔画像を入力して表情筋の動きを表す筋肉パラメータを算出し、算出した筋肉パラメータに基づいて筋肉顔モデルを用い、本人または他人の表情顔画像を合成する。そこで、以下の特徴を満たす表情顔画像の合成手法を提案する。

1. 入力顔画像の表情変化から筋肉パラメータを算出する。

入力画像の顔に特徴線やマーカなどの情報がある場合は、特徴がはっきりしている目や口などのみならず、特徴がはっきりしていない頬や額などの顔部位の特徴や動きを求めやすい。しかしながら、顔に特徴線を描いたり、マーカを貼ったりすることは被験者の負担となり、オペレータにより位置がずれるおそれがある。そこで、本研究では、被験者の顔にマーカをつけるなど負担をかけずに撮影した顔画像を入力として用いる。そのため、筋肉パラメータを求める際に用いられる特徴点の抽出が困難である。そのような問題点を解決するために特徴点として2種類を設定する。詳しくは、画像処理により安定に検出される顔部位の特徴点および筋肉の影響を多く受ける顔筋肉の特徴点である。それにより、顔画像から筋肉パラメータを算出することが可能となる。

2. 少数の筋肉で筋肉顔モデルの表情が合成できる。

ヒトの顔には多数の筋肉があり、筋肉を用いる筋肉顔モデルの表情合成は数多く提案されているが、本研究では、表情合成に最も重要な筋肉のみを残すことにより筋肉の数を最小限に減らした。そこで、本論文で提案する筋肉モデルは、線形筋において18個、括約筋において3個の筋肉がある。

1.5 論文の構成

本論文で提案する表情顔画像の合成手法の流れを図 1.1 に示す。

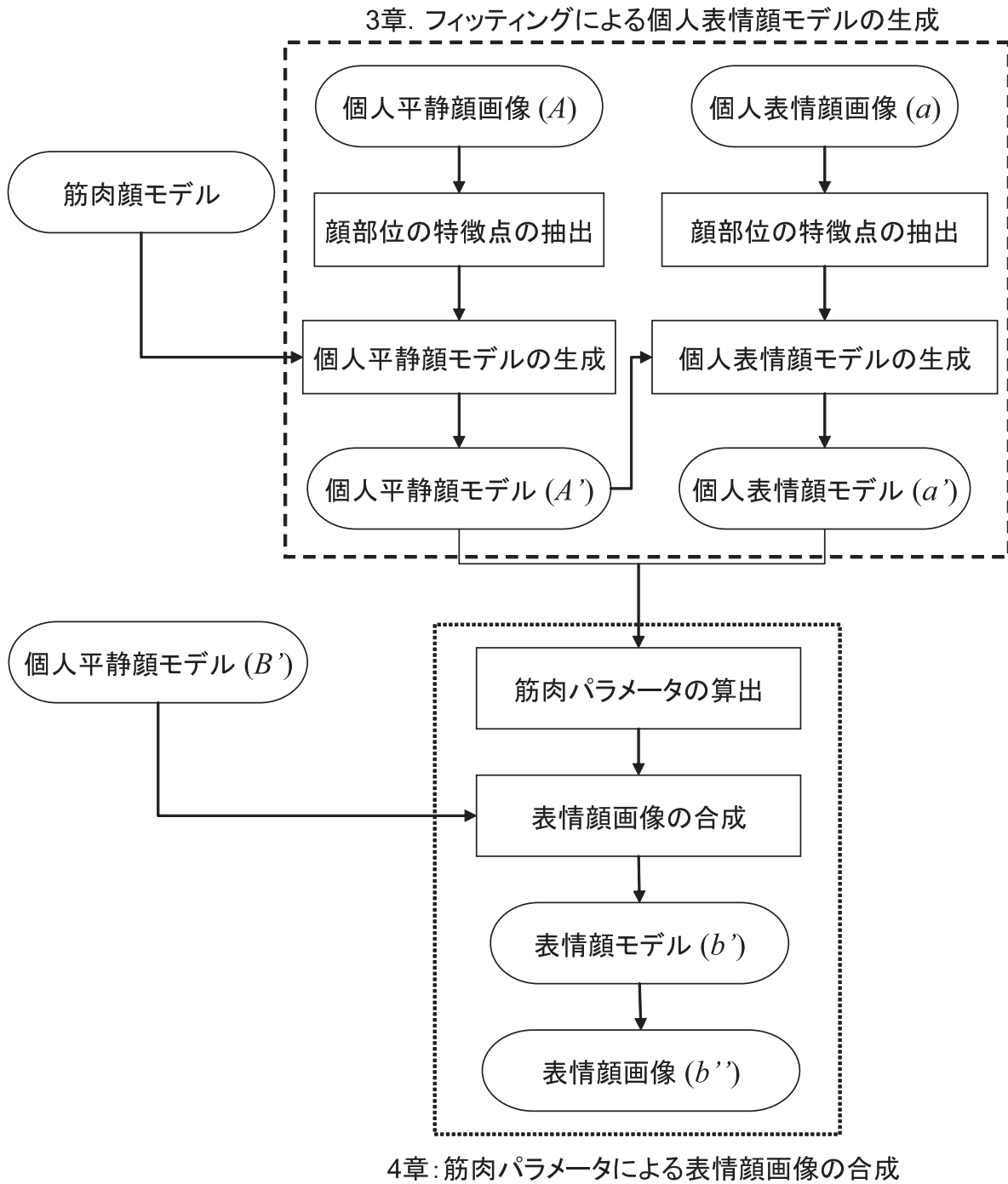


図 1.1 表情顔画像の合成の流れ

第2章では本論文で扱う筋肉顔モデルについて述べる。まず、ヒトの顔の筋肉および表情について述べ、次に、線形筋(モデル)と括約筋(モデル)で構成される筋肉顔モデルを定義し、表情生成のメカニズムについて述べる。

第3章ではフィッティングによる個人表情顔モデルの生成について述べる。個人平静顔画像(図1.1のA)から個人平静顔モデル(A')を生成し、同一人物の個人表情顔画像(a)から個人表情顔モデル(a')を生成する。その際、以下の2点がポイントとなる。

- 画像処理による顔部位の特徴点の抽出
- フィッティング

第4章では筋肉パラメータによる表情顔画像の合成について述べる。個人平静顔モデル(図1.1の A')と個人表情顔モデル(a')の相違から筋肉パラメータを算出し、算出した筋肉パラメータを用いて個人平静顔モデル(B')から表情顔モデル(b')、さらには表情顔画像(b'')を合成する。その際、以下の2点がポイントとなる。

- 各筋肉の筋肉パラメータの算出
- 筋肉パラメータに基づく表情顔画像の合成

個人平静顔モデル(B')が見本となる顔モデル(A')と同一人物である場合($B' = A'$, 本人)は、4章で合成する個人表情顔モデル(b')と表情顔画像(b'')は3章で生成する個人表情顔モデル(a')と同等の結果が得られるべきであり、システムの検証が可能となる。すなわち、本人の表情顔画像が合成される。一方、個人平静顔モデル(B')が見本となる顔モデル(A')と同一人物でない場合($B' \neq A'$, 他人)は、(A')と(a')の相違から算出する筋肉パラメータに基づいて、(B')の個人性を保ち(a')と同等の表情を持つ表情顔画像(b'')が合成できる。すなわち、他人の表情顔画像が合成される。

第5章の実験では個人平静顔モデル(B')が見本となる顔モデル(A')と同一人物である場合($B' = A'$, 本人)を用いて本論文で提案する手法によるシステムの検証を行う。

第6章の応用では本論文で提案する手法の応用可能性について議論する。

第7章では本論文の結論について述べる。

第 2 章

筋肉顔モデル

2.1 顔の筋肉と表情

ヒトの顔の筋肉は一般に表情筋といわれる．表情筋は皮下に広く存在し，おもに骨から起こって皮膚に停止する皮筋であって，様々な表情はこの働きにより生成される．

正面から見た顔の表情筋を図 2.1 に示す．

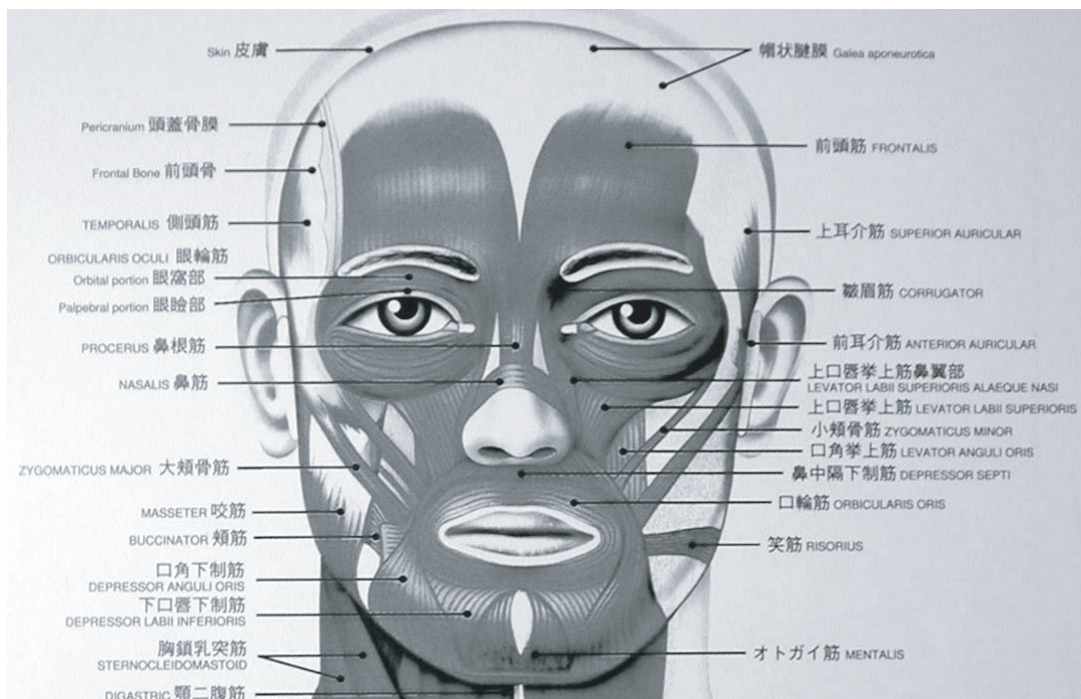


図 2.1 表情筋肉の断面 ([50] より引用)

図 2.1 に示したように人間の顔には多数の筋肉があり，筋肉ごとに起こる所や着く所，走り方，作用も異なる．このような筋肉ごとの特徴をすべて考慮した顔モデルを生成するのは困難である．そのため，ヒトの表情変化をコンピュータで取り扱うときには簡略化した顔の立体形状が不可欠である．

2.2 提案する筋肉顔モデルの構成

ヒトの表情は筋肉の作用により生成される．そこで，本論文では，自然に変化する表情の表現を目指し，少数の筋肉で，筋肉の作用を再現できる筋肉顔モデルを提案する．

顔の立体形状はワイヤフレームモデルで表現するのが一般的である．ワイヤフレームモデルとは，各頂点の3次元座標と頂点同士を連結するリンク情報によって構成されるモデルである．実際には，3つのリンクによって構成される三角形ポリゴンにより面を生成して皮膚表面モデルを実現する．

本論文では，筋肉顔モデルとしてワイヤフレームモデル(頂点群 P_n の位置情報，三角形を構成するための連結情報)に筋肉 i および特徴点を付け加えたものを提案する．筋肉顔モデルを図 2.2 に示す．なお，特徴点については 3.3 節で述べる．

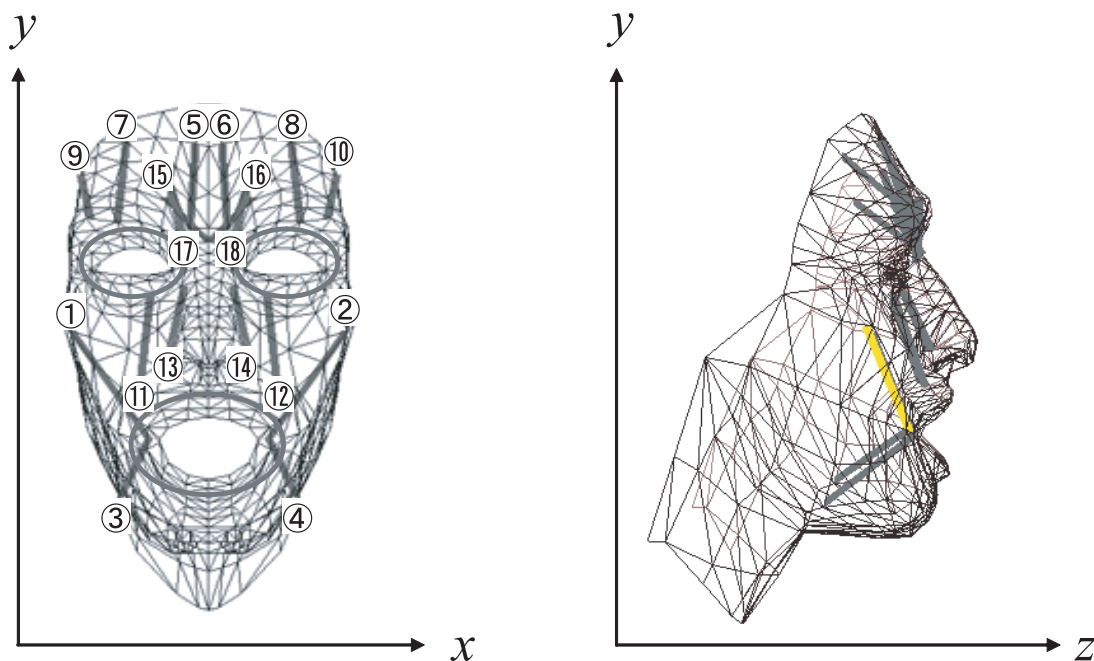


図 2.2 筋肉顔モデル

図 2.2 に示したように筋肉顔モデルには，筋肉の種類として線形筋と括約筋がある．これらは解剖学的な筋肉の作用が再現できるようにモデル化した筋肉である．直線が線形筋(18個)であり，目と口の周りにある楕円が括約筋(3個)である．各筋肉名を表 2.1 に示す．

前頭筋や大頬骨筋などのように線形に動く筋肉の作用を再現する線状の筋肉を線形筋と定義する．この線形筋は線状であるが，筋肉からの影響程度を定める筋肉情報を与えることにより実際の線形筋の作用のような動きを表現する．一方，口輪筋および眼輪筋の作用

表 2.1 筋肉名

種類	番号	筋肉名
線形筋	1,2	大頬骨筋
	3,4	口角下制筋
	5,6	内部前頭筋
	7,8	大前頭筋
	9,10	外側前頭筋
	11,12	上唇挙筋
	13,14	内部上唇挙筋
	15,16	皺眉筋
	17,18	二次前頭筋
括約筋	目	眼輪筋
	口	口輪筋

を再現する輪状の筋肉を括約筋と定義する．この括約筋は輪状筋であるが，筋肉からの影響程度を定める筋肉情報を与えることにより実際の括約筋の作用のような動きを表現する．

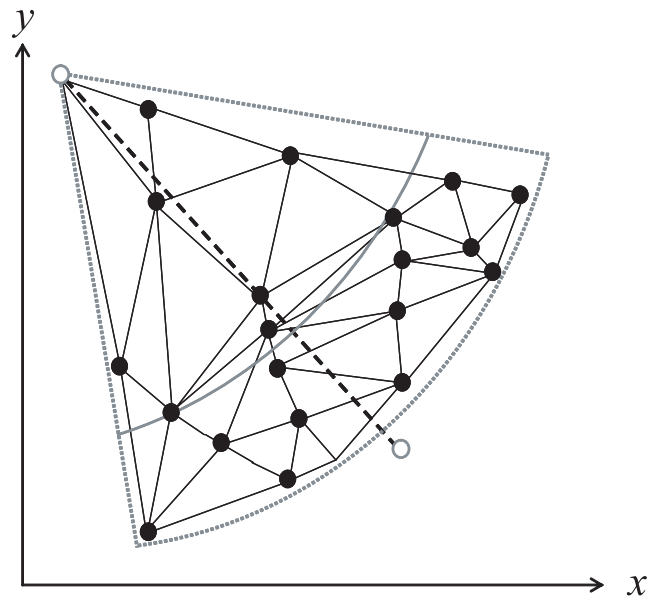
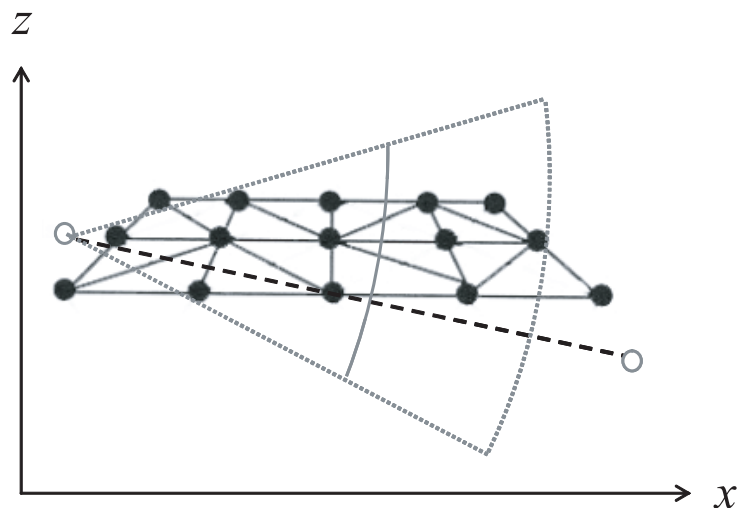
本論文で提案する筋肉顔モデルは，Waters が提案した顔モデル [51] を改良したモデルである．線形筋に対する頂点群の位置情報および頂点同士を連結するリンク情報，線形筋の筋肉情報は Waters の顔モデルと同一である．それに，括約筋の追加および特徴点の設定により Waters の顔モデルを改良した．詳しくは，括約筋の筋肉情報の追加や括約筋に対する頂点群の位置を変更した．また，頂点群の中から適切な特徴点を選んだ．

2.2.1 線形筋

解剖学的な線形筋の作用が再現できるようにモデル化した線形筋 (以下，線形筋という．) を提案する．線形筋モデルを図 2.3 および図 2.4 に示す．

図 2.3 および図 2.4 の点線の直線は線形筋であり，白丸点は線形筋の端点である．筋肉の端点は位置の個人差はあるが，表情によっては動かない，すなわち，固定である．そして，黒丸点は頂点であり，表情によって動く．扇形は線形筋から影響を受ける範囲 (以下，影響範囲という．) であり，[51] に基づいて定める．

線形筋モデルを用いると線形筋の影響範囲内にある各頂点が線形筋の伸び縮みの方向に沿って移動することにより額や頬などの表情が生成できる．

図 2.3 線形筋モデル (x - y 軸)図 2.4 線形筋モデル (x - z 軸)

2.2.2 括約筋

解剖学的な括約筋の作用が再現できるようにモデル化した括約筋(以下、括約筋という。)を提案する。目の表情は開閉やウィンクなどであり、上下の動きであって横の動きがない。一方、口の表情には開閉のみならず突き出しやすぼめるなどがある。そのため、本論文では括約筋として突き出しを表現できる放射状モデル(図 2.5(a))と開閉を表現でき

る縦線モデル (図 2.5(b)) の 2 種類を定義する .

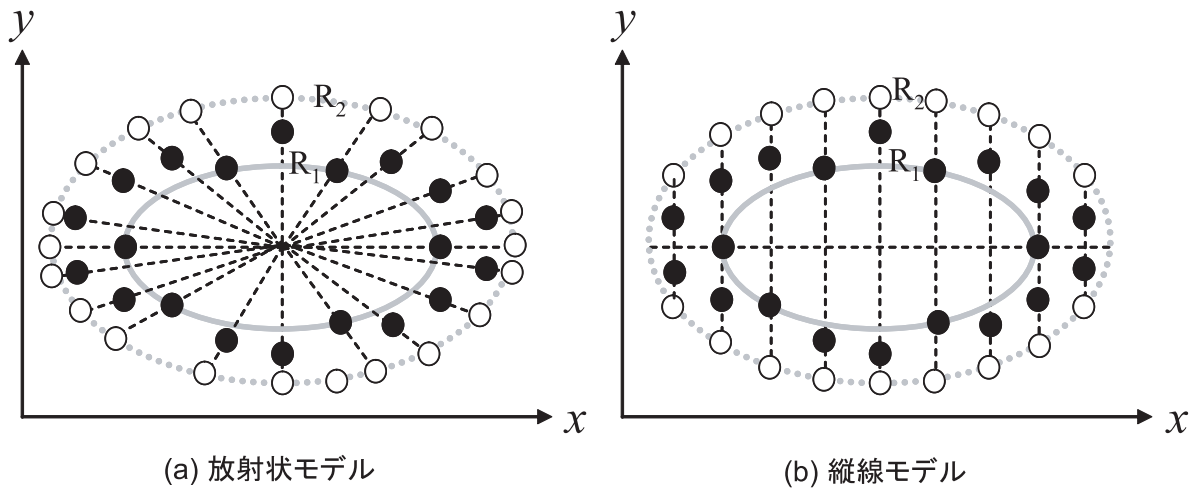


図 2.5 括約筋モデルの種類

図 2.5 の白丸点は線形筋の端点である . 図 2.5 の楕円は括約筋の影響範囲 (R_1, R_2) であり , 予備実験で適切に定めた . 内側の実線楕円 R_1 は図 2.2 の筋肉顔モデルの図形から目と口の輪郭をすべて含む最小限の範囲に設定されている . 一方 , 外側の点線楕円 R_2 が図 2.2 に示した楕円であり , 目は眉が , 口は鼻が含まれない範囲に設定されている .

放射状モデルは筋肉顔モデルの目または口の周りにある頂点群 (図 2.5(a) の黒丸点) を各々目または口の中心点と結ぶことにより放射状に伸びた線形筋群 (図 2.5(a) の点線) で構成されると仮定する . それにより、放射状モデルを用いると括約筋の影響範囲内にあるすべての頂点が 1 つの筋肉パラメータにより、線形筋に沿って移動することにより楕円の大きさが変わる表情が生成できる . 一方、縦線モデルは筋肉顔モデルの目または口の周りにある頂点群 (図 2.5(b) の黒丸点) を各々目または口の中心の横線から垂直に結ぶことにより縦に伸びた線形筋群 (図 2.5(b) の点線) で構成されると仮定する . それにより、縦線モデルを用いると括約筋の影響範囲内にあるすべての頂点が 1 つの筋肉パラメータにより、線形筋に沿って移動することにより楕円が上下に動く表情が生成できる .

2.3 提案する筋肉顔モデルの表情生成のメカニズム

筋肉顔モデルの表情は，人間の表情生成と同様に筋肉の働き，すなわち伸び縮みにより生成される．筋肉顔モデルの表情は頂点群 P_n のうち，筋肉 i の影響範囲内にある頂点群 $P_n^{(i)}$ が筋肉パラメータ c_i に基づいて移動することにより生成される．

実際の顔のある位置は複数の筋肉から影響を受けて表情を生成するが，遠くにある筋肉から受ける影響は極めて小さい．すなわち，近くにある筋肉の影響は大きく受けるが，遠くにある筋肉の影響は小さく，もしくはほとんど受けない．また，筋肉の伸び縮みの方向からも影響を受ける．このことから，影響範囲は各筋肉からの距離と方向を考慮して定め，筋肉顔モデルのある頂点は一つの筋肉のみの影響を受けると仮定する．したがって，各筋肉の影響範囲は重なっていない．すなわち，排他的である．まず，線形筋の影響範囲は R_1, R_2, β (図 2.6 参照) により定める．次に，括約筋の影響範囲は R_1, R_2 (図 2.5 の楕円を参照) により定める．

筋肉顔モデルの表情は，各筋肉の影響範囲内にあるすべて頂点が筋肉パラメータに基づいて移動することにより生成される．詳細には，筋肉 21 本の筋肉パラメータにより 512 点の頂点群が移動することにより表情が生成される．すなわち，筋肉ごとに平均 24 点の頂点を移動させることである．

筋肉ごとの影響範囲を排他的にした場合，隣接している筋肉が同じ方向に動けば矛盾がない．逆方向に動いても頂点同士を連結するリンク情報による頂点の接続関係により動きが変にはならない．その理由は，筋肉顔モデルの表情が筋肉パラメータの影響で動くが，極端な変形はしないためである．

2.3.1 線形筋

筋肉顔モデルの線形筋の構造を図 2.6 に示す．

図 2.6 では筋肉一本 M と頂点一つ p だけが描かれている．筋肉の端点から p までのベクトルを V とし，筋肉の両端点を結んだ筋肉ベクトルを M とする． α は V と M のなす角である． R_1, R_2, β は筋肉から影響範囲を決めるときに必要なパラメータであり，[51] に基づいて定める．

線形筋の表情は筋肉情報から影響を受ける頂点 p が p' に移動することにより生成される． p は筋肉顔モデルの頂点の一つである． p' は p の移動後の頂点，すなわち，表情顔の頂点の一つである． p' は V に沿って動くので，筋肉の端点から p' までのベクトル V' は

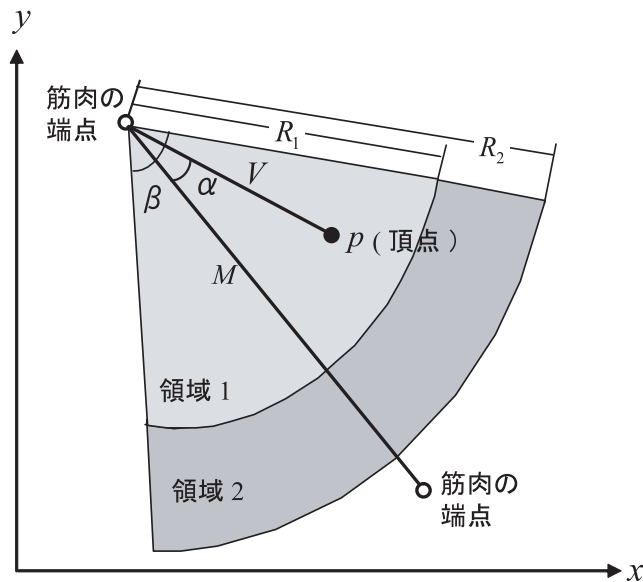


図 2.6 線形筋の構造 (x-y 軸)

式 (2.1) で算出される .

$$V' = cr \cos \alpha \frac{V}{|V|} + V \tag{2.1}$$

$c, r, \cos \alpha$ は筋肉情報である . $\cos \alpha$ は円周方向の影響程度を決めるパラメータであり , α が大きくなるほど小さくなる . すなわち , 各頂点が筋肉 M から近いほど $\cos \alpha$ が大きくなり , 遠いほど $\cos \alpha$ が小さくなる . r は半径方向の影響程度を決めるパラメータであり , M から $|V|$ への影響の程度を決めるパラメータである . p が領域 1(図 2.6 参照) 内にあるときは $r = \cos((1 - \frac{|V|}{R_1})\frac{\pi}{2})$ であり , p が領域 2(図 2.6 参照) 内にあるときは $r = \cos(\frac{|V| - R_1}{R_2 - R_1} \frac{\pi}{2})$ である . この式により , $|V| = R_1$ の場合 , r は最大値である 1 となる . p が領域 1 内にあって $|V| = 0$ の場合と p が領域 2 内にあって $|V| = R_2$ の場合 , r は最小値である 0 となる . 筋肉の影響程度を決めるパラメータ ($r, \cos \alpha$) を図 2.7 に示す .

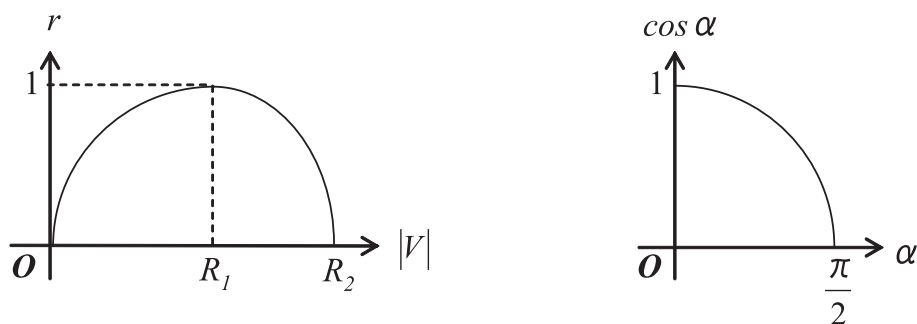


図 2.7 筋肉の影響程度のパラメータ

式 (2.1) に示した筋肉情報中, r と $\cos\alpha$ は筋肉 M と頂点 p との位置関係のみによって定められる. すなわち, 筋肉顔モデルの頂点群の初期値により定められるので, 表情が変わっても一定である. そこで, 残された筋肉情報 c が表情による移動量を与えるパラメータである. 以下, c を線形筋の筋肉パラメータという.

2.3.2 括約筋

筋肉顔モデルの括約筋の構造を図 2.8 に示す.

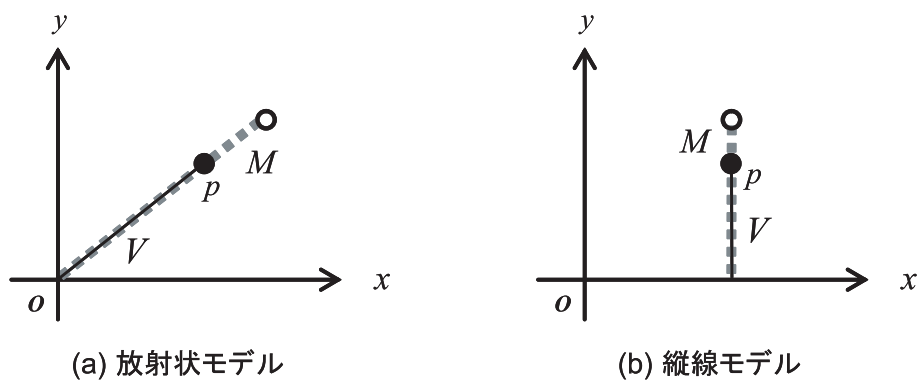


図 2.8 括約筋の構造 (x - y 軸)

原点 O は目または口の中心である. 図 2.8 では一つの頂点 p (黒丸点) とそれから得られる一つの線形筋 M (グレーの点線) だけが描かれている.

図 2.8(a) の放射状モデルは原点 O から p までのベクトルを V とし, 原点 O から p を結んだ直線上に線形筋 M の端点 (白丸点) があると仮定する. 一方, 図 2.8(b) の縦線モデルは原点の横線から垂直に結んだ p までのベクトルを V とし, 原点 O の横線から垂直に p を結んだ直線上に線形筋 M の端点 (白丸点) があると仮定する.

括約筋の表情は, 筋肉情報から影響を受ける頂点 p が移動することにより生成される. 移動後の V' は式 (2.2) により算出される.

$$V' = cr \frac{V}{|V|} + V \quad (2.2)$$

式 (2.2) は線形筋の筋肉パラメータ c に基づいて頂点群の変位を求める式 (2.1) に $\alpha = 0$ を代入して線形筋の円周方向の影響程度を 1 にしたのと同じである. ここで, r は半径方向の影響程度を決めるパラメータであり, 式 (2.1) の r と同一である. c は括約筋の筋肉パラメータである.

図 2.5 に示したように括約筋は線形筋群により構成されているので, 括約筋の影響範囲 (R_1, R_2) 内にあるすべての頂点が式 (2.2) に一つの筋肉パラメータ c を与えることにより

移動量が算出され，目と口の表情が生成される．放射状モデルの場合は楕円の大きさが変わる表情が生成でき，縦線モデルの場合は楕円が上下に動く表情が生成できる．

2.3.3 表情生成メカニズムの検証

線形筋の表情生成メカニズムの有効性を検証するためには，線形筋に対して線形筋の筋肉パラメータ c を与えて式 (2.1) により自然な表情が生成できることを確認する必要がある．筋肉顔モデルの線形筋は Waters が提案した線形筋 [51] と同一である．そのため，Waters が生成した基本表情の6種類（幸福，悲しみ，驚き，恐怖，怒り，嫌悪）の結果を図 2.9 に示す．

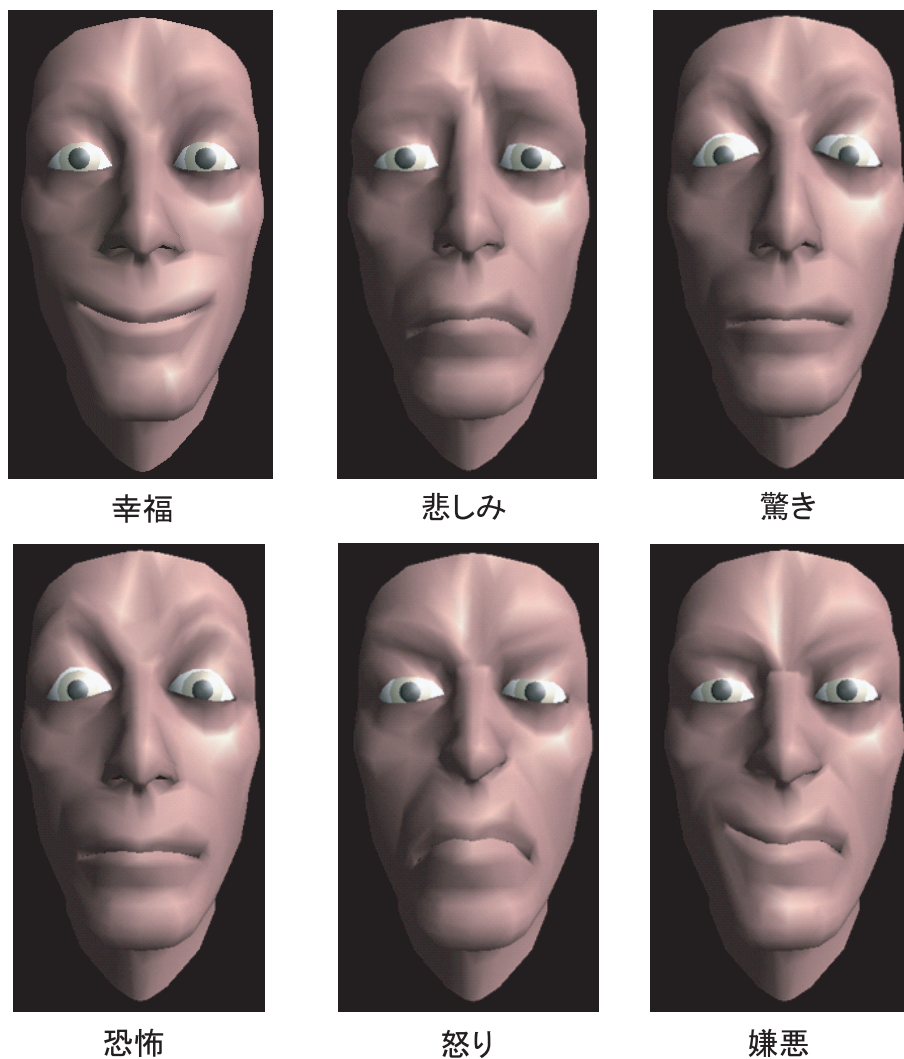
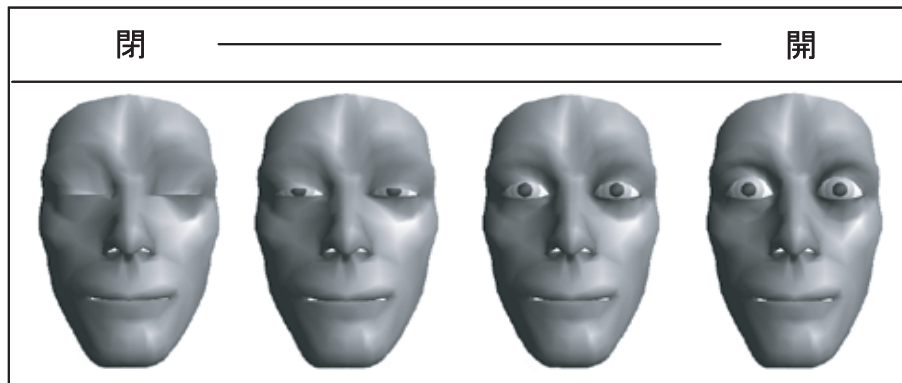


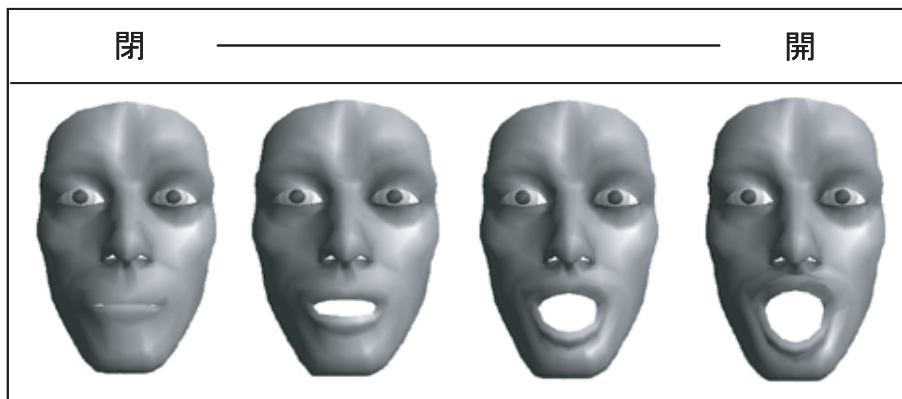
図 2.9 線形筋を用いた基本表情

括約筋の表情生成メカニズムの有効性を検証するためには，括約筋内の線形筋群に対し

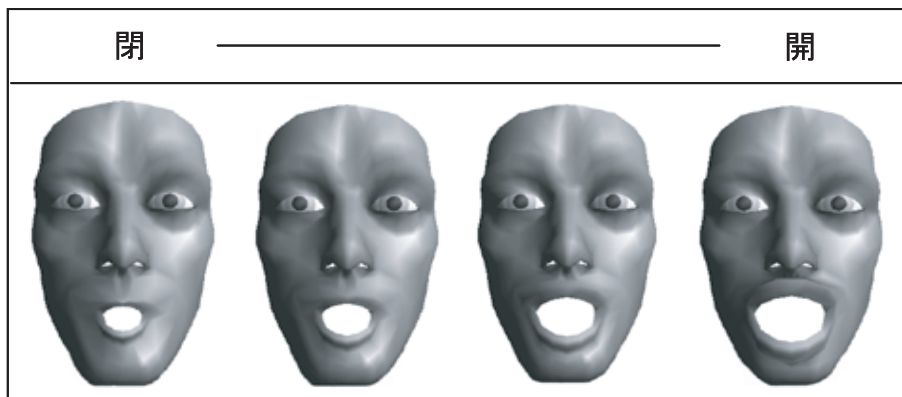
て一つの筋肉パラメータ c を与えて式 (2.2) により目と口の自然な表情が生成できることを確認する必要がある．試行錯誤によって定めた筋肉パラメータ c を与えて，生成した目と口の表情の結果を図 2.10 に示す．提案した括約筋を用いることにより，目と口の表情を生成できたことが分かる．



(a) 目の開閉（縦線モデル）



(b) 口の開閉（縦線モデル）



(c) 口のすぼめ（放射状モデル）

図 2.10 目と口の表情

2.4 総括

筋肉顔モデルは Waters が提案した顔モデルを改良したものであり，ワイヤフレームモデルと筋肉，特徴点で構成される．そして，表情生成に最も重要な筋肉のみを残すことにより筋肉顔モデルの筋肉の数を最小限に減らした．筋肉としては，線形筋 (18 個) と括約筋 (3 個) を用いた．

筋肉顔モデルの表情は，各筋肉の影響範囲内にあるすべての頂点が筋肉パラメータに基づいて移動することにより生成される．筋肉顔モデルの表情生成の有効性を検証するために，筋肉パラメータを指定することにより様々な表情を生成して示した．

このことより，顔画像から筋肉パラメータを求めることができれば，筋肉パラメータの指定のための試行錯誤が要らない．さらに，個人性が反映された表情が生成できると考えられる．

3 章では，画像処理による顔部位の特徴点の抽出およびフィッティングによる個人表情顔モデルの生成について述べる．4 章では，3 章により生成された個人表情顔モデルから筋肉パラメータを算出し，それに基づく表情顔画像の合成について述べる．

第3章

フィッティングによる個人表情顔モデルの生成

3.1 概要

本章では、フィッティングによる個人表情顔モデルの生成について述べる。ここで、個人とは入力画像の人物、すなわち、被験者を表す。

個人表情顔モデルの生成の流れを図 3.1 に示す。

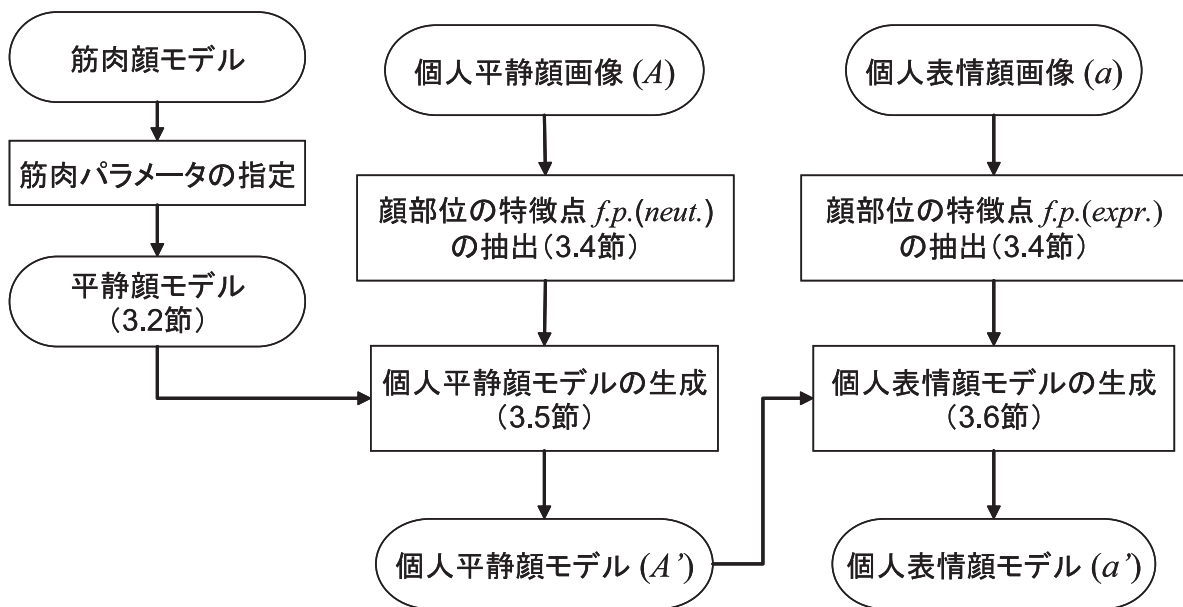


図 3.1 個人表情顔モデルの生成の流れ

前処理として、平静顔モデルを作成する。平静顔モデルの作成については 3.2 節で述べる。次に、平静顔モデルの頂点群 P_n の中から顔部位の特徴点 $F.P.(model)$ および顔筋肉の特徴点 $M.P.(model)$ を設定する。これらの設定については 3.3 節で述べる。

個人平静顔画像 (A) を入力し、画像処理により個人平静顔画像 (A) の顔部位の特徴点 $f.p.(neut.)$ を抽出する。顔部位の特徴点の抽出については 3.4 節で述べる。次に、抽出した個人平静顔画像 (A) の顔部位の特徴点 $f.p.(neut.)$ の位置情報に基づいて、図 3.2 の平静顔モデルからフィッティングにより個人平静顔モデル (A') を生成する。個人平静顔モデル (A') の生成については 3.5 節で述べる。

これらの準備の後、個人表情顔画像 (a) を入力して抽出した顔部位の特徴点 $f.p.(expr.)$ の位置情報に基づいて、個人平静顔モデル (A') からフィッティングにより個人表情顔モデル (a') を生成する。個人表情顔モデル (a') の生成については 3.6 節で述べる。

3.2 平静顔モデルの作成

2章で提案した筋肉顔モデル(図2.2参照)は口を中開きに行している。しかしながら、平静顔は口を閉じているのが一般的である。したがって、平静顔モデルとしては口を閉じたモデルが必要なので、筋肉顔モデルから平静顔モデルを作成する。平静顔モデルを図3.2に示す。

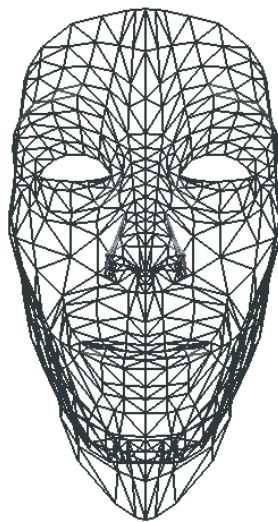


図3.2 平静顔モデル

平静顔モデルは図2.2に示した筋肉顔モデルから口の括約筋として縦線モデルを用い、式(2.2)に基づいて生成する。2.3.3で述べた括約筋の表情生成メカニズムの有効性を検証した実験により生成した図2.10(b)の左から1番目の口を閉じた顔モデルを平静顔モデルとして用いる。

3.3 顔部位の特徴点および顔筋肉の特徴点の設定

平静顔モデルの頂点群 P_n の中から顔部位の特徴点 $F.P.(model)$ および顔筋肉の特徴点 $M.P.(model)$ を設定する。顔部位の特徴点 $F.P.(model)$ を個人ごとの相違，表情による相違に合わせて変位させることにより個人表情顔モデルを生成する。生成された個人平静顔モデルと個人表情顔モデルの顔筋肉の特徴点 $M.P.(neut.)$ と $M.P.(expr.)$ の変位に基づいて表情顔画像を合成する。表情顔画像の合成については4章で述べる。

3.3.1 顔部位の特徴点の設定

図3.2に示した平静顔モデルの頂点群 P_n の中から顔部位の動きが判断できて輪郭がはっきりしている頂点を選び，顔部位の特徴点 $F.P.(model)$ とする。顔部位の特徴点は画像処理により安定に検出される点でもある。顔部位の特徴点 $F.P.(model)$ の位置を図3.3に示す。

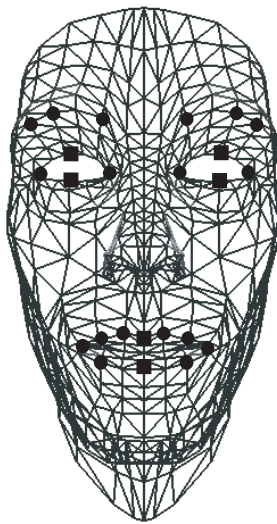


図 3.3 顔部位の特徴点 $F.P.(model)$ の位置

顔部位の特徴点 $F.P.(model)$ は線形筋と対応する18点(図3.3の丸点)と括約筋と対応する6点(図3.3の目と口の中央に位置する四角点)で合計24点とする。

3.3.2 顔筋肉の特徴点の設定

筋肉顔モデルは筋肉ごとに影響範囲があり，その範囲内にある各頂点が筋肉パラメータに基づいて移動することにより表情が生成される．その際，筋肉から各頂点までの距離と方向により影響の割合が異なる．そのため，2章の筋肉顔モデルの表情生成メカニズムの検証を行う際に，筋肉ごとの影響範囲内にある頂点群の移動値を観察して影響を多く受けている，すなわち，よく動く頂点を顔筋肉の特徴点 $M.P.(model)$ として設定する．顔筋肉の特徴点は，4.4節で述べる筋肉パラメータ c の算出の際に，精度よく算出できる頂点ともいえる．

設定された顔筋肉の特徴点 $M.P.(model)$ の位置を図 3.4 に示す．

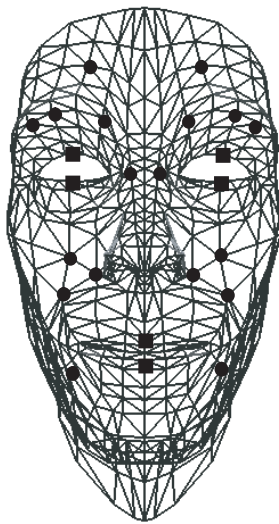


図 3.4 顔筋肉の特徴点 $M.P.(model)$ の位置

顔筋肉の特徴点 $M.P.(model)$ は線形筋と対応する 18 点 (図 3.4 の丸点) と括約筋と対応する 6 点 (図 3.4 の目と口の中央に位置する四角点) で合計 24 点とする．すなわち，筋肉ごとに対応する顔筋肉の特徴点 $M.P.(model)$ は一点ずつである．

顔筋肉の特徴点 $M.P.(model)$ は図 2.7 に示したように，線形筋においては式 (2.1) の r を最大とする $|V| = R_1$ と $\cos\alpha$ の値を最大値 1 とする $\alpha = 0$ の場合であり，括約筋においては式 (2.2) の r を最大とする $|V| = R_1$ の場合である．しかしながら，その位置に必ず頂点が存在するとは限らないため，その条件を満たす近傍にある頂点を顔筋肉の特徴点 $M.P.(model)$ として設定する．

3.4 顔部位の特徴点の抽出

平静顔画像 (図 3.6(b)) および表情顔画像 (図 3.7(b)) からそれぞれの顔部位の特徴点 $f.p.(neut.)$ および $f.p.(expr.)$ を抽出する。

顔部位の特徴点を求めるためには、顔部位 (眉、目、口) の領域を求めてから、その領域情報に基づいて顔部位の特徴点を抽出する。顔部位の特徴点の抽出の流れを図 3.5 に示す。

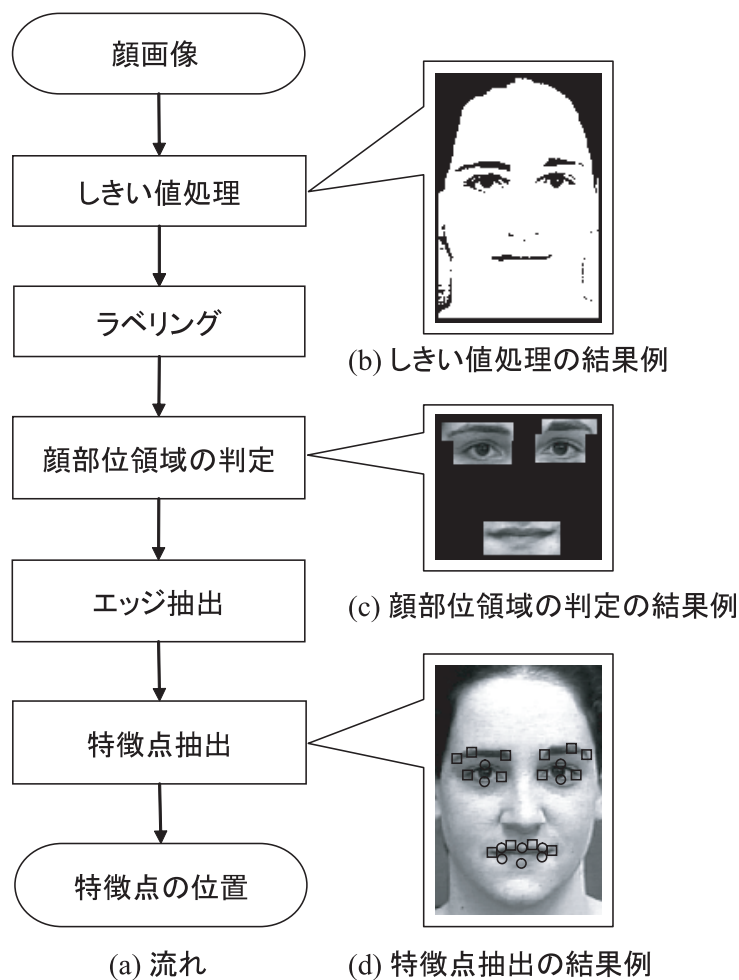


図 3.5 顔部位の特徴点の抽出の流れ

以下、図 3.5 に示した顔部位の特徴点の抽出の流れを段階ごとに説明する。

1. しきい値処理

p-タイル法 (p-tile method) を用いて輝度値に対するしきい値処理を行う。p-タイル法は対象画像に対する事前の知識が必要な手法である。すなわち、画像中の顔の占

める領域の画素数が顔の大きさと撮影条件からあらかじめ予測できる場合に、予測された画素数に応じてしきい値を決める手法である。本論文で扱う入力画像は背景に特徴がない壁であり、画像の真ん中に被験者が正面を向いているため、p-タイル法が適する。しきい値は予備実験により決めた。図 3.5(b) にしきい値処理の結果例を示す。

2. ラベリング

ラベリングとは同じ連結成分を構成する画素にラベルをつけ、異なる連結成分を構成する画素に異なる番号をつける処理である。ラベリングは自動で行うが、入力によっては顔部位が一つのラベル(例：眉と目)となってしまう場合には手作業で修整する。ラベリングの結果からノイズである小さいラベルと縦長いラベルを除去する。その結果、顔部位の候補のラベルが残る。

3. 顔部位領域の判定

残されたラベルがどの顔部位かを顔部位の位置関係(眉及び目は左右対称になっており、眉は上に目は下に存在する。鼻及び口は顔の中央部にあり、鼻は上に口は下に存在する。)を用いて判定する。それぞれのラベルからエッジ抽出ができるように外接長方形を拡張したものを各顔部位の領域とする。図 3.5(c) に顔部位領域の判定の結果例を示す。

4. エッジ抽出

顔部位の領域ごとに原画像に戻して鮮鋭化を行った後、Sobel フィルタを用いてエッジを抽出する。

5. 特徴点抽出

特徴点の抽出は顔部位の領域ごとに行う。まず、抽出したエッジから太め・細めを行い、ノイズを除去する。次に、残されたエッジの中から両端や中心の上下などの位置情報に基づいて顔部位の特徴点の位置を定める。図 3.5(d) に特徴点抽出の結果例を示す。図 3.5(d) の 14 点の四角点はエッジ情報のみで十分抽出できる。一方、10 点の丸点はエッジ情報のみでは位置がずれる場合がある。そのため、丸点は得られたエッジ情報と周囲の四角点の位置情報を用いて算出する。

図 3.5 に示したように、顔部位の特徴点はしきい値処理やエッジ抽出などの簡単な画像処理により抽出する。入力画像の背景や顔の位置などの情報を知っているため、顔部位の特徴点が簡単な画像処理でも十分に抽出できる。

3.5 個人平静顔モデルの生成

入力的人物(個人, 被験者)の輪郭線と特徴点 $f.p.(neut.)$ (図 3.6(b) の白丸点) の位置は平静顔モデルの顔部位の特徴点 $F.P.(model)$ (図 3.6(a) の黒丸点) の位置と異なるので, 平静顔モデルの顔部位の特徴点(図 3.6(a) の黒丸点) と顔の輪郭点(図 3.6(a) の四角点) を, 個人平静顔画像に一致させるとともにそれに応じて顔モデルの全頂点の位置を移動する必要がある. この操作をフィッティングと呼ぶ. フィッティングにより得られた顔モデルには各人物の顔部位の位置関係や顔の大きさなどの個人性が反映され, 個人平静顔モデルと呼ぶ.

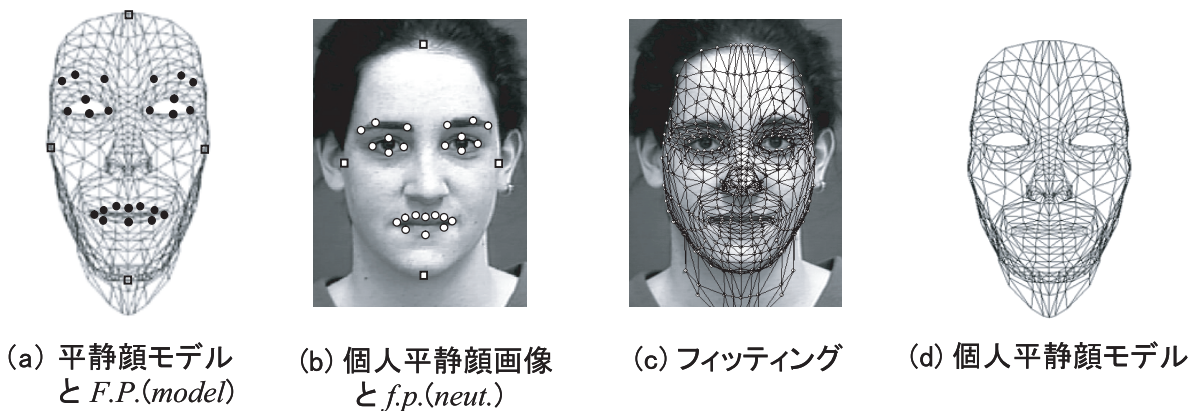


図 3.6 個人平静顔モデルの生成

図 3.6(c) は個人平静顔画像にフィッティングにより得られた個人平静顔モデルを重畳したものであり, 図 3.6(d) に個人平静顔モデルを示す.

フィッティングの前処理として, 顔の大きさに基づいてフィッティングを行う範囲を決める. まず, 入力画像から顔の大きさを決定する 4 点(図 3.6(b) の四角点) をマニュアルにより指定する. 次に, 図 3.6(a) の平静顔モデルの四角の 4 点と合わせる. その 4 点の移動値に基づいて他の頂点を平行移動および拡大・縮小する.

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_x & 0 & t_x \\ 0 & s_y & t_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

ここで, s_x, s_y は, それぞれ x 方向, y 方向の拡大(または縮小)率であり, t_x, t_y は, それぞれ x 軸方向, y 軸方向の移動量である.

以下に, フィッティングについて述べる.

平静顔モデルには図 3.6(a) に示したように, 図 3.6(b) の個人平静顔画像の顔部位の特

徴点と対応する頂点が存在するので、あらかじめ個人平静顔画像の顔部位の特徴点と一致する平静顔モデルの頂点番号が分かる。それにより、個人平静顔画像から抽出した顔部位の特徴点 $f.p.(neut.)$ の位置と対応する平静顔モデルの顔部位の特徴点 $F.P.(model)$ を用いる。個人平静顔モデルは特徴点の変位 $f.p.(neut.) - F.P.(model)$ に基づいて、平静顔モデルの頂点群 P_n を式 (3.2) によりフィッティングさせることにより生成される。すなわち、特徴点の変位 $f.p.(neut.) - F.P.(model)$ に基づいて平静顔モデルを個人平静顔画像の顔上に合わせることである。

$$P_n' = \omega(f.p.(neut.) - F.P.(model)) + P_n \quad (3.2)$$

具体的には、まず、平静顔モデルの顔部位の特徴点 $F.P.(model)$ を個人平静顔画像の顔部位の特徴点 $f.p.(neut.)$ の位置に合わせる。これが特徴点の変位である。次に、その特徴点の変位および重みに基づいて特徴点以外の残りの頂点を移動させる。

式 (3.2) を用いてフィッティングを行うことにより個人平静顔モデルが生成される。生成された個人平静顔モデルの頂点群 P_n' には顔部位の特徴点 $F.P.(neut.)$ および顔筋肉の特徴点 $M.P.(neut.)$ が含まれている。なお、入力として顔の正面画像を用いるため、筋肉顔モデルの z 座標は変化しないとする。

3.6 個人表情顔モデルの生成

人物が同一人でも表情が異なれば顔モデルも異なる．これを個人表情顔モデルと呼ぶ．個人表情顔モデルは3.5章で述べた手法により生成された個人平静顔モデル(図3.7(a))の顔部位の特徴点 $F.P.(neut.)$ の位置情報と個人表情顔画像(図3.7(b))から抽出した顔部位の特徴点 $f.p.(expr.)$ の位置情報の相違に基づいて，3.5節で述べた個人平静顔モデルの生成と同様に，フィットTINGを行うことにより生成する．個人表情顔モデルの生成結果を図3.7(d)に示す．

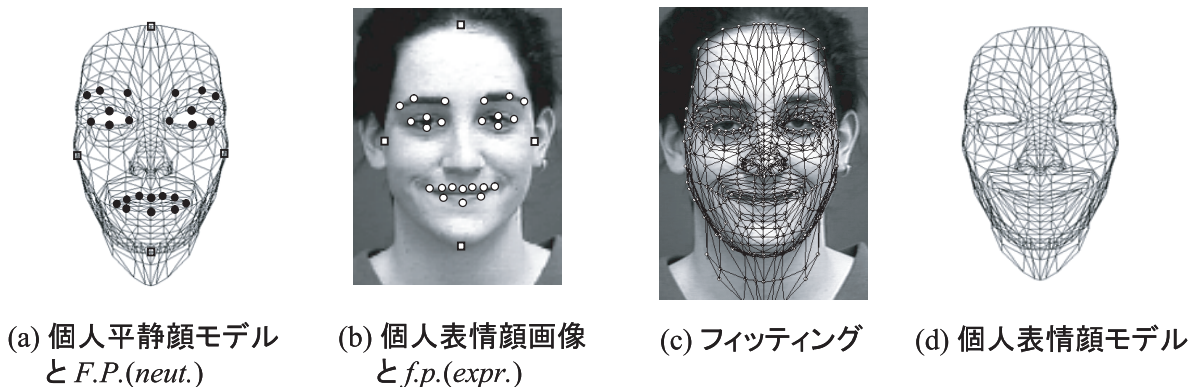


図 3.7 個人表情顔モデルの生成

個人表情顔画像から抽出した顔部位の特徴点 $f.p.(expr.)$ の位置と対応する個人平静顔モデルの顔部位の特徴点 $F.P.(neut.)$ を用いる．個人表情顔モデルは特徴点の変位 $f.p.(expr.) - F.P.(neut.)$ に基づいて，個人平静顔モデルの頂点群 P_n' を式(3.3)によりフィットTINGさせることにより生成される．すなわち，特徴点の変位 $f.p.(expr.) - F.P.(neut.)$ に基づいて個人平静顔モデルを個人表情顔画像の顔上に合わせることである．

$$P_n'' = \omega(f.p.(expr.) - F.P.(neut.)) + P_n' \quad (3.3)$$

具体的には，まず，個人平静顔モデルの顔部位の特徴点 $F.P.(neut.)$ を個人表情顔画像の顔部位の特徴点 $f.p.(expr.)$ の位置に合わせる．これが特徴点の変位である．次に，その特徴点の変位および重みに基づいて特徴点以外の残りの頂点を移動させる．

式(3.3)を用いてフィットTINGを行うことにより個人表情顔モデルの生成される．生成された個人表情顔モデルの頂点群 P_n'' には顔部位の特徴点 $F.P.(expr.)$ および顔筋肉の特徴点 $M.P.(expr.)$ が含まれている．

3.7 総括

本章では，被験者の顔に何もつけずに撮影した個人平静顔画像と個人表情顔画像を入力として，顔部位の特徴点の抽出およびフィッTINGにより，個人平静顔モデルと個人表情顔モデルを生成する手法を提案した．その際のポイントを以下に述べる．

- 顔部位の特徴点の抽出

入力の顔画像から画像処理により顔部位の特徴点を抽出した．顔部位の特徴点としては，顔部位の動きが判断できて輪郭がはっきりする，すなわち，画像処理により安定に検出される点を選んだ．

- フィッTING

個人表情顔モデルを生成する際に，個人平静顔画像から個人表情顔画像への表情の相違に基づいてフィッTINGを行った．そこで，本手法には基準表情となる平静顔画像が必要となる．

個人平静顔モデルと個人表情顔モデルの生成により，顔部位の特徴点 $F.P.(neut.)$ と $F.P.(expr.)$ および顔筋肉の特徴点 $M.P.(neut.)$ と $M.P.(expr.)$ が求まる．

4章では，3章により生成された個人平静顔モデルと個人表情顔モデルの顔筋肉の特徴点 $M.P.(neut.)$ と $M.P.(expr.)$ の相違から筋肉パラメータを算出し，それに基づく表情顔画像の合成について述べる．

第 4 章

筋肉パラメータによる表情顔画像の 合成

4.1 概要

2章の筋肉顔モデルの表情生成のメカニズムで述べたように，筋肉顔モデルの表情を生成する際に，表情による移動量を与えるのは式(2.1)と式(2.2)における線形筋と括約筋の筋肉パラメータ c のみである．それにより，筋肉パラメータ c が算出できれば，個人平静顔モデル (B') から式(2.1)と式(2.2)を用いて表情顔画像が合成できる．

本章では，3章により生成された個人平静顔モデル (A') と個人表情顔モデル (a') の頂点群の位置情報の相違から筋肉パラメータ c を算出する手法を提案する．表情顔画像の合成の流れを図4.1に示す．

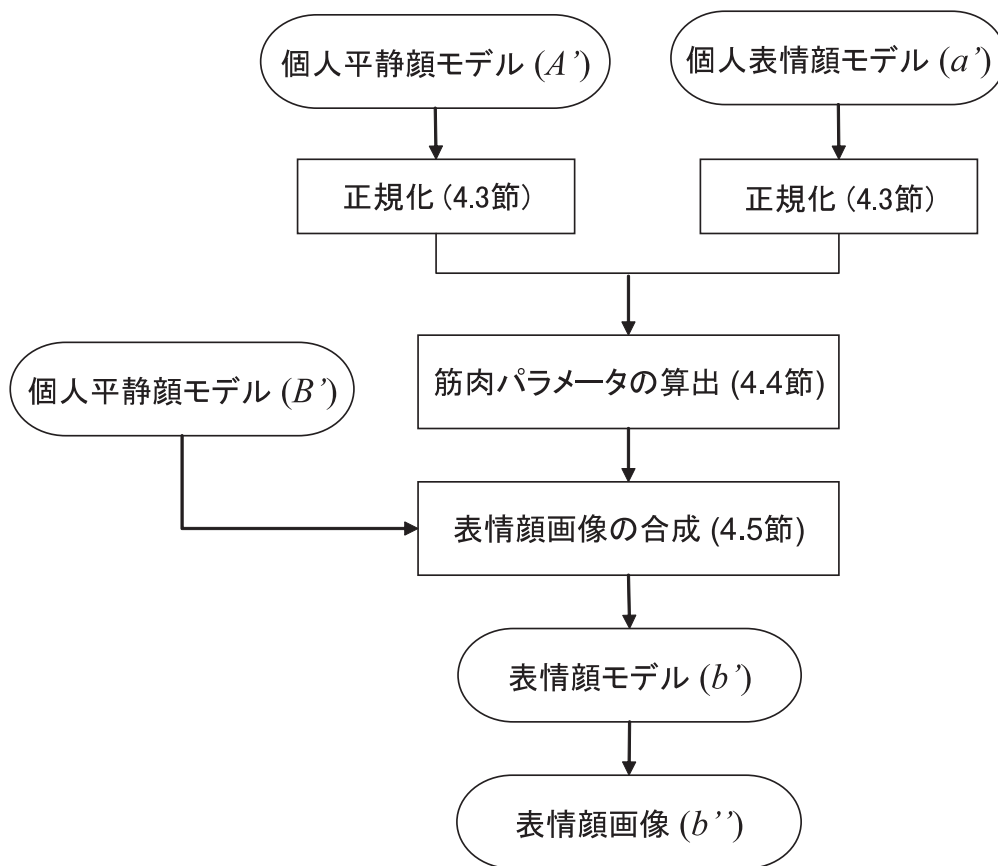


図 4.1 表情顔画像の合成の流れ

括約筋の筋肉パラメータを算出する前に放射状モデルと縦線モデルの中，どちらのモデルを用いるかを判定する必要がある．括約筋モデルの判定については4.2節で述べる．3章で述べた手法により生成された個人平静顔モデル (A') と個人表情顔モデル (a') の頂点群には顔筋肉の特徴点 $M.P.(neut.)$ と $M.P.(expr.)$ が含まれている．そこで，顔筋肉の特

徴点 $M.P.(neut.)$ と $M.P.(expr.)$ を用いて筋肉パラメータを算出する．筋肉パラメータの算出の前に，個人平静顔モデル (A') と個人表情顔モデル (a') の座標の正規化が必要である．正規化については4.3節で述べ，筋肉パラメータの算出については4.4節で述べる．算出された筋肉パラメータに基づいて筋肉顔モデルの表情生成のメカニズムにより表情顔画像を合成する．表情顔画像の合成については4.5節で述べる．

4.2 括約筋モデルの判定

2.2 節で述べたように筋肉顔モデルの括約筋には放射状モデルと縦線モデルがある．そのため，入力の個人表情顔画像からどちらのモデルを用いるかを判定する必要がある．

目の表情には縦方向の動きのみが存在すると仮定して縦線モデルのみを用いる．一方，口の表情には放射状および縦方向の動きが存在するので，どちらのモデルを用いるかを顔部位の特徴点として抽出した口の両端の頂点間の距離に基づいて判断する．

個人平静顔画像の口の両端の頂点の距離を $m.d.(neut.)$ ，個人表情顔画像の口の両端の頂点の距離を $m.d.(expr.)$ とする．図 4.2 に $m.d.(neut.)$ と $m.d.(expr.)$ を示す．

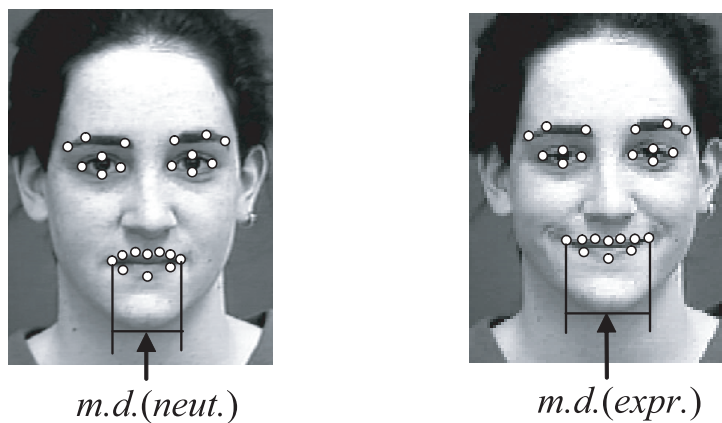


図 4.2 $m.d.(neut.)$ と $m.d.(expr.)$

そこで， $\frac{2}{3}m.d.(neut.) < m.d.(expr.) < \frac{4}{3}m.d.(neut.)$ の場合は縦線モデルを用いる．それ以外の場合は放射状モデルを用いる．

括約筋のモデルの判定のためのしきい値 ($\frac{2}{3}, \frac{4}{3}$) は予備実験により定めた．まず，375 枚の表情顔画像を用い，人物ごとに平静顔画像と表情顔画像の両目尻 $e.d.(neut.)$ と $e.d.(expr.)$ および口の両端の距離 $m.d.(neut.)$ と $m.d.(expr.)$ を測る．次に，平静顔画像の両目尻の長さ $e.d.(neut.)$ を基準に表情顔画像の両目尻の長さ $e.d.(expr.)$ および口の両端の距離 $m.d.(expr.)$ を正規化する．最後に，平静顔画像と正規化した表情顔画像の口の両端の距離を $m.d.(neut.)$ と $m.d.(expr.)$ の長さを表情ごとに計測し，しきい値 ($\frac{2}{3}, \frac{4}{3}$) を定めた．

4.3 正規化

入力の顔画像は頭を固定していないため、撮影時に微妙な動きが生じてしまうことから画像上の顔の大きさの違いや回転が生じる。そのため、筋肉パラメータの算出の前に、3章で述べた手法により生成された個人平静顔モデルと個人表情顔モデルの正規化が必要である。

正規化は2段階に分けて行う。まず、個人平静顔モデルと個人表情顔モデルをそれぞれ座標の正規化を行う。詳細には、両目尻の midpoint を顔モデルの中心に位置するようにし、両目尻を結んだ直線が水平になるように回転させ、顔モデルの位置と方向に対する座標の正規化を行う。次に、個人平静顔モデルの両目尻の長さを基準に、個人表情顔モデルの両目尻の長さを比較して個人表情顔モデルの大きさの正規化を行う。これらにより、微妙な動きによる顔の大きさおよび回転による顔モデルの頂点群における位置座標の誤差を除去することができる。その結果、筋肉パラメータの算出の精度を上げることができる。

顔モデルの座標の正規化を図4.3に示す。

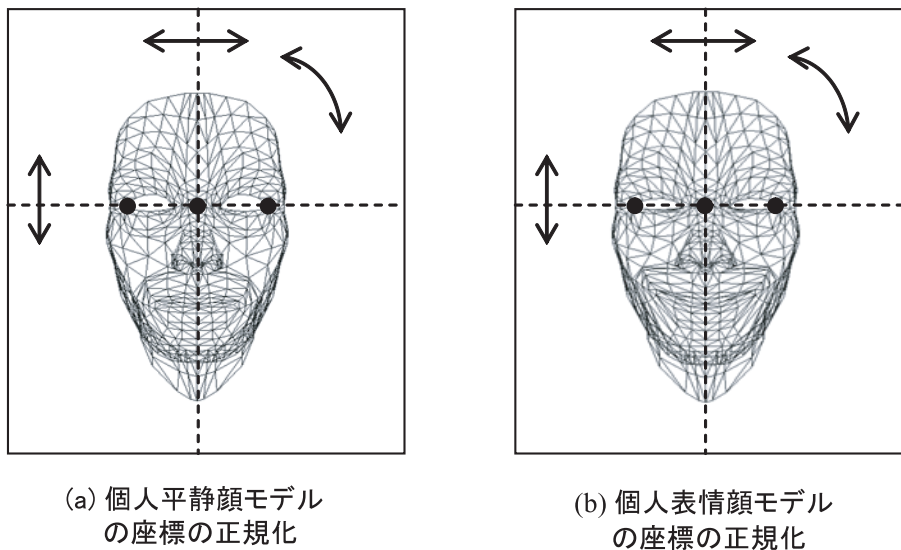


図 4.3 顔モデルの座標の正規化

4.4 筋肉パラメータの算出

筋肉パラメータの算出の際に、筋肉 i から影響を受ける一頂点 j の変位 ($V_{j(expr.)}^{(i)} - V_{j(neut.)}^{(i)}$) を用いる。その変位が大きいほうが精度よく算出できると考えられる。それにより、顔筋肉の特徴点 $M.P.$ は筋肉パラメータ c を算出する際に、精度よく算出できる頂点である。

筋肉パラメータは筋肉 i ごとに算出する。まず、4.3 節で述べた正規化により求められた個人平静顔モデルと個人表情顔モデルの顔筋肉の特徴点 $M.P.(neut.)$ と $M.P.(expr.)$ の位置情報を用いて顔筋肉の特徴点の変位 ($V_{M.P.(expr.)}^{(i)} - V_{M.P.(neut.)}^{(i)}$) を求める。次に、求められた顔筋肉の特徴点の変位を用いて筋肉パラメータを算出する。

3.3.2 で述べたように、筋肉ごとに顔筋肉の特徴点 $M.P.$ は一点ずつ選ばれている。すなわち、各筋肉の筋肉パラメータ c_i はその筋肉と対応する各顔筋肉の特徴点の変位 ($V_{M.P.(expr.)}^{(i)} - V_{M.P.(neut.)}^{(i)}$) に基づいて算出する。

4.4.1 線形筋

筋肉顔モデルの表情は、等方性の筋肉パラメータ (c : スカラー) が定めれば、頂点群の座標 $P_n(x, y, z)$ が求まることにより生成される仕組みである。したがって、表情顔画像を合成するときは筋肉パラメータ c を用いて筋肉顔モデルの z 方向も含め、3次元座標を求めている。ただし、本論文では筋肉パラメータ c を求めるときに正面画像を対象にしているので、頂点群の z 座標は変化しないとしている。

線形筋の筋肉パラメータ c_i は筋肉 i から影響を受ける顔筋肉の特徴点 $M.P.$ の変位 ($V_{M.P.(expr.)}^{(i)} - V_{M.P.(neut.)}^{(i)}$) を用いて式 (4.1) により算出する。

$$c_i = \frac{V_{M.P.(expr.)}^{(i)} - V_{M.P.(neut.)}^{(i)}}{r_{M.P.(neut.)}^{(i)} \cos \alpha_{M.P.(neut.)}^{(i)} \frac{V_{M.P.(neut.)}^{(i)}}{|V_{M.P.(neut.)}^{(i)}|}} \quad (4.1)$$

ここで、 r は半径方向の影響程度を決めるパラメータであり、 $\cos \alpha$ は円周方向の影響程度を決めるパラメータである。これらは式 (2.1) の筋肉の影響程度を決めるパラメータ ($r, \cos \alpha$) と同一である。2.3 節で述べたように、 r と $\cos \alpha$ は筋肉顔モデルの頂点群の初期値により定められるので、表情が変わっても一定である。これにより、個人平静顔モデルの顔筋肉の特徴点 $M.P.(neut.)$ の値を用いる。

式 (4.1) に示した線形筋の顔筋肉の特徴点 $M.P.$ の変位 ($V_{M.P.(expr.)}^{(i)} - V_{M.P.(neut.)}^{(i)}$) と筋肉ベクトル (M , 図 2.6 参考) は同一方向になるべきである。しかしながら、顔画像から求めた顔筋肉の特徴点 $M.P.$ を用いて線形筋の筋肉パラメータを算出するので、必ず同一方向に

なるとは限らない。したがって、式(4.2)を用いて線形筋の筋肉パラメータを算出する。

$$c_i = \sqrt{c_{i;x}^2 + c_{i;y}^2} \quad (4.2)$$

$$c_{i;x} = \frac{x V_{M.P.(expr.)}^{(i)} - x V_{M.P.(neut.)}^{(i)}}{x r_{M.P.(neut.)}^{(i)} \cos \alpha_{M.P.(neut.)}^{(i)} \frac{x V_{M.P.(neut.)}^{(i)}}{|x V_{M.P.(neut.)}^{(i)}|}}, c_{i;y} = \frac{y V_{M.P.(expr.)}^{(i)} - y V_{M.P.(neut.)}^{(i)}}{y r_{M.P.(neut.)}^{(i)} \cos \alpha_{M.P.(neut.)}^{(i)} \frac{y V_{M.P.(neut.)}^{(i)}}{|y V_{M.P.(neut.)}^{(i)}|}}$$

ここで、 x^* 、 y^* はそれぞれベクトル*の x 、 y 成分を意味している。

4.4.2 括約筋

括約筋の筋肉パラメータは4.2節の括約筋モデルの判定結果に基づいて式(4.3)または式(4.4)により算出する。

放射状モデルの場合は、括約筋の筋肉パラメータ c_i は筋肉 i から影響を受ける顔筋肉の特徴点 $M.P.$ の変位 ($V_{M.P.(expr.)}^{(i)} - V_{M.P.(neut.)}^{(i)}$) を用いて式(4.3)により算出する。

$$c_i = \sqrt{c_{i;x}^2 + c_{i;y}^2} \quad (4.3)$$

$$c_{i;x} = \frac{x V_{M.P.(expr.)}^{(i)} - x V_{M.P.(neut.)}^{(i)}}{x r_{M.P.(neut.)}^{(i)} \frac{x V_{M.P.(neut.)}^{(i)}}{|x V_{M.P.(neut.)}^{(i)}|}}, c_{i;y} = \frac{y V_{M.P.(expr.)}^{(i)} - y V_{M.P.(neut.)}^{(i)}}{y r_{M.P.(neut.)}^{(i)} \frac{y V_{M.P.(neut.)}^{(i)}}{|y V_{M.P.(neut.)}^{(i)}|}}$$

一方、縦線モデルの場合は式(4.4)により算出する。

$$c_{i;y} = \frac{y V_{M.P.(expr.)}^{(i)} - y V_{M.P.(neut.)}^{(i)}}{y r_{M.P.(neut.)}^{(i)} \frac{y V_{M.P.(neut.)}^{(i)}}{|y V_{M.P.(neut.)}^{(i)}|}} \quad (4.4)$$

ここで、 x^* 、 y^* はそれぞれベクトル*の x 、 y 成分を意味している。 r は半径方向の影響程度を決めるパラメータであり、式(4.1)の r と同一である。

4.5 表情顔画像の合成

4.4節の手法により求められた筋肉パラメータに基づいて2.3節の筋肉顔モデルの表情生成のメカニズムにより表情顔画像を合成する．その流れを図4.4に示す．

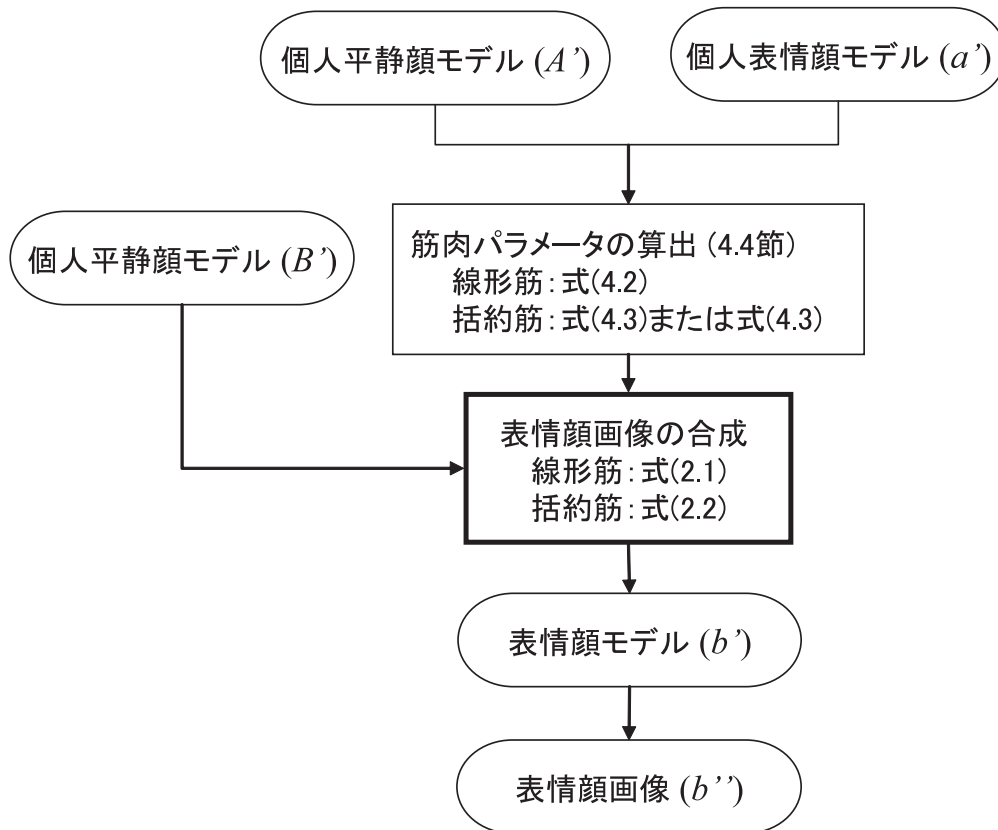


図 4.4 表情顔画像の合成の結果例

線形筋においては，式 (4.2) により算出した線形筋の筋肉パラメータ c を用いると式 (2.1) により各線形筋の影響範囲内にある頂点群の移動情報が得られる．一方，括約筋においては，式 (4.3) または式 (4.4) により算出した括約筋の筋肉パラメータ c を用いると式 (2.2) により各括約筋の影響範囲内にある頂点群の移動情報が得られる．すなわち，各筋肉と対応する一点の顔筋肉の特徴点 $M.P.$ の変位に基づいて算出した筋肉パラメータにより，影響範囲内にあるすべて頂点群の移動情報が得られることである．

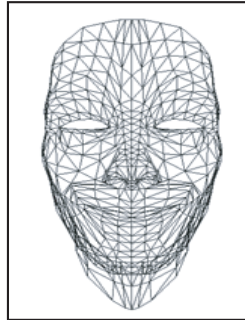
式 (4.2) および式 (4.3) または式 (4.4) により得られた頂点群の移動により表情顔モデルが合成できる．さらに，レンダリングにより表情顔画像が合成できる．その結果，見本となる入力の個人表情顔画像の表情に基づく表情顔画像が合成できる．

表情顔画像の合成の結果例を図 4.5 に示す．図 4.5(a) は入力の個人表情顔画像である．

そして、図 4.5(b) と図 4.5(c) は出力の表情顔モデルと表情顔画像である。



(a) 個人表情顔画像



(b) 表情顔モデル



(c) 表情顔画像

図 4.5 表情顔画像の合成の結果例

4.6 総括

本章では、3章により生成された個人平静顔モデルと個人表情顔モデルの顔筋肉の特徴点 $M.P.(neut.)$ と $M.P.(expr.)$ の相違から筋肉パラメータの算出およびそれに基づく表情顔画像を合成する手法を提案した。その際のポイントを以下に述べる。

- 入力の顔画像の表情変化から筋肉パラメータを算出する。

3章で提案した手法により、入力の個人平静顔画像と個人表情顔画像から個人平静顔モデルと個人表情顔モデルが生成できた。これにより、個人平静顔モデルと個人表情顔モデルの顔筋肉の特徴点 $M.P.(neut.)$ と $M.P.(expr.)$ が求まった。

筋肉ごとに対応する顔筋肉の特徴点 $M.P.$ は一点ずつである。すなわち、各筋肉の筋肉パラメータ c_i はその筋肉と対応する各顔筋肉の特徴点の変位 $(V_{M.P.(expr.)}^{(i)} - V_{M.P.(neut.)}^{(i)})$ に基づいて算出した。

- 筋肉パラメータに基づく表情顔画像の合成

各筋肉と対応する一点の顔筋肉の特徴点 $M.P.$ の変位に基づいて算出した筋肉パラメータにより、影響範囲内にあるすべて頂点群の移動情報を得た。その結果、見本となる入力の個人表情顔画像の表情に基づく表情顔画像が合成できた。

第5章では、本章で述べた手法を適用した実験について述べる。実験では個人平静顔モデル (B') が見本となる顔モデル (A') と同一人物である場合 ($B' = A'$, 本人) を用いて本論文で提案した手法によるシステムの検証を行う。

第 5 章

実 験

5.1 概要

本論文で提案した表情顔画像の合成手法は，平静顔から表情顔までの表情変化に注目している．そのため，表情顔画像を合成するためには，基準表情として平静顔画像が必要となる．

実験のための画像データとしては Cohn-Kanade Facial Expression Database[52] を用いている．このデータベースには210人の表情顔画像が含まれており，同じ人の様々な表情顔画像を含んでおり，平静顔画像も含まれている．年齢は18～50歳であり，性別は女性の69%と男性の31%である．また，画像の背景には特徴があまりなく，顔は画像の中心にあって正面を向いている．入力画像の例を図5.1に示す．



図 5.1 入力画像の例

1.5 節で述べたように，個人平静顔モデル (B') が見本となる顔モデル (A') と同一人物である場合 ($B' = A'$ ，本人) は，4 章で合成した表情顔モデル (b') と表情顔画像 (b'') は 3 章で生成した個人表情顔モデル (a') と同等の結果が得られるべきであり，システムの検証が可能となる．そこで，実験では，個人平静顔モデル (B') が見本となる顔モデル (A') と同一人物である場合 ($B' = A'$ ，本人) を用いて本論文で提案した手法によるシステムの検証を行う．実験の入力画像としては，Cohn-Kanade Facial Expression Database の中から様々な表情画像および表情変化が連続画像として保存されている人物の画像を選んだ．

以下に，実験の内容について述べる．

- 実験 1：従来顔モデルを用いた従来手法による表情顔画像の合成

筆者は，本論文で述べた表情顔画像の合成の従来手法として，線形筋のみを用いた筋肉顔モデルを提案し，入力顔画像から線形筋の筋肉パラメータを算出する手法を提案した [53]．そこで，実験 1 では，従来手法による表情顔画像の合成により，システムの検証を行う．さらに，連続画像を用いて従来手法により表情顔画像を合成する．最後に，実験結果を用いて主観評価および定量評価を行い，従来手法によるシステムの有効性を確認する．

- 実験 2：筋肉顔モデルを用いた提案手法による表情顔画像の合成

筆者は，本論文で述べた表情顔画像の合成の手法として，従来の線形筋に括約筋を加えた筋肉顔モデルを提案し，入力顔画像から筋肉パラメータを算出する手法を提案した [54]．そこで，実験 2 では，提案手法による表情顔画像の合成により，本論文で提案したシステムの検証を行う．そして，提案手法の有効性を確認するために従来手法および提案手法により表情顔画像を合成し，比較する．さらに，連続画像を用いて従来手法および提案手法により表情顔画像を合成し，比較する．最後に，実験結果を用いて主観評価および定量評価を行い，提案手法によるシステムの有効性を確認する．

5.2 実験 1：従来顔モデルを用いた従来手法による表情顔画像の合成

実験 1 では，個人平静顔モデル (B') が見本となる顔モデル (A') と同一人物である場合 ($B' = A'$ ，本人) を用いて本論文で提案した手法 (図 1.1 の参照) の検証を目的とする．

筆者は，本論文で述べた表情顔画像の合成の従来手法として，線形筋のみを用いた筋肉顔モデルを提案し，入力顔画像から線形筋の筋肉パラメータを算出する手法を提案した [53]．そこで，実験 1 では従来手法による表情顔画像の合成により，システムの検証を行う．さらに，連続画像を用いて従来手法により表情顔画像を合成する．最後に，実験結果を用いて主観評価および定量評価を行う．











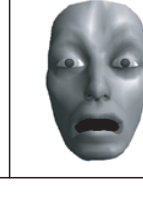

入力として，表情変化がある表情顔画像を用いた．まず，顔部位の特徴点を抽出し，フィッティングにより個人平静顔モデルと個人表情顔モデルを生成した．次に，個人平静顔モデルと個人表情顔モデルの相違から各筋肉の筋肉パラメータを算出した．最後に，算出した筋肉パラメータに基づいて表情顔画像を合成した．

実験 1 では，まず，5 人 (人物 A～E) の様々な顔画像を入力として用い，上記で述べた流れにより合成した表情顔画像の結果を人物ごとに分けた．その結果を図 5.2 と図 5.3 に示す．図 5.2 と図 5.3 の上段が見本となる入力表情顔画像であり，下段が出力表情顔画像の合成結果である．主観的ではあるが，図 5.2 と図 5.3 の結果から見本となる入力顔画像の表情に基づく表情顔画像が合成できたことが分かる．



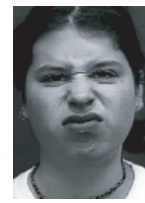

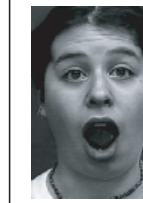
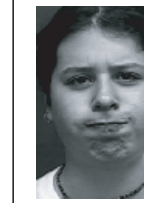




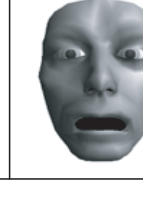

次に，図 5.2 と図 5.3 に示した実験 1 の結果画像を用いて 22 名を対象にして主観評価を行った．入力表情顔画像 (表情 I) と出力表情顔画像 (表情 O から生成した画像) の 25 組を用意した．その内，13 組は入力表情顔画像と提案手法により合成した出力表情顔画像の組合せ ($O = I$) であり，12 組がそれ以外の表情 ($O \neq I$) である．入力顔画像の表情と出力顔画像の表情が同じ表情なのか異なる表情なのかを判断してもらった (表 5.1)．表 5.1 に示したように入力表情顔画像と出力表情顔画像が同じ表情であると答えたのが 89% である．したがって，本論文で提案した手法が有効であるといえる．

表 5.1 主観評価の結果




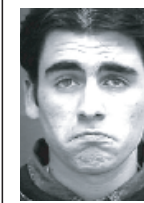
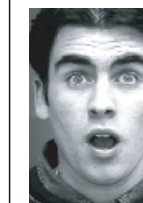







主観評価	提 案システム	
	$O = I$	$O \neq I$
$O = I$	89%	31%
$O \neq I$	11%	69%

		表情 1	表情 2	表情 3	表情 4	表情 5	表情 6
入力	顔画像						
出力	顔画像						

(a) 人物 A: 表情顔画像の合成結果













		表情 1	表情 2	表情 3	表情 4	表情 5	表情 6
入力	顔画像						
出力	顔画像						

(b) 人物 B: 表情顔画像の合成結果

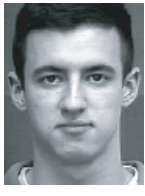

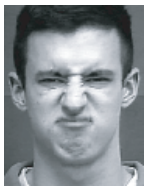

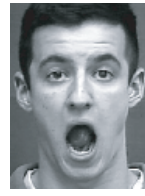





		表情 1	表情 2	表情 3	表情 4	表情 5	表情 6
入力	顔画像						
出力	顔画像						

(c) 人物 C: 表情顔画像の合成結果

図 5.2 実験 1: 人物ごと - 表情顔画像の合成結果 (1/2)

		表情 1	表情 2	表情 3	表情 4	表情 5	表情 6
入力	顔画像						
出力	顔画像						











(d) 人物 D: 表情顔画像の合成結果

		表情 1	表情 2	表情 3	表情 4	表情 5
入力	顔画像					
出力	顔画像					

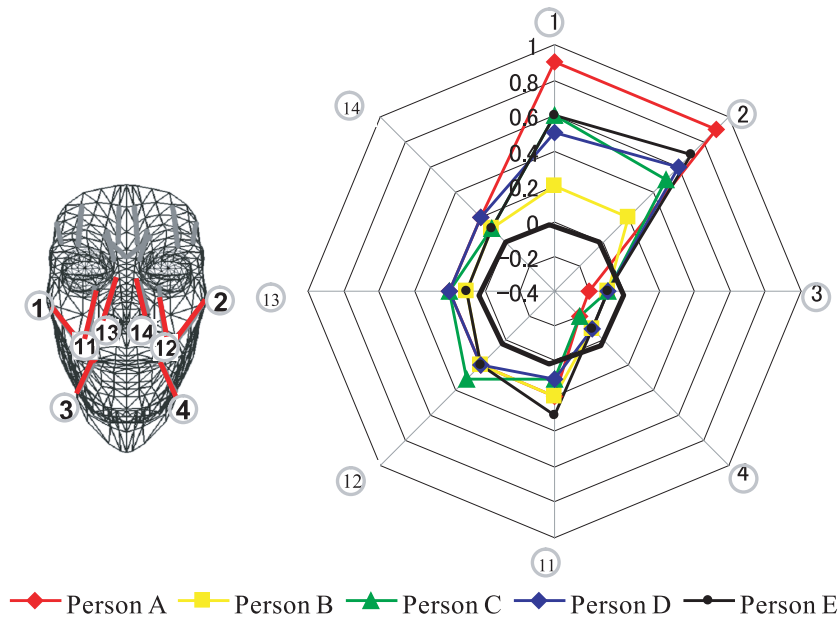
(e) 人物 E: 表情顔画像の合成結果

図 5.3 実験 1: 人物ごと - 表情顔画像の合成結果 (2/2)

次に，実験1の5人(人物A~E)の表情ごとの表情顔画像の合成結果を用いて，定量評価を行った．図5.2と図5.3の表情顔画像の合成結果から6種類の基本表情の表情顔画像の合成結果を選んだ．その結果を図5.4~図5.9に示す．

		人物 A	人物 B	人物 C	人物 D	人物 E
入力	顔画像					
	顔画像(形状)					

(a) 表情顔画像(幸福)の合成結果


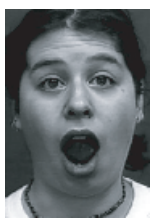


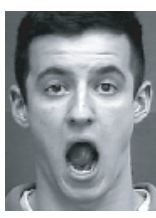







(b) 表情顔画像(幸福)の筋肉パラメータ

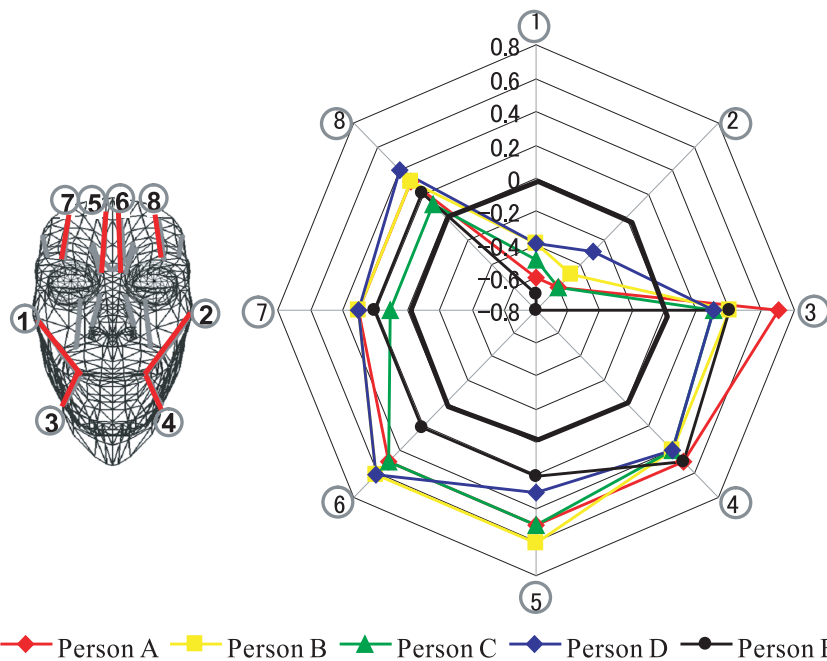
図 5.4 実験1：幸福 - 表情顔画像の合成結果および筋肉パラメータ (1/6)

図 5.4(a) の上段が見本となる入力の表情顔画像であり，下段が出力の表情顔画像の合成結果である．図 5.4(b) は 5 人(人物 A~E)の幸福の表情を用いて，得られた筋肉パラメータ

タである．図 5.4(b) に示した筋肉番号は幸福の表情の際に変化が大きい 8 種類の筋肉のみを表示している．

		人物 A	人物 B	人物 C	人物 D	人物 E
入力	顔画像					
出力	顔画像 (形状)					

(a) 表情顔画像(驚き)の合成結果











(b) 表情顔画像(驚き)の筋肉パラメータ

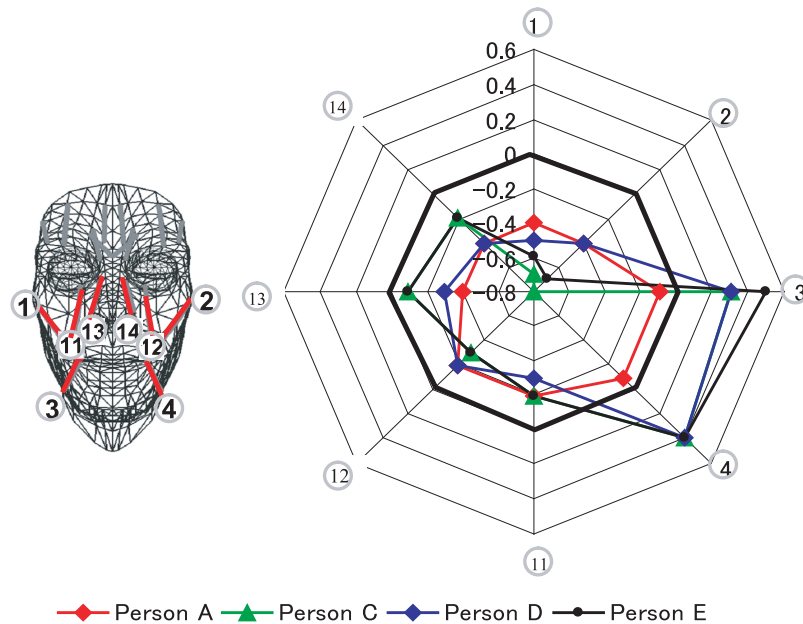
図 5.5 実験 1：驚き - 表情顔画像の合成結果および筋肉パラメータ (2/6)

図 5.5(a) の上段が見本となる入力の表情顔画像であり，下段が出力の表情顔画像の合成結果である．図 5.5(b) は 5 人(人物 A ~ E)の驚きの表情を用いて，得られた筋肉パラメータである．図 5.5(b) 示した筋肉番号は驚きの表情の際に変化が大きい 8 種類の筋肉のみ

を表示している .

		人物 A	人物 B	人物 C	人物 D	人物 E
入力	顔画像		/			
出力	顔画像 (形状)		/			


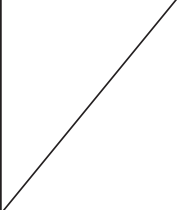


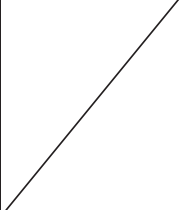

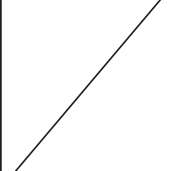


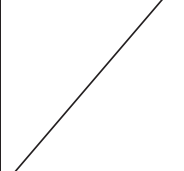
(a) 表情顔画像(悲しみ)の合成結果



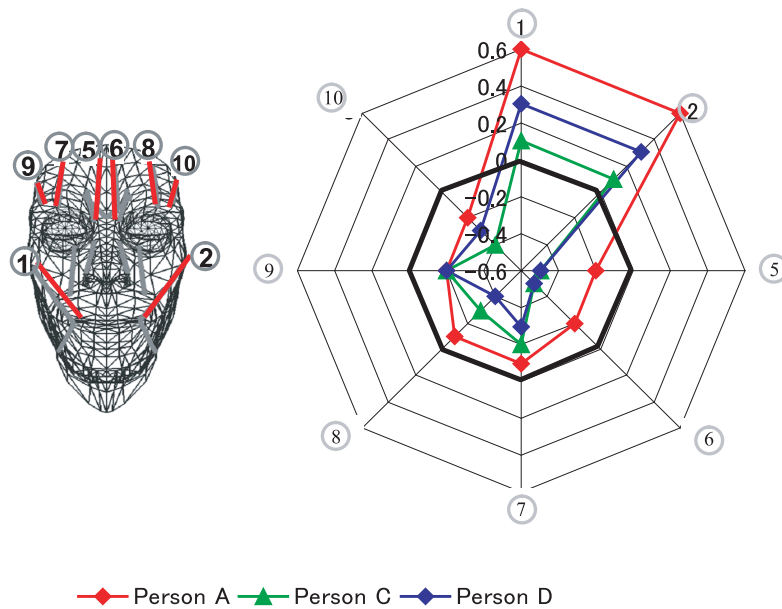
(b) 表情顔画像(悲しみ)の筋肉パラメータ

図 5.6 実験 1 : 悲しみ - 表情顔画像の合成結果および筋肉パラメータ (3/6)

図 5.6(a) の上段が見本となる入力の表情顔画像であり , 下段が出力の表情顔画像の合成結果である . 図 5.6(b) は 4 人の悲しみの表情を用いて , 得られた筋肉パラメータである . 図 5.6(b) 示した筋肉番号は悲しみの表情の際に変化が大きい 8 種類の筋肉のみを表示している .

		人物 A	人物 B	人物 C	人物 D	人物 E
入力	顔画像					
出力	顔画像 (形状)					


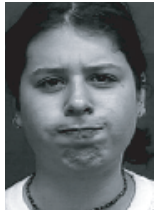




(a) 表情顔画像(恐怖)の合成結果



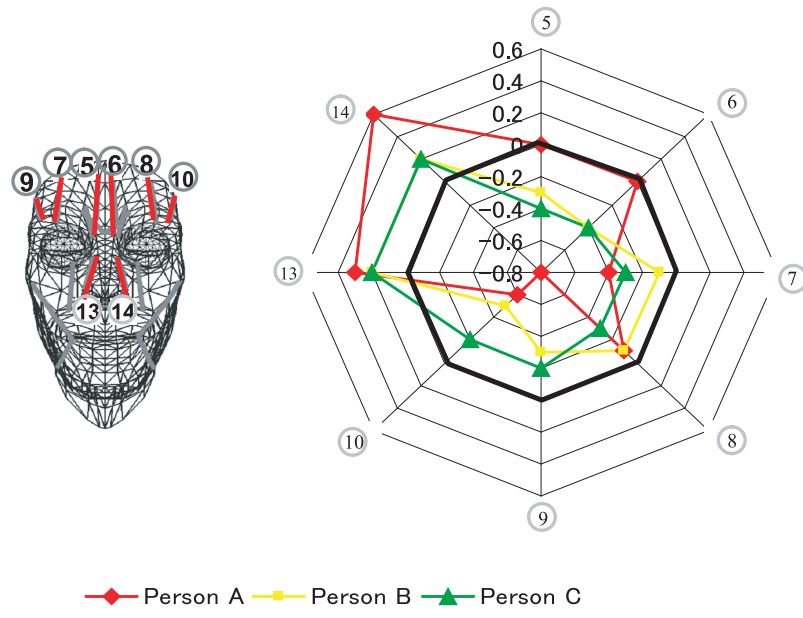
(b) 表情顔画像(恐怖)の筋肉パラメータ

図 5.7 実験 1：恐怖 - 表情顔画像の合成結果および筋肉パラメータ (4/6)

図 5.7(a) の上段が見本となる入力の表情顔画像であり，下段が出力の表情顔画像の合成結果である．図 5.7(b) は 3 人の恐怖の表情を用いて，得られた筋肉パラメータである．図 5.7(b) 示した筋肉番号は恐怖の表情の際に変化が大きい 8 種類の筋肉のみを表示している．

		人物 A	人物 B	人物 C	人物 D	人物 E
入力	顔画像					
	顔画像 (形状)					


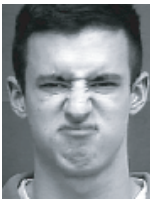


(a) 表情顔画像(怒り)の合成結果



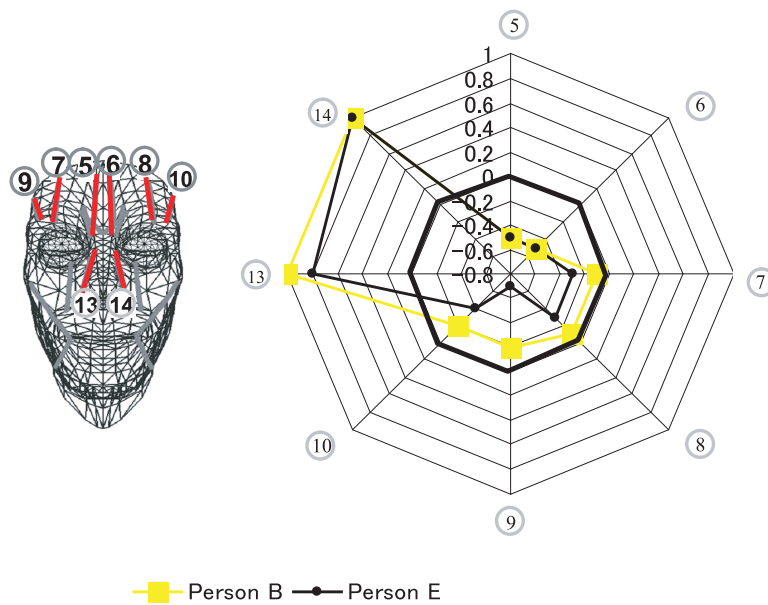
(b) 表情顔画像(怒り)の筋肉パラメータ

図 5.8 実験 1：怒り - 表情顔画像の合成結果および筋肉パラメータ (5/6)

図 5.8(a) の上段が見本となる入力の表情顔画像であり，下段が出力の表情顔画像の合成結果である．図 5.8(b) は 3 人の怒りの表情を用いて，得られた筋肉パラメータである．図 5.8(b) 示した筋肉番号は怒りの表情の際に変化が大きい 8 種類の筋肉のみを表示している．

		人物 A	人物 B	人物 C	人物 D	人物 E
入力	顔画像					
出力	顔画像 (形状)					

(a) 表情顔画像(嫌悪)の合成結果



(b) 表情顔画像(嫌悪)の筋肉パラメータ

図 5.9 実験 1：嫌悪 - 表情顔画像の合成結果および筋肉パラメータ (6/6)

図 5.9(a) の上段が見本となる入力の表情顔画像であり，下段が出力の表情顔画像の合成結果である．図 5.9(b) は 2 人の嫌悪の表情を用いて，得られた筋肉パラメータである．図 5.9(b) 示した筋肉番号は嫌悪の表情の際に変化が大きい 8 種類の筋肉のみを表示している．

図 5.4~ 図 5.9 の (b) に示した筋肉パラメータを見ると，表情ごとに人物によらずほぼ同じ形状となっており，フィッティングおよび筋肉パラメータの算出が妥当に行われていることを示している．また，表情が豊かな人はわずかながら筋肉パラメータの変化が大きいことも分かる．

しかしながら，図 5.4~ 図 5.9 の (b) に示したレーダーグラフには各表情に対して変化が大きい 8 種類の筋肉のみを表示したので，表情ごとの特徴を比較することは困難である．そのため，6 章の応用事例に示している平均の表情顔画像を合成する際のすべての筋肉パラメータに基づいてレーダーグラフを生成した．その結果を図 5.10 に示す．

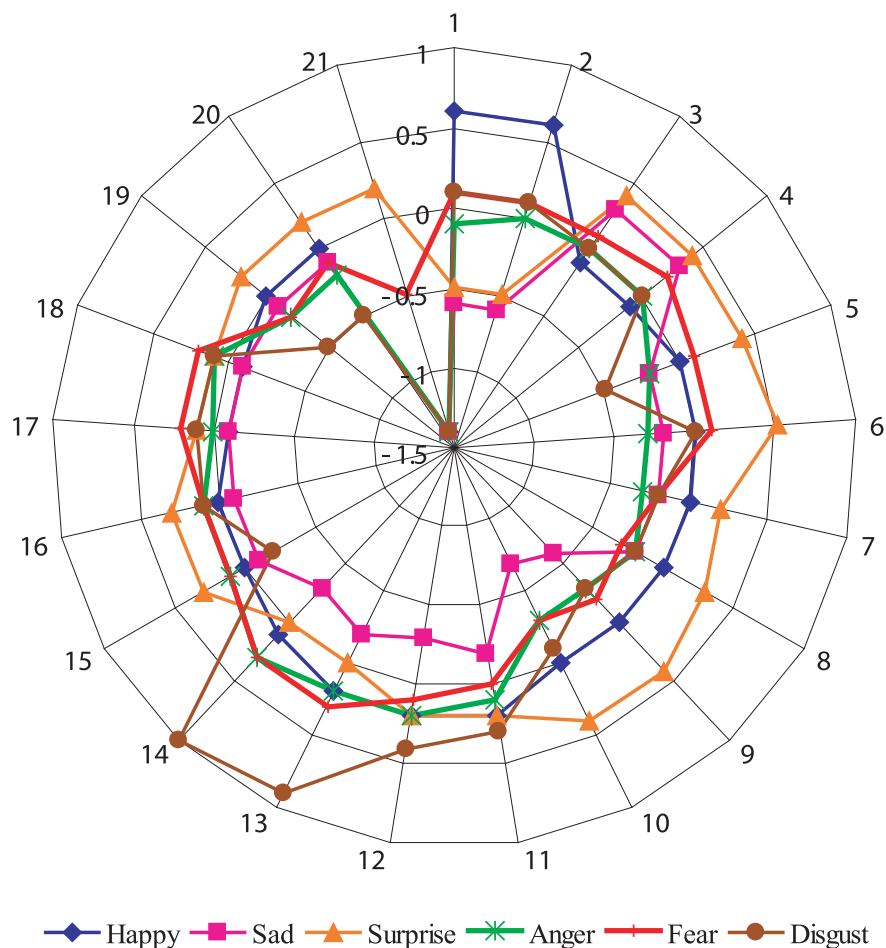
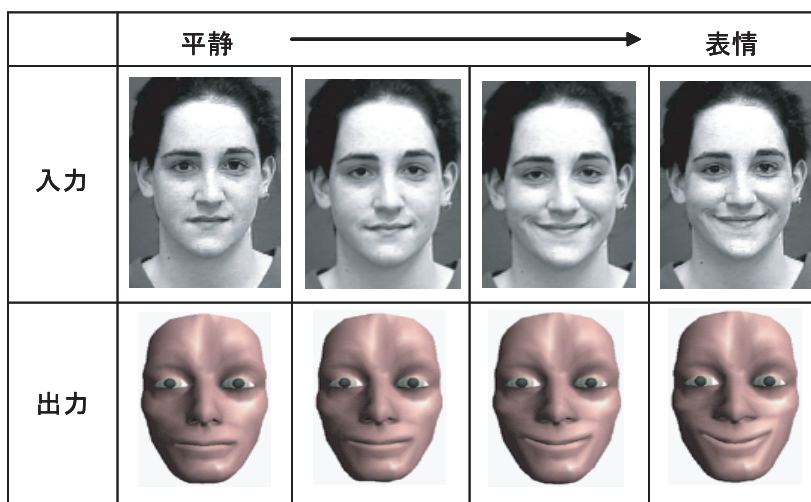


図 5.10 実験 1：表情ごとの筋肉パラメータ

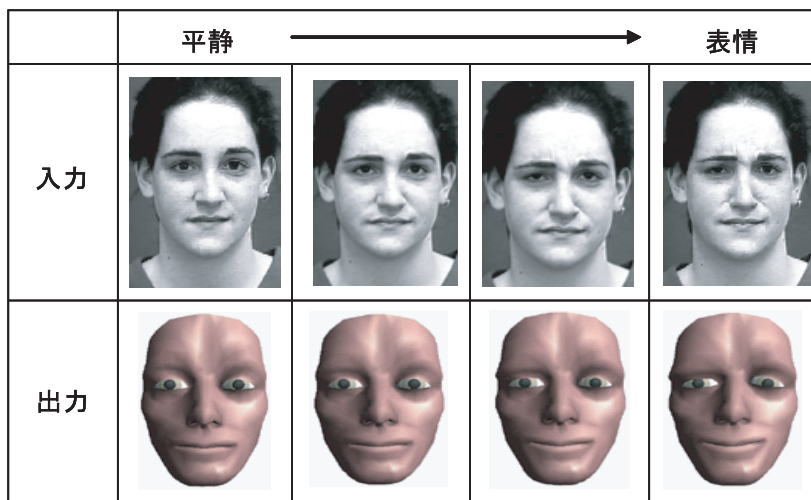
図 5.10 のレーダーグラフ内の 1 ~ 18 は図 2.2 に示した線形筋の筋肉番号と同一である．19 ~ 21 は括約筋であり，19 は左目，20 は右目，21 は口である．図 5.10 に示したよ

うに，表情ごとに大きく変化する筋肉パラメータが異なるためにグラフの形状が異なる．それにより，より多くの被験者のデータを用いる必要はあるが，筋肉パラメータを用いる表情の分類も可能であることを示した．

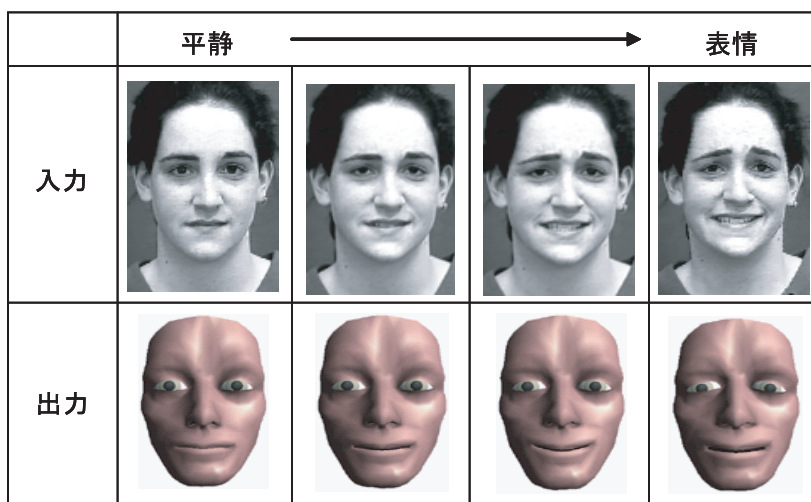
最後に，入力として2人(人物 A, 人物 C)の連続画像を用いて表情顔画像を合成した．その結果の一部を図 5.11 および図 5.12 に示す．図 5.11 および図 5.12 の上段が見本となる入力の表情顔画像であり，下段が出力の表情顔画像の合成結果である．図 5.11 および図 5.12 の結果から主観的ではあるが，入力として連続顔画像を用いても，見本となる入力顔画像の表情に基づく表情顔画像が合成でき，本手法が有効であるといえる．



(a) 幸福

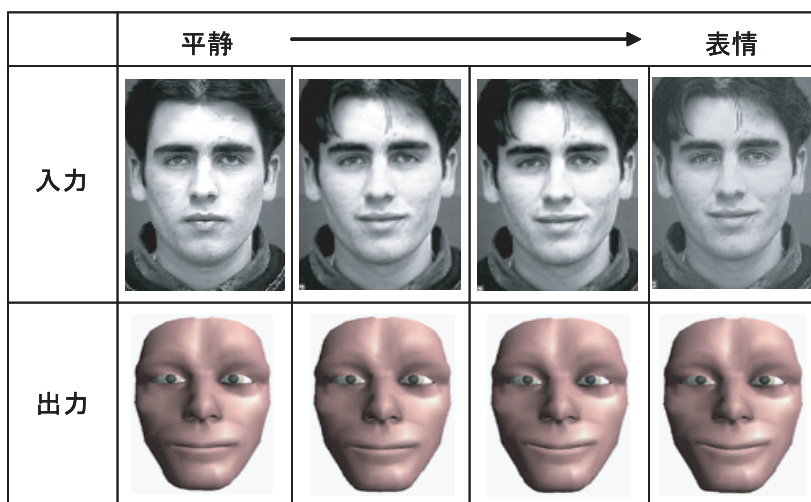


(b) 怒り

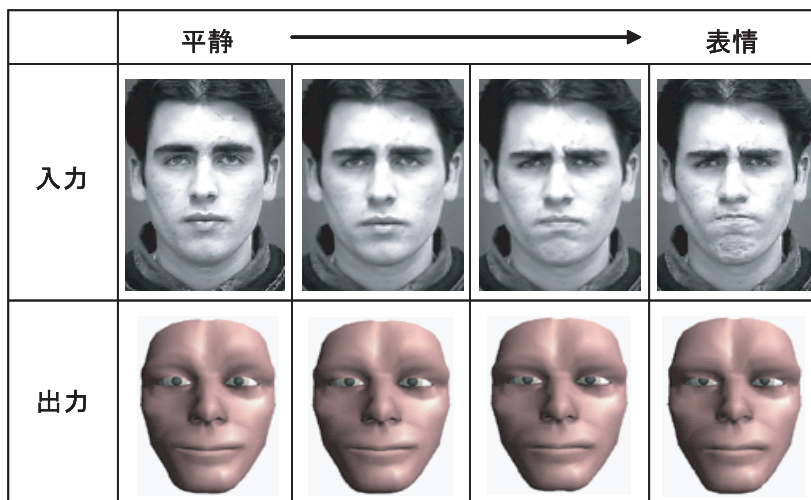


(c) 恐怖

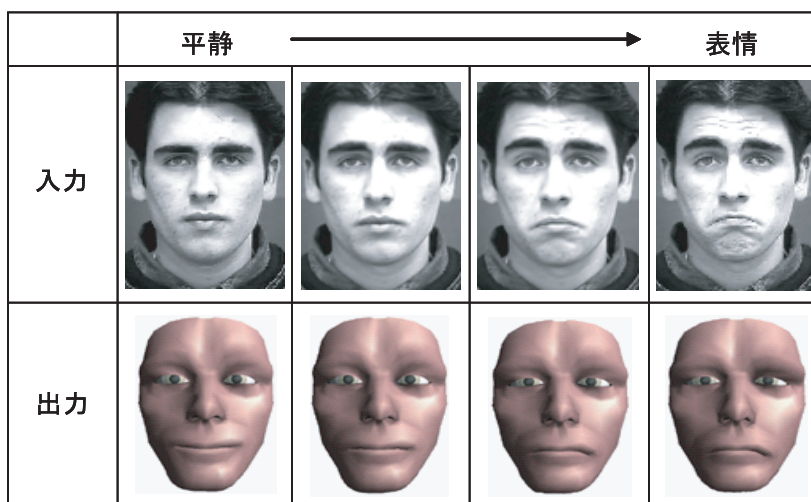
図 5.11 人物 A : 連続画像を用いた表情顔画像の合成結果



(a) 幸福



(b) 怒り



(c) 悲しみ

図 5.12 人物 C : 連続画像を用いた表情顔画像の合成結果

5.3 実験 2：筋肉顔モデルを用いた提案手法による表情顔画像の合成

実験 2 では、個人平静顔モデル (B') が見本となるモデル (A') と同一人物である場合 ($B' = A'$, 本人) を用いて本論文で提案した手法 (図 1.1 の参照) の検証を目的とする。

筆者は、本論文で述べた表情顔画像の合成の手法として、従来の線形筋に括約筋を加えた筋肉顔モデルを提案し、入力顔画像から筋肉パラメータを算出する手法を提案した [54]。そこで、実験 2 では、提案手法による表情顔画像の合成により、本論文で提案したシステムの検証を行う。そして、提案手法の有効性を確認するために従来手法および提案手法により表情顔画像を合成し、比較する。さらに、連続画像を用いて従来手法および提案手法により表情顔画像を合成し、比較する。最後に、実験結果を用いて主観評価および定量評価を行う。

実験 2 では、まず、入力として目と口の開閉の表情顔画像を用い、従来手法および提案手法により表情顔画像を合成した。その結果を図 5.13 に示す。従来顔モデルには括約筋がないため、合成結果に不具合があった。一方、筋肉顔モデルには括約筋があるため、目と口の開閉が入力と同様に合成できたことが分かる。











	入力	出力 1 (Old)		出力 2 (New)	
		形状のみ	テクスチャ	形状のみ	テクスチャ
目の開閉					
口の開閉					

図 5.13 実験 2：従来手法と提案手法の比較 - 目と口の開閉の表情顔画像の合成結果

図 5.13 に示した目と口の開閉の表情顔画像の合成結果は正面画像である．それに加えて，側面の合成結果を図 5.14 に示す．

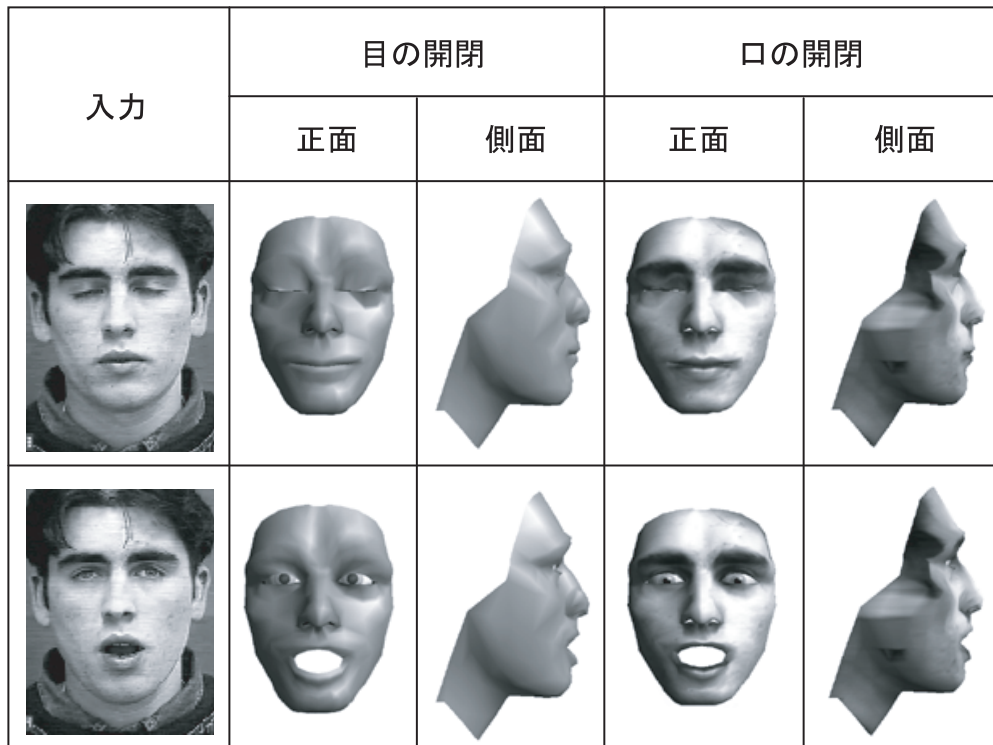


図 5.14 実験 2：正面および側面画像 - 目と口の開閉の表情顔画像の合成結果

本論文で提案した筋肉顔モデルは図 2.2 に示したように 3 次元の顔モデルである．そこで，筋肉顔モデルの表情は，2.3 節で述べたように表情生成のメカニズムにより，頂点群の 3 次元座標の移動値が得られることにより生成される．その結果，筋肉顔モデルの表情は正面画像のみならず，側面画像も表示できる．

本論文で提案した手法による筋肉パラメータの算出は，入力として顔画像の正面画像を用いるため，奥行き (z 座標) は変化しないとし，画像上の顔の $x-y$ 方向の表情変化から求める．このことより，正面画像から求めた筋肉パラメータに基づいて，筋肉顔モデルの 3 次元移動座標を得ることにより，表情顔画像が合成される．そのため， z 座標の結果には信頼性がないが，側面から見た表情顔画像の合成の表示ができる．しかしながら，ほとんどの表情は正面から見たほうが確認しやすいために正面画像を用いるのが一般的である．

次に，入力として4つの表情顔画像を用い，従来手法および提案手法により表情顔画像を合成した．その結果を図5.15に示す．




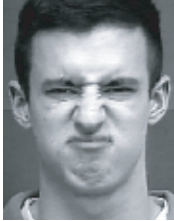


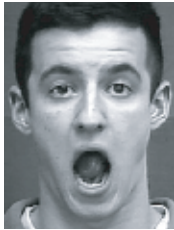





No	Input	Output	
		Old	New
1			
2			
3			
4			

図 5.15 実験 2：表情顔画像の合成結果

図 5.13 および図 5.15 に示したように，従来手法 (old) には括約筋が存在しないので，入力画像と同様の表情をもつ表情顔画像が合成できたが，目の大きさや口の形が異なり，合成結果に不具合があった．一方，提案手法 (new) には括約筋が存在するので，入力画像と同様の表情を持つ表情顔画像が合成できた上に，目と口の形も同等である．これにより，主観的ではあるが，従来手法よりは提案手法のほうが有効であるといえる．

次に，図 5.15 に示した実験 2 の結果画像を用いて 20 名を被験者として主観評価を行った．主観評価は 2 つで構成されている．評価 1 では，図 5.15 の入力画像と提案手法 (new) の出力画像を見比べて，どの程度似ているのかを評価してもらった．評価値はよく似ている (5) からまったく似ていない (1) までの 5 段階に分けている．評価 1 の結果を図 5.16 に示す．

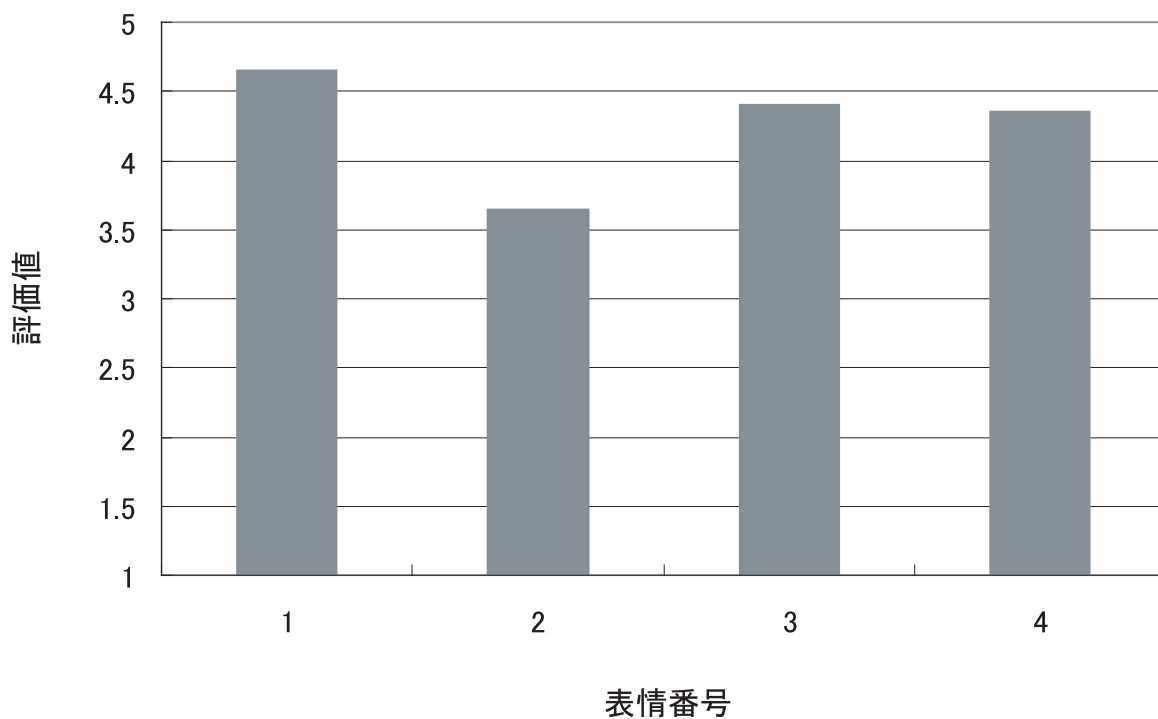


図 5.16 評価 1：主観評価 1

図 5.16 に示したように評価値の平均が 3.65～4.65 点になっており，平均は 4.3 点となった．

評価2では、図5.15の従来手法 (Old) と提案手法 (new) の出力結果からどちらが入力画像と似ているのかを評価してもらった。評価2の結果を図5.17に示す。

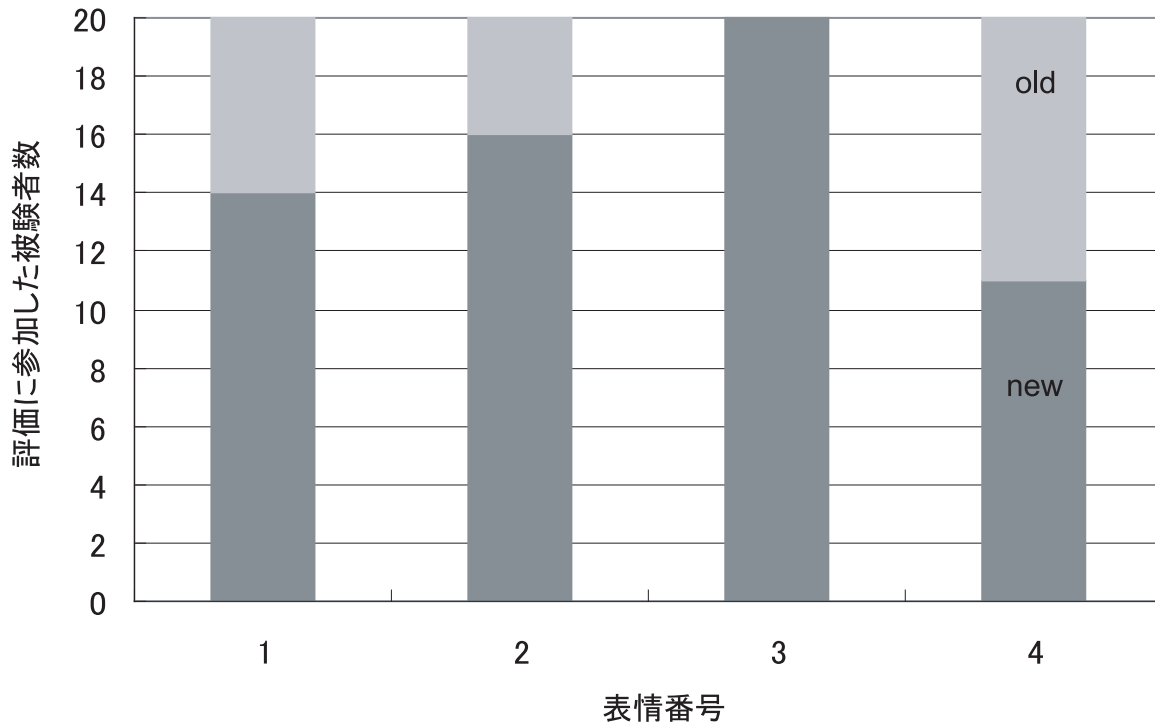


図5.17 評価2：主観評価2

表情1～3は高い評価を得ている。特に、表情3は全員が提案手法 (new) を選択した。これにより、目と口が大きく変化する表情に対しては明らかに提案手法 (new) のほうがいい結果を得たと考えられる。表情4は提案手法 (new) が高い評価を得ているが、従来手法 (Old) とあまり差がない。表情4は目の動きがあまりないため、結果の差もあまりなかったと考えられる。

評価3では、図5.15の表情3の表情顔画像の合成結果を用いて、定量評価を行った。
 図5.15の表情3から得られた筋肉パラメータを図5.18に示す。



図5.14の表情3の入力および出力

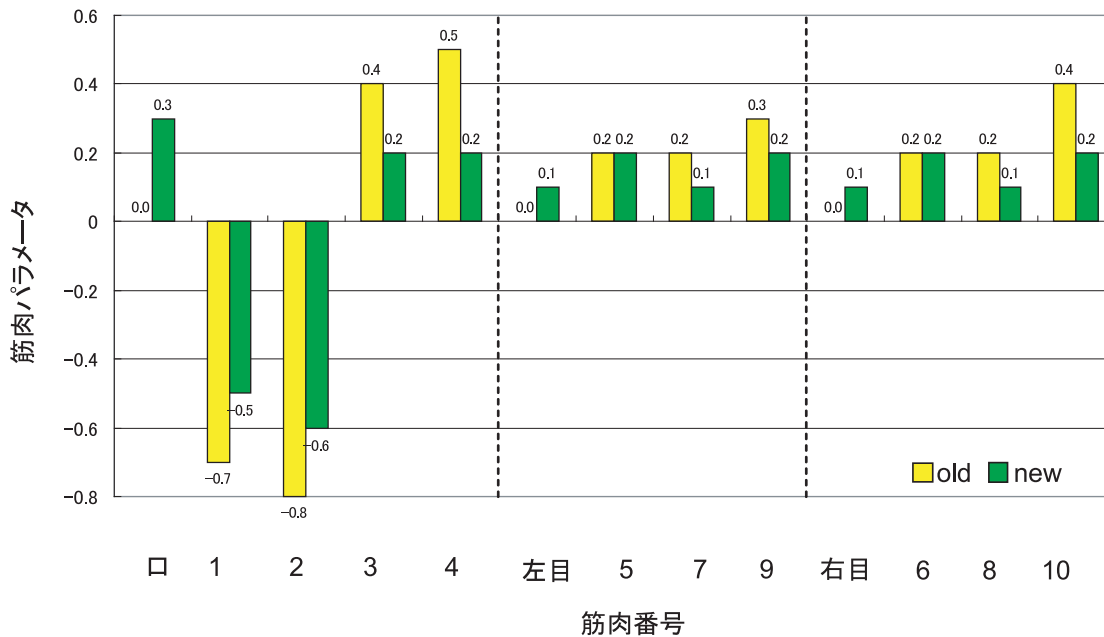


図 5.18 評価3：図5.15の表情3の筋肉パラメータ





















図5.18の筋肉番号は目と口の表情合成に重要な筋肉のみを表示している。従来手法 (Old) では括約筋がないため、括約筋の筋肉パラメータは0である。その代替として目と口の周りの線形筋が大きく伸び縮みした。一方、提案手法 (new) では線形筋とともに括約筋があるために括約筋が伸び縮みしている。目と口の周りにある線形筋の伸び縮みの値が従来手法 (Old) の値と比べ小さくなっている。その理由は、提案手法 (new) では括約筋の追加により今まで括約筋の代わりに大きく伸び縮みしていた線形筋の余分な動きがなくなったためである。すなわち、目周囲の線形筋は本来の額の表情により伸び縮みし、口周囲の線形筋は本来の頬の表情により伸び縮みしている。

最後に，入力として連続画像を用いて提案手法 (new) により表情顔画像を合成した．その結果の一部を図 5.19 に示す．

図 5.19(a) は入力として瞬きをしながら幸福の表情をした顔画像を用いて合成した表情顔画像である．一方，図 5.19(b) は入力として瞬きをしながら悲しみの表情をした顔画像を用いて合成した表情顔画像である．図 5.19 の結果から主観的ではあるが，見本となる入力顔画像の表情に基づく表情顔画像が合成できるとともに目の瞬きも合成できたことが分かる．

図 5.19(a) の瞬きをしながら幸福の表情をした合成結果を用いて，従来手法 (old) による合成結果も示し，比較をした．その結果の一部を図 5.20 に示す．

図 5.20 の入力は，瞬きをしながら幸福の表情をした顔画像である．従来手法 (old) による出力結果は，見本となる入力顔画像の表情に基づく表情顔画像が合成できたが，目の瞬きが合成できなかった．その理由は，従来手法は筋肉顔モデルの筋肉として線形筋のみを用いていて，目の周りに筋肉がなかったために目の表情が合成できなかったからである．提案手法 (new) による出力結果は，図 5.19(a) と同一であり，主観的ではあるが，見本となる入力顔画像の表情に基づく表情顔画像が合成できるとともに目の瞬きも合成できたことが分かる．

Frame	Input	Output	Frame	Input	Output
1			1		
9			5		
12			8		
16			11		
29			13		

(a) 幸福および瞬き

(b) 悲しみおよび瞬き

図 5.19 提案手法による連続画像を用いた表情顔画像の合成
















Frame	Input	Output	
		Old	New
1			
9			
12			
16			
29			

図 5.20 従来手法および提案手法による連続画像を用いた表情顔画像の合成結果

図 5.20 の合成結果を用いて定量評価を行った．図 5.20 の入力連続画像 (1 ~ 29frames) と出力の結果画像を用いて，右目の縦横比を図 5.21 に示す．

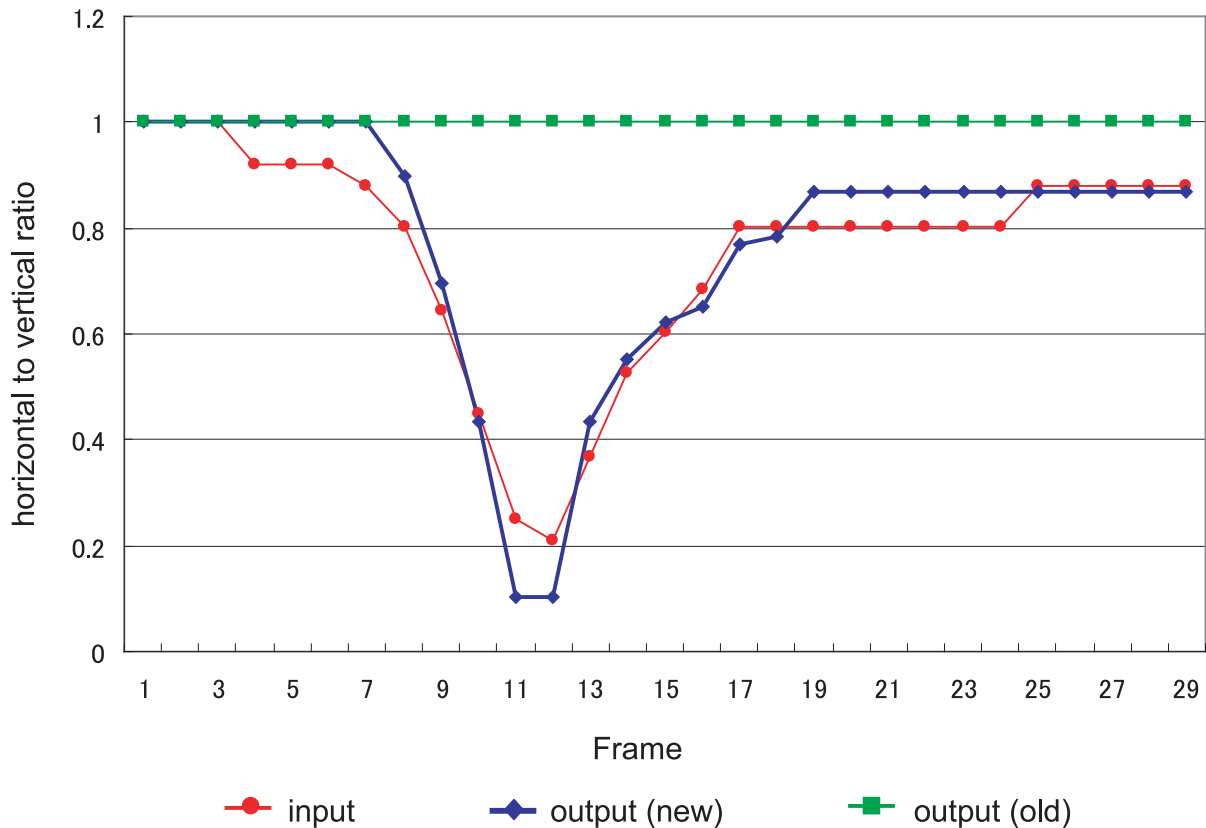


図 5.21 図 5.20 の右目の縦横比

第 1 フレームの目を開いた状態の縦横比 1 とする．従来手法 (old) には括約筋が存在しないので，目の開閉ができなかった．その結果，図 5.21 に示したように従来手法 (old) の縦横比が変化しなかった．一方，提案手法 (new) には括約筋が存在するので，目の開閉が合成できた．その結果，図 5.21 に示したように目の縦横比が入力と同様に变化した．それにより，本論文で提案した手法により，任意の表情とともに目と口の表情も持つ多彩な表情顔画像の合成ができることが確認できた．

5.4 総括

本章では，個人平静顔モデル (B') が見本となる (A') と同一人物である場合 ($B' = A'$ ，本人) を用いて本論文で提案した手法によるシステムの検証を行った．

以下に，実験ごとにまとめる．

- 実験 1：従来顔モデルを用いた従来手法による表情顔画像の合成

実験 1 では，まず，従来顔モデルを用いた従来手法による表情顔画像の合成により，システムの検証を行った．その結果，主観ではあるが，見本となる入力顔画像の表情に基づく表情顔画像が合成できた．次に，実験結果を用いて，主観評価および定量評価を行った．その結果，筋肉パラメータの算出が適切であったことを示した．さらに，表情が豊かな人はわずかながら筋肉パラメータの変化が大きいことも分かった．最後に，連続画像を用いて従来手法により表情顔画像の合成し，筋肉パラメータの算出の有効性を示した．しかしながら，従来顔モデルは線形筋のみを用いたため，口を開いた場合や目を閉じた場合のような入力画像に対しては合成結果に不具合があった．

- 実験 2：筋肉顔モデルを用いた提案手法による表情顔画像の合成

実験 2 では，まず，入力として目と口の開閉の表情顔画像を用い，従来手法および提案手法による表情顔画像の合成により，本論文で提案したシステムの検証を行った．次に，入力として 4 つの表情顔画像を用い，従来手法および提案手法により表情顔画像を合成した．従来手法および提案手法の結果を比較した結果，主観ではあるが，従来手法よりは提案手法のほうが有効であるといえる．次に，合成結果を用いて主観評価および定量評価を行った．その結果，本論文で提案した筋肉顔モデルの効果の検証ができた．最後に，連続画像を用いて従来手法および提案手法により表情顔画像を合成し，比較した．そして，合成結果を用いて主観評価および定量評価を行った．それにより，本論文で提案した手法により，任意の表情とともに目と口の表情も持つ多彩な表情顔画像の合成ができることが確認できた．

第6章

本手法の応用事例

5 章の実験では，個人平静顔モデル (B') が見本となる顔モデル (A') と同一人物である場合 ($B' = A'$ ，本人) を用いて本論文で提案した手法によるシステムの検証を行った．

本論文では，顔画像の合成手法として筋肉パラメータを算出し，算出した筋肉パラメータを用いて表情顔画像を合成した．入力の顔画像から筋肉パラメータが算出できることにより，以下の応用事例が考えられる．

6.1 他人の表情顔画像の合成

本論文で提案した手法は筋肉パラメータに基づいて表情顔画像を合成しているために，他人の平静顔モデルさえあれば，他人の表情顔画像が合成できる．すなわち，個人平静顔モデル (B') が見本となる顔モデル (A') と同一人物でない場合 ($B' \neq A'$ ，他人) は，(A') と (a') の相違から算出する筋肉パラメータに基づいて，(B') の個人性を保ち (a') と同等の表情を持つ表情顔画像 (b'') が合成できる (図 1.1 参照)．その結果，見本となる表情が顔モデルに反映された他人の表情顔画像合成できる．ここで，個人とは入力画像の人物，すなわち，被験者の本人を表す．そして，他人とは見本となる入力の人物と違う人物である．

まず，入力として 2 人の平静と幸福の顔画像を用いて，本人と他人の表情顔画像の合成の流れを図 6.1 に示す．ここで， M は顔モデルであり， C は筋肉パラメータである．

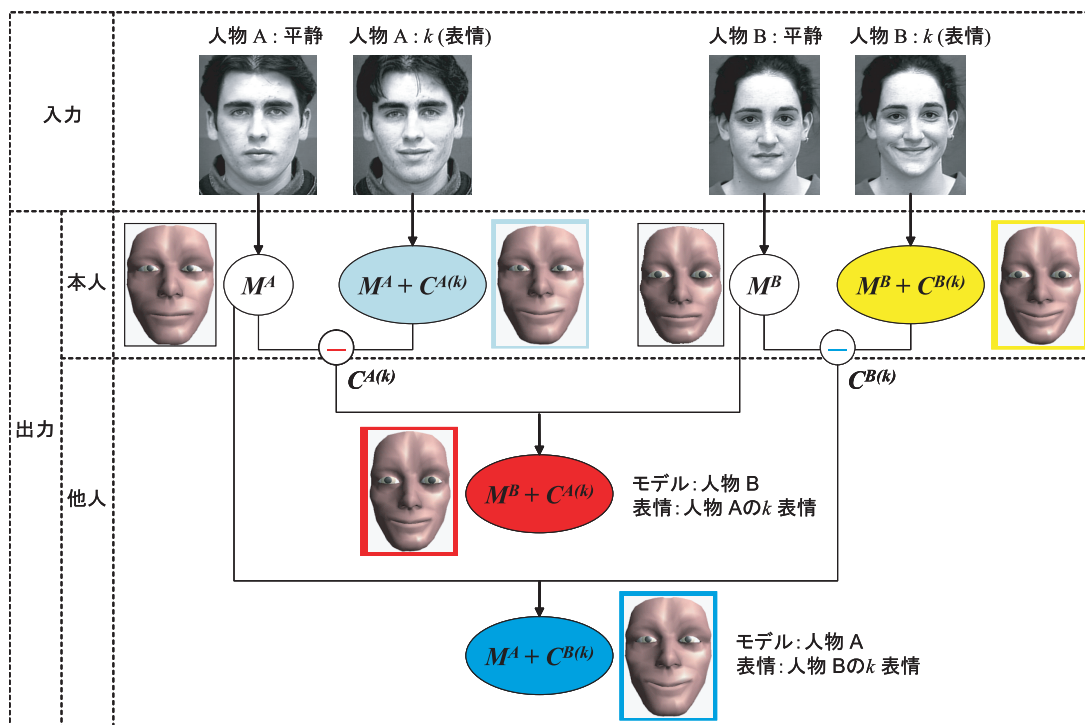


図 6.1 本人と他人の表情顔画像の合成の流れ

図 6.1 の流れにより合成された本人と他人の表情顔画像を図 6.2 に示す .

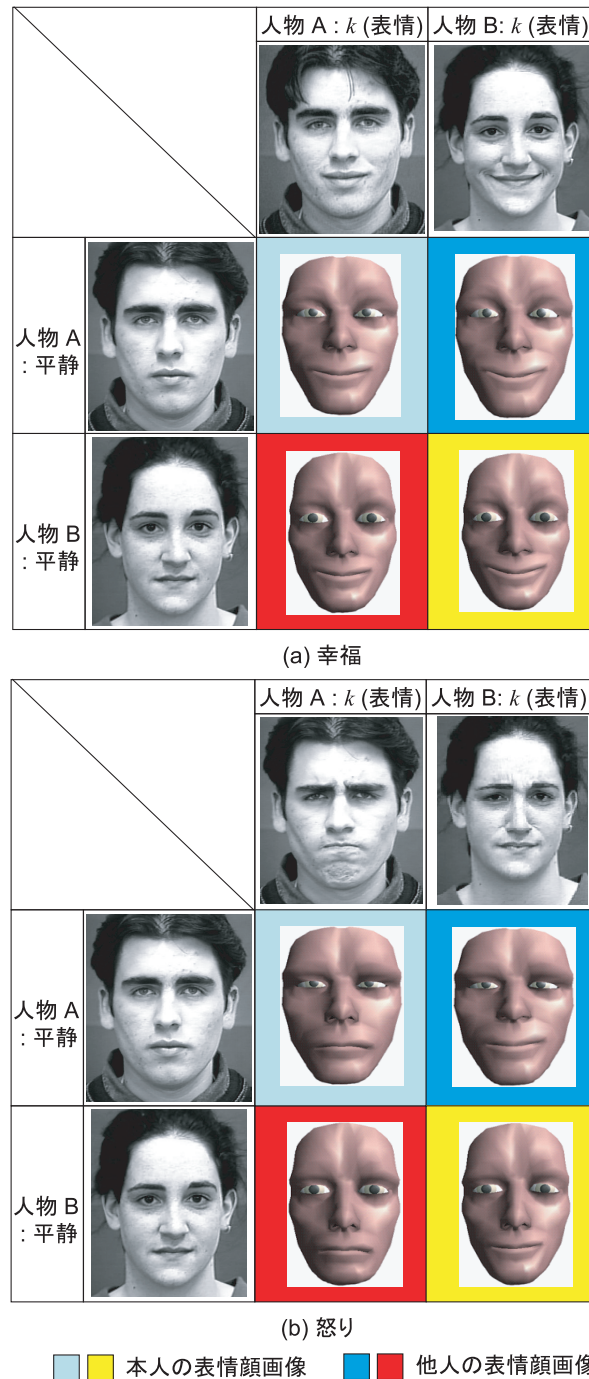


図 6.2 本人と他人の表情顔画像の合成結果

次に，人物 A の個人平静顔モデルを用いて，他人（人物 B~E）の筋肉パラメータに基づいて表情顔画像 ($B' \neq A'$) を合成した．その結果を図 6.3 に示す．結果の比較のために，人物 B~E の本人の顔画像 ($B' = A'$) も合成した．その結果，人物 A の個人性を保ち，他

人(人物 B~E) と同等の表情を持つ表情顔画像が合成できた .

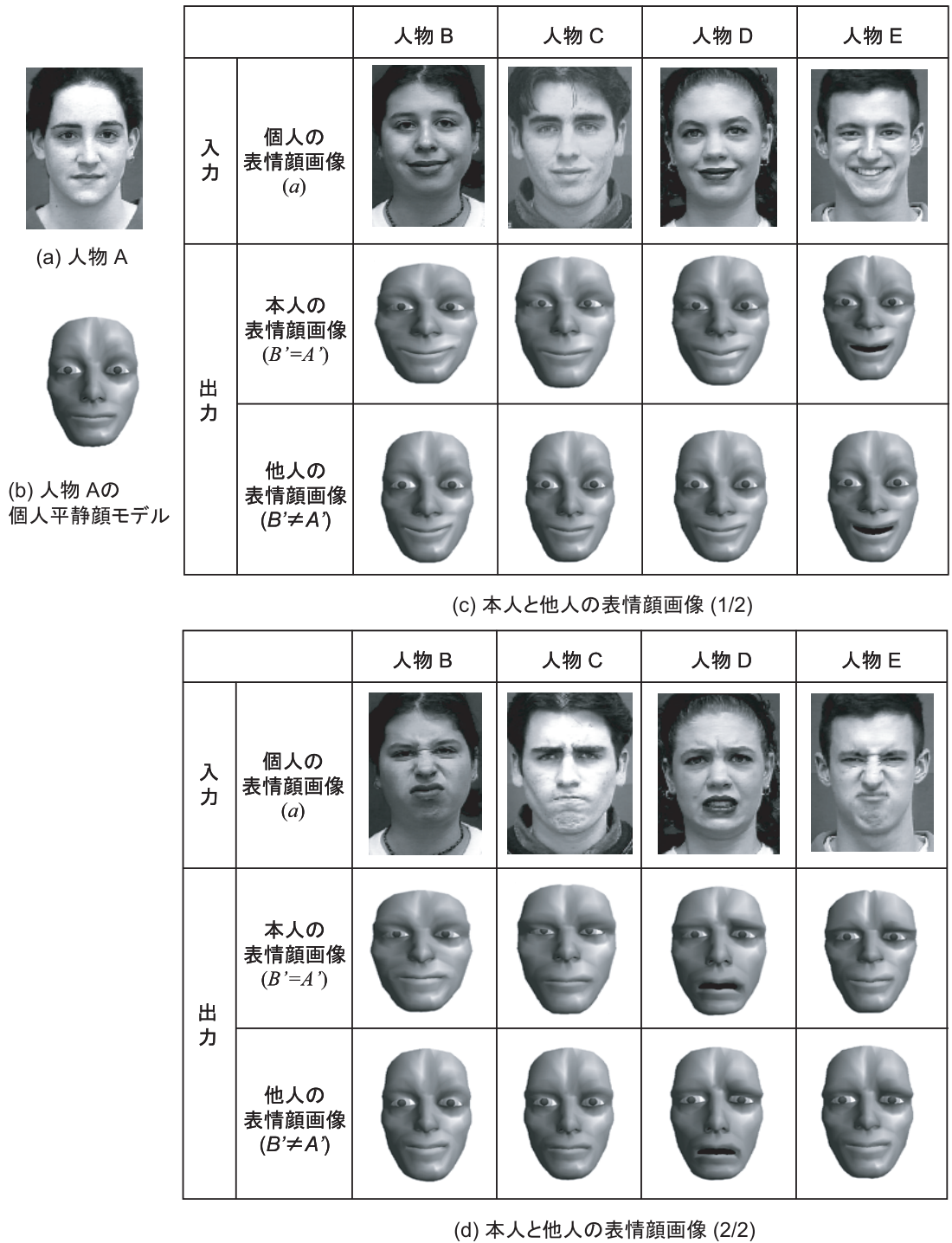












図 6.3 人物 A の個人平静顔モデルを用いた他人の表情顔画像

他人の表情顔画像の合成ができることにより , 映画やゲームなどのエンターテインメント用のキャラクターの表情生成にも応用できると考えられる .

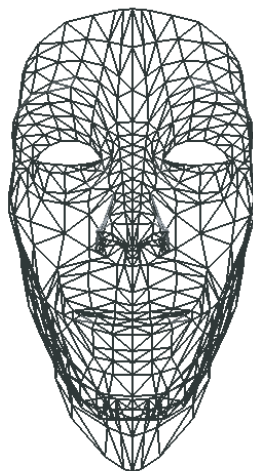
6.2 平均表情顔画像の合成

5.2 節の実験 1 の結果の評価で示したように，表情ごとの筋肉パラメータは人物によらずほぼ同じ形状となっている．この事実から複数の人物から算出した同一表情の筋肉パラメータを用いると平均表情顔画像が合成できる．

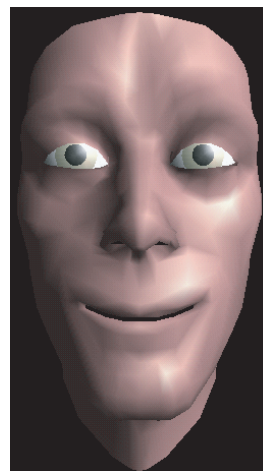
図 5.4 に示した幸福の表情顔画像の合成の際に求められた 5 人の筋肉パラメータの平均を用いて，筋肉顔モデルから平均表情顔画像を合成し，その結果を図 6.4 に示す．

		人物 A	人物 B	人物 C	人物 D	人物 E
入力	顔画像					
出力	顔画像					

(a) 表情顔画像(幸福)の合成結果(図 5.4(a)と同一)



(b) 筋肉顔モデル



(c) 筋肉モデルを用いた平均の表情顔画像

図 6.4 幸福：平均表情顔画像の合成結果

図 5.4 に示した結果から表情ごとに分類して，複数の人物(約 5 人)から算出した筋肉

パラメータの平均を用いて，筋肉顔モデルから平均表情顔画像を合成した．その結果を図 6.5 に示す．比較のために，図 2.9 に示した Waters が生成した基本表情の 6 種類（幸福，悲しみ，驚き，恐怖，怒り，嫌悪）の結果も示す．図 6.5 の上段は Waters が試行錯誤により定めた筋肉パラメータの指定により生成した基本表情である．一方，下段は本手法により算出した筋肉パラメータの平均により合成した基本表情である．

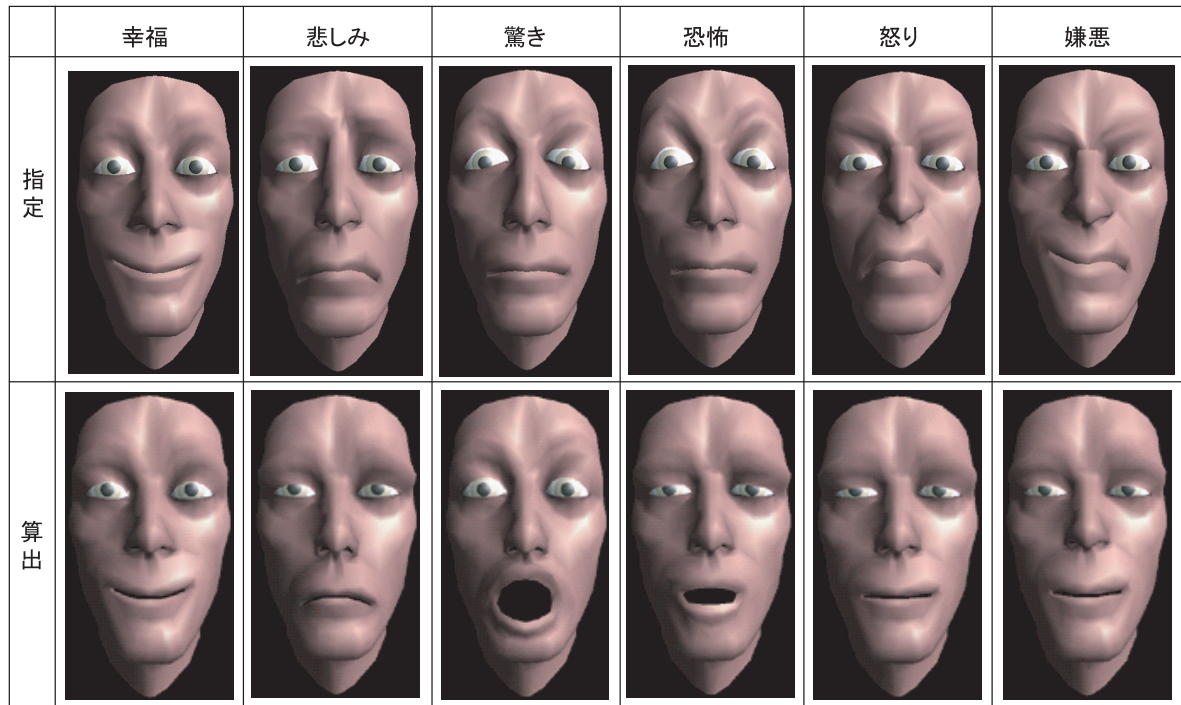


図 6.5 基本表情の合成結果の比較

平均表情顔画像の合成ができることにより，映画やゲームなどのエンターテインメント用のキャラクターの表情生成にも応用できると考えられる．さらに，キャラクターの表情を生成する際に，キャラクターによっては表情が大きいキャラクターもいる．そこで，筋肉パラメータに基づいて表情生成ができることから筋肉パラメータの変化を大きくすることにより誇張された表情の生成も可能になると考えられる．

6.3 時間方向の内挿による中間表情顔画像の合成

本論文で平静顔画像と表情顔画像から算出した筋肉パラメータに基づいて表情顔画像を合成している．そのため，時間方向の内挿が可能となり，連続画像のいくつかの筋肉パラメータの算出によって平静顔画像と表情顔画像の間の中間の表情顔画像が合成できる．さらに，合成された表情画像を用いて表情変化のある顔アニメーションが生成可能となる．

6.2節で示した6種類の平均の表情顔画像の中から幸福および悲しみ，驚きの表情を用いて，筋肉パラメータの変化が滑らかになるように分けて，内挿することによる中間表情顔画像を合成しました．その結果を図6.6～図6.8に示す．

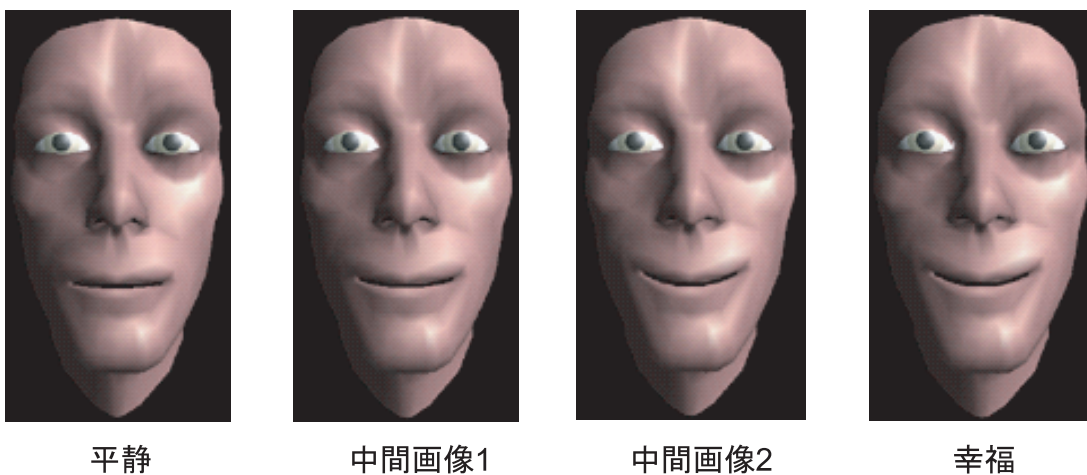


図 6.6 幸福：中間表情顔画像の合成

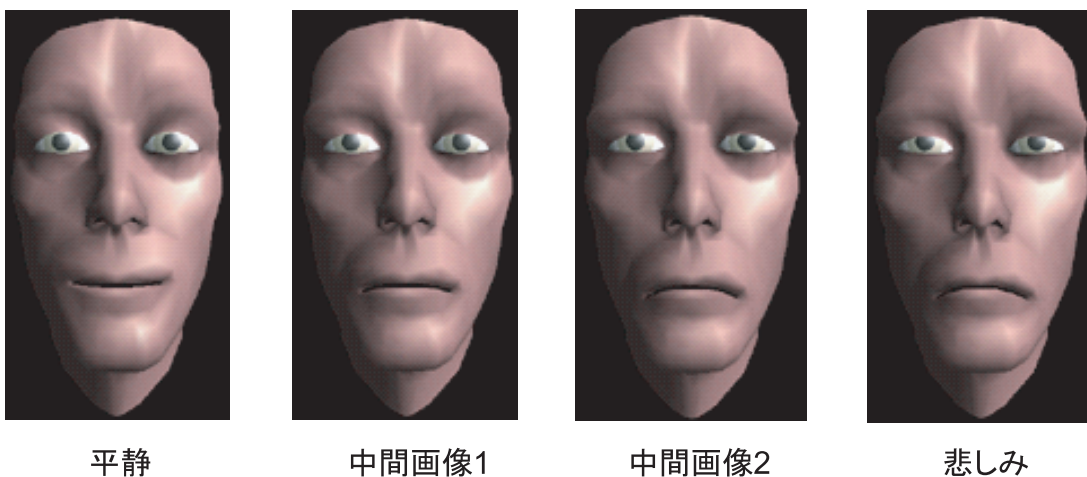
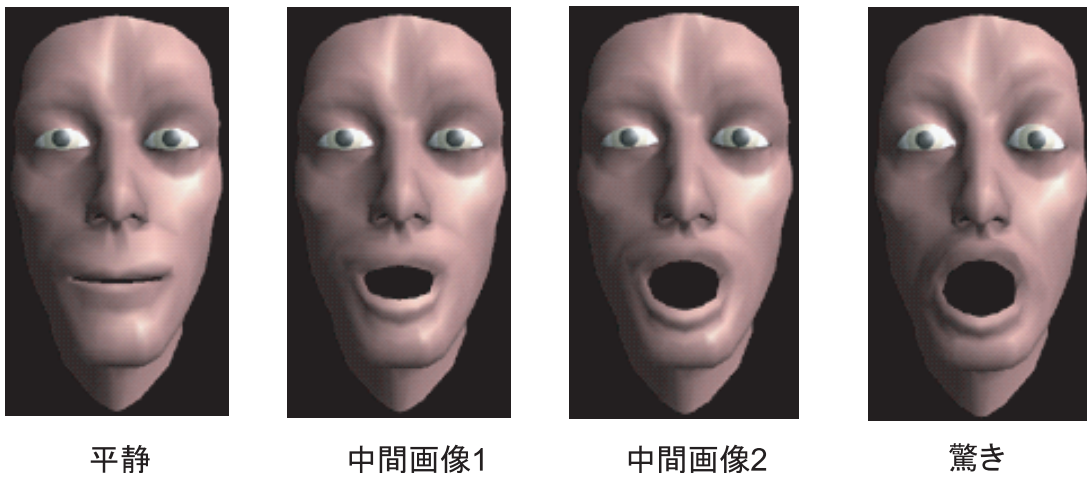


図 6.7 悲しみ：中間表情顔画像の合成



平静

中間画像1

中間画像2

驚き

図 6.8 驚き：中間表情顔画像の合成

第 7 章

結 論

本論文では、見本となる顔画像の表情に基づく表情顔画像の合成を目的とした。詳細には、個人の表情顔画像を入力して表情筋肉の働きを表す筋肉パラメータを算出し、算出した筋肉パラメータに基づいて筋肉顔モデルを用い、本人または他人の表情顔画像を合成することを目的とし、以下の特徴を満たす表情顔画像の合成手法を提案した。

1. 入力顔画像の表情変化から筋肉パラメータを算出する。
2. 少数の筋肉で筋肉顔モデルの表情が合成できる。

- 1章の総括

1章では、コミュニケーションにおいて、顔の表情は非言語コミュニケーションの最も主要な情報源であることを示した。そこで、顔に関する研究について、心理学や医学、工学での事例を述べた。顔表情の合成という目的のもとで提案された関連研究について調査した内容を述べた。「顔表面情報を用いる顔表情の合成」、「顔筋肉情報を用いる顔表情の合成」、「顔モデル」に分け、それぞれの特徴について述べた。そして、研究の目的を「見本となる顔画像の表情に基づく表情顔画像の合成」とし、提案する手法の2つの特徴について述べた。最後に、本論文で提案する表情顔画像の合成の流れを示し、章ごとの特徴および内容の概略を述べた。

- 2章の総括

2章では、本論文で扱う筋肉顔モデルについて述べた。それは Waters が提案した顔モデルを改良したものであり、ワイヤフレームモデルと筋肉、特徴点で構成される。筋肉としては、解剖学的な筋肉の作用が再現できるようにモデル化した線形筋と括約筋を用いた。また、表情生成に最も重要な筋肉のみを残すことにより筋肉顔モデルの筋肉の数を最小限に減らした。その結果、括約筋の追加によって表現できる表情が豊かになった。さらに、頂点群の中から適切な特徴点を選ぶことにより、筋肉パラメータを求めることが可能となった。

- 3章の総括

3章では、個人平静顔画像と個人表情顔画像を入力として、顔部位の特徴点の抽出およびフィッティングにより、同一人物の個人平静顔モデルと個人表情顔モデルを生成する手法を提案した。被験者の負担を最小限にするために入力画像として被験者の顔に何もつけずに撮影したものをを用いた。顔部位の特徴点としては、顔部位の動きが判断できて輪郭がはっきりする、すなわち、画像処理により安定に検出される点を選んだ。個人表情顔モデルは、個人平静顔画像から個人表情顔画像への表情の相違に基づいてフィッティングを行うことにより生成した。

- 4章の総括

4章では、3章により生成された個人平静顔モデルと個人表情顔モデルの顔筋肉の特徴点 $M.P.(neut.)$ と $M.P.(expr.)$ の相違から筋肉パラメータの算出およびそれに基

づく表情顔画像を合成する手法を提案した．顔筋肉の特徴点 $M.P.$ は筋肉ごとに一点ずつ選んだ．すなわち，各筋肉の筋肉パラメータ c_i はその筋肉と対応する各顔筋肉の特徴点 $M.P.^{(i)}$ の変位に基づいて算出した．各筋肉と対応する一点の顔筋肉の特徴点 $M.P.$ の変位に基づいて算出した筋肉パラメータにより，影響範囲内にあるすべての頂点群の移動情報を得た．その結果，見本となる入力 of 個人表情顔画像の表情に基づく表情顔画像が合成できた．

- 5章の総括

5章の実験では，個人平静顔モデル (B') が見本となる顔モデル (A') と同一人物である場合 ($B' = A'$ ，本人) を用いて本論文で提案した手法によるシステムの検証を行った．筆者が提案した従来手法および提案手法に基づいて，入力として様々な表情顔画像および連続画像を用い，表情顔画像を合成した．その結果，見本となる入力の顔画像の表情に基づく表情顔画像が合成できることを確認した．さらに，主観評価および定量評価を行い，本論文で提案した表情顔画像の合成手法の有効性が確認できた．これにより，テレビ会議やエージェントアバターシステムなどの人間同士が対話を行うようなアプリケーションに応用できると考えられる．

- 6章の総括

本論文で提案した表情顔画像の合成は入力の顔画像から算出した筋肉パラメータに基づく．6章の応用では，他人の表情顔画像の合成や平均表情顔画像の合成，時間方向の内挿による中間表情顔画像の合成を示し，本論文で提案した手法の応用可能性を確認した．これにより，映画やゲームなどのエンターテイメント用のキャラクターの表情生成にも応用できると考えられる．さらに，キャラクターの誇張された表情の生成も可能になると考えられる．

以上，各章において述べた内容を総括した．最後に，本論文を総括した結論を述べる．

コミュニケーションにおいて，顔の表情は非言語コミュニケーションの最も主要な情報源である．本論文では，見本となる顔画像の表情に基づく表情顔画像の合成を目的とした．そこで，筋肉パラメータの数が少ない筋肉顔モデルとその筋肉パラメータを顔画像から求める手法を提案した．詳しくは，まず，線形筋と括約筋で構成される筋肉顔モデルを定義し，入力の顔画像の表情変化から筋肉パラメータを算出した．次に，算出した筋肉パラメータを用いて平静顔モデルの頂点群の移動情報を得て，表情顔画像を合成した．実験により，本論文で提案した表情顔画像の合成の有効性が確認でき，見本となる入力の顔画像の表情に基づく表情顔画像が合成できた．さらに，応用により，あらかじめ用意された人物の表情だけではなく様々な人物の表情画像が生成できることを確認した．この結果，本論文で提案した表情顔画像の合成手法は，人間同士の対話アプリケーションやゲームなどのエンターテイメントのキャラクターの表情生成に応用できると考えられる．

謝 辞

本研究は、著者が慶應義塾大学大学院理工学研究科在学中に、同大学理工学部小沢慎治教授と斎藤英雄教授のもとで行なったものであります。本研究を遂行するにあたり、終始御指導くださり、本研究の内容の詳細にわたり貴重な御助言を賜りました小沢教授と斎藤英雄教授に心から深く感謝いたします。

小沢慎治教授には、著者が韓国から日本に渡ってきた2000年の研究生の頃から後期博士課程修了に至るまでの9年もの間、研究の面、生活の面、その他あらゆる点において貴重な御助言を頂きました。心より感謝の念を申し上げます。

斎藤英雄教授には、2000年の研究生の頃から後期博士課程修了に至るまでの9年もの間、研究の詳細にわたり終始熱心に丁寧な御指導、御助言を頂きました。心より感謝の念を申し上げます。

そして、本研究の副査をご快諾頂き、また貴重なご意見を下さいました南谷晴之教授、浜田望教授、萩原将文教授に深く感謝いたします。副査の先生方からは技術的な観点からのご意見のみならず、本技術の今後の運用に関する方向性など、実に様々な視点からのご意見を頂きました。心より感謝の念を申し上げます。

著者の研究生活を支えてくれた小沢研究室と斎藤研究室の諸先輩方に感謝申し上げます。著者が日本に渡ってきた2000年の研究生の頃から須藤智氏、原寛徳氏には研究や私生活の様々な面でお世話になりました。心より感謝の念を申し上げます。そして、辛貞殷氏には韓国の大学の後輩でありながらも、研究や私生活の様々な面でお世話になりました。深く感謝いたします。また、研究室での多くの時間を共に過ごし、精神的支えになってくれた同期生の皆様、ならびに小沢研究室と斎藤研究室の諸氏に、深く感謝いたします。

本研究は、ロータリー米山記念奨学金および山岡憲一記念外国人留学生助成基金の支援を頂きながら行いました。特に、川崎とどろきロータリークラブの皆様には様々な面でお世話になりました。心より感謝の念を申し上げます。

著者に研究者としての道を開いて下さいました韓国の韓神大学の趙昌錫教授に心から深く感謝いたします。趙昌錫教授には、様々な面において貴重な御助言を頂きました。心より感謝の念を申し上げます。

著者がジャパンテントに参加した 2002 年の頃から後期博士課程修了に至るまでの 7 年もの間、上村ご夫妻には日本での生活の様々な面でお世話になりました。心より感謝の念を申し上げます。

最後に、精神的な支えとなってくれた家族、特に両親に、研究を続ける上で様々な面で支えとなってくれた愛する夫・金相佑と息子・致秀にこの場を借りて感謝申し上げます。

2009 年 3 月

安 善 娃

参考文献

- [1] 黒川隆夫, “ノンバーバルインタフェース,” オーム社, 1994.
- [2] A.Mehrabian. 西田司, 津田幸男, 岡村輝人, 山口常夫 共訳, “非言語コミュニケーション,” 聖文社, 1986.
- [3] K.A Deffenbacher, T.Vetter, J.Johanson and A.j O’Toole, “Facial aging ,attractiveness , and distinctiveness ,” Perception, vol.27, pp.1233-1243, 1998.
- [4] P.Ekman, W.V.Friesen, 工藤力 (訳編), “表情分析入門,” 誠心書房, 1987.
- [5] P.Ekman, W.V.Friesen, “Facial action coding system ,” Consulting Psychologists Tress, 1987.
- [6] 横川勇仁, 船曳信生, 東野輝夫, 小田政志, 森悦秀, “Deformable template マッチング法による唇輪郭抽出法の改良と歯科医療応用を目的とした評価,” 電子情報通信学会論文誌 (D-II), vol.J86-D-II, no.8, pp.1177-1185, 2003.
- [7] 青木義満, 寺嶋雅彦, 中島昭彦, 橋本周司, “X 線規格画像を用いた 3 次元頭部物理モデルの構築とその臨床応用,” 電子情報通信学会論文誌 (D-II), vol.J84-D-II, no.2, pp.390-399, 2001.
- [8] 南谷晴之, 星野佳彦, 田中一郎, “Optical flow 法による顔面神経麻痺再建手術の術後評価,” Facial Nerve Research Japan, vol.23, pp.55-57, 2003.
- [9] 森山寛, “中耳・外耳,” メジカルビュー社, 2000.
- [10] 柳原尚明, 西村宏子, 陌間啓芳, 他, “顔面神経麻痺程度の判定基準に関する研究,” 日耳鼻, vol.80, pp.799-805, 1977.
- [11] House JW, “Facial nerve grading systems ,” Laryngoscope, vol.93, pp.1056-1069, 1983.
- [12] 田中久哉, 磯野道夫, 川本亮, 伊藤明彦, 東博二, 村田清高, “顔面表情運動の定量的検討-コンピュータ画像処理を用いた評価,” Facial Nerve Research Japan, vol.14, pp.167-172, 1994.
- [13] 井口郁雄, 結縁晃治, 前田学, 桜井康子, 川上晋一郎, 前田游, “モアレ指数による顔面神経麻痺の評価,” Facial Nerve Research Japan, vol.13, pp.179-184, 1993.

- [14] 南谷晴之, 飯島淳彦, 國弘幸伸, “顔表情運動の画像解析による顔面神経麻痺の診断システム,” 生体医工学会論文誌, vol.41, no.2, pp.87-96, 2003.
- [15] 長谷川修, 森島繁生, 金子正秀, “「顔」の情報処理,” 電子情報通信学会論文誌 (D-II), vol.J80-D-II, no.8, pp.2047-2065, 1997.
- [16] M.Turk, A.Pentland, “Face recognition using eigenfaces,” Proc. Computer Vision and Pattern Recognition, vol.11, pp.453-458, 1993.
- [17] 福井和広, “顔でセキュリティを守る, 東芝のアプローチ, 事例,” エレクトロニクス 3月号, pp.19-21, 2000.
- [18] Ming-hsuan Yang, David J. Kriegman, Narendra Ahuja, “Detecting faces in images: A survey,” IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol.24, no.1, pp.34-58, 2002.
- [19] 安本讓, 本郷仁志, 渡辺博己, 山本和彦, 輿水大和, “マルチカメラ統合を用いた人物識別と顔方向推定,” 電子情報通信学会論文誌 (D-II), vol.J84-D-II, no.8, pp.1772-1780, 2001.
- [20] 川戸慎二郎, 鉄谷信二, “リング周波数フィルターを利用した眉間の実時間検出,” 電子情報通信学会論文誌 (D-II), vol.J84-II, no.12, pp.2577-2584, 2001.
- [21] S. Kawato and N. Tetsutani, “Detection and tracking of eyes for gaze-camera control,” Proc. of VI2002, pp.348-353, 2002.
- [22] 崔昌石, 原島博, 武部幹, “顔の3次元モデルを用いた顔面表情の分析,” 電子情報通信学会論文誌 (D-II), vol.J74-D-II, no.6, pp.766-777, 1991.
- [23] K.Mase, “Recognition of facial expression from optical flow,” IEICE Transactions, vol.74, no.10, pp.3473-3483, 1991.
- [24] 大関和夫, 斎藤隆弘, 金子正秀, 原島博, “顔動画のインタラクティブ知的符号化システム,” 電子情報通信学会論文誌 (A), vol.J80-A, no.8, pp. 1293-1303, 1997.
- [25] 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,” 電子情報通信学会論文誌 (A), vol.J73-A, no.7, pp.1270-1280, 1990.
- [26] 磯野勝宣, 赤松茂, “任意表情の顔の3次元構造の生成 - 3D 及び画像サンプルにおける表情差分ベクトルの利用 -,” 電子情報通信学会論文誌 (D-II), vol.J82-D-II, no.10, pp.1729-1738, 1999.
- [27] Jun-yong Noh, Ulrich Neumann, “Expression cloning,” Proc. of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, pp.277-288, 2001.
- [28] Z.Deng, P.Y.Chiang, P.Fox, U.Neumann, “Animating blendshape faces by cross-mapping motion capture data,” Proc. of ACM SIGGRAPH Symposium on Interactive 3D Graphics and Games, pp.43-48, 2006.
- [29] J.Chai, J.Xiao, J.Hodgins, “Vision-based control of 3D facial animation,” Proc. of

- Symposium on Computer Animation, pp.193-206, 2003.
- [30] K.Waters , “A muscle model for animating three-dimensional facial expression ,” *Computer Graphics*, vol.21, no.4, pp.17-24, 1987.
- [31] Y.Zhang, E.C.Prakash, E.Sung , “A new physical model with multilayer architecture for facial expression animation using dynamic adaptive mesh ,” *IEEE Trans. on Vis. Comput. Graphics*, vol.10, no.3, pp.339-352, 2004.
- [32] Y.Lee, D.Terzopoulos and K.Waters , “Realistic modeling for facial animation ,” *Proc. SIGGRAPH 1995*, pp.55-62, 1995.
- [33] G.Breton, C.Bouville, D.Pele , “Face engine a 3D facial animation engine for real time applicatinos ,” *Web3D Symposium 2001*, pp.15-22, Feb.2001.
- [34] T.D.Bui, D.Heylen, A.Nijholt , “Combination of facial movements on a 3D talking head ,” *Proc. CGI'04*, pp.284-291, 2004.
- [35] 野添潤一, 五味裕章, 党建武, 本多清志 , “リアルな発話運動を実現する生理学的口唇力学モデルの構築 ,” *電子情報通信学会論文誌*, vol.J88-D-II, no.9, pp.1944-1953, 2005.
- [36] T.D.Bui, D.Heylen, A.Nijholt , “Improvements on a simple muscle-based 3D face for realistic facial expressions ,” *Proc. Computer Animation and Social Agents(CASA)*, pp.33-40, 2003.
- [37] M. Kass, A. Witkins, and Terzopoulos , “Snakes: active contour models ,” *International Journal Computer Vision*, pp.321-331, 1988.
- [38] D.Terzopoulos and K.Waters , “Analysis and synthesis of facial image sequences using physical and anatomical models ,” *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol.15, no.6, pp.569-579, 1993.
- [39] T.Ishikawa, S.Morishima, D.Terzopoulos , “3D face expression estimation and generation from 2D image based on a physically constraint model ,” *IEICE Trans.Inf.&Syst.*, vol.E83-D, no.2 , pp.251-258, 2000.
- [40] T.Ishikawa, H.Sera, S.Morishima, D.Terzopoulos , “Facial image reconstruction by estimated muscle parameter ,” *Proceedings of FG '98*, pp.342-347, 1998.
- [41] 倉立尚明 , “三次元顔形状データベースを用いた無表情顔形状からの表情変化推定 ,” *情報処理学会*, vol.2004, no.16, pp.13-18, 2004.
- [42] 木下敬介, 倉立尚明 , “主成分分析によるリアルタイムトーキングヘッドシステム ,” *電子情報通信学会 HIP2004-71*, vol.104, no.525, pp.47-52, 2004.
- [43] 佐藤一 , 大谷淳 , 寺島信義 , “顔面筋動作に基づく形状変形とテクスチャの張替えによる三次元人物顔画像の再構築 ,” *電子情報通信学会論文誌 (D-II)*, vol.J88-D-II, no.7, pp.1126-1142, 2005.

- [44] H.Sato, J.Ohya, N. Terashima , “Realistic 3D facial animation using parameter-based deformation and texture remapping ,” Proc. of FGR’04, pp.735-742, 2004.
- [45] 矢崎和彦, 石川貴博, 森島繁生 , “オブティカルフローを用いた正面顔画像からの顔面筋パラメータの自動推定 ,” PRMU97-281, 1998.
- [46] S.Morishima, T.Ishikawa, D. Terzopoulos , “Facial muscle parameter decision from 2D frontal image ,” Proc. of ICPR’98, vol.1, pp.160-162, 1998.
- [47] K.Zhang, Z.Huang,T.S.Chua , “A framework to customize a face model for reusing animation ,” Proc. of the Computer Graphics International, pp.258-261, 2003.
- [48] Ding Huang, Hong Yan , “NURBS curve controlled modeling for facial animation ,” Computers & Graphics, vol.27, issue 3, pp.373-385, 2003.
- [49] S.Tang, A. W. Liew, Hong Yan , “Lip-sync in human face animation based on video analysis and spline models ,” Proc. of the International Multimedia Modeling Conference, pp.102-108, 2004.
- [50] Werner Platzer , “Pernkopf anatomy, atlas of topographic and applied human anatomy Volume , Head and neck , Third edition ,” Urban & Scharzenberg Baltimore (Munich) , 1989.
- [51] F.I.Parke and K.Waters , “Computer facial animation ,” A K Peters, 1996.
- [52] <http://www-2.cs.cmu.edu/~face/>
- [53] 安善姓, 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 ,” 電子情報通信学会論文誌 (D-II), vol.J88-D-II, no.10, pp.2081-2089, 2005.
- [54] 安善姓, 小沢慎治 , “線形筋と仮想括約筋を用いた筋肉パラメータに基づく表情顔画像の合成 ,” 電気学会論文誌 C , vol.129 , no.4, 2009.
- [55] 森於菟 [ほか] 分担執筆 , “分担解剖学 第 1 巻 総説・骨学・靭帯学・筋学 ,” 改訂第 11 版 , 金原出版 , 1982.
- [56] 赤松茂 , “人間とコンピュータによる顔表情の認識 [I] コミュニケーションにおける表情とコンピュータによるその自動解析 ,” 電子情報通信学会誌, vol.85, no.9, pp.680-685, 2002.
- [57] 赤松茂 , “人間とコンピュータによる顔表情の認識 [II] コンピュータによる顔表情認識技術 (1) : 表情による感情の認識 ,” 電子情報通信学会誌, vol.85, no.10, pp.766-771, 2002.
- [58] 赤松茂 , “人間とコンピュータによる顔表情の認識 [III] コンピュータによる顔表情認識技術 (2) : 顔面の表情動作の認識 ,” 電子情報通信学会誌, vol.85, no.12, pp.936-941, 2002.
- [59] 赤松茂 , “人間とコンピュータによる顔表情の認識 [IV] コンピュータによる顔表情認識の展望 : 人間による表情認知に学ぶ ,” 電子情報通信学会誌, vol.86, no.1,

- pp.54-61, 2003.
- [60] 赤松茂, “コンピュータによる顔の認識 サurvey”, 電子情報通信学会論文誌 (D-II), vol.J80-D-II, no.8, pp.2031-2046, 1997.
- [61] 菊地直, 仲里智志, 岡田裕也, 蒲池みゆき, 赤松茂, “自在な顔で表情や視線の動きを表出する3次元擬人化エージェントの生成 顔の3次元モーフィングモデルとGalateaモデルの対応付けと視線制御の実現”, 電子情報通信学会 HIP2006-131, vol.106, no.610, pp.19-24, 2007.
- [62] 伊藤貴之, 五味裕章, 菅田雅彰, “発声運動に応じた筋ステイフネスによる上唇・顎の協調メカニズム”, 電子情報通信学会論文誌 (D-II), vol.J86-D-II, no.2, pp.333-341, 2003.
- [63] Y.Liu, G.Xu, Q.Wang, “Realistic multi-view face animation with aid of 3D PDM”, Proc. of FGR'04, pp.511-516, 2004.
- [64] T.Goto, S.Kshirsagar, N.Magnenat-Thalmann, “Automatic face cloning and animation using real-time facial featuretracking and speech acquisition”, IEEE Signal Processing Magazine, vol.18, issue.3, pp.17-25, 2001.
- [65] S.Morishima, “Face analysis and synthesis for duplication expression and impression”, IEEE Signal Processing Magazine, vol.18, issue.3, pp.26-34, 2001.
- [66] M.Pantic, L.Rothkrantz, “Automatic analysis of facial expressions : the state of the art”, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol.22, no.12, pp.1424-1445, 2000.
- [67] B.Fasel, J.Luettin, “Automatic facial expression analysis : a survey”, Pattern Recognition, vol.36, no.1, pp.259-275, 2003.
- [68] Z.Xue, S.Z.Li, E.K.Teoh, “Bayesian shape model for facial feature extraction and recognition”, Pattern Recognition, vol.36, no.12, pp.2819-2833, 2003.
- [69] Ming-Hsuan Yang, D.J.Kriegman, N.Ahuja, “Detecting faces in images: a survey”, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol.24, issue.1, pp.34-58, 2002.

付 録：表 情 筋

本論文では、筋肉顔モデルを用いて表情顔画像の合成結果を示した。本論文で提案した筋肉顔モデルは、人間の表情変化をコンピュータで取り扱う簡略化したモデルであり、筋肉の種類として、線形筋と括約筋を用いる。それらは、解剖学的な筋肉の作用が再現できるようにモデル化した筋肉である。

人間の顔には多数の筋肉があり、筋肉ごとに起こる所や着く所、走り方、作用も異なる。そこで、付録では、解剖学的な表情筋の特徴について述べる。

表情筋は皮下に広く存在し、おもに骨から起こって皮膚に停止する皮筋であって、様々な表情はこの働きにより生成される。表情筋を便宜上次のように分類して記述する。

● 頭蓋表筋と耳介の筋

筋肉名	起こる所と走り方	着く所	作用
後頭前頭筋 前頭筋	帽状腱膜から起こって下行する。下部では左右がほとんど接する。	眼輪筋, 鼻根筋と交叉しながら眉部と眉間の皮膚につく。	眉を上げ帽状腱膜を前方に引いて, 額の皮膚に横のヒダを作る。
後頭筋	後頭骨の最上項線から起こり外上方に向かう。	帽状腱膜に移行する。	帽状腱膜を後方に引き額を滑かにする。
上耳介筋	帽状腱膜中央部の側縁から起こる。	耳介軟骨内側面上前部	耳介を上方に引く。
前耳介筋	帽状腱膜のつづきから起こり, 後方に向かう。	耳介前面の耳輪棘	耳介を前方に引く。
後耳介筋	側頭骨の乳様突起の外側面から起こり, 前方に向かう。	耳介後面の甲介隆起	耳介を後方に引く。

● 眼裂周囲の筋

筋肉名	起こる所と走り方	着く所	作用
眼輪筋	眼瞼部は眼瞼内にあり、上瞼部および下瞼部ともに内側眼瞼靭帯と付近の骨部から起こり、外眼角の外側で縫線を介して上下が連絡する。 眼窩部はこれより厚く、内側眼瞼靭帯と眼窩口の内側縁から起こり、眼瞼部の周囲をまわる。 涙嚢部は後涙嚢稜付近から起こり、前外方に向かって眼瞼部に合する小筋束である。		眼窩部は眼瞼部に比べて色が暗く筋線維束も太い。周辺部の筋束は疎で、かつ周囲に放散するので、周辺の輪郭は不明瞭である。
眉毛下制筋	眼輪筋の内眼角の部より分かれて眉毛の内側部の下の皮膚にいたる。		眉頭部を下方に引く。
皺眉筋	眼窩部の内側縁で前頭上顎縫合のあたりから起こり、眼輪筋に被われて斜めに外上方に走り、前頭筋および眼輪筋眼窩部の筋束とまじり合う。	眉部中央部から内側部へかけての皮膚	眉を内下方に引き、左右の眉の間に縦のヒダをつくる。
鼻根筋	鼻骨から起こり上行する。発達すると表皮筋束はさらに下方からも起こる。	眉間の皮膚に放散する。	眉間の皮膚を引下げ、鼻根の皮膚に横のヒダをつくる。

● 鼻部の筋

筋肉名	起こる所と走り方	着く所	作用
鼻筋横部	一部は上唇鼻翼拳筋に被われて、上顎犬歯の歯槽隆起から起こり鼻背へ。		鼻孔を圧迫し狭くする。
鼻翼部	上顎外側切歯の歯槽隆起から起こり外鼻孔後縁の皮膚へ。		鼻翼を外下方に引き鼻孔をひろげる。
鼻中隔下制筋	鼻筋の内側部が鼻中隔の皮膚につくものをいう。		鼻中隔を引下げ鼻孔をひろげる。

● 口裂周囲の筋

筋肉名	起こる所と走り方	着く所	作用
口輪筋	口裂をとりまく筋で口唇の中にある。周囲の筋(とくに頬筋)からの筋束が加わるので、口輪筋の筋束は輪状のものだけでなく交錯している。とくに口角部ではこれらの筋束が交錯して停止し結節状をなしている。また一部の筋束は周りの骨などから起こる。		中心部の筋束は口を軽く閉じ、周辺部の筋束は強く閉じたり、さらにまた口を尖らせるとき(口笛など)に働く。
上唇鼻翼拳筋	内眼角に近く上顎骨の前頭突起から起こり下方に向かう。	上唇, 鼻翼および外鼻孔縁につく。	上唇, 鼻翼を引き上げる。また鼻唇溝をつくる。
上唇拳筋	眼輪筋に被われ, 眼窩下縁の直下で上顎体の前面から起こり, 四角形をなして下方に向かう。両側の筋よりやや深い。	上唇にはいり, その皮膚につく。	
小頬骨筋	眼輪筋に被われて頬骨外面から起こり, 前下方に向かう。		
大頬骨筋	小頬骨筋の外側で頬骨弓の外面, 側頭頬骨縫合のあたりから起こり, 前下方に向かう。	口角に達し, 一部は上下両唇にはいる。	口角を外上方に引き上げる。
笑筋	広頸筋顔面部の上にあつて, 耳下腺, 咬筋筋膜および付近の皮膚から内方へ集まる。	口角の皮膚。一部は口角下制筋に合する。	口角を外方に引き頬に小さいくぼみをつくる。
口角拳筋	上唇拳筋に被われ, 上顎骨前面の犬歯窩から起こり, 外下方に向かう。	口角部に達し, 一部は下唇にはいる。	口角を引き上げる。

筋肉名	起こる所と走り方	着く所	作用
口角下制筋	下顎骨下縁の中部からひろく下唇下制筋の起始とまじり合って起こり、上方に向かって走り狭くなる。	三角形をなして口角に集中する。一部は口輪筋に加わる。	口角を引き下げる。両側が働くと口が「へ」の字の形になる。
オトガイ横筋	両側の口角下制筋の前縁が横につづいた部をいう。		オトガイの部に「一重あご」をつくるという。
下唇下制筋	下顎骨の前面でオトガイ孔の下付近から起こり、その外側部は口角下制筋に被われる。内上方に走る。	三角形をなして口角に集中する。一部は口輪筋に加わる。	下唇を外下方に引く。両側が働くと口が一文字の形で引き下げられる。
オトガイ筋	下唇下制筋に被われ、下顎の第2切歯の歯槽隆起から起こり、内下方へ。	左右が合してオトガイ部の皮膚へ。	オトガイ部の皮膚を引き上げて、下唇をつきだす。
頬筋	上下顎の臼歯部の歯槽隆起、下顎骨の頬筋稜および翼突下顎縫線から馬蹄状に起こり前方へ。	口角に向かって集まり、上下交叉して口輪筋の深層にはいる。	頬壁を支え、これを歯列に押しつける。また空気を急にまたは強く吹き出すときに働く。歯列と頬粘膜との間にはさまった食物を追いだすときにも働く。

- 広顎筋の顔面部

広顎筋の上部は下顎骨縁に付着するほか、顔面にのびて、内側部は下唇下制筋に移行し、また口唇にはいり、外側部は頬部の皮膚につく。