

NAIST-IS-MT351056

修士論文

頭部全周計測距離データを用いた表情解析と その顔表情アニメーションへの応用

辰野 由美子

1995年 2月 20日

奈良先端科学技術大学院大学
情報科学研究科 情報システム学専攻

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おいて
修士(工学) 授与の要件として提出された修士論文である。

提出者： 辰野 由美子

指導教官： 横矢 直和 教授
千原 國宏 教授
荻原 剛志 助教授

頭部全周計測距離データを用いた表情解析と その顔表情アニメーションへの応用*

辰野 由美子

内容梗概

人間とコンピュータとのコミュニケーションをより円滑にするためのインタフェース環境や遠隔通信会議を目的として顔画像の表情合成の研究が進められている。表情変化に伴う顔面内特徴点位置の変化を FACS (Facial Action Coding System) に基づいて解析し、ワイヤフレームなどの 3 次元モデルを扱うものが多い。本論文では、距離画像を用いた表情解析と、解析結果に基づく顔表情アニメーションの生成について報告する。まず、全周計測距離データを使って顔表情の変化に伴って移動する特徴点の 3 次元位置を計測し、顔面内に設定した座標系の利用により計測時の位置、姿勢に関わらず常に安定したパラメータ値として特徴点位置を表現する。次に、表情変化に伴って変化する各特徴点のパラメータ値から表情の定量化を行う。この手法により推定された顔面の表情筋上に位置する特徴点からなるベクトルを表情筋ベクトルとして扱い、最後に、モーフィングによって表情変化を与えることで顔表情変化の 3 次元的なアニメーションを実現する。

キーワード

全周計測距離データ, FACS, 頭部座標系, 距離画像解析, モーフィング, 顔表情アニメーション

*奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 情報システム学専攻 修士論文, NAIST-IS-MT351056, 1995 年 2 月 20 日.

Analysis of Facial Range Image and Its Application to Facial Expression Animation*

Yumiko Tatsuno

Abstract

Synthesis of facial expression has been studied in order to make communication between human and computers more harmonious. Usually feature points in a face are analyzed based on the concept of FACS (Facial Action Coding System), mainly with 3D models such as a wireframe model. This paper describes the analysis and synthesis of facial expression using panoramic range images obtained by a laser rangefinder. We first show that motion-invariant representations of 3D locations of the facial feature points can be obtained by using an object-centered coordinate system defined on the face. We then attempt to quantify the facial expression and associate the motion vectors of feature points with “muscle vectors” on the face. Finally, we generate the animation of facial expression by using a morphing technique and the motion vectors. The proposed technique has been successfully experimented with real range images.

Keywords:

panoramic range image, FACS, motion invariant coordinate, range image analysis, morphing, facial animation

*Master's Thesis, Department of Information Systems, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, NAIST-IS-MT351056, February 20, 1995.

目次

1. はじめに	1
2. 人間の心理と顔表情—表情記述法 FACS を通して—	3
2.1 感情と表情	4
2.2 AU—アクション・ユニット—	4
3. 顔面内特徴点位置の表現	11
3.1 頭部 3 次元モデル	11
3.1.1 ポリゴン表現による顔モデル	11
3.1.2 レーザレンジファインダによる頭部 3 次元計測	13
3.1.3 頭部形状の円筒座標系表現	15
3.2 顔面内特徴点位置の表現法	15
3.2.1 表情筋ベクトル	20
3.2.2 観測時の姿勢に不変な頭部座標系	20
3.2.3 特徴点位置のパラメータ表現	23
4. 顔表情の定量的解析	29
4.1 特徴点位置の個人差	29
4.2 特徴点パラメータによる表情解析	30
5. 表情解析に基づく表情変化の生成	33
5.1 モーフィング理論	33
5.1.1 1組のベクトルによる制御を用いた1枚の画像での モーフィング	33
5.1.2 複数組のベクトルによる制御を用いた1枚の画像で のモーフィング	34
5.1.3 2枚の画像でのモーフィング	39
5.2 モーフィングによる「微笑み」表情の生成	39
5.3 表情の強度	46
6. むすび	50
謝辞	52
参考文献	53

目 次

1	基本感情を組み合わせて考えられる 3 3 種の感情	5
2	顔面内の主な表情筋	7
3	ポリゴン表現による顔モデル	12
4	全周計測レンジファインダ	14
5	頭部 3 次元計測システムの構成	16
6	円筒座標系で表現された頭部全周計測データ	17
7	距離データのみを用いた 3 次元形状表現	18
8	距離データと表面カラーデータを用いた 3 次元形状表現	18
9	円筒座標系画像	19
10	顔面内特徴点位置	21
11	28 本の表情ベクトル	22
12	絶対座標系 XYZ と相対座標系 ABC	24
13	頭部座標系の基準ベクトル	25
14	同一人物を計測した 2 枚の距離画像における特徴点パラ メータの値の比較	27
15	特徴点パラメータの値の正確さの検証過程	28
16	5 人の被験者の無表情時の特徴点パラメータの値	31
17	表情表出によるパラメータ値の変化量 (5 人の被験者とそ れらの平均としての標準量)	32
18	原画像上のベクトル $P'Q'$ と生成画像上のベクトル PQ か らなる 1 組のベクトルを基準とするモーフィングによる変形	35
19	モーフィングに利用した原画像と変形に用いられたベクト ル $P'Q'$	36
20	モーフィングで生成された画像と変形に用いられたベクト ル PQ	36
21	原画像上のベクトル $P'_1Q'_1, P'_2Q'_2$ と生成画像上のベクトル P_1Q_1, P_2Q_2 からなる 2 組のベクトルを基準とするモーフィ ングによる変形	37
22	モーフィングに利用した原画像と変形に用いられた 3 つの ベクトル $P'_1Q'_1, P'_2Q'_2, P'_3Q'_3$	40
23	モーフィングで生成された画像と変形に用いられたベクト ル P_1Q_1, P_2Q_2, P_3Q_3	40
24	2 枚の画像間で行なわれるモーフィングの図解	41
25	変形されていない画像 A(100%)	42

26	2枚の画像間で行なわれるモーフィング：画像 A(80%)+ 画像 B(20%)	42
27	2枚の画像間で行なわれるモーフィングの例:画像 A(55%)+ 画像 B(45%)	43
28	2枚の画像間で行なわれるモーフィングの例:画像 A(35%)+ 画像 B(65%)	43
29	2枚の画像間で行なわれるモーフィングの例:画像 A(15%)+ 画像 B(85%)	44
30	変形されていない画像 B(100%)	44
31	モーフィングに用いられた40本のベクトル	45
32	無表情から「微笑み」への表情変化を持った3次元モデル ((1), (2), (3), (4)の順)	47
33	表情強度 $r = 0.3$ で合成された「(微)表情」	49
34	表情強度 $r = 4$ で合成された「過表情」	49

表 目 次

1	顔の上部の AU の番号とその動き	8
2	顔の下部の AU の番号とその動き	9
3	その他の AU の番号とその動き	10
4	特徴点番号と顔面筋	20

1. はじめに

顔を扱う研究は、犯罪捜査やセキュリティのための本人確認という個人同定を目的とするパターン認識の一分野として始められた^[22]。近年その研究範囲は、表情の分析、認識、合成へと広がりを見せている。これは、マンマシンインタフェースの充実、臨場感通信会議^[17]を始めとする遠隔通信会議などの、高度な情報サービスの提供を目的とするものである。さらに、美容形成外科やCGアニメーション、心理学にまで至る広い応用分野での利用を目的として、表情に関する研究が進められている。

顔画像における表情を分析するためのパラメータとしては、心理学分野において普及している FACS (Facial Action Coding System) ^[1] と呼ばれる表情記述方式における顔面表情筋の運動単位 AU (Action Unit) が用いられることが多い^{[5][6][7][12][14]}。

FACS を直接利用する以外の手法としては、入力された顔画像から等濃度分布をつくりモルフォロジー理論による解析を試みたもの^[8]、顔全体に及ぶ表情構成要素の特徴を総合的に捉える物理モデルにおいて、表情変化によるノードの移動量を変位ベクトルとして扱い、予め作成された表情特徴ベクトルとの類似度をポテンシャルネットを利用して解析したもの^[9]、またニューラルネットに表情を AU パラメータとして記述、学習させ、生成された感情空間を用いて表情分析、合成を試みたもの^[15] などがある。

このように分析され、生成された表情はワイヤーフレームに代表される 3次元モデルを変形させることによって実現される。階層的にモデル化された表情記述に FACS における顔面筋の運動単位である AU を取り入れ、定量化された AU の動きにあわせて 3次元モデルの特徴点を移動させたもの^[5]、頭部の動きと表情による顔部位の動きを分離することによって抽出された顔部のみ動きを AU の組み合わせと考え、表情の再合成を試みたもの^[6]、高精細 3次元モデルと従来型モデルの両方を用いることで、双方の利点を生かして FACS の表情パラメータに基づく格子点を特定し、移動させて表情変化を与えたもの^[7]、さらに、顔面を解剖学的な皮膚、筋肉、骨格からなる 3層のバネ構造と考え、表情変化による顔面筋の移動をシミュレートすることで、より自然な表情変化を実現させたもの^[14]などがあげられる。

しかし、従来の研究のいずれにおいても、表情変化に伴う表情筋上に位置する特徴点の移動量について定量的に分析されておらず、また、3次元モデルにおける特徴点を移動させることによって、その形状を変化

させるには極めて煩雑な計算と試行錯誤が必要である。

そこでこのような3次元モデルに対して円筒座標系を定義し、その角度成分と高さ成分からなる2次元パラメータ空間として顔面形状を扱う手法^[16]が提案されている。この2次元パラメータ空間上における顔面内特徴点をモーフィングと呼ばれる変形手法を用いることで移動させ顔形状そのものを他のものに変化させたり、また表情変化を与え3次元アニメーションへの応用を試みるもの^[13]もある。しかし、これらの2次元パラメータ空間においては、半径成分が扱われておらず、表情変化に伴う頬の膨らみなどは表現できない。

本論文においては、距離画像を用いた表情解析と、解析結果に基づく顔表情アニメーションの生成法を提案する。提案手法では、円筒座標系で表現された全周計測距離画像を用いることで、その角度成分、高さ成分に加えて距離（奥行き）情報を利用し、2次元パラメータ空間でありながら3次元情報を活かす方法をとる。これにより、顔面内の特徴点を、頭部に設定した座標系を構成する3本のベクトルの加重線形和で表現^[12]し、計測時の姿勢の変化などによる位置変化に影響を受けない安定したパラメータ値として扱う。さらに、表情変化によるこれら特徴点パラメータの値の変化量から表情の定量化を実現した。

この手法により、AUに基づいた表情変化に伴う顔面上の特徴点の動きを表情筋ベクトルの動きとして扱い、距離画像上でのモーフィングにより表情変化を試みた。また、変形された3次元モデルに張り付けるテクスチャについても、全周形状計測装置によって得られた距離画像と一致したカラー画像を同様にモーフィングを用いて変形させたものを用いることによって自然な表情アニメーションを実現した。

以下、2章においては表情記述方式FACSを通して人間の心理と顔表情について論じ、3章では、頭部形状の3次元表現と距離データを用いた顔面内特徴点位置のパラメータ表現法について論じる。4章においては表情変化にともなうパラメータ変化量を用いた表情の定量化について論じ、最後に5章で表情変化の生成について論じる。

2. 人間の心理と顔表情—表情記述法 FACS を通して—

人間の顔を扱った研究は、顔そのものを認識することが目的であるもの、すなわち個人認識^{[18][19][20][22]}と、顔の表情を扱うもの^{[5][6][8][9]}の2つに大別でき、表情を扱う研究は、表情検出を目的とするものと、表情生成・合成などの処理を行うものに分けることができる。

本研究は表情分析に基づいて表情の合成を試みるというものである。表情が変化するという事は、心理状態に起こった変化による顔面筋の動きが顔表面に現れ、それによって目、鼻、口などの造作のかたちに変化が起こったり、また位置に変化が起こることである。この章においては、人間の心理と顔表情の関連性について表情記述法 FACS を通して論じる。

人間の感情を最も反映するものが顔表情であることは言うまでもない。人間は自分以外の人物との意思伝達、すなわちコミュニケーションをとるために言葉という道具を用いるが、それと同時に相手の表情を読みとりながら相手が現在どのような感情を自分に抱いているのか、また会話の内容にどのような感情を持っているのかを観察しながらコミュニケーションをとる。

共通の言語を話さない異人種間でのコミュニケーションとなれば、なおさら相手の表情を読みとる必要が出てくる。また手話による会話においても表情は情報を伝達するための重要な要素であると言われている。わたしたち人間の多くが犬や猫などのペットとともに暮らしている。彼らが飼い主である人間の表情を観察しながらコミュニケーションをとっていることも事実である。

この人間の顔表情を構造的、体系的に記述するために、表情変化にもなって移動する顔表情筋の移動グループを単位として取り扱ったものが FACS (Facial Action Coding System)^[1]である。FACS による表情記述法は、心理学者で顔面表情の研究者である P.Ekman と W.V.Friesen によって提唱されたものであり、AU (Action Unit) と呼ばれる顔面筋肉の運動単位を組み合わせることによって表情を記述、分析するという手法である。

2.1 感情と表情

人間の基本感情は大きく6種に分けられる。「驚き」、「恐怖」、「嫌悪」、「怒り」、「幸福」、「悲しみ」の6種が基本感情と言われ、それぞれの感情のときに表出された表情を基本6表情という。この6種に「無感情」の際の無表情を加えて7種の表情に大別され、それは人種、性別、文化をほとんど問わず共通に識別できるものであることがP.Ekman、W.V.Friesenらの実験により明らかにされている^[1]。これらの7表情以外に「好奇心」、「恥」、「侮辱」の3種を新たに加えて、合計10種の表情が識別可能であるとの説もある^[2]。

人間の顔に表出する表情が「幸福」、「悲しみ」などの、基本感情を単一に表現していることは少なく、むしろ多くの場合はこれらの基本感情の入り交じった「ブレンド表情」であると言われている。この様な複数の感情を含んだ表情を解析する心情分析は、心理学や精神医学において広く利用されている。

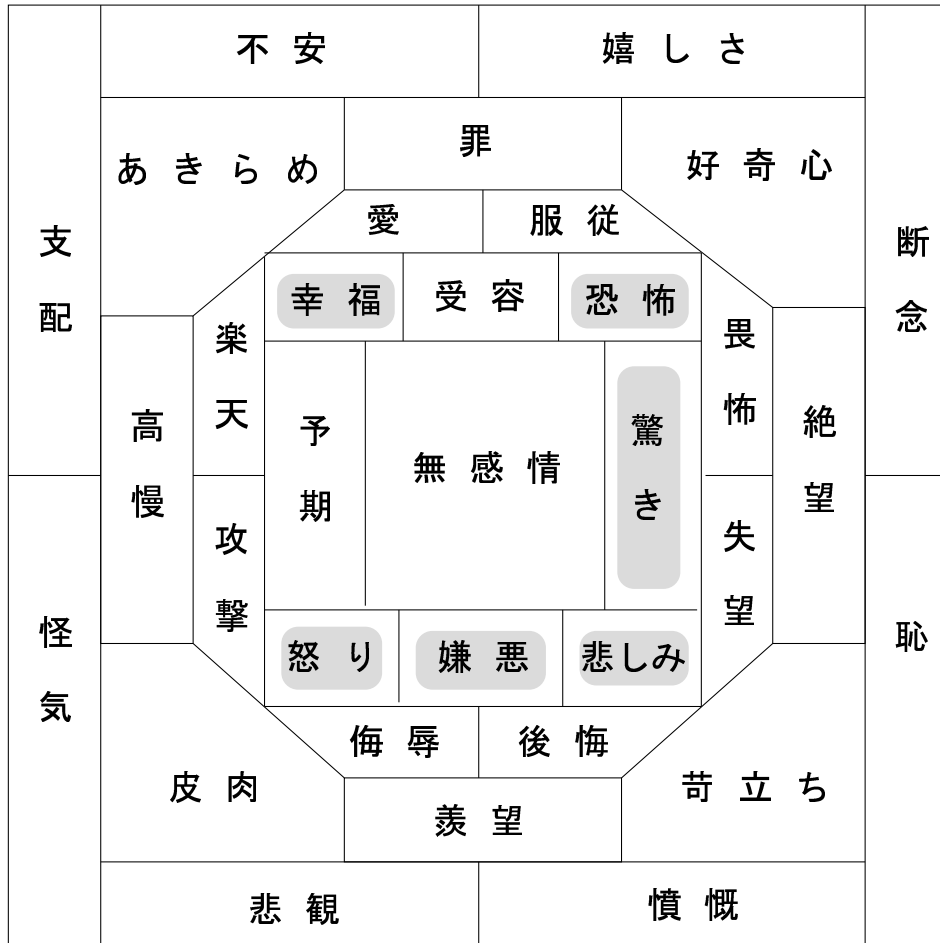
ある感情を抱いたときにどの程度の時間でその表情が表出されるか、また次の感情の影響を受け表情が変化するまでにどの程度の時間がかかるのか、感情がなくなってからどの程度の時間顔に表情は残っているものなのか、といった研究も行なわれているが、一定規則として単純に定式、定量化することは「個々の人間心理」を対象にするだけに難しい。

「微表情」といわれるものは極めて短い時間に顔に表出されるものである。多くの表情は1秒以上持続して現れるものであるが、この「微表情」は0.2秒から0.04秒程度しか表出されない。これはある感情を抱くことで、すばやくその感情が表情となり顔に表出されたが、なんらかの理由によって、それを隠すためにその表情を一時的に抑制することによって違う表情に変わったものである。多くの場合は「微表情」があらわれた後に、通常の隠そうとした表情が現れると言われている。

このように、人間の表情は前述の6基本表情を組み合わせて33種類に分類することができると言われている^{[1][2]} (図1参照)。

2.2 AU—アクション・ユニット—

顔面にある表情をつくる筋肉を表情筋と呼び、その種類は約30種と言われている。一般に骨格筋と呼ばれる人体の筋肉は骨と骨をつなぐ状態(骨から骨へ)でその骨自体に付いているが、顔面につく表情筋の大半は皮膚から皮膚に流れるようにしている。皮膚という不安定なもの



 基本感情

図 1 基本感情を組み合わせて考えられる 33 種の感情

に柔らかくついている表情筋の働きにより、微妙で細やかな心の動きであろうとも、脳から発せられた感情の信号を瞬時に表現できることになる。また、女性は男性と比べて皮膚や筋肉が柔らかいため、感情が表情となって表出しやすい^[3]。このため、実験の容易さから、本研究の実験における被験者はすべて女性にした。

先にも述べたように、感情変化による表情変化に伴って移動する顔面筋の構造グループの動きを、運動単位の組み合わせで記述し、測定する手法を FACS と呼び、そのひとつひとつの運動単位のことを AU と呼ぶ。AU は解剖学的に互いに独立し、しかも視覚的に識別可能な最小単位である 44 個の顔面の動きの単位である。この AU を 1 つ以上使って、人間のあらゆる顔表情を表現することが可能であると言われている^[1]。図 2 は顔面にある主な表情筋の配置を表したものである。

表情筋をその影響範囲、移動部分によって分類した場合、下記のように大きく 3 つに分けて考えることができる^[10]。

1. 顔の上部
おもに眉と額の部分
2. 顔の下部
最も動きの大きい口と頬の部分
3. 顔の中心部
目と鼻の付け根の部分

いずれの表情筋も、表情をつくるうえで重要なものであることは言うまでもないが、このなかでも特に口元周辺に位置する筋肉が最も発達しており、表情変化に関連が深いと思われる。実際、口元周辺の筋肉群の動きを表す AU の種類が多い。顔面内における影響範囲別の AU の番号とその動きを表 1、表 2、表 3 に示す。

このように定義される AU を用いて、以下では、「幸福 (happiness)」、「悲しみ (sadness)」の相反するふたつの表情と、さらに「怒り (anger)」の表情を表現することを考えてみる。

「幸福」を表す「微笑み」の表情は、眼窩眼輪筋の移動によって頬が上に持ち上げられる AU6、それと同時に大頬骨筋の運動による唇の端を横に引く AU12 の組合せで次のように表現できる。

「幸福」 = AU6 + AU12

また、「悲しみ」を表す表情は、

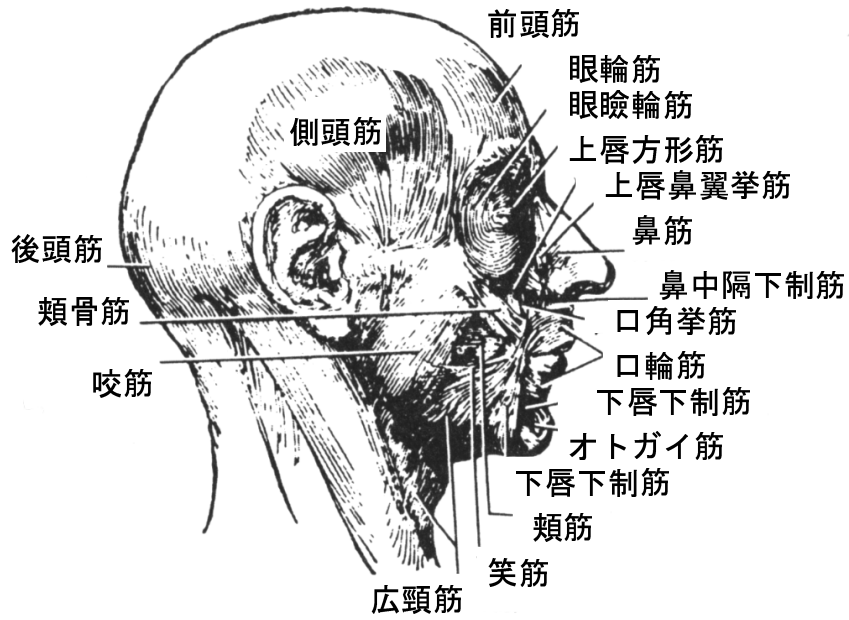
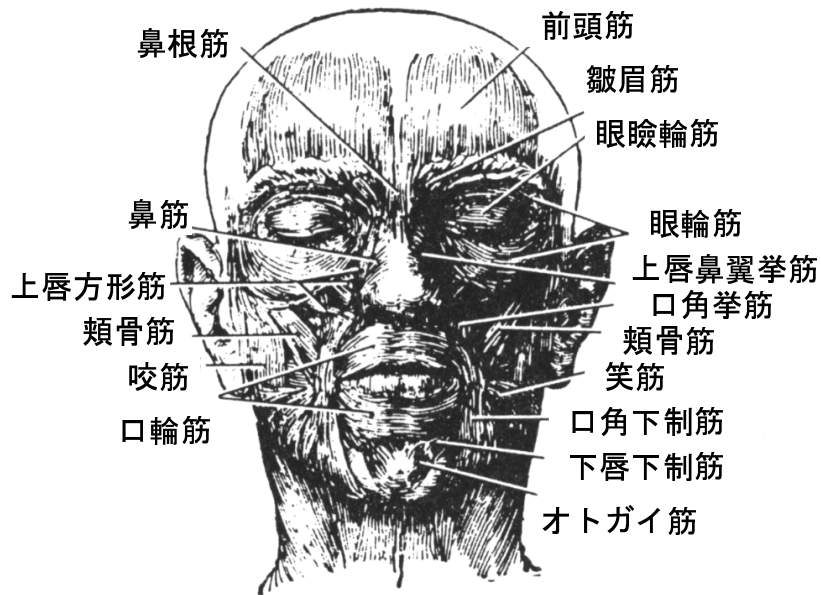


図 2 顔面内の主な表情筋^[2]

表 1 顔の上部の AU の番号とその動き^[10]

AU の番号	動作
1	眉の内側を上げる
2	眉の外側を上げる
4	眉を下げる
5	上瞼を上げる
6	頬を持ち上げる
7	瞼を緊張させる
4 1	瞼を力なく下げる
4 2	薄目
4 3	瞼を閉じる
4 4	細目
4 5	まばたく
4 6	ウインクする

「悲しみ」 = AU1 + AU15

となり、内側前頭筋の働きによって、眉の内側が持ち上げられる AU1 と、三角筋の運動によって唇の端を押し下げる AU15 を組み合わせることによって表現できる。

最後に「怒り」の表情を AU で表現すると、

「怒り」 = AU4 + (-0.5AU5) + AU26

となる。これにより、「怒り」の感情によって、眉間下制筋、眉毛下制筋、皺眉筋などの運動で眉が下がり、そして上眼瞼挙筋の移動から上瞼が下に下がり、さらに翼突筋、顎二腹筋により顎が下がった状態に表情は変化する。

ここで、ある AU の動きと全く逆の動きを表現するのはマイナスの AU で表現できる。AU の係数はその AU の強度を表すと考えてよいと思うが、その数値と表情の表出強度の関係が現時点において明確に定義されていないようである。

表 2 顔の下部の AU の番号とその動き^[10]

AU の番号	動作
9	鼻に皺をよせる
10	上唇を上げる
11	鼻唇溝を深める
12	唇端を引張り上げる
13	唇端を鋭く上げて頬を膨らます
14	えくぼを作る
15	唇端を下げる
16	下唇を下げる
17	下顎を上げる
18	唇をすぼめる
20	唇を横に引っ張る
22	唇を突き出す
23	唇を堅く閉じる
24	唇を押さえつける
25	顎を下げずに唇を開く
26	顎を下げて唇を開く
27	口を大きく開く
28	唇をかむ (吸い込む)

表 3 その他の AU の番号とその動き^[10]

AU の番号	動作
8	唇どうしを接近させる
1 9	舌を見せる
2 1	首を緊張させる
2 9	下顎を突き出す
3 0	下顎を横へずらす
3 1	歯をくいしばる
3 2	唇を噛む
3 3	息を吹きかける
3 4	頬を息で膨らます
3 5	頬を吸い込む
3 6	舌で頬や唇を膨らます
3 7	舌で唇をなめる
3 8	鼻孔を開く
3 9	鼻孔を狭める

3. 顔面内特徴点位置の表現

人間における顔表情の変化とは、顔面筋が動くことによって顔造作やその近辺の位置や形が変わることである。処理の対象となる顔画像が2次元、3次元のいずれであるかを問わず、その顔画像を変形させることによって、なるだけ不自然さを感じさせない自然な表情変化を表現しようとするとき、対象となる顔画像モデルにおける表情変化を制御する何かを基準として、顔造作や、その周辺部分を移動させたり、あるいは変形させる必要がある。

このような表情生成、合成を目的とする研究の場合は、その出力結果の視覚的な不自然さをなるだけ感じさせないという点で3次元モデルが利用される。顔の標準的な3次元モデルを変形させることにより、そのモデルに表情を与えたり、また表情を変化させる試みにおいて顔面表情筋の動きをパラメータとしたものが多く発表されている^{[5][6][7][12][14][21]}。

また、セキュリティーを目的とする個人認識には、CCDカメラが用いられることが多いために、個人識別研究においてはCCDカメラなどによって得られた2次元画像データを利用することが多い^[19]。さらに、表情認識、分析においても2次元画像を利用しているものが多くみられる^[20]。しかし、表情変化に伴う顔面内特徴点の移動量については、定量的な分析が行なわれていない。

この章ではまず頭部3次元モデル^{[4][10]}について説明し、次に、表情ベクトルと顔造作を含む特徴点位置の表現法について論じる。

3.1 頭部3次元モデル

3.1.1 ポリゴン表現による顔モデル

非常に細かくて複雑な起伏形状を持つ人間の顔をモデル化する場合、ポリゴン (polygon : 多角形) による表現が使われることが多い。この3次元モデルの三角パッチの数を増やすことで、曲面を滑らかに表現することが可能である。ポリゴンを用いて顔を表現した例を図3に示す。これは標準3次元モデルと呼ばれ^[7]、標準的な顔を、その造作などの特徴点とそれらを結ぶ線分で近似したものである。

標準3次元モデルは、顔造作などの各特徴点とその格子点がすでに対応付けされているために、比較的容易にモデルの変形が可能である。

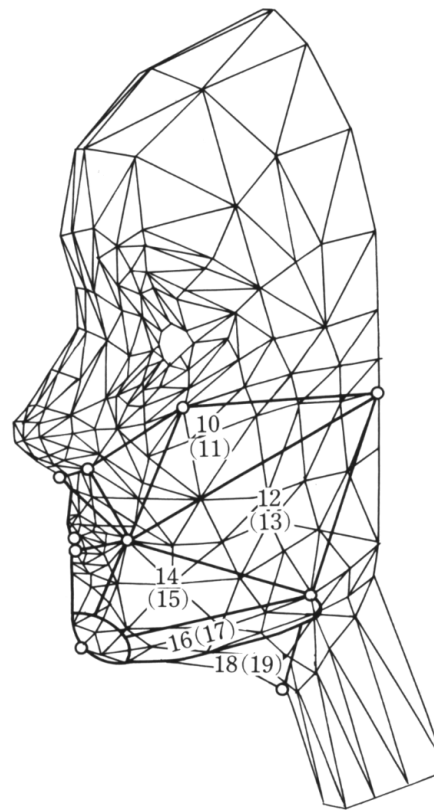
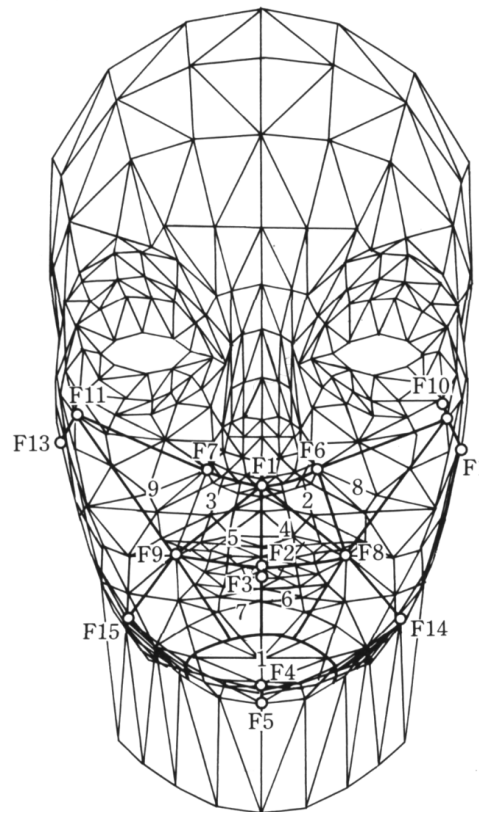


図 3 ポリゴン表現による顔モデル[2]

標準的な顔において、顔の基本的な形状や構造が共通していることは言うまでもないが、造作の形状や位置関係が個々の人間によって微妙に違いを持つことで、ひとりひとりの個性となって現れるのである。従って、この標準3次元モデルの格子点を移動させることによって、対象人物の造作などの特徴点や輪郭線に整合させ、それぞれの個人の特徴を反映した、3次元モデルを生成することが可能となる。

しかし、このような標準3次元モデルは、たかだか数百～千数百個のパッチで構成されているために、細やかで微妙な表情変化を表現することは困難である。このモデルのポリゴンをつくる三角パッチの大きさをさらに小さくすれば、曲面の構成はさらに細かく滑らかに表現できるが、その反面、三角パッチの数が膨大になり、計算量、計算時間が増えることとなり、扱いにくくなる。

3.1.2 レーザレンジファインダによる頭部3次元計測

人間を含む動物は、その形状や質、色などを含む表面データなどにおいて、複雑な3次元物体と言える。

顔部分を主とする人間頭部の3次元形状データは、先端映画技術におけるCGとしての利用、医療技術面での応用などといった需要の増大とともに、その計測法も徐々に変化している。医療技術面で利用される場合に用いられるのは、多くの場合、人体の内部構造を取得するために行われるCTやMRIと呼ばれる透視計測である^[4]。これによって得られた3次元構造は頭部、心臓などの外科手術のシミュレーションなどに応用が進んでいる。

今回本研究で利用したものは、レンジセンサとCCDカラーカメラから構成される3次元形状計測装置である。この装置はCyberware社によって開発された、高速3次元フルカラー・デジタイジング・システムと呼ばれるもので、計測対象物体の回りを装置が1回転することで、その3次元形状データ（距離データ）と表面データ（カラーデータ）の対応のとれたものを、一度に取得することができる（図4参照）。

1周360度に対して512回走査し、各走査について450点の3次元座標とカラー情報を得ることができる。しかも計測時のレーザー光が目に直接接触しても人体に悪影響がなく、その計測精度、計測時間（約30秒）、使いやすさ、安全性などについても優れており、装置が大がかりである点とレーザー光の当たりにくい顎の下などの部分の計測がやや困難であるという点を除いては問題はない。

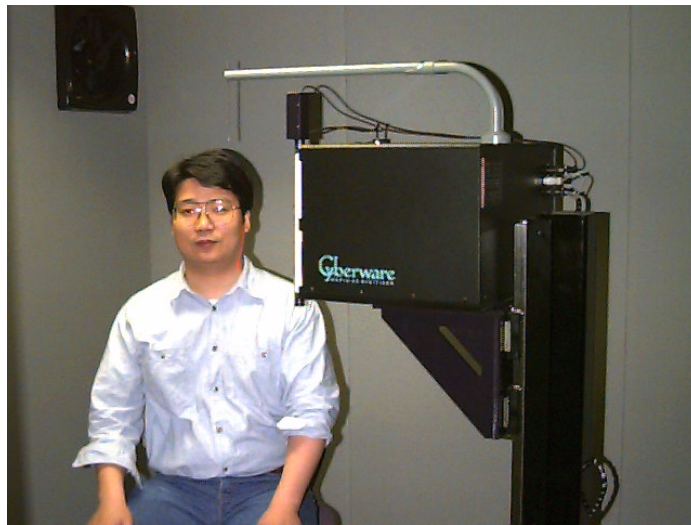


図 4 全周計測レンジファインダ

このレンジファインダを中心とする頭部 3次元計測システムの構成を図 5に示す。本システムによって得られるデータは円筒座標系で表現された距離画像とカラー画像（図 6参照）であり、これらの距離画像とカラー画像を組み合わせて 3次元形状データとして表現することが可能である（図 7、図 8参照）。

3.1.3 頭部形状の円筒座標系表現

円筒座標系とは、頭部の形状などを表現するために用いられる座標系で、物体表面上の点の位置を物体の中心軸を利用し、その角度成分 ($0\sim 2\pi$) と高さ成分の 2次元のパラメータ空間として表現されるものである（図 9参照）。

この円筒座標系で表現された画像上の点の移動量は、角度方向と高さ方向に限定されることになるが、今回のように距離画像が円筒座標系で表現されている場合は、その画素値が物体中心の回転軸から物体表面までの距離の値を表している。これより、物体の奥行き情報を、角度情報、高さ情報と同時に扱うことになり、3次元物体を平面的に扱うことが可能になる。

3.2 顔面内特徴点位置の表現法

表情の合成を行うためには、表情分析によって得られた情報を逆に利用する必要がある。表情記述方式 FACS の AU に基づく表情筋の移動を表情分析に利用するためには、対象人物の忠実な 3次元モデルと、その人の顔造作及び顔面表情筋などを示すだけでなく正確な特徴点位置情報が不可欠となる。

本研究においては、無表情のときの特徴点位置情報と、表情が表出したときの位置情報との差を定量的に分析することから、表情分析を試みる。

画像から顔面上の特徴点位置を検出することは、複雑な画像処理技術が必要であるため、本研究においては、対象人物の顔面の特徴点に目印となるマーカ（直径 5mm の黒いシール）を張り付けて計測することにした。

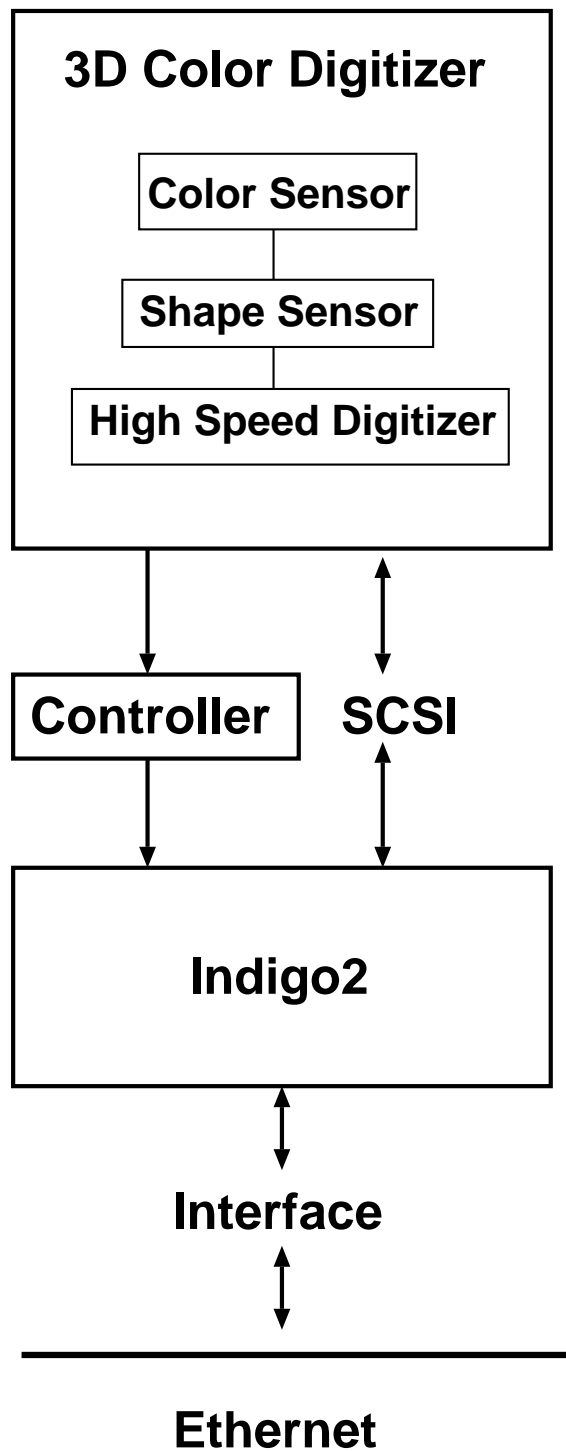
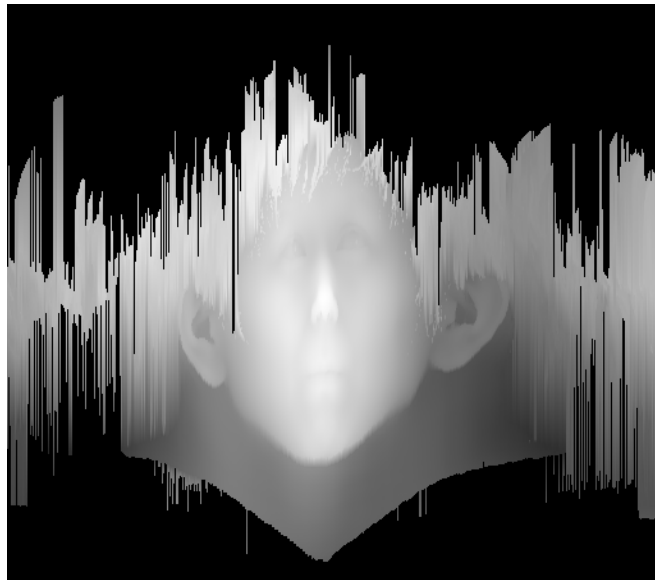


図 5 頭部 3 次元計測システムの構成



(a) カラー画像



(b) 距離画像

図 6 円筒座標系で表現された頭部全周計測データ



図 7 距離データのみを用いた 3 次元形状表現

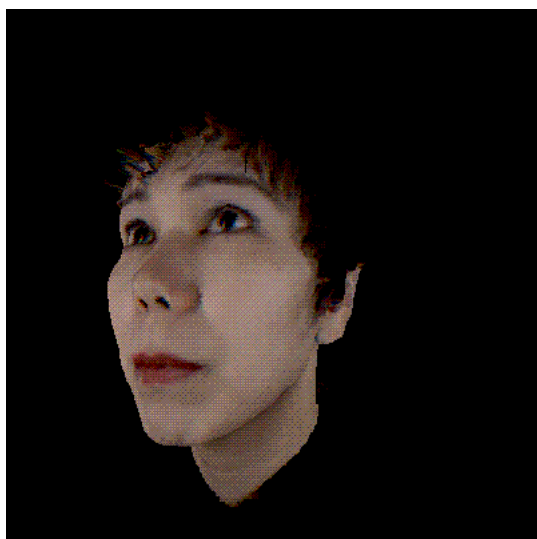
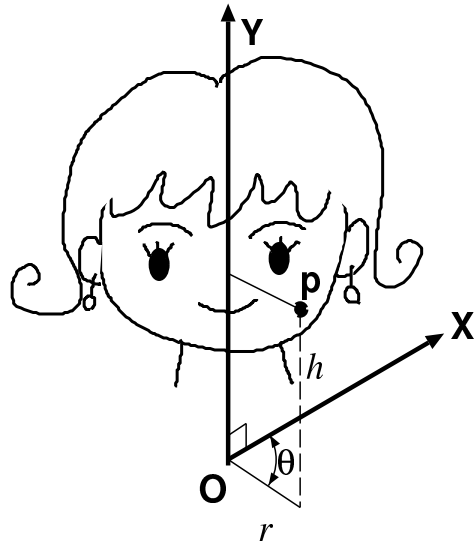


図 8 距離データと表面カラーデータを用いた 3 次元形状表現



r 半径成分 θ 角度成分 h 高さ成分

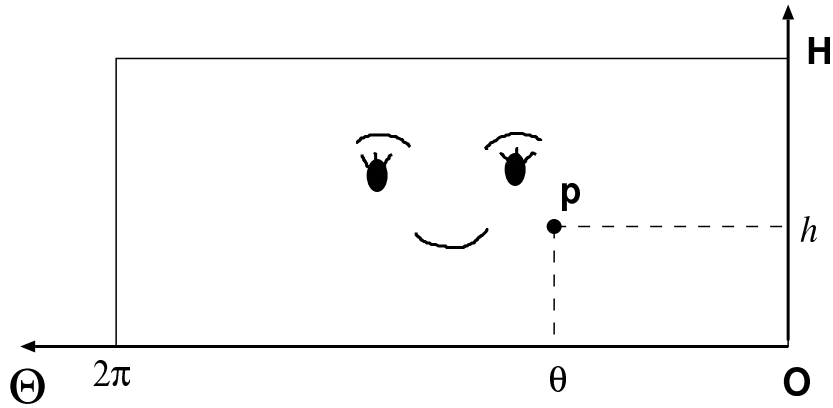


图 9 円筒座標系画像

表 4 特徴点番号と顔面筋

特徴点番号	表情筋
3,4,5,20,21,22	内側前頭筋
6,7,8,23,24,25	眼瞼輪筋
10,11,27,28	眼輪筋
12,13,29,30	頬骨筋
16,18,33,35	口角挙筋
14,15,31,32	頬筋
17,34	笑筋
19,36	オトガイ筋
37,38,39,40,41	口輪筋

3.2.1 表情筋ベクトル

2章においてFACSについて論じたように、人間の顔面筋は口元付近が最も発達しており、それらが表情変化に大きな影響を与えていることを利用し、頬骨筋、三角筋などの表情筋上に22個のマーカを張り付けることにした。

これら22個の特徴点以外に目、口、眉などの顔造作とその周辺、さらに基準位置として後に利用する表情変化にほとんど影響を受けないと思われる鼻中央、(右)目頭、(左)耳たぶの3点を加えて、42点の顔面内特徴点を利用し、それらを組み合わせて28本の表情筋ベクトルとして使用することにした。

表情変化を制御する顔面内特徴点は、顔上部で16点、頬・鼻の付近で9点、顔下部で13点の計38点であると言われる^[12]ため、42点の特徴点の数は決して少なくないものと考えられる。

図10は本研究で利用した、顔面内の特徴点位置を示したものであり、図11は、それらを結んだ表情ベクトルの位置を示したものである。また、表4は、特徴点の番号とそれらが指し示す顔面筋を示したものである。

3.2.2 観測時の姿勢に不変な頭部座標系

今回のような人間の頭部の計測において、多くの場合問題となるのは、計測時の位置・姿勢の変化による計測点の位置ズレである。



图 10 顔面内特徴点位置

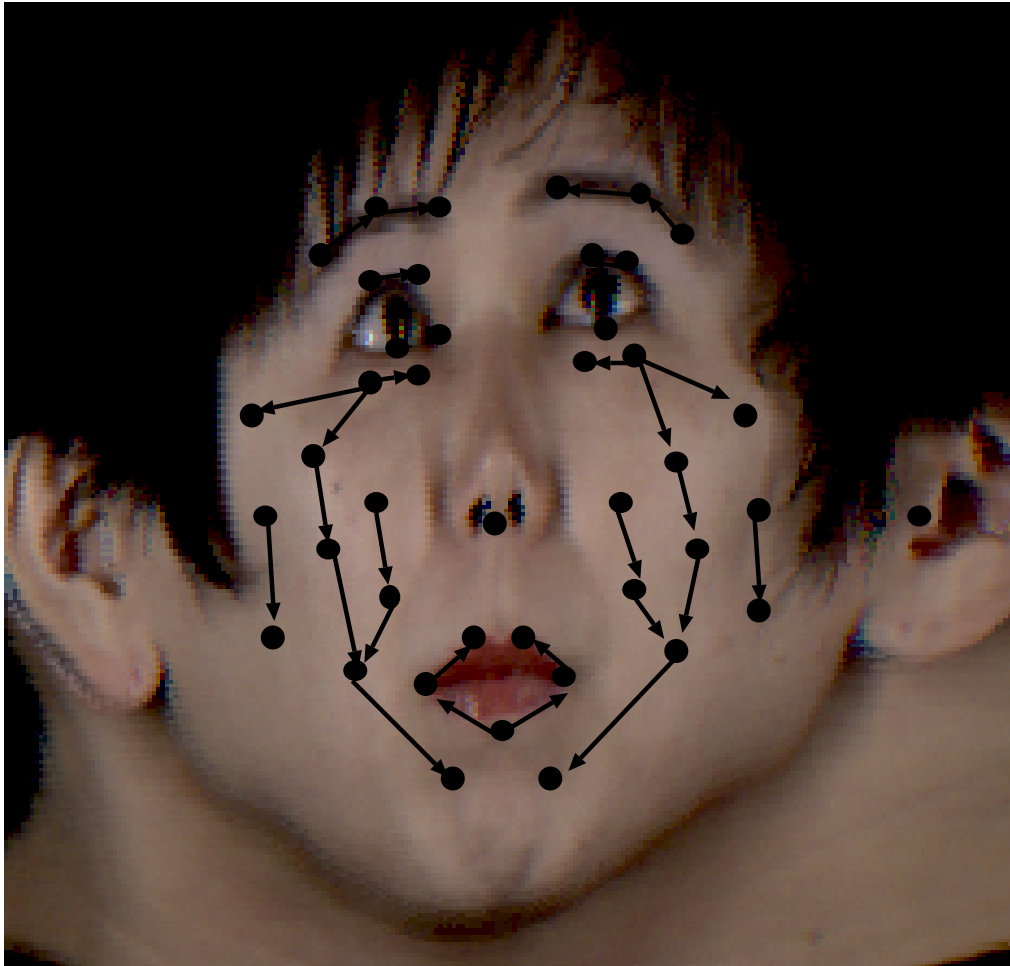


図 11 28本の表情ベクトル

本論文では、全周計測距離データを使って、無表情時と表情表出時の顔面表面の特徴点位置を計測し、それらの表情変化による3次元的移動量から表情を解析しようと試みている。計測された全周計測距離データをそのまま利用すると、計測時の頭部の傾きや姿勢の変化による動き情報までが特徴点の動きとして扱われてしまう。そこで、頭部に設定した座標系を用いて頭部（顔面表面）の特徴点位置を表現する手法^[12]を用いることで問題を解決することにした。

つまり、対象物体である頭部がたとえ絶対座標系 XYZ（カメラからの視線）に対して傾きや姿勢の変化などからその位置を変えたとしても、その物体（頭部）内で設定された相対的な座標系 ABC で表された座標 P は影響を受けないことを利用する（図 12 参照）。

このような物体中心座標を得るためには頭部に1次独立な3次元ベクトルを3本設定する必要がある。これらの基準点として、表情変化にほとんど影響を受けないと思われる鼻中央、（右）目頭、（左）耳たぶの3点を採用し、これら3つの基準点から決まる2つのベクトル（鼻中央から右目頭に向かう \vec{A} 、鼻中央から左耳たぶに向かう \vec{B} ）と \vec{A} 、 \vec{B} の両方に垂直である大きさ $|\vec{BC}|$ の外積ベクトル（ \vec{C} ）の3本のベクトルからなる座標系を頭部に設定した（図 13 参照）。

3.2.3 特徴点位置のパラメータ表現

頭部座標系を構成する3つのベクトル \vec{A} 、 \vec{B} 、 \vec{C} を基準ベクトルとし、顔面内の各特徴点 P_i の座標 (x_i, y_i, z_i) は、この基準ベクトルの各成分の加重線形和で表現できる。

$$\vec{P}_i = a_i \vec{A} + b_i \vec{B} + c_i \vec{C} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_x & b_x & c_x \\ a_y & b_y & c_y \\ a_z & b_z & c_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_i \\ b_i \\ c_i \end{bmatrix} \quad (2)$$

式 (1) による表現は、頭部の大きさを正規化する効果もあり、これにより、骨格（頭部）の大きさについての個人差を吸収することができる。

ある人物の基準点（3点）とそれ以外の特徴点（5点）の8点を無表情で、異なる姿勢で2回計測し、その2枚の距離画像（Image1, Image2）を元に

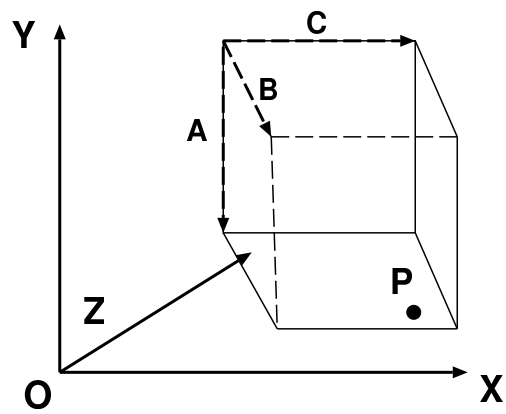
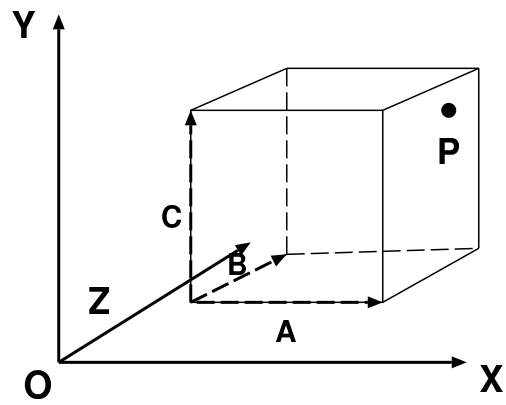


図 12 絶対座標系 XYZ と相対座標系 ABC



図 13 頭部座標系の基準ベクトル

して求められた基準点以外の5つの特徴点についてのパラメータ a, b, c の値を比較したグラフを図 14に示す。2枚の画像における各特徴点の a, b, c の3つのパラメータの値にはわずかな誤差が見られるものの、ほぼ一致している。これらのパラメータ値の違いが実際の画像上では何画素程度の違いとなって現れるのかを調べることにより、パラメータ値の正確さを検証した。

Image1 の特徴点から得られたパラメータ a, b, c の値と、Image2 の基準点から得られた基準ベクトルとを組み合わせることにより推定された Image2 の画像上における特徴点の x, y 座標位置と、Image2 から直接計測される特徴点の x, y 座標位置を比較してみた (図 15参照)。これによると、顔造作から離れた右耳たぶを示す特徴点について、 x 座標方向で6画素、 y 座標方向で5画素の誤差があったものの、目、鼻の造作に関しては x, y 座標方向ともに一致もしくは2画素以内の差であることがわかった。美容整形・形成外科における顔造作の位置や大きさなどの形状変化で、印象が変わりやすいのは目と鼻の部分であり、約2mm程度から、頬や顎のラインについては5mm程度の変化ではほとんど印象は変わらないと言われている¹。2画素程度の位置ずれは2mmの変化には及ばないと考えられるので、この程度の位置ずれは、個人的な顔造作の形状や位置などの個性の変化には影響をもたらすことがなく、また表情変化にもほとんど影響しないものと考えられる。

以上の実験結果から、頭部座標系 (基準ベクトル) の利用により計測時の位置、姿勢の変化に関わらず常に安定したパラメータ値として顔面内特徴点位置を表現できることが確認された。

次章では、本章で定義した3つのパラメータを用いて、表情を定量的に扱う手法について述べる。

¹メガ美容形成外科・高柳 進 医師

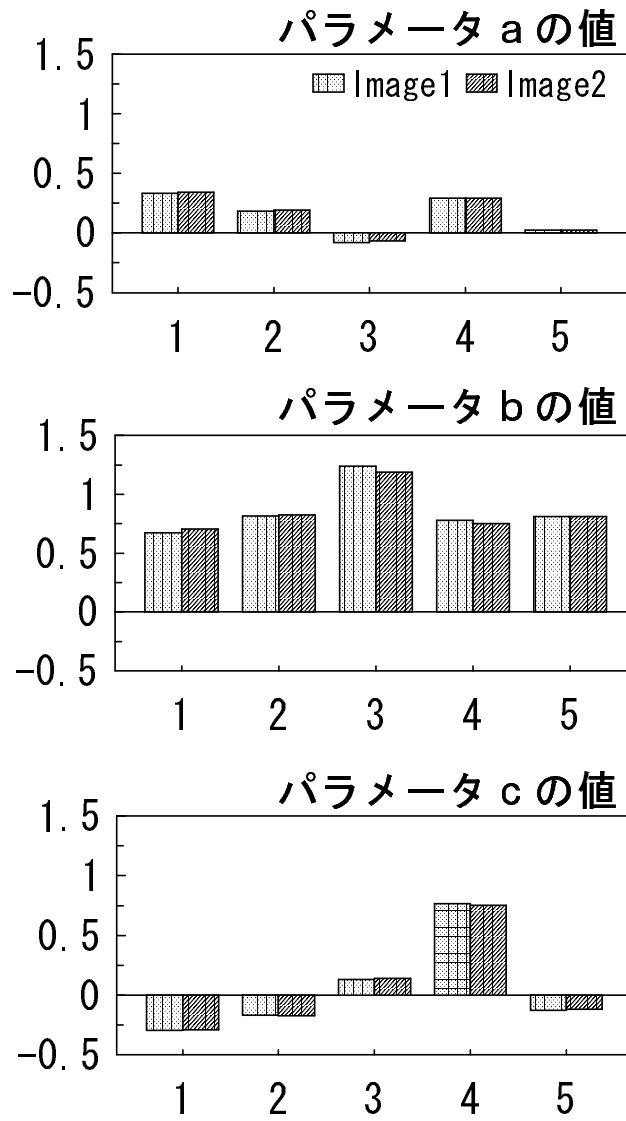


図 14 同一人物を計測した 2 枚の距離画像における特徴点パラメータの値の比較

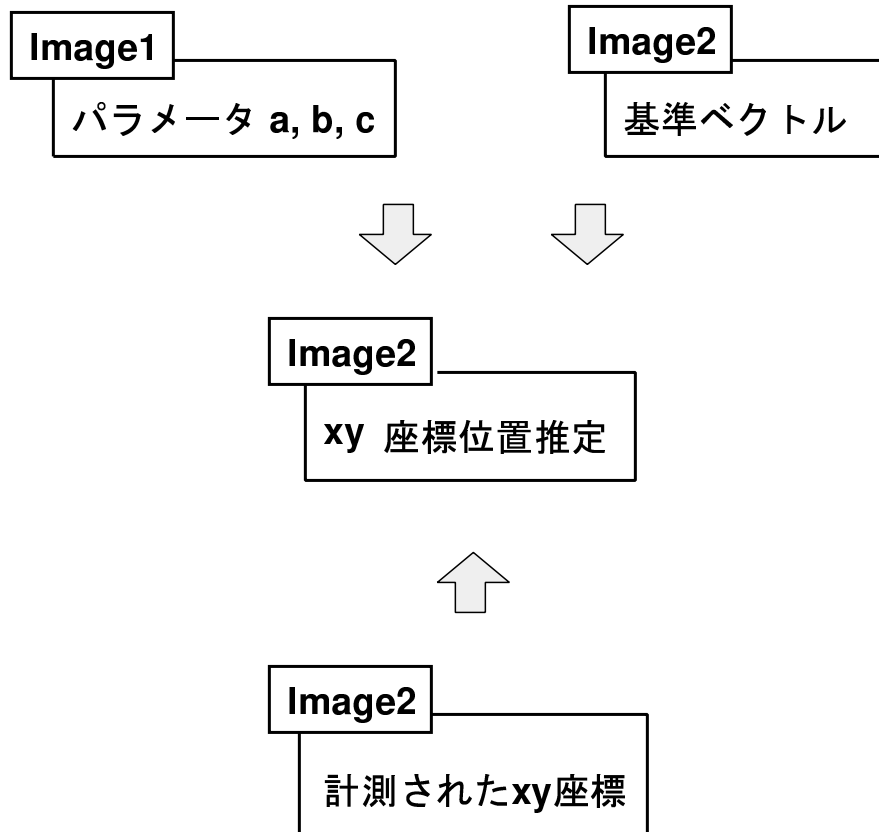


図 15 特徴点パラメータの値の正確さの検証過程

4. 顔表情の定量的解析

感情の変化とともに顔の形状が変化し、表情変化が起こる。2章で述べたように、性別、文化、人種を問わず、「幸せ」や「不快」を意味する表情は読み取れる。つまり、誰から見ても一様に理解できるような一定の規則のもとで顔の造作位置や形状が変化していると言える。この「誰から見ても一様に理解できるような一定の規則」を数値として定量的に表現することで表情の解析を行った。

本章においては、まず顔面内特徴点位置の個人差について論じ、次に表情変化に伴って変化する特徴点パラメータの値を解析することから表情の定量化を試みる。

4.1 特徴点位置の個人差

今回の実験で定量化を試みたのは「幸福 (happiness)」を意味する「微笑み」の表情である。

実験に協力して頂いた被験者は5名の女性である。彼女たちは、顔モデルとして故意に表情を作り出すこと、つまり FACS の AU に従って、顔の表情筋を自らの意思で制御して表情を作り出すような訓練を受けていない普通の人々である。このような被験者を対象とした場合、眉の内側を持ち上げて、唇の端を押し下げるといった「悲しみ (sadness)」の表情をつくるよりも、頬を上を持ち上げて (AU6)、唇の端を横に引く (AU12) 「微笑み」の表情をつくることの方が自然に受け入れられた。

当然のことながら、被験者それぞれで骨格や筋肉のつき方なども異なるため、特徴点の位置、それらの間隔にも個人差がある。さらに、常に正確に表情筋上にマーカを張り付けなければならないという問題がある。そこで、被験者それぞれについての安定した特徴点パラメータの値を得るために、無表情時、表情表出時のそれぞれ5回ずつマーカをつけ替えて計測し、その平均値をその被験者の無表情時、表情表出時のそれぞれの特徴点のパラメータの値とした。

図 16は5名の被験者それぞれが無表情時の5回の試行における AU6, AU12 に関連の深い各特徴点 (12~19, 29~41) におけるパラメータ a, b, c の値のそれぞれの平均値を示すグラフである。

このグラフから、たとえ見た目には、顔面内特徴点位置に個人差があっても、個々の基準ベクトルによって表現された、無表情時の各特徴点位置を表すパラメータ a, b, c の値には、ほとんど個人差のないことがわかる。

この様にして得られた5人の特徴点パラメータ a, b, c の値の平均値を、標準的な無表情時のパラメータ値として扱うことによって、表情を解析する手法について次に述べる。

4.2 特徴点パラメータによる表情解析

骨格の形や大きさ、顔の肉付き、また表情筋の付き具合が異なっている、無表情時の AU6, AU12 に関連が深いと思われる頬骨筋、口角挙筋、頬筋、口輪筋上に位置する各特徴点におけるパラメータ a, b, c の値についての個人差が少ないことを利用し、それらの特徴点パラメータ a, b, c の値を、標準的な無表情顔のパラメータの値とし、「微笑み」の表情表出時のパラメータの値との差から表情の定量化を行った。

図 17は、5名の被験者について、表情変化によるパラメータ a, b, c の変化量を示しており、各特徴点における5回の試行の平均値（細線）と、それらから推定された標準値（太線）を表したものである。

表情表出における特徴点パラメータ a の値の変化については、個人差が現れ、それが原因と思われるやや不安定なバラツキが見られるものの、パラメータ b, c については個人差はほとんど見られず、規則的な動きを読みとることができる。

これら特徴点パラメータ a, b, c の値の表情変化による標準的な変化量を、表情（微笑み）表出による特徴点位置の平均的移動量と考え、表情の定量化に利用した。

$$a_{2i} = a_{1i} + da_i \quad (3)$$

$$b_{2i} = b_{1i} + db_i \quad (4)$$

$$c_{2i} = c_{1i} + dc_i \quad (5)$$

式(3)~(5)における a_{1i}, b_{1i}, c_{1i} は、無表情時の各特徴点 P_i におけるパラメータの値を意味し、 a_{2i}, b_{2i}, c_{2i} は、表情表出時（微笑み）のパラメータの値を、また da_i, db_i, dc_i は、それぞれの特徴点 P_i における「微笑み」表情表出によるパラメータ a, b, c の値の変化量を意味する。

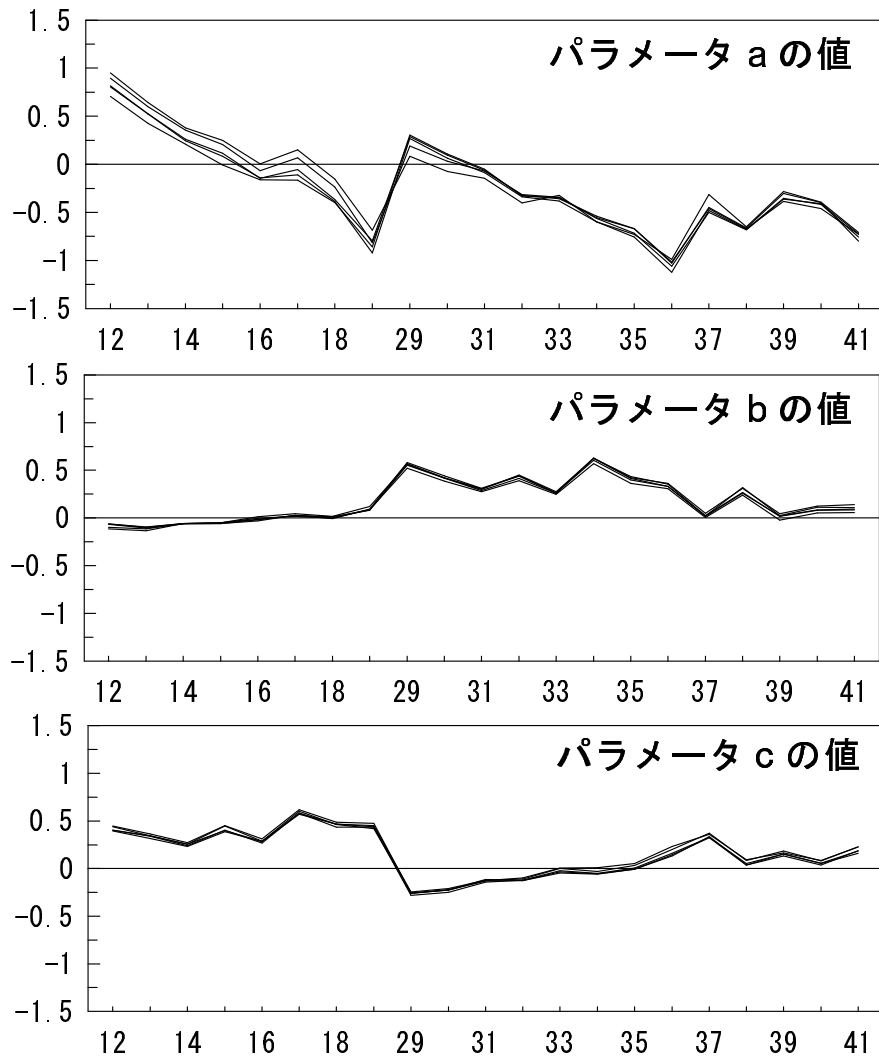


図 16 5人の被験者の無表情時の特徴点パラメータの値

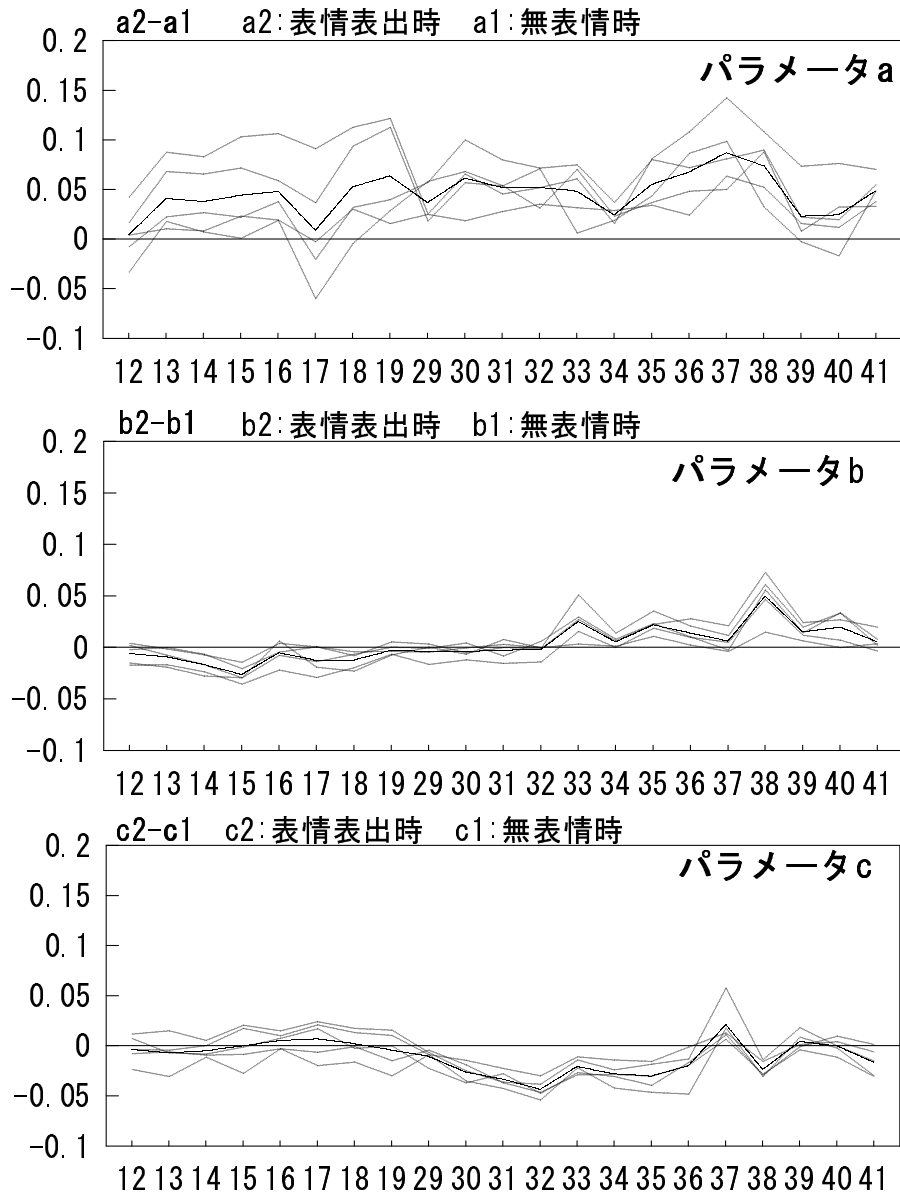


図 17 表情表出によるパラメータ値の変化量（5人の被験者とそれらの平均としての標準量）

5. 表情解析に基づく表情変化の生成

顔面内に設定した座標系を利用することで、顔造作を含む特徴点を安定したパラメータ値として表現し、さらに、それらを利用することで特徴点の3次元的位置や、表情変化に伴う特徴点の移動量を表現することができた。顔面内特徴点は、いずれも FACS の AU を反映する表情筋上に位置するものであり、これら特徴点の表情変化による移動を、特徴点からなる表情ベクトルの移動と考える。

円筒座標系で表現された距離画像上の表情ベクトルを、画像変形の制御に用いることで、表情変形を試みる。本研究において、画像変形の手法としてモーフィングを用いた。

本章においては、まずモーフィングの手法を紹介し、次に、その手法を用いた画像処理による表情変形を試みる。

5.1 モーフィング理論

モーフィングの語源は「metamorphosis = 変形」であり、映像中のある物体が、色や形の異なる別の物体に、滑らかに変化していく映像手法で、CG やコンピュータアニメーションの分野で近年多用されている画像変形手法である。

このモーフィングの手法のひとつとして、画像上のベクトルの対応によって変形を制御するものがある。今回は、原画像と生成画像とで対になるベクトルを配置して、ベクトル上の点是对応するベクトル上に、ベクトルから離れた点はそれなりに移動させるという手法^[11]を用いた。

変形を制御するベクトルに表情筋からなるベクトルを利用し、表情変化による筋肉の3次元的な移動を、解剖学的にシミュレートすることによって、より自然な表情生成が可能になるのではないかと考えたからである。顔面内の特徴点から得られた無表情時、表情表出時のそれぞれの表情ベクトルを対応づけ変形を行った。以下において、モーフィングの数学的な理論を紹介する。

5.1.1 1組のベクトルによる制御を用いた1枚の画像でのモーフィング

原画像（変形前）上にある1本のベクトル $P'Q'$ と生成画像（変形後）上の1本のベクトル PQ が対応している場合、その1組のベクトルを基準として原画像をモーフィングによって変形することから生成画像は得

られる (図 18参照)。

生成画像上の点 X から原画像上の点 X' の位置を求めその画素をコピーすることによって変換が可能となる。具体的には以下のアルゴリズムによって1組のベクトル間での変換が行われる。

- 生成画像の各々の画素 X において
 - 対応する u, v を求める
 - u, v から X' を探す
- 原画像 X' の画素を生成画像 X に移す

ここで u は X から PQ に垂線を下ろした点の内分比を表し、 v は PQ と X の距離を表す。また $per()$ は入力されたベクトルと垂直で長さが等しいベクトルを表す。なお、 u, v, X' は以下の式によって求められる。

$$u = \frac{(X - P) \cdot (Q - P)}{\|Q - P\|^2} \quad (6)$$

$$v = \frac{(X - P) \cdot per(Q - P)}{\|Q - P\|} \quad (7)$$

$$X' = P' + u(Q' - P') + v \frac{per(Q' - P')}{\|Q' - P'\|} \quad (8)$$

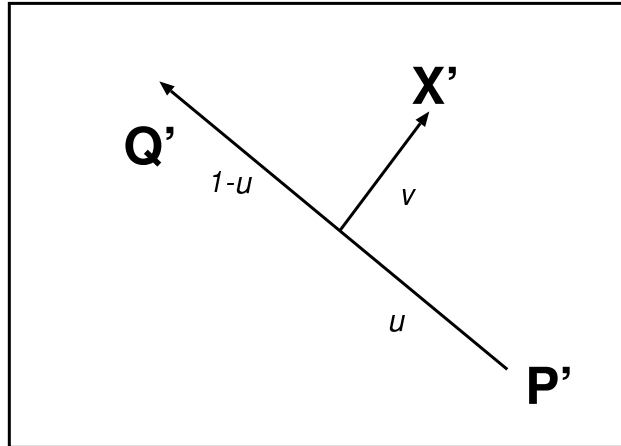
図 19には変形前の原画像と変形を制御するベクトルの位置を示し、図 20においては変形後の生成画像の例とその対応するベクトル位置を示す。

5.1.2 複数組のベクトルによる制御を用いた1枚の画像でのモーフィング

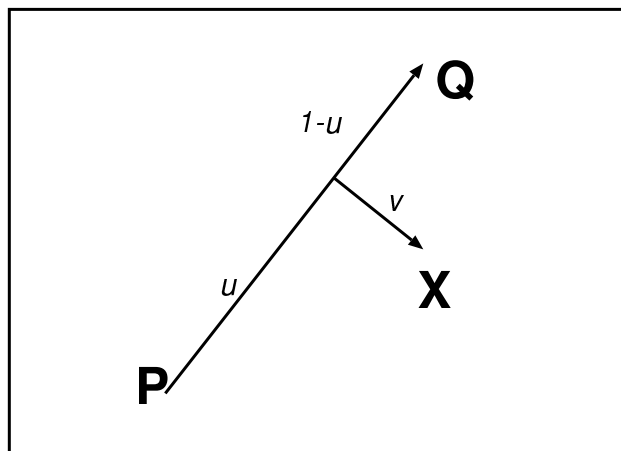
制御にかかわるベクトルの本数が増えるとその変換が複雑になることは言うまでもないが、例えば、原画像の変形を制御するベクトルが i 本であった場合、ベクトルが1本のときと同じように X から X'_i を求める。つまりベクトルが i 本あれば原画像上の候補となる X' は i 点存在する。ここで変位 $D_i = X - X'_i$ の加重平均を利用する。

複数組のベクトルが対応する場合のモーフィングのアルゴリズムは以下のようなになる。

- 生成画像上の各々の画素 X について



(a) 原画像



(b) 生成画像

図 18 原画像上のベクトル $P'Q'$ と生成画像上のベクトル PQ からなる 1 組のベクトルを基準とするモーフィングによる変形

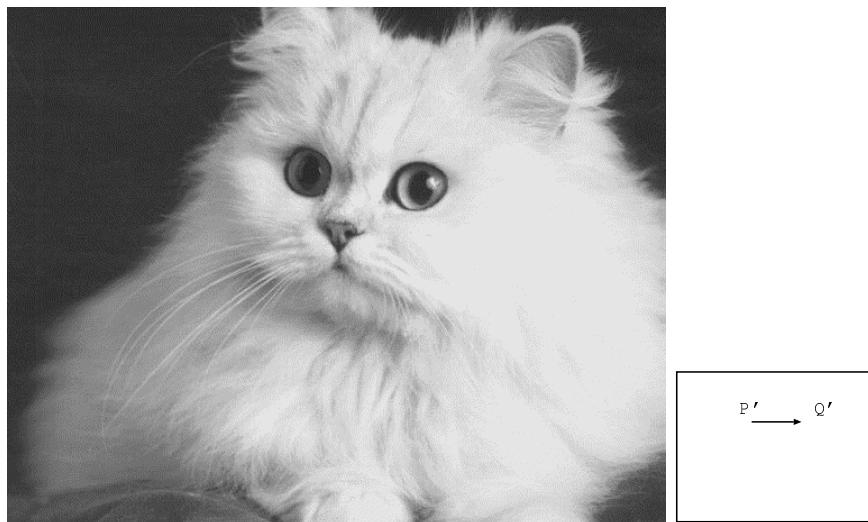
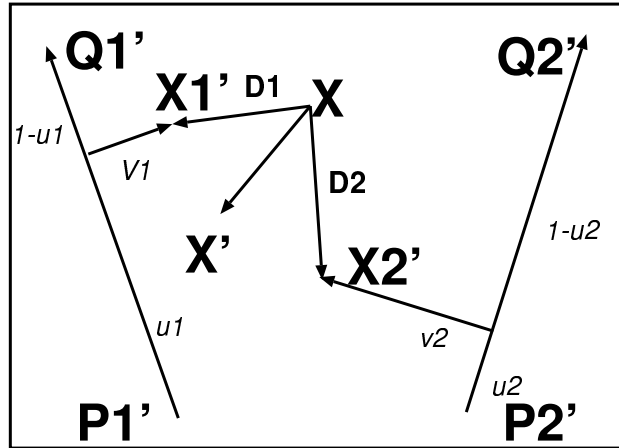


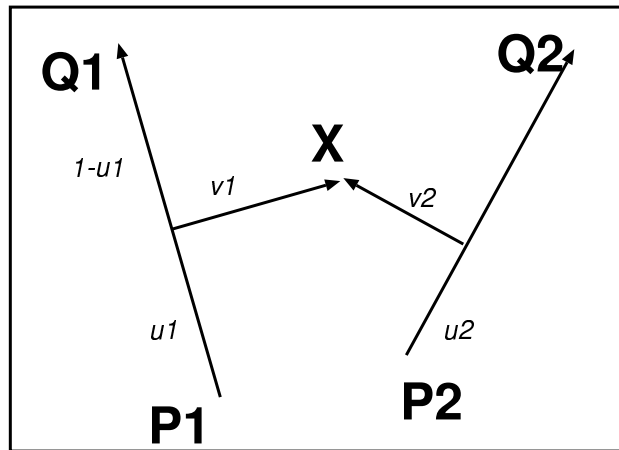
図 19 モーフィングに利用した原画像と変形に用いられたベクトル $P'Q'$



図 20 モーフィングで生成された画像と変形に用いられたベクトル PQ



(a) 原画像



(b) 生成画像

図 21 原画像上のベクトル $P_1'Q_1', P_2'Q_2'$ と生成画像上のベクトル P_1Q_1, P_2Q_2 からなる 2 組のベクトルを基準とするモーフィングによる変形

- $DSUM = (0, 0)$
- $weightsum = 0$
- それぞれのベクトルについて
 - * $P_i Q_i$ に基づく u, v を求める
 - * X'_i を求める
 - * 変位 $D_i = X - X'_i$ を求める
 - * X から $P_i Q_i$ への最も短い距離を $dist$ とする
 - * $weight$ を求める
 - * $DSUM+ = D_i * weight$
 - * $weightsum+ = weight$
- $X' = X + \frac{DSUM}{weightsum}$
- 生成画像 (X)=原画像 (X')

1組のベクトルによるモーフィングで利用した3つの式に次の式を加えて利用する必要がある。

$$weight = \left(\frac{length^P}{A + dist} \right)^B \quad (9)$$

ただし、 $length$ は線分の長さ、 $dist$ は画素と線分の距離を表す。式(9)における A, B, P はモーフィングを制御するパラメータであり、以下のような特徴をもっている。

1. 定数 A は0より大きい数値で大きいほど制御しやすいが逆に感度が落ちる。
2. 定数 B は0.5から2の数値をとり、画素は近い線分により強く影響される。
3. 定数 P は0から1の数値をとり、長い線分の方により影響される。

またアルゴリズムの中での $DSUM$ は画素 X の x, y 方向への変位の大きさの和を表し、 $weightsum$ は $weight$ の和を表す。制御にかかわる原画像上の複数本のベクトルが交差すると結果が得られないため、ベクトルの配置には気くばりが必要である。参考論文^[11]においても、実際の計算にかかるまでの労力の多くは、このベクトルをいかにうまくとるかにあてられたと述べられている。

図 22には変形前の原画像と変形を制御するベクトルの位置を示し、図 23においては変形後の生成画像の例とその対応するベクトル位置を示す。

5.1.3 2枚の画像でのモーフィング

2枚の画像間でのモーフィングは前述の手法の応用となる。画像Cを画像A、画像Bの間でモーフィングを行なって得られた生成画像とする。画像A、画像Bで対応するベクトル（特徴点を結んだものなど）の本数が多いほど滑らかなモーフィングが期待できる。以下は画像Cを生成する行程である（図 24参照）。

1. 画像Cを画像Aから画像Bへのモーフィングの過程 ($t\%$) で生成されたものとする。
2. 画像A上にあるベクトル $P_{ai}Q_{ai}$ に対応する画像B上のベクトル $P_{bi}Q_{bi}$ へ $P_{ai}Q_{ai}$ を $t\%$ 移動した位置にあるベクトル $P_{ci}Q_{ci}$ を生成画像C上にあるベクトルと考える。
3. $P_{ai}Q_{ai}$ と $P_{ci}Q_{ci}$ を対応する i 組のベクトルと考え画像Aをモーフィングにより変形し、画像ACを得る。
4. $P_{bi}Q_{bi}$ と $P_{ci}Q_{ci}$ を対応する i 組のベクトルと考え画像Bをモーフィングにより変形し、画像BCを得る。
5. 画像AC、画像BCの各画素を $(1-t):t$ の割合で加え、画像Cが生成される。

変形を制御するベクトルの数が多いほど自然な変形が期待できるが、ベクトルの本数が増えると計算時間がかかる。図 25、図 30はモーフィングを行う前の画像A（田村氏）と画像B（三浦氏）であり、図 26、図 27、図 28、図 29は画像A（田村氏）から画像B（三浦氏）への、異なる人物へのモーフィングの例である。また、図 31はこれら2枚の画像におけるモーフィングを制御した40本のベクトルの位置を示したものである。

5.2 モーフィングによる「微笑み」表情の生成

4章で得られた「微笑み」表情の標準量を利用して、任意の人物の無表情画像をもとに、「微笑み」表情の生成をモーフィングにより行った。

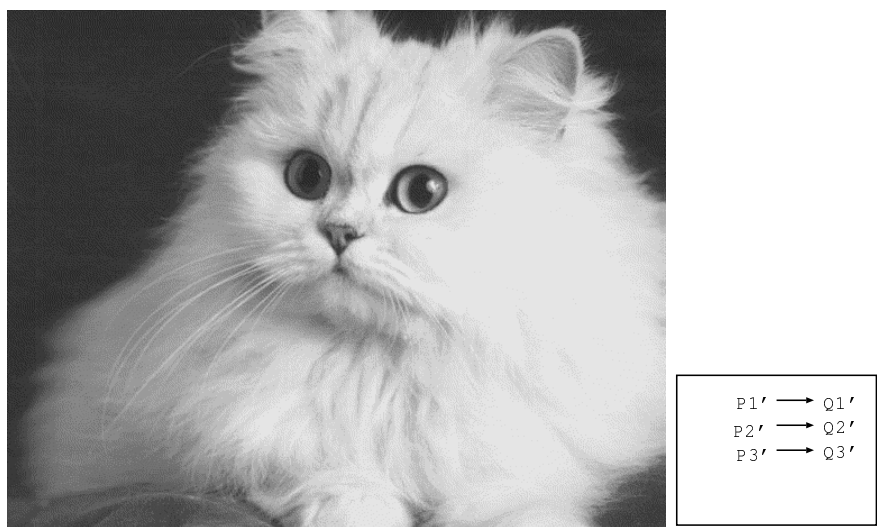


図 22 モーフィングに利用した原画像と変形に用いられた 3つのベクトル $P_1'Q_1', P_2'Q_2', P_3'Q_3'$

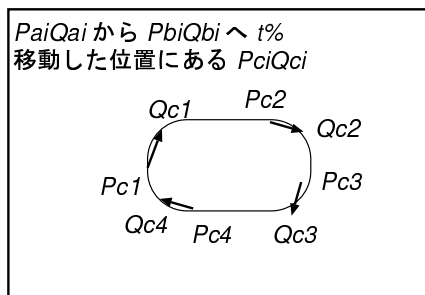


図 23 モーフィングで生成された画像と変形に用いられたベクトル P_1Q_1, P_2Q_2, P_3Q_3

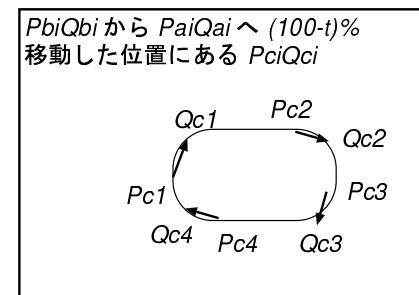


画像 A

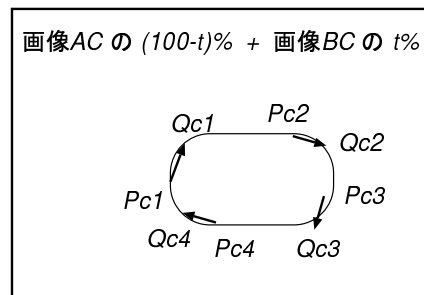
画像 B



画像 AC
(*PaiQai* と *PciQci* の対応によって変形)



画像 BC
(*PbiQbi* と *PciQci* の対応によって変形)



画像 C

図 24 2 枚の画像間で行なわれるモーフィングの図解



図 25 変形されていない画像 A(100%)



図 26 2枚の画像間で行なわれるモーフィング：画像 A(80%)+画像 B(20%)



図 27 2 枚の画像間で行なわれるモーフィングの例：画像 A(55%)+画像 B(45%)



図 28 2 枚の画像間で行なわれるモーフィングの例：画像 A(35%)+画像 B(65%)



図 29 2 枚の画像間で行なわれるモーフィングの例：画像 A(15%)+画像 B(85%)



図 30 変形されていない画像 B(100%)

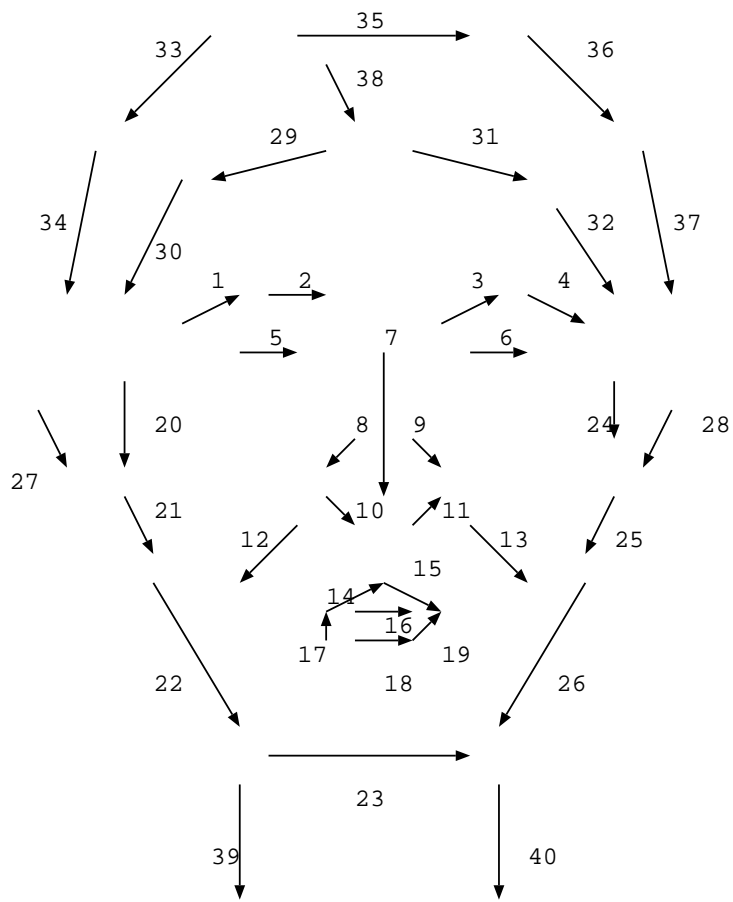


図 31 モーフィングに用いられた 40 本のベクトル

モーフィングを制御する 28 組の表情ベクトル（図 11 参照）を得る手順は、以下の通りである。

1. 任意の人物の頭部全周計測により、その人物の距離画像とカラー画像を得る。
2. 距離画像をもとに 3 次元基準ベクトルを得る。
3. 無表情時の特徴点の標準的なパラメータの値と基準ベクトルから、円筒座標系で表現された画像上の無表情時の特徴点座標を求め、それより表情ベクトルの位置を得る。
4. 無表情から「微笑み」表情への変化による特徴点パラメータの標準的な変化量から表情表出時の画像上の特徴点座標を求め、表情ベクトルの位置を得る。

以上により、原画像（無表情）と生成画像（表情表出）とで対応する 28 組のベクトルが得られ、1 枚の無表情の画像からの 28 組のベクトルの制御によってモーフィングを行い、「微笑み」の表情を持つ画像の生成を試みた。

3 章の図 11 は制御に使われた無表情時の 28 本のベクトルを示したものである。モーフィングは距離画像、カラー画像ともに同じ表情ベクトルを用いて行われ、それにより生成された距離画像、カラー画像の両方をあわせて用いることにより、表面カラーを保持した 3 次元形状表現を得る。図 32 は無表情から徐々に「微笑み」の表情に変化する様子を示したものである。距離画像を活用することで平面的な画像処理から 3 次元的な変形を実現した。

5.3 表情の強度

表情変化による各特徴点の 3 次元移動量から得られたパラメータ a, b, c の値の変化量をもとに「微笑み」表情の定量化を行い、それらを利用することにより任意の人物の無表情画像に表情変化を与えることが可能であることがわかった。

この変化量を変えることにより、「微笑み」にまで至らない「(微) 表情」や、また「過表情」生成について検討した。なお、本節以降用いられる「(微) 表情」は、2 章において紹介した「微表情」とは異なり、無表情からある表情にほんの少しだけ変化した微かな表情という意味である。

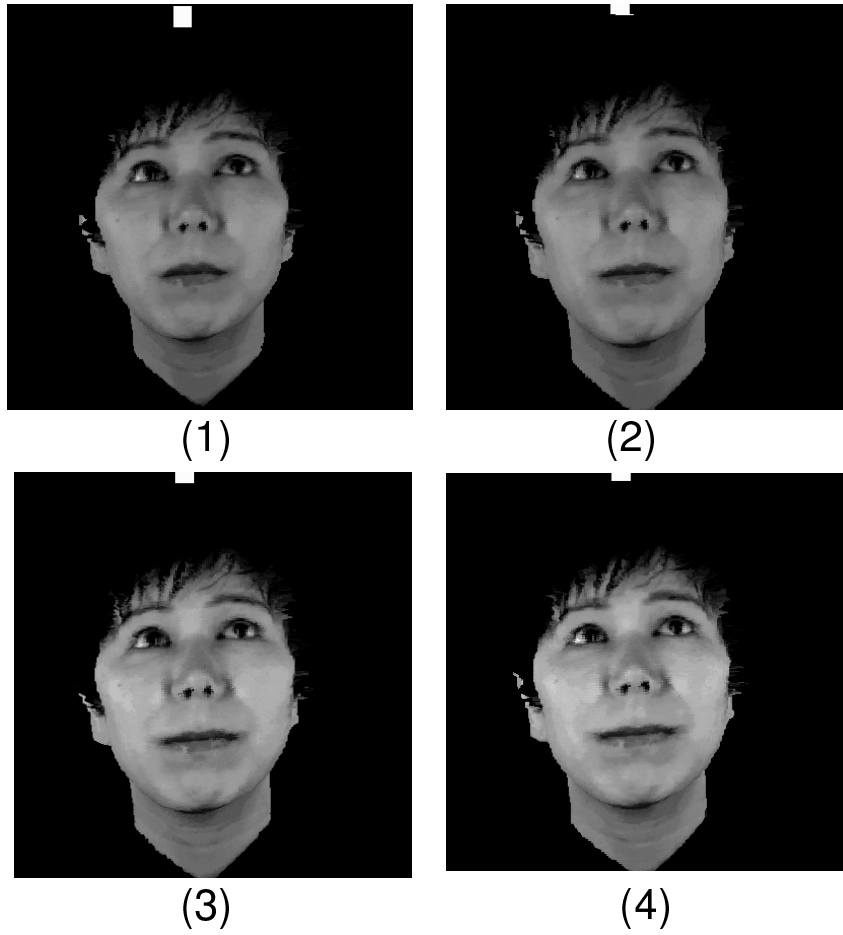


図 32 無表情から「微笑み」への表情変化を持った 3 次元モデル ((1), (2), (3), (4) の順)

4章で利用した式 (3), (4), (5) から以下の式を得る。

$$a2_i = a1_i + rda_i \quad (10)$$

$$b2_i = b1_i + rdb_i \quad (11)$$

$$c2_i = c1_i + rdc_i \quad (12)$$

上記の式における定数 r をその表情の強度の割合と考える。 $r = 1$ の場合を標準的な強度の「微笑み」の表情とし、 $r = 0.3$ の「(微) 表情」と $r = 4$ の「過表情」を生成した。図 33は無表情の3次元モデルをもとに生成された「(微) 表情」の、また図 34は「過表情」の3次元モデルである。

「(微) 表情」に関しては、図 32における「無表情」から「微笑み」へのモーフィングによって生成されたモデル (図 32(2)) とほぼ一致した画像が生成された。また、「過表情」については、「微笑み」の「過表情」が「笑い」になると思われがちであるが、「微笑み」は AU6, AU12 による表情筋の動きによって得られる表情であり、その動きは「頬を持ち上げ」、「唇を横に引く」の2種の動きの組み合わせのみで表現されるものである。「笑い」の表情にはこれら以外の眼輪筋や口輪筋の運動を表す AU の動きが関わり、「微笑み」の「過表情」がそのまま「笑い」の表情変化を意味するわけではない。図 34でもわかるように、単に「微笑み」が強く表現された不自然な表情となっている。

以上より、特定の表情変化を意味する特徴点パラメータ a, b, c の変化量を変えることにより、その表情に強度を持たせることができることがわかった。これらの実験結果から、本論文で提案した顔画像における表情合成法は、知的インタフェースへの応用、実在の人物像を利用したリアルなアニメーション映画や、そのセル画の自動生成などの娯楽・芸術への応用が期待できる。

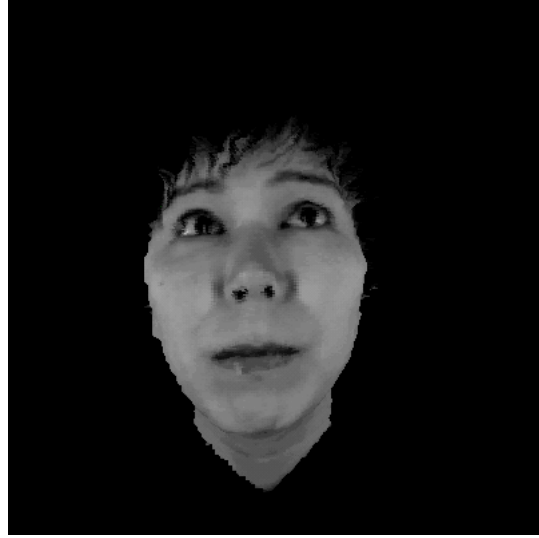


図 33 表情強度 $r = 0.3$ で合成された「(微) 表情」



図 34 表情強度 $r = 4$ で合成された「過表情」

6. むすび

表情合成などの従来の研究においては、3次元モデルの、表情筋上の特徴点位置に相当する格子点を、FACSのAUの動きに合わせて移動させることにより変形させて、表情生成を行っているものが多いが、表情変化による特徴点の移動量について定量的に分析されていない。また、その変形において、計算の煩雑さや人手による試行錯誤などの弱点がある。

本研究においては、円筒座標系で表現された距離画像から得られる3次元情報を利用した表情解析を行い、解析結果に基づく2次元の平面処理として表情合成を行うことでこれらの問題点を解決した。

頭部に設定した座標系からなる3本の基準ベクトルの各成分を用いることで、顔距離画像における特徴点位置を、計測時の位置、姿勢に不変で、かつ頭部・骨格の大きさについて正規化されたパラメータ値として表現し、表情変化によるそれら各特徴点の3次元的な移動量から表情の変化量を得ることができた。この手法により、抽出された表情表出時の特徴点位置の標準的な移動量を、表情筋ベクトルの3次元的な移動として捉え、表情変化に伴って移動する表情筋の動きを、その運動単位であるAUの動きを十分に考慮しながら、無表情の距離画像、カラー画像に対するモーフィングを、それらの表情筋ベクトルを対応させて行うことにより、表情を与えることができた。さらに、表情の変化量を意味する特徴点パラメータの値の変化量を変えることで、表情に強度を持たせることができた。

顔画像における表情の研究は、コンピュータの普及が急ピッチで進む昨今、人間とコンピュータとのコミュニケーションの、より一層の円滑化のために、そのインタフェースの向上と充実を目的として進められている。また、一方で、人間の表情が心理を直接反映していることを利用し、感性情報を解析する手段としての応用も期待される分野である。

本研究を発展させることによって、表情変化を持った、異なる人物、あるいは、動物や物体への3次元モーフィングも可能であり、これによって、現在は人間の手作業に頼っている映画の特殊メイクを始めとする映像技術への貢献、さらに、美容、医療面での活用など応用分野は、今後ますます広範囲に広がっていくものと考えられる。

最後に、今回の実験では被験者は日本の女性を使ったが、性別や人種、年齢が異なると、顔面内特徴点位置を表すパラメータの値や、その変化量なども異なってくるものと思われる。また、各種AUの定量化を実現することから、基本6表情のみならず、「ブレンド表情」への応用など検

討する課題が残されている。これら残された課題を解決すべく、今後も研究を続けていく予定である。

謝辞

本研究を行なうにあたり、終始暖かくきめ細かな御指導を頂いた、情報科学研究科横矢直和教授に厚く御礼申し上げます。

本論文をまとめるに際し様々な御教示を頂きました、千原國宏教授、荻原剛志助教授、竹村治雄助教授に感謝いたします。

日頃より、御指導、御助言、そしていつも暖かく励まして下さった、馬場始三助手、岩佐英彦助手、片山善章助手に感謝いたします。

本研究の実験を行なうに当たり快く被験者として協力して下さった、研究室事務補佐の伊原裕代さん、佃井敬子さん、村上和代さん、及び情報科学研究科学生の中島了さん、松本直子さん、そして長年来の友人可児なをみさんに感謝いたします。

横矢研究室の諸氏には、言い尽くせないほどの多大なる御助言、御助力を頂きました。ここに心より感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 工藤 力 (訳), P.Ekman and W.V.Friesen: 表情分析入門, 誠信書房, 1988.
- [2] 福井康之: 感情の心理学, 川島書店, 1990.
- [3] MORE 編集部: “めざせ! 表情美人!!”, 集英社MORE, No.211, pp.186-197, 1995.
- [4] 中嶋正之: 3次元CG, オーム社, pp.119-142, 1994.
- [5] 崔、原島、式部: “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(1990.7).
- [6] 崔、原島、式部: “顔の3次元モデルを用いた顔面表情の分析”, 信学論 (D-II), Vol.J74-D-II, No.6, pp.766-777(1991.6).
- [7] 上野、小野、森島、原島: “自然な表情合成のための頭部高精細ワイヤフレームの構成とその階層的制御について”, 情処研報, グラフィックスとCAD60-2, (1992.12.17).
- [8] 関、中村、南: “表情認識のための表情記述モデルの構成と表情解析”, 情処研報, グラフィックスとCAD64-9, (1993.8.20).
- [9] 松野、李、辻: “ポテンシャルネットを用いた顔表情の認識”, 信学技報, PRU93-64, (1993.10).
- [10] 末永、間瀬、渡部: “人間のCG表現と応用”, テレビジョン学会誌, Vol.46, No.8, pp.1012-1020(1992.8).
- [11] T.Beier and S.Neely: “Feature Based Image Metamorphosis”, *Computer Graphics*, Vol.26, No.2, pp.35-42, July 1992.
- [12] 阪口、森島、大谷、岸野: “3次元計測に基づく顔表情変化の分析と合成”, 信学技報, HC93-74, (1994-01).
- [13] 新井: “大局的変形と局所的変形を用いた顔の三次元アニメーション”, 情処研報, グラフィックスとCAD64-2, (1993.8.19).

- [14] D.Terzopoulos and K.Water: “Analysis and Synthesis of Facial Image Sequences Using Physical and Anatomical Models”, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.15, No.6, pp.569-579, June 1993.
- [15] 上木、森島、山田、原島: “多層ニューラルネットの恒等写像学習による感情空間の構成”, 信学技報, HC92-60, (1993-01).
- [16] 新井、栗原: “2次元パラメータ空間上での線形内挿による顔の3次元アニメーション”, 情処研報, グラフィックスとCAD45-5, (1990.7.20).
- [17] 大谷、北村、竹村、岸野: “臨場感通信会議における3次元顔画像の実時間表示”, 信学技報, HC92-61, (1993-01).
- [18] 田中、岸野: “3次元曲率を用いた顔の同定-顔の3次元形状特徴抽出”, 信学論 (D-II), Vol.J76-D-II, No.8, pp.1595-1603, (1993.8).
- [19] 赤松、佐々木、深町、末永: “濃淡画像マッチングによるロバストな正面顔の識別法-フーリエスペクトルのKL展開の応用”, 信学論 (D-II), Vol.J76-D-II, No.7, pp.1363-1373, (1993-7).
- [20] 村瀬、S.K.Nayar: “2次元照合による3次元物体の認識とその学習—パラメトリック固有空間表現—”, 信学技報, PRU93-120, (1994-01).
- [21] 角、中川、登、前原: “三次元顔画像合成システム”, 画像ラボ, pp.36-39, 1992.1.
- [22] 金出: “人の同定のための画像処理”, 信学誌, Vol.59, No.11, pp.1278-1285, Nov.1976.