

NAIST-IS-MT9451059

## 修士論文

# 頭部全周計測距離データを用いた 顔基本 6 表情の解析と合成

鈴木 哲

1996年2月16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  
修士(工学)授与の要件として提出した修士論文である。

鈴木 哲

指導教官： 横矢 直和 教授  
千原 國宏 教授  
竹村 治雄 助教授

# 頭部全周計測距離データを用いた 顔基本 6 表情の解析と合成\*

鈴木 哲

## 内容梗概

従来の顔表情合成の研究においては、心理学分野で普及している FACS (Facial Action Coding System) と呼ばれる表情記述方式に基づいて、顔面内特徴点に合わせられたワイヤーフレームモデルなどの頭部 3 次元モデルの制御点を手作業で移動させて表情合成を行なうものがほとんどであった。しかしながら、顔面内特徴点の移動量は FACS において定量的に与えられたものではなく、その合成手法は試行錯誤によるところが大きかった。本研究では、頭部全周計測距離データを用いて、表情の変化に伴う顔面内特徴点の移動量を定量的に解析し、その解析結果に基づいて 3 次元顔表情画像を合成する手法を提案する。まず、頭部に設定した物体中心座標系を用いて、計測時の頭部の位置や姿勢に依存しない顔面内特徴点位置のパラメータ表現を得る手法について述べる。次に、無表情から基本 6 表情 (怒り・嫌悪・恐怖・喜び・悲しみ・驚き) への変化に伴う顔面内特徴点の移動をパラメータの変化量として捉え、表情解析を行なう。最後に、解析結果を利用して、無表情顔画像をワーピングにより変形させることによって、自然な基本 6 表情の 3 次元顔表情画像合成を行なう。

## キーワード

全周計測距離データ, 顔基本 6 表情, 表情解析, 表情合成, ワーピング

---

\*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-MT9451059, 1996年2月16日.

# Analysis and Synthesis of Six Primary Expressions Using Cylindrical Facial Range Images\*

Satoshi Suzuki

## Abstract

In most of conventional approaches in synthesis of human facial expressions, facial images are generated by manually moving control points of a 3-D model based on the concept of FACS (Facial Action Coding System). However, movements of facial feature point locations have not been quantified in FACS. This paper describes a synthesis-by-analysis approach using range images for producing human facial 3D images with expressions. First view-independent representations of 3-D locations of facial feature points are obtained by using an object-centered coordinate system defined in a face. Then we quantify feature point locations for the neutral expression and six primary expressions: “anger”, “disgust”, “fear”, “happiness”, “sadness” and “surprise”. Applying an image warping technique on both range and texture images, we finally generate 3-D facial expression images from neutral expression images and motion vectors of facial feature points.

## Keywords:

cylindrical range image, six primary facial expressions, expression analysis, expression synthesis, image warping

---

\*Master's Thesis, Department of Information Systems, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, NAIST-IS-MT9451059, February 16, 1996.

# 目次

1. はじめに	1
2. 顔表情と FACS	3
2.1 感情と表情	3
2.1.1 基本6表情	3
2.1.2 顔面表情筋	4
2.2 FACS	4
3. 頭部座標系を用いた顔面内特徴点のパラメータ表現	12
3.1 頭部3次元モデル	12
3.2 頭部全周計測距離データ	14
3.3 顔面内特徴点のパラメータ表現	20
3.3.1 顔面内特徴点位置計測	20
3.3.2 頭部座標系と顔面内特徴点のパラメータ表現	20
3.4 予備実験	24
4. 基本6表情の定量的解析と解析結果に基づく合成	27
4.1 基本6表情の定量的解析	27
4.2 解析結果に基づく基本6表情の合成	40
4.2.1 動径的基底関数に基づく画像変形	40
4.2.2 不連続部を含む画像変形への対応	41
4.2.3 3次元顔表情画像の合成	42
4.2.4 表情の強度	46
5. むすび	53
謝辞	54
参考文献	55

## 目 次

1	基本 6 表情 [1] . . . . .	5
2	基本感情を組み合わせて考えられる 33 種の感情 . . . . .	6
3	主な顔面表情筋 [2] . . . . .	7
4	ワイヤースケッチによる頭部 3 次元モデル例 [15] . . . . .	13
5	全周計測レンジファインダの外観 . . . . .	15
6	距離データのみを用いた 3 次元形状表現 . . . . .	16
7	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 . . . . .	16
8	頭部 3 次元計測システムの構成 . . . . .	17
9	円筒座標系表現された計測データ . . . . .	18
10	円筒座標系 . . . . .	19
11	顔面内特徴点位置 . . . . .	21
12	計測データ例 . . . . .	22
13	頭部物体中心座標系の基準ベクトル . . . . .	23
14	無表情時の 3 回の計測におけるパラメータ値 . . . . .	24
15	9 名の被験者の無表情時のパラメータ値 . . . . .	26
16	円筒座標系で表現された基本 6 表情の距離画像例 . . . . .	29
17	円筒座標系で表現された基本 6 表情の表面カラー画像例 . . . . .	30
18	「怒り」の表情時の無表情時からのパラメータ変化量 . . . . .	31
19	「嫌悪」の表情時の無表情時からのパラメータ変化量 . . . . .	32
20	「恐怖」の表情時の無表情時からのパラメータ変化量 . . . . .	33
21	「喜び」の表情時の無表情時からのパラメータ変化量 . . . . .	34
22	「悲しみ」の表情時の無表情時からのパラメータ変化量 . . . . .	35
23	「驚き」の表情時の無表情時からのパラメータ変化量 . . . . .	36
24	「怒り」、「嫌悪」の表情時の平均パラメータ変化量 . . . . .	37
25	「恐怖」、「驚き」の表情時の平均パラメータ変化量 . . . . .	38
26	「喜び」、「悲しみ」の表情時の平均パラメータ変化量 . . . . .	39
27	不連続部を含む画像変形 . . . . .	41
28	口の不連続部 . . . . .	42

29	基本 6 表情の合成画像例 1 . . . . .	44
30	基本 6 表情の合成画像例 2 . . . . .	45
31	表情の強度を徐々に変えて生成した「怒り」の 3 次元顔表情画像 .	47
32	表情の強度を徐々に変えて生成した「嫌悪」の 3 次元顔表情画像 .	48
33	表情の強度を徐々に変えて生成した「恐怖」の 3 次元顔表情画像 .	49
34	表情の強度を徐々に変えて生成した「喜び」の 3 次元顔表情画像 .	50
35	表情の強度を徐々に変えて生成した「悲しみ」の 3 次元顔表情画像 .	51
36	表情の強度を徐々に変えて生成した「驚き」の 3 次元顔表情画像 .	52

## 表 目 次

1	顔の上部の AU [15] . . . . .	8
2	顔の下部の AU [15] . . . . .	9
3	頭と目の位置の AU [15] . . . . .	10
4	その他の AU [15] . . . . .	11

## 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 [4]。近年その研究範囲は、顔表情の分析、認識、合成へと広がりを見せている [5, 6, 7]。表情合成に関する研究は、擬人化エージェントなどのような、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マンマシンインタフェースの充実や、バーチャル・リアリティへの応用、もしくは臨場感通信 [16] などの高度な情報サービスの提供を目的として行なわれている。さらなる広がりとしては、美容形成外科や CG アニメーション [8]、そして心理学への応用なども考えられる。

顔表情に関する従来の研究のほとんどにおいて、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が用いられている [5, 6, 7, 9, 18]。FACS においては、顔面表情筋の構造グループの動きを AU (Action Unit) と呼び、各表情は 1 つないし複数の AU を足しあわせたものとして表現される。顔表情合成における従来の手法は、表情変化に伴う顔面内特徴点位置の変化を FACS に基づいて解析し、顔面内特徴点に合わせられたワイヤフレームなどの頭部 3 次元モデル上の制御点を手作業で移動させ変形させて表情変化を与えるものが大半であった [5, 7]。しかしながら、FACS においては顔面内特徴点の移動量は定量化されておらず、リアルな顔表情を得るためには、顔面内特徴点の移動ベクトルを選ぶ必要があり、極めて煩雑な計算と試行錯誤が必要であった。また、顔面内特徴点位置を計測し FACS の定量化を試みている研究 [9] もあるが、解析の結果を直接利用している訳ではない。

そこで本研究では、頭部全周計測距離データを用いて顔面内特徴点位置を計測し、基本 6 表情の定量的解析を行なう。そしてその解析結果を直接利用して 3 次元顔表情画像を合成する手法を提案する。ここでいう基本 6 表情とは、人間の基本感情と言われる「怒り」、「嫌悪」、「恐怖」、「喜び」、「悲しみ」、「驚き」の感情時に表出される表情のことで、これに無表情を加えた 7 つの表情は、人種、性別、文化を問わずに識別することが可能であると言われている [1]。まず、全周計測レンジファインダにより得られた円筒座標系で表現された顔距離画像から、顔造作上、顔面表情筋上に位置する顔面内特徴点の 3 次元位置を抽出する。次に、

頭部に設定した物体中心座標系 [7, 9, 24, 25, 26, 27, 28] を利用して、計測された顔面内特徴点位置を、計測時の被験者の位置や姿勢の変化に影響されない安定したパラメータ値として表現する。さらに、表情変化に伴って移動する顔面内特徴点の位置の 3 次元移動量を、パラメータ値の変化量としてとらえることによって、基本 6 表情の定量化を行なう。最後に、解析結果を利用し、また口が開くという不連続性も考慮したワーピング手法を距離画像に適用することにより、無表情顔画像から表情顔画像を合成する。

以下、2 章においては、まず人間の表情と FACS について述べ、3 章においては、頭部座標系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、4 章においてはパラメータ変化量を用いた基本 6 表情の解析と、その解析結果に基づく 3 次元顔表情画像の合成手法について述べる。

## 2. 顔表情と FACS

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 [4, 10, 11, 12] と、顔の表情を扱うもの [5, 6, 13, 14] の 2 つに大別できる。その中で表情を扱う研究は、表情検出を目的とするものと、表情合成を目的とするものに分けることができ、共に、マンマシンインターフェースの充実や、臨場感通信などの高度な情報サービスの提供を目的として行なわれている。表情合成のさらなる応用例としては、美容形成外科、VR や CG アニメーションなどが考えられる。本研究ではこの表情合成を目的としている。

本章においては、まず人間の心理と顔表情の関連性、そして顔基本 6 表情について述べる。そして顔表情を構造的、体系的に記述する方式である FACS (Facial Action Coding System) [1] について簡単に説明する。

### 2.1 感情と表情

#### 2.1.1 基本 6 表情

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。逆に言えば、表情が変化するということは、心理状態の変化による顔面表情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。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。

一般に人間の感情は大きく 6 種に分けられる。その 6 種とは、「怒り」、「嫌悪」、「恐怖」、「喜び」、「悲しみ」、「驚き」のことであり、基本感情と言われている。そして、それぞれの感情のときに表出される表情を基本 6 表情という (図 1 参照)。この 6 種に「無感情」の際の無表情を加えた 7 種の表情は、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]。しかしながら、人間の顔に表出する表情が「喜び」、「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。こうして、人間の表情は前述の基本 6 表情を組み合わせると 33 種類に分類することができると言われている [1, 2] (図 2 参照)。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。また、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。

### 2.1.2 顔面表情筋

先にも述べたように、表情とは顔面の筋肉が動くことにより作られる。顔面上の表情を作る筋肉のことを顔面表情筋と呼び、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付いている。皮膚という不安定なものに柔らかく付いている顔面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。図 3 は主な顔面表情筋の配置を表わしたものである。

## 2.2 FACS

人間の顔表情を構造的、体系的に記述する方式として FACS (Facial Action Coding System)[1] が挙げられる。FACS による表情記述法は、心理学者で顔表情の研究である P. Ekman と W. V. Friesen によって提唱されたものであり、顔表情を扱う研究において幅広く用いられている。FACS では、表情変化に伴って移動する顔面表情筋の構造グループを単位として取り扱って表情を記述する。この一つ一つの運動単位は AU (Action Unit) と呼ばれる。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動きの単位である。いずれの顔面表情筋



怒り」



嫌悪」



恐怖」



喜び」

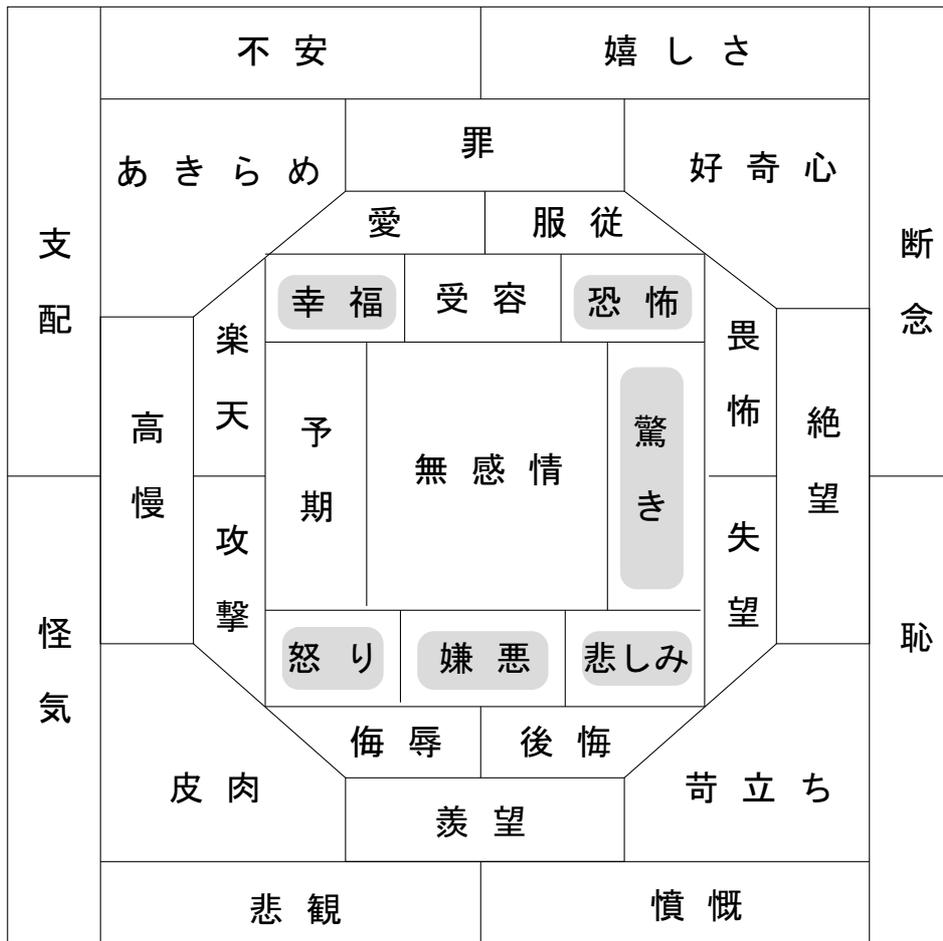


悲しみ」



驚き」

図1 基本6表情 [1]



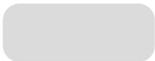
 基本感情

図2 基本感情を組み合わせる考えられる33種の感情

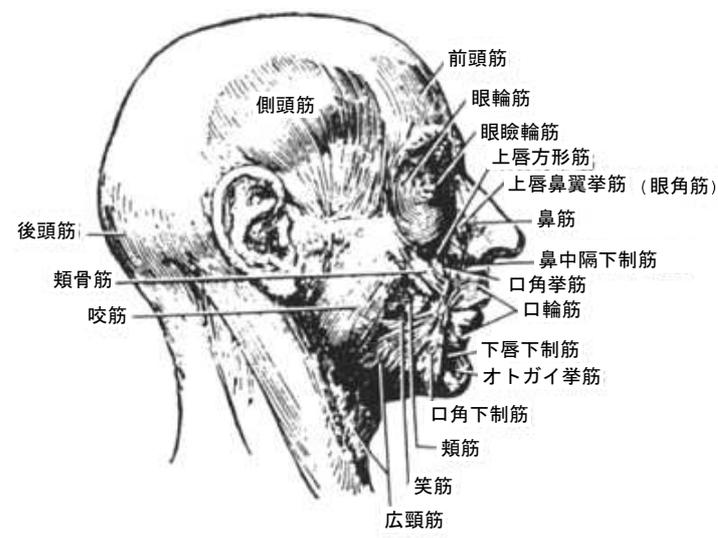
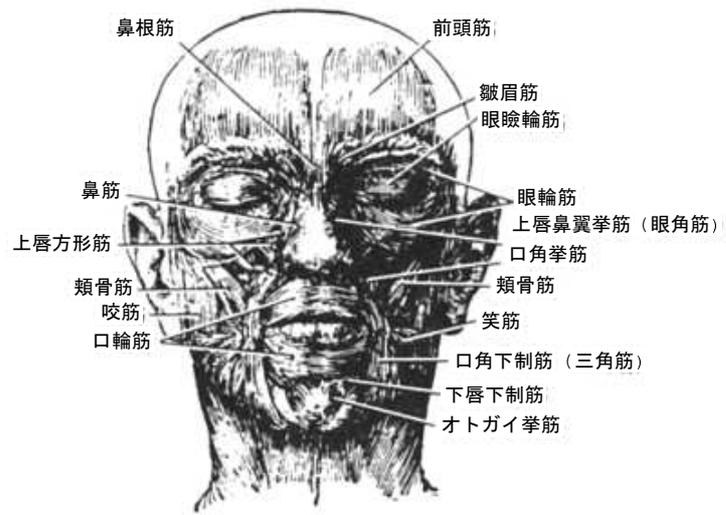


図 3 主な顔面表情筋 [2]

も、表情を形成する上で重要なものであることは言うまでもないが、その中でも特に口元周辺に位置する筋肉が非常に発達しており、これらの筋肉は表情の変化に大きな影響を与えらると思われる。これを反映してか、口元周辺の筋肉群の動きを表わす AU の数が多くなっている。顔面内における影響範囲別に表わした AU の番号とその動作を表 1~3 に示す。

これら 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。

表 1 顔の上部の AU [15]

AU	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
41	瞼を力なく下げる
42	薄目
43	瞼を閉じる
44	細目
45	まばたく
46	ウインクする

表 2 顔の下部の AU [15]

AU	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 頭と目の位置の AU [15]

AU	動作
51	左を向く
52	右を向く
53	頭を上げる
54	頭を下げる
55	頭を左へ傾ける
56	頭を右へ傾ける
57	頭を前へ出す
58	頭を後ろへ引く
61	左を見る
62	右を見る
63	上を見る
64	下を見る
65	斜視
66	内斜視

表 4 その他の AU [15]

AU	動作
8	唇どうしを接近させる
19	舌を見せる
21	首を緊張させる
29	下顎を突き出す
30	下顎を横へずらす
31	歯をくいしばる
32	唇を噛む
33	息を吹きかける
34	頬を息で膨らます
35	頬を吸い込む
36	舌で頬や唇を膨らます
37	舌で唇をなめる
38	鼻孔を開く
39	鼻孔を狭める

### 3. 頭部座標系を用いた顔面内特徴点のパラメータ表現

顔表情の合成においては、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、対象となる顔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、あるいは変形させる必要がある。そこで、顔造作の位置や表情筋の位置を示すいくつかの点を考え、これらを顔面内特徴点と呼び、その位置変化を基に表情変化を合成することが考えられる。表情合成を目的とする研究のほとんどにおいては、その出力結果の視覚的な不自然さを減少させるために、ワイヤースケルトンなどの3次元モデルが利用される [5, 7, 15, 17]。そしてその3次元モデルを、2章で述べた FACS に基づいて変形させることによって表情を与える。しかしながら、FACS においては顔面内特徴点の移動量については定量化が行なわれていないため、リアルな表情を合成するためには、試行錯誤によるところが大きい。FACS の AU について定量的に解析を試み、それを基に表情合成を試みているものもあるが [9]、本研究では FACS を用いずに、表情の変化に伴う顔面内特徴点位置の移動量について定量的に解析し、その解析結果をそのまま表情合成に利用することを目的としている。

本章では、まず従来の研究でよく用いられている頭部3次元モデルについて述べ、次に、本研究で利用している全周計測距離データについて説明する。そして、本研究で用いた頭部座標系と、その座標系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述べ、最後にその有効性を検証する。

#### 3.1 頭部3次元モデル

人間の顔をモデル化する場合、より自然な表情合成を実現するためにワイヤースケルトンによる3次元モデルが使われることが多い [5, 7, 15, 17]。この場合、三角パッチの数を増やすことで、より滑らかな曲面を表現することが可能となる。ワイヤースケルトンを用いた頭部3次元モデルの例を図4に示す [15]。これは人間の標準的な顔を、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。人間の顔において、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、個々の人間によって、造作の形状や位置関係が微妙に違っており、それが

個性となって現れる。従って、この3次元モデルを対象人物の顔造作などの特徴点や輪郭線に整合させて、それぞれの個人の特徴を反映させる作業が必要になる。また、この3次元モデルにおいては、顔造作などの各特徴点が、制御点と呼ばれる一部の格子点に対応付けされているので、FACSに基づいてこの制御点に変化を与え、後の格子点はそれに合わせて移動させることにより、表情合成を行なう。しかし、FACSにおいては顔面内特徴点の移動量については定量化されておらず、自然な表情を合成するには、試行錯誤による制御点の移動を必要とする。

そこで本研究では、このような3次元モデルやFACSを用いずに、頭部全周計測距離データを用いて表情を解析し、その解析結果に基づいて表情合成することを考えた。

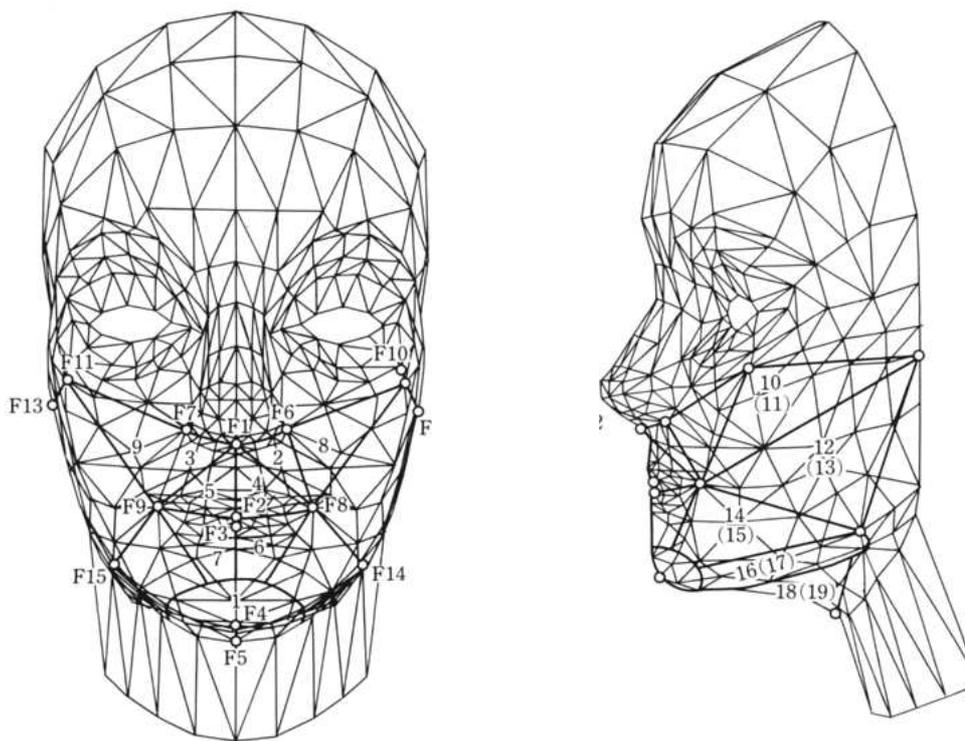


図4 ワイヤフレームによる頭部3次元モデル例 [15]

## 3.2 頭部全周計測距離データ

人間を含む動物は、その形状、質や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きた。

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 (Cyberwara3030RGB/I/PS) (図 5 参照) 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、回転軸から物体表面までの距離と表面カラーを同時に取得することができる。取得した距離データと表面カラーデータを組み合わせて、3 次元形状データとして表現することが可能である。(図 6, 7 参照)。

1 周 360 度に対して 512 回の鉛直方向の走査を行ない、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。計測時のレーザ光が目には直接触れても人体に悪影響がないという安全性はもちろん、その計測精度、計測時間 (約 30 秒)、使いやすさ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無い。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 8 に示す。

本システムによって得られる距離データと表面カラーデータは、円筒座標系で表現されており、以降、距離画像と表面カラー画像と呼ぶ。(図 9 参照)。画像サイズは共に  $512 \times 450$  である。円筒座標系とは、物体の中心軸を利用し、物体表面上の点の 3 次元位置を、その中心軸に対する角度成分 ( $0 \sim 2\pi$ ) と高さ成分の 2 次元のパラメータ空間として表現する座標系である (図 10 参照)。この円筒座標系で表現された画像上の点の移動は、角度方向と高さ方向に限定されることになる。しかしながら、距離画像の場合は、その画素値が中心軸から物体表面までの距離の値を表わしているため、物体の奥行き情報も、角度情報、高さ情報と同時に扱うことができ、3 次元情報を平面的に扱うことが可能になる。

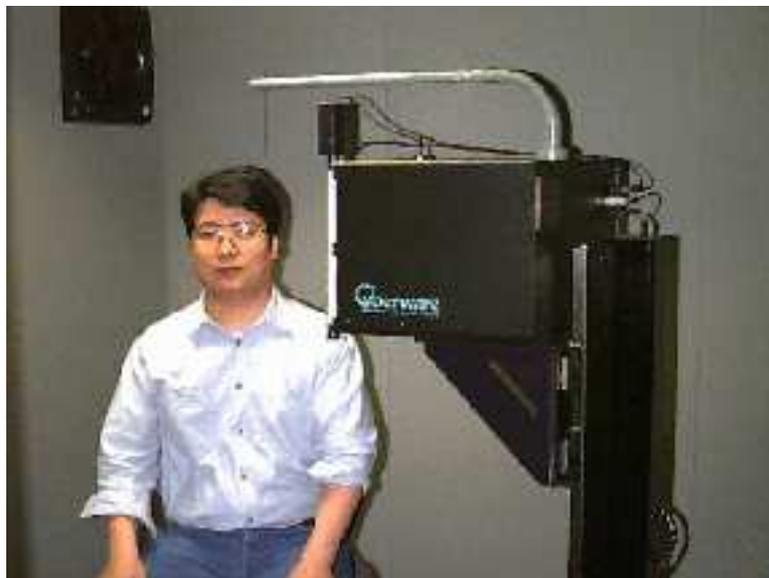


図 5 全周計測レンジファインダの外観



図 6 距離データのみを用いた 3 次元形状表現



図 7 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

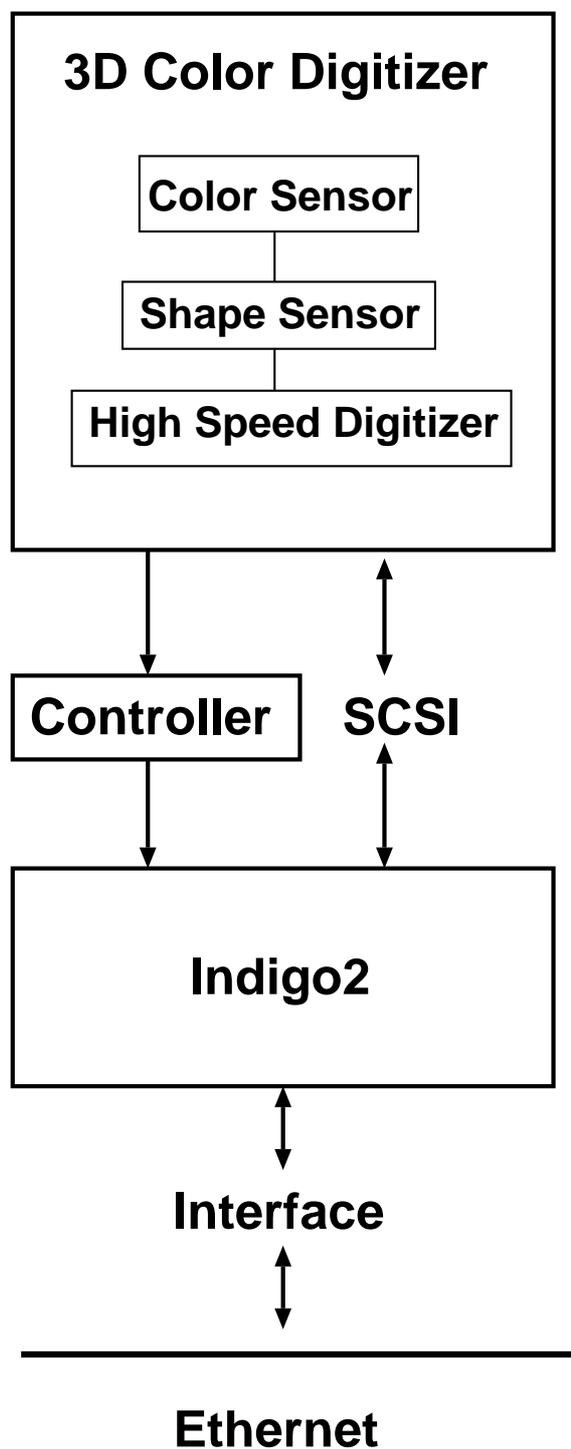
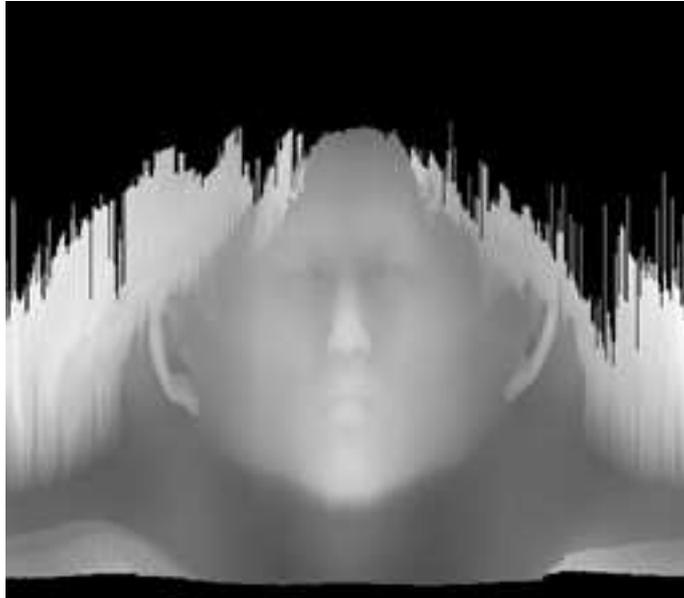


図 8 頭部 3 次元計測システムの構成



(a) 距離画像



(b) 表面カラー画像

図 9 円筒座標系表現された計測データ

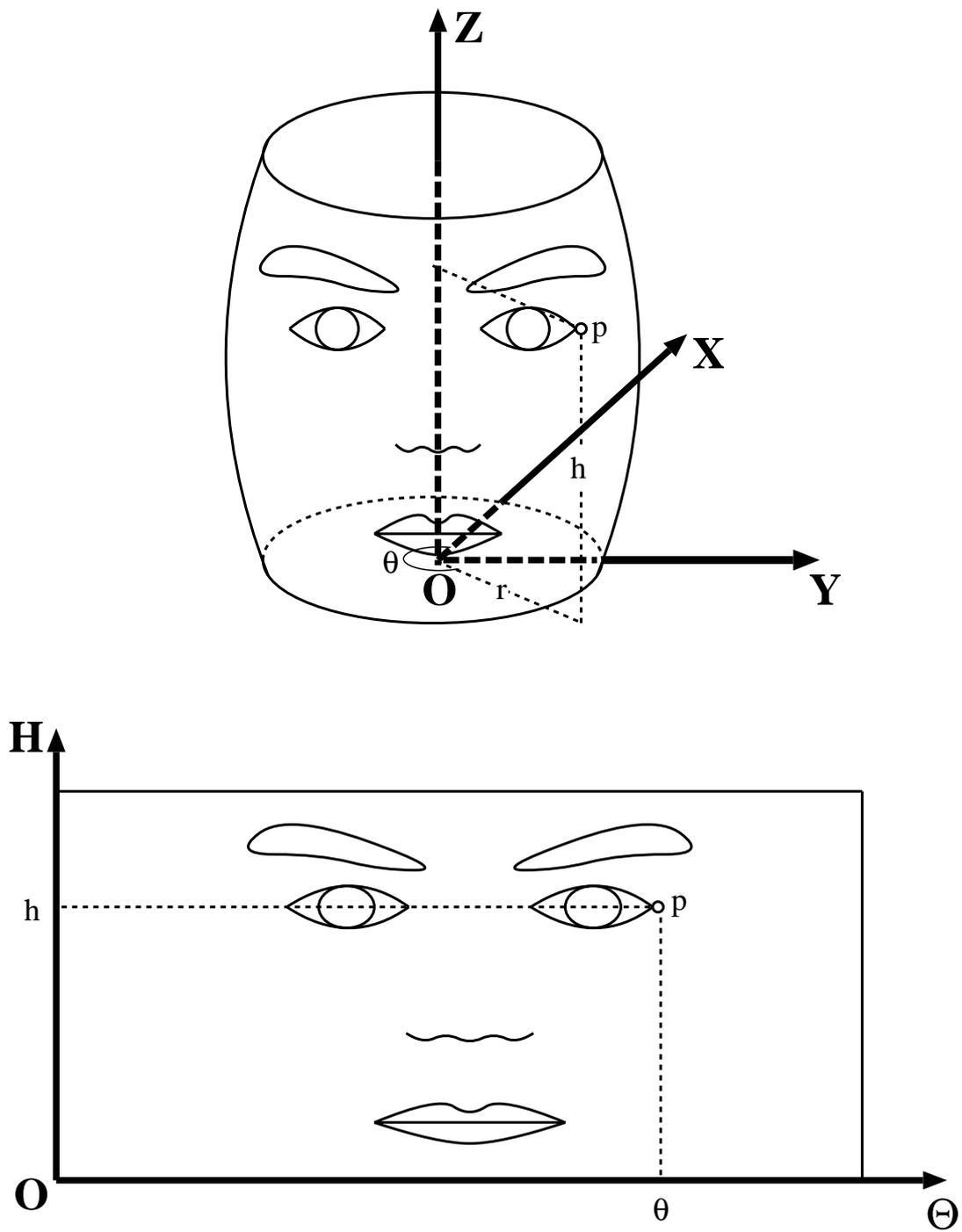


图 10 円筒座標系

### 3.3 顔面内特徴点のパラメータ表現

#### 3.3.1 顔面内特徴点位置計測

前節の装置を使って被験者の頭部を計測し、顔造作の位置や表情筋の位置を示す顔面内特徴点位置を得ることができる。図 11 は本研究で用いた顔面内特徴点の位置を示している。2 章で述べたように、人間の顔面表情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考慮し、唇上と、その周囲の表情筋上に 22 個の特徴点を配した。これらの点以外に、目、眉などの顔造作上とその周辺、そして頬の顔面表情筋上にも特徴点を配した。また、表情の変化に影響を受けない基準点として、鼻の穴の中間点、両目の目頭、両耳の穴の横の 5 点を配し、計 59 個の顔面内特徴点を定義した。実際の計測時には、被験者の顔面表情筋上の顔面内特徴点に目印となるマーカ (直径 5mm のシール) を張り付けて計測を行なった。図 12 に計測データの例を示す。今回、マーカの位置の抽出はマウスによる手作業で行なっている。

#### 3.3.2 頭部座標系と顔面内特徴点のパラメータ表現

今回のような人間の頭部の 3 次元計測においての問題点として挙げられるのは、計測時の被験者の位置や姿勢の変化による特徴点位置のずれである。すなわち、計測されたデータをそのまま用い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顔面内特徴点の動きとして扱われてしまうことになる。そこでこの問題を解決するために、頭部に 1 次独立な 3 本の 3 次元ベクトルからなる物体中心座標系を設定する [7, 9, 24, 25, 26, 27, 28]。3 本のベクトルを得るために、図 11 に示した特徴点の内、表情の変化に影響を受けない 5 つの特徴点 (鼻の穴の中間点  $N$ , 左右の目頭  $M_l, M_r$ , 左右の耳の穴の横  $E_l, E_r$ ) を利用する。左右の目頭の間接点を  $M$  とし、以下の様に 3 つの基準ベクトルを定義する (図 13 参照)。

$$\begin{aligned}\vec{A} &= \overrightarrow{NM} \\ \vec{B} &= \overrightarrow{NE_r} \\ \vec{C} &= \overrightarrow{NE_l}\end{aligned}\tag{1}$$

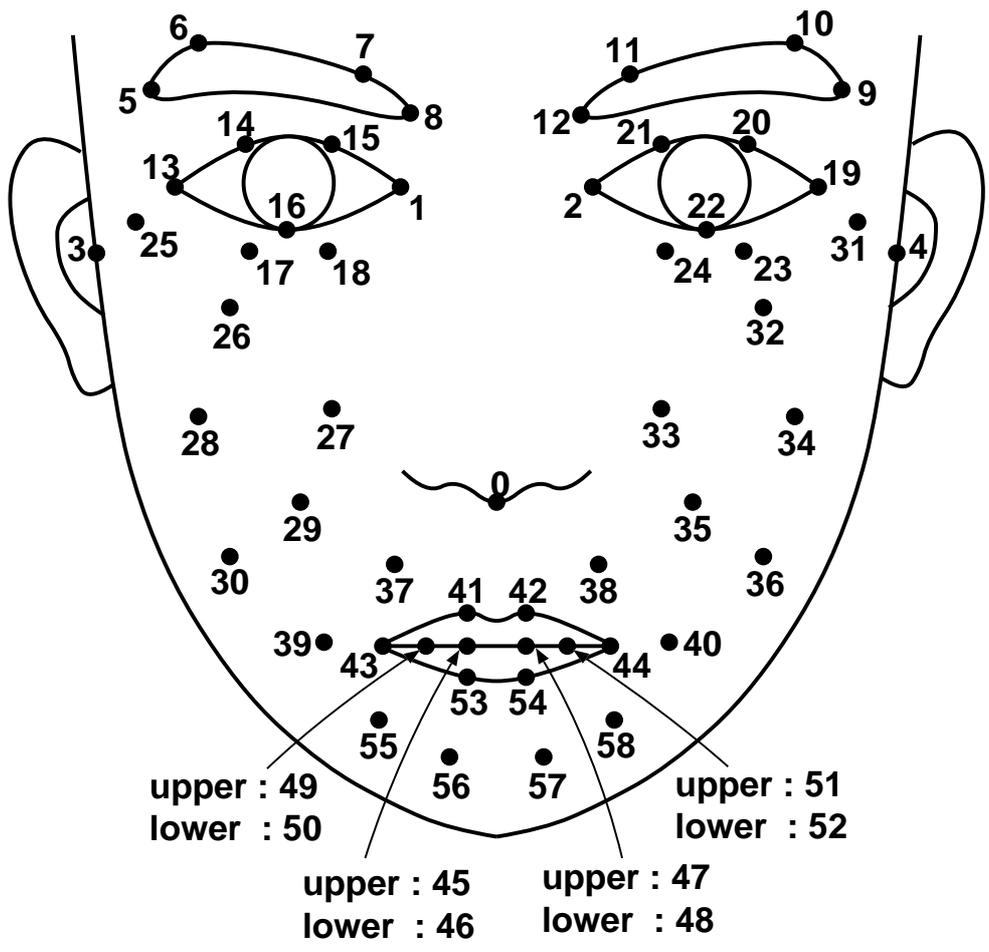


图 11 顔面内特徴点位置



(a) 距離画像



(b) 表面カラー画像

図 12 計測データ例

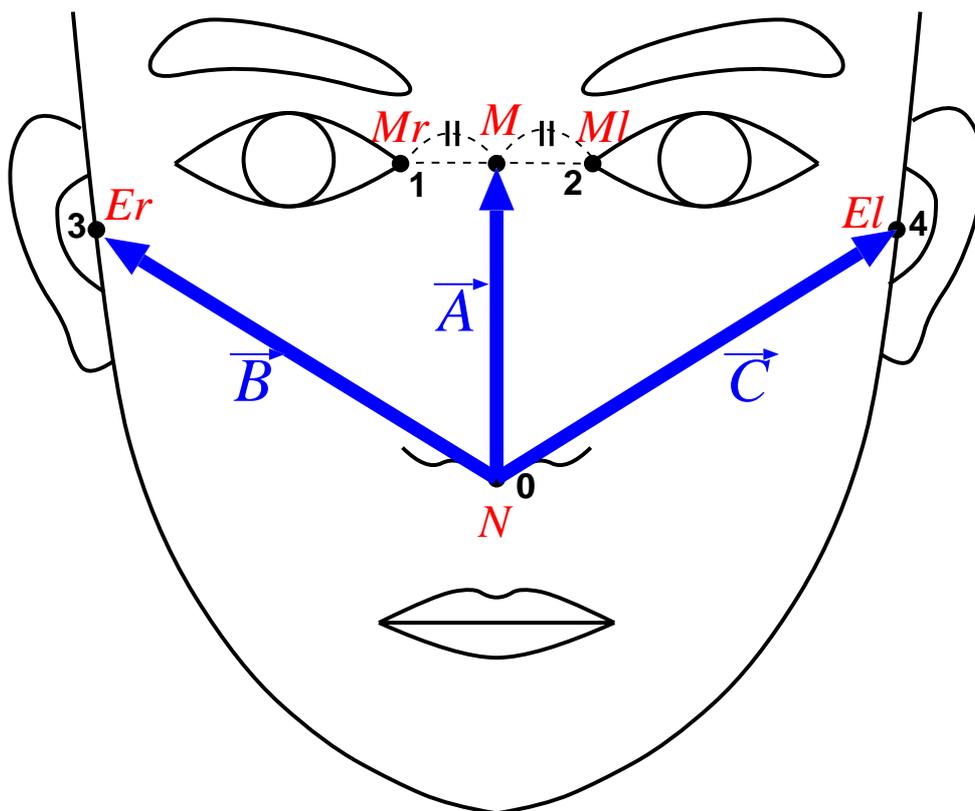


図 13 頭部物体中心座標系の基準ベクトル

各顔面内特徴点  $P_i$  について、 $\vec{P}_i = \overrightarrow{NP_i}$  として、これを 3 つの基準ベクトル  $\vec{A}, \vec{B}, \vec{C}$  の加重線形和で表現する。

$$\vec{P}_i = a_i \vec{A} + b_i \vec{B} + c_i \vec{C} \quad (2)$$

3 つのパラメータ  $a_i, b_i, c_i$  によって、計測時の被験者の位置や姿勢に影響を受けない安定した特徴点位置  $P_i$  の表現を得ることが可能となる。また、この頭部座標系によって頭部の大きさの個人差も吸収できる。

### 3.4 予備実験

前節で述べた顔面内特徴点のパラメータ表現の有効性を確認するために以下に示す 2 つの予備実験を行なった。まず、ある人物の無表情時の顔を、姿勢と位置を変えて 3 回計測した。図 14 のグラフは 3 回の計測によって得られた各特徴点のパラメータ  $a, b, c$  の値を示している。縦軸がパラメータ値、横軸が特徴点番号を表わしている。姿勢と位置を変えて行なった 3 回の計測において、各特徴点のパラメータ値はほとんど一定の値をとっており、頭部座標系が特徴点の安定した表現に有効であることがわかる。

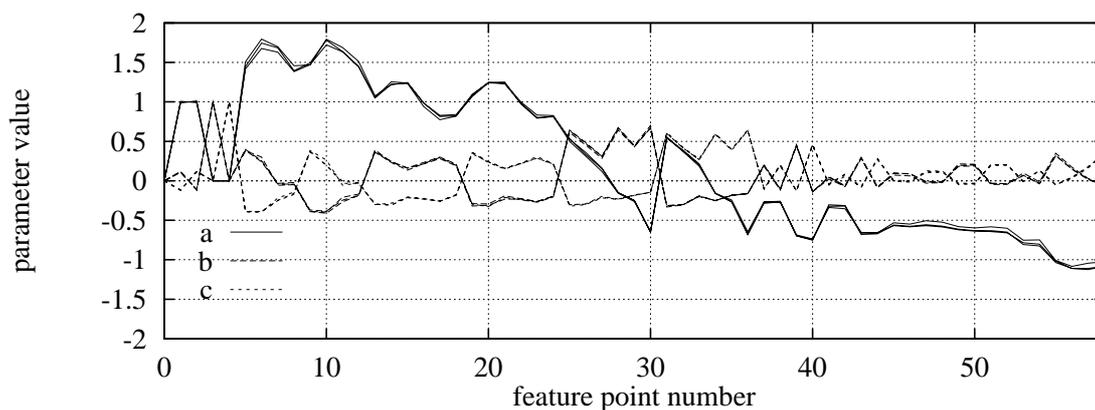


図 14 無表情時の 3 回の計測におけるパラメータ値

次に、9名の被験者の無表情時の顔を、それぞれ3回ずつ計測した。これら9名の被験者は全員同じ研究室に所属する20歳代の男性である。図15は、計測から得られたパラメータごとのグラフである。先程と同じく、横軸が特徴点番号で縦軸がパラメータ値を表わしている。図中の各線は、被験者それぞれの3回の計測の平均値を表わしている。パラメータ  $a$  の値には若干のばらつきがあるものの、 $b, c$  に関してはほぼ同じ値をとっていることがわかる。すなわち、たとえ見た目の顔面内特徴点位置に明らかな個人差があっても、個々の基準ベクトルによって正規化された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がないことがわかる。以上から、頭部座標系は、骨格の違いなどによる見た目の顔面内特徴点位置の個人差を吸収することが可能であり、このパラメータを利用した顔表情解析は十分有効であると考えられる。

次章ではこのパラメータ値を用いて、基本6表情について解析を行ない、その結果に基づいて表情合成を行なう。また、ここで得られた各特徴点のパラメータ  $a, b, c$  について、9名の平均をとったものを、無表情時の標準的な顔面内特徴点位置を表わす標準パラメータ量として扱い、表情合成の際に利用する。

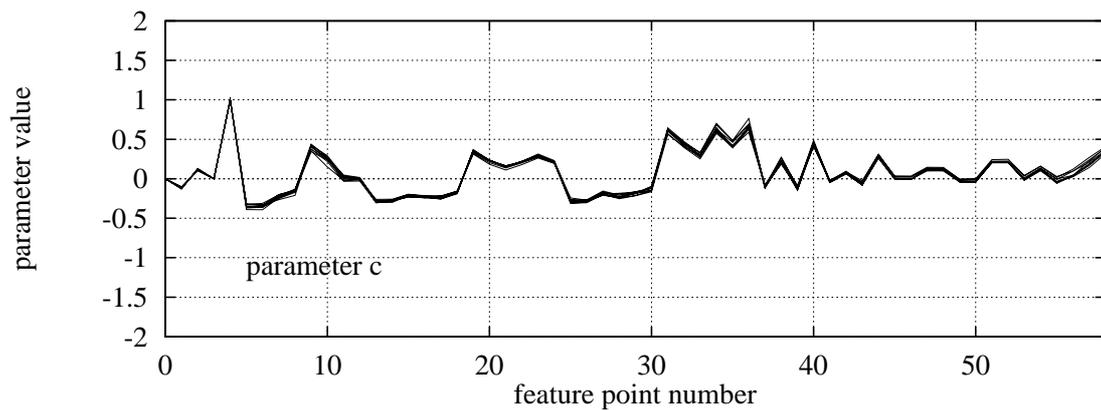
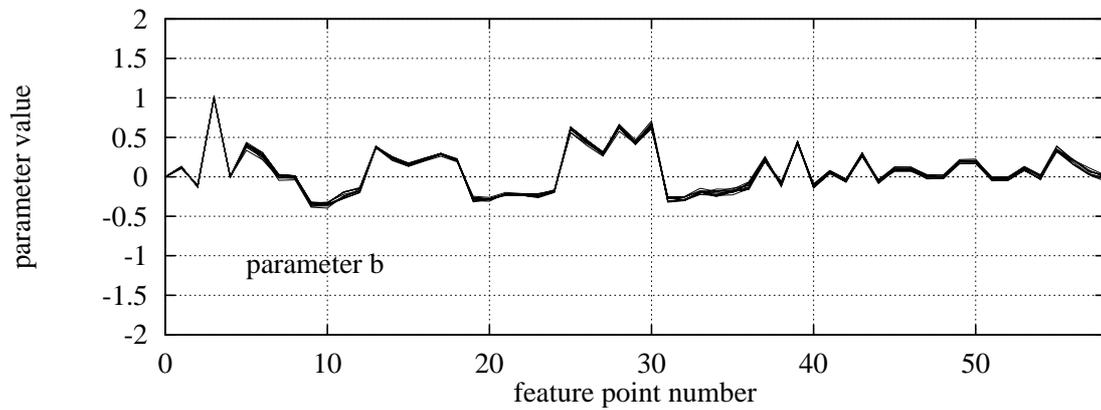
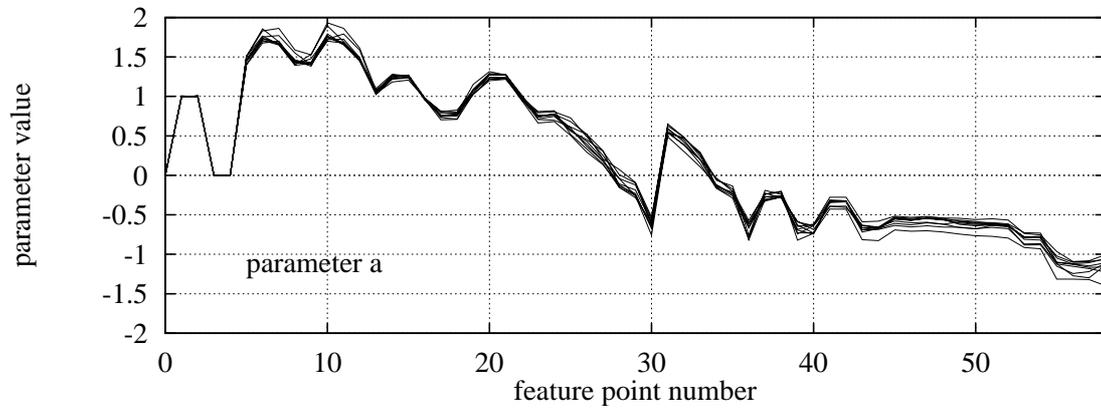


図 15 9 名の被験者の無表情時のパラメータ値

## 4. 基本 6 表情の定量的解析と解析結果に基づく合成

前述したように、従来の表情合成の研究は FACS に基づいており、表情変化を起こす運動単位である AU を用いて表情合成を行なっている。しかし、FACS の AU は顔のある部分のある運動を定義しているだけで、その移動量は定量化されていないので、自然な表情合成のためには試行錯誤を要する。

本章では、基本 6 表情の定量的な解析を行ない、その解析結果を直接利用することにより 3 次元顔表情画像を合成する手法を提案する。まず、3 章で述べた顔面内特徴点位置のパラメータ表現方法を用いて、基本 6 表情表出時の顔面内特徴点の移動量について定量的に解析する。そして、解析結果を利用し、また口が開くという不連続性にも対応した画像ワーピング手法を無表情顔画像に適用することにより、3 次元顔表情画像を合成する。

### 4.1 基本 6 表情の定量的解析

3 章で述べた顔面内特徴点のパラメータ表現手法を用いることにより、表情変化に伴う顔面内特徴点位置の移動は、各顔面特徴点における 3 つのパラメータ  $a, b, c$  の変化量となって表われる。そこで、この変化量を用いて基本 6 表情の定量的解析を試みる。

3.4 節の予備実験と同じ 9 名の被験者による計測を行なった。9 名の被験者は全員 20 歳代の男子学生であり、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。各被験者に 3 回ずつ各基本 6 表情をつくってもらい、無表情時と同様に計測した。図 16、図 17 は計測により得られた画像例である。図 18~23 のグラフは、基本 6 表情表出による各特徴点におけるパラメータ  $a, b, c$  の無表情時からの変化量を表わしている。横軸が特徴点番号、縦軸がパラメータの変化量を表わしている。図中の各線は、9 名の被験者それぞれの 3 回の計測における変化量の平均値を表わしている。各パラメータ値の変化量は、顔面内特徴点の運動方向と強さによって異なり、またそれは表情の差となって表われる。頭部座標系において、 $\vec{A}$  はほぼ鉛直に設定されているので、特徴点の鉛直方向の移動がパラメータ  $a$  の変化に表われやすくなっている。同様に、パラメータ  $b, c$  の値は特徴

点の (顔の正面から見て) 横方向と奥行き方向の移動の影響を受けやすくなっている。たとえば、顎や、口の下側の部分、眉における特徴点の上下方向の移動がパラメータ  $a$  の値の増減となって表われる。また、パラメータ  $b, c$  に関しては、口を横に引くと言った横方向の移動や、頬の膨らみなどの奥行き方向の移動の影響を受けると考えられる。各図を見てみると、個人間でばらつきはあるものの、全体として見ると各表情ごとに固有の変化があることがわかる。そこで、ここでは単純に各パラメータにつき 9 名の平均をとり、その結果を図 24~26 に示す。以下、簡単に各表情ごとに見ていく。

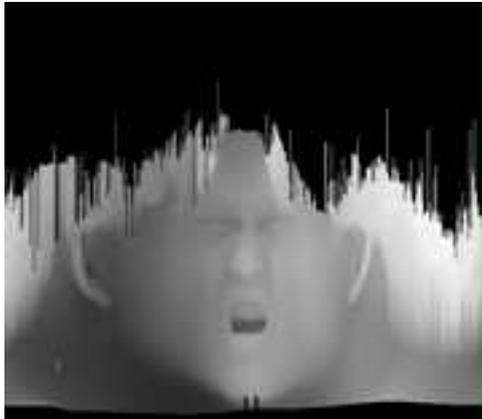
まず図 24 の「怒り」と「嫌悪」に関しては、顔の上部 (眉、目、頬) において非常に似た変化が生じている。これは実際の「怒り」と「嫌悪」の表情が顔の上半分において非常に似かよっていることを反映している。口元、顎においては、「怒り」が口を大きく下側に開くことによるパラメータ  $a$  の減少が見られるのに対し、「嫌悪」では口をつむんで引きあげるという動作の影響がパラメータ  $a$  の増加になって表われている。

次に、図 25 の「恐怖」と「驚き」では眉が上がることによるパラメータ  $a$  の増加が同様に見られる。口の部分でも似た変化が見られるが、「驚き」ではぼかんと口を開くことによる口の下部でのパラメータ  $a$  の減少が大きいのに対し、「恐怖」では口を横に開くということが口の両端 (43, 44) のパラメータ  $b, c$  の変化に出ている。また「恐怖」では頬のひきつりによるパラメータ  $a$  の増加も見られる。

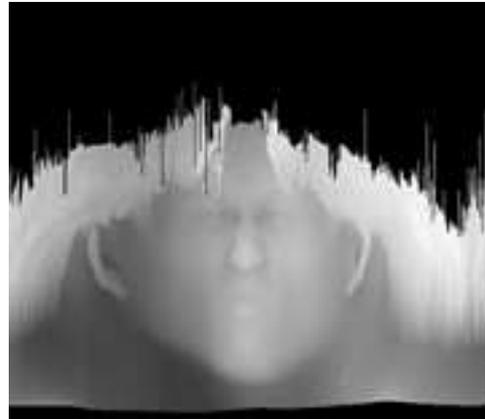
最後に、図 26 の「喜び」と「悲しみ」も、明らかに他の表情と異なっている。「喜び」に関しては、「恐怖」と同様に口を横に開くが、「恐怖」と比較して口の上側でもパラメータ  $a$  の変化が見られる。また頬の持ち上げによるパラメータ  $a$  の増加も明らかに他の表情と異なっている。「悲しみ」に関しては、眉が下がることと、頬と顎が少し上がることで、それぞれパラメータ  $a$  の減少と増加に反映されている。

この様にして得られた 9 人の各特徴点のパラメータ  $a, b, c$  の変化量の平均を、基本 6 表情表出時の顔面内特徴点位置の標準の変化量を表わす標準パラメータ変化量として扱い、4.2 節の表情合成に利用する。

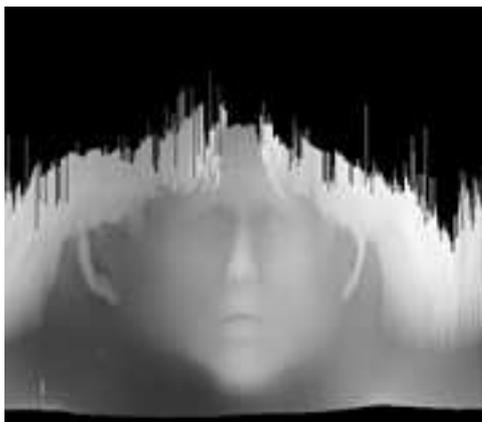
怒り」



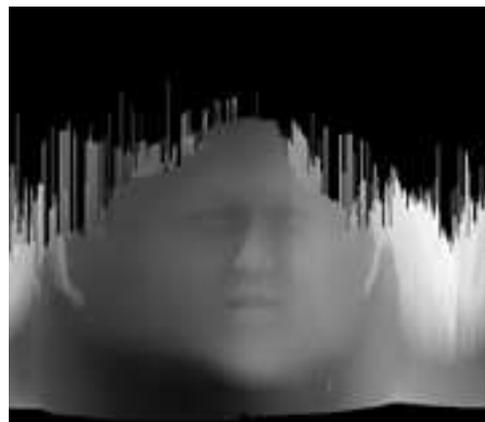
嫌悪」



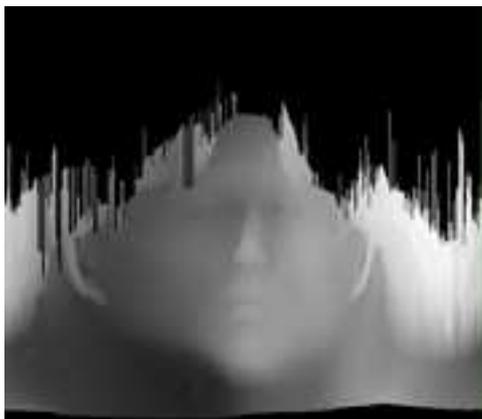
恐怖」



喜び」



悲しみ」



驚き」

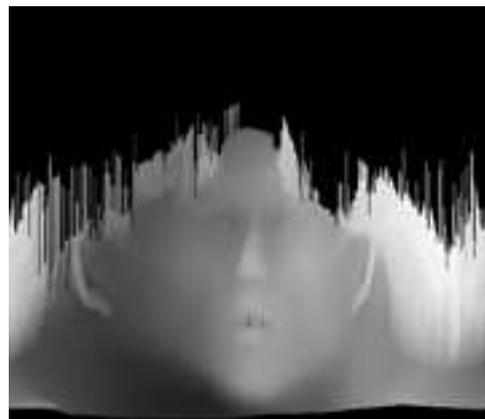


図 16 円筒座標系で表現された基本 6 表情の距離画像例

怒り」



嫌悪」



恐怖」



喜び」



悲しみ」



驚き」



図 17 円筒座標系で表現された基本 6 表情の表面カラー画像例

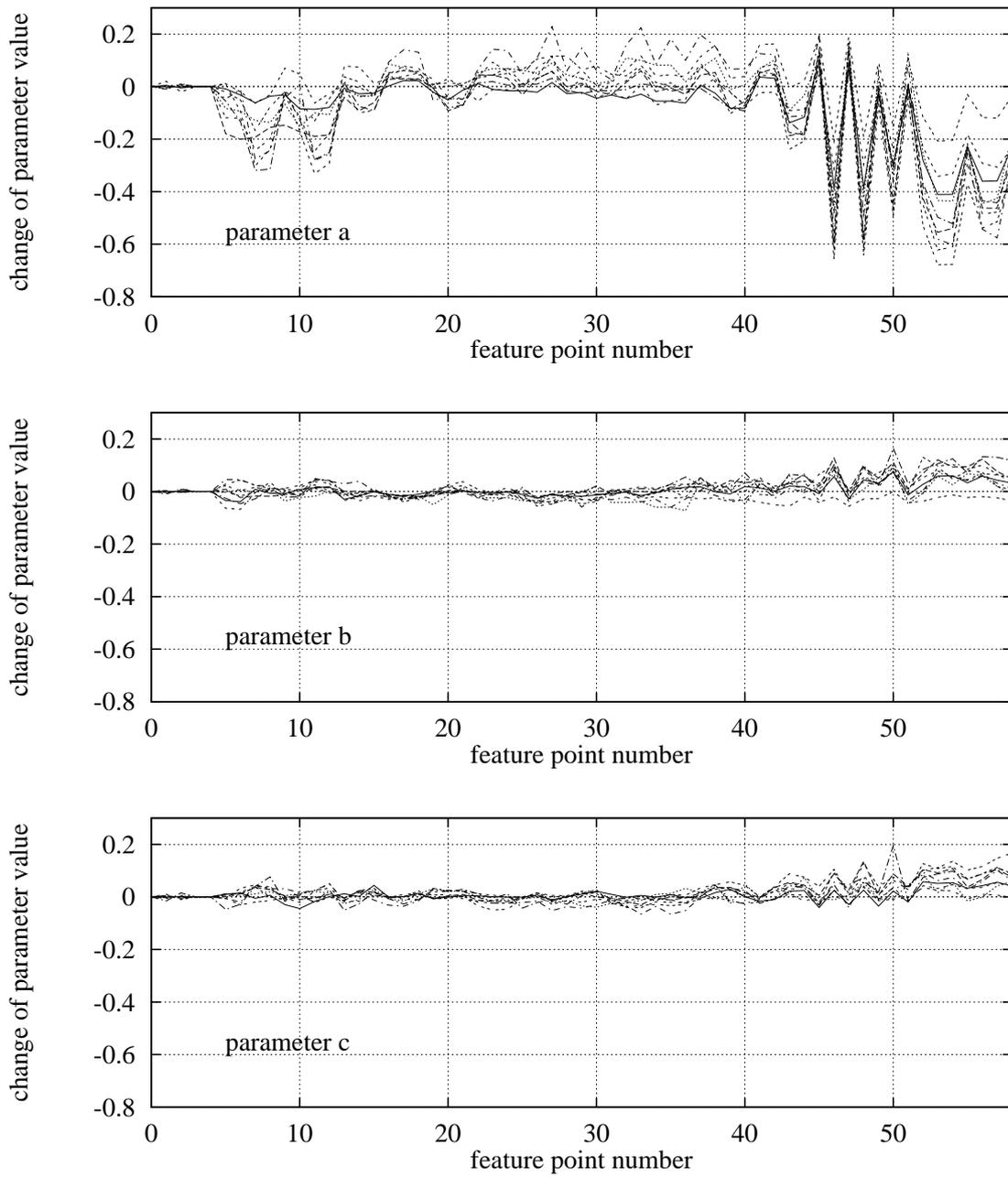


図 18 「怒り」の表情時の無表情時からのパラメータ変化量

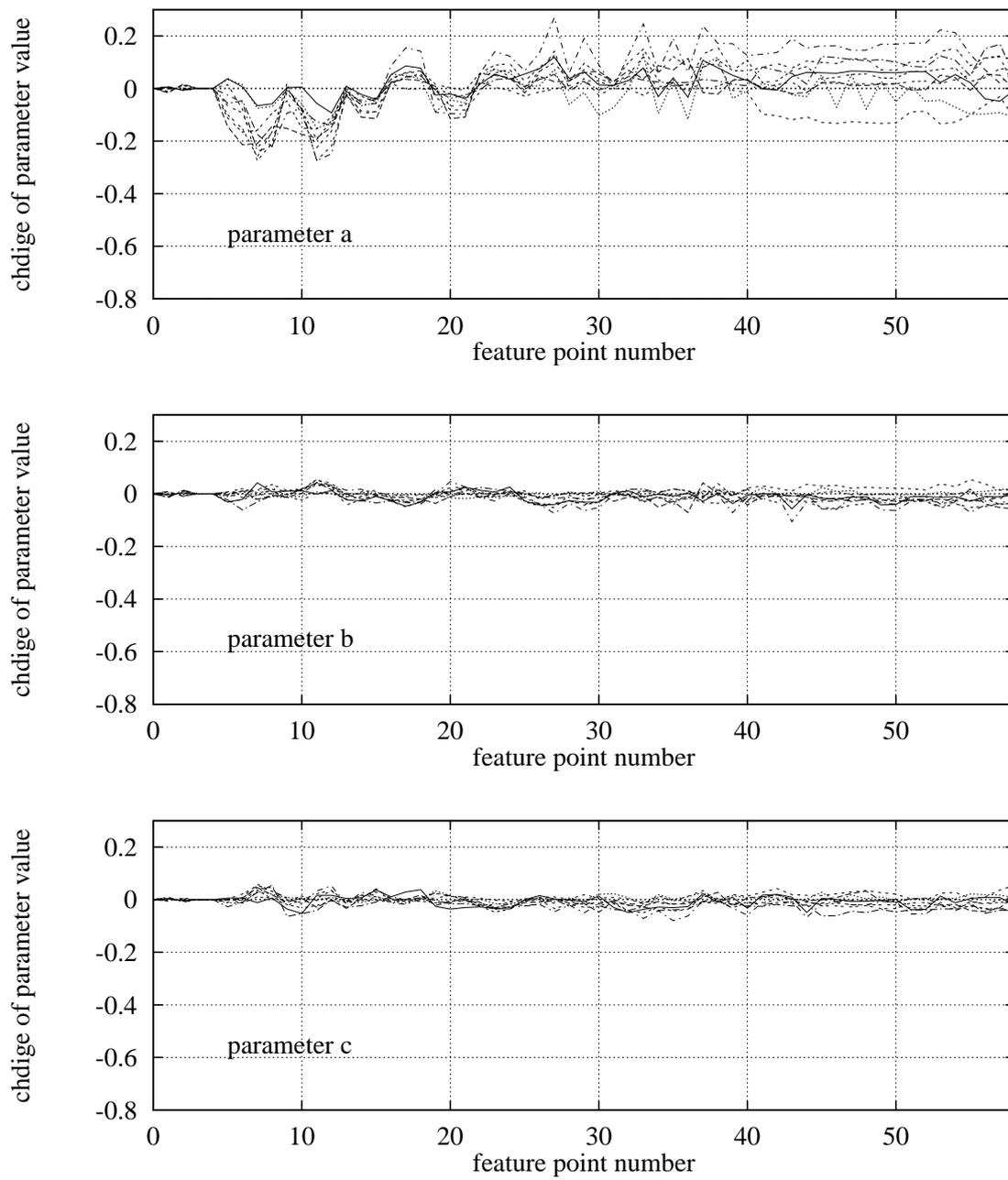


図 19 「嫌悪」の表情時の無表情時からのパラメータ変化量

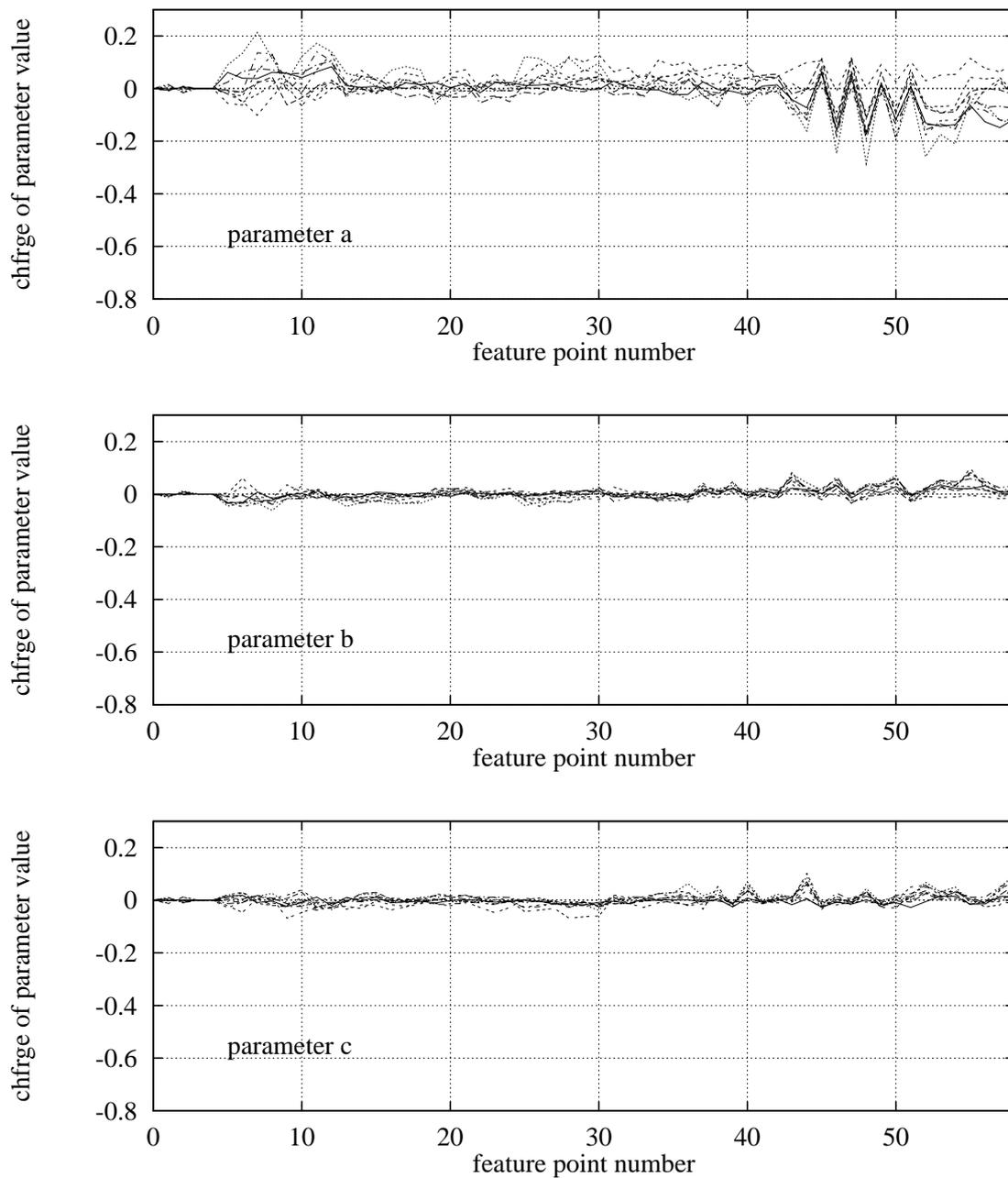


図 20 「恐怖」の表情時の無表情時からのパラメータ変化量

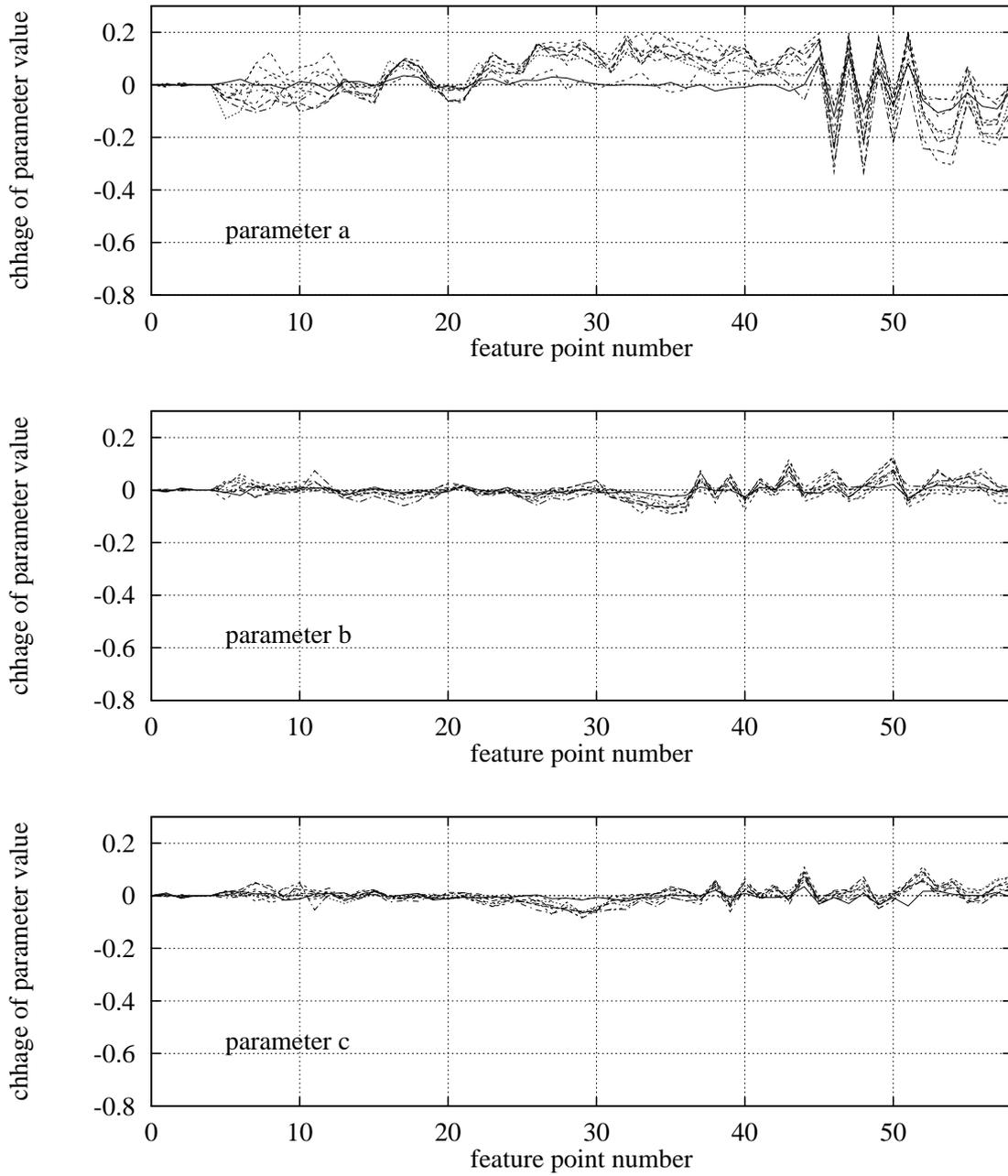


図 21 「喜び」の表情時の無表情時からのパラメータ変化量

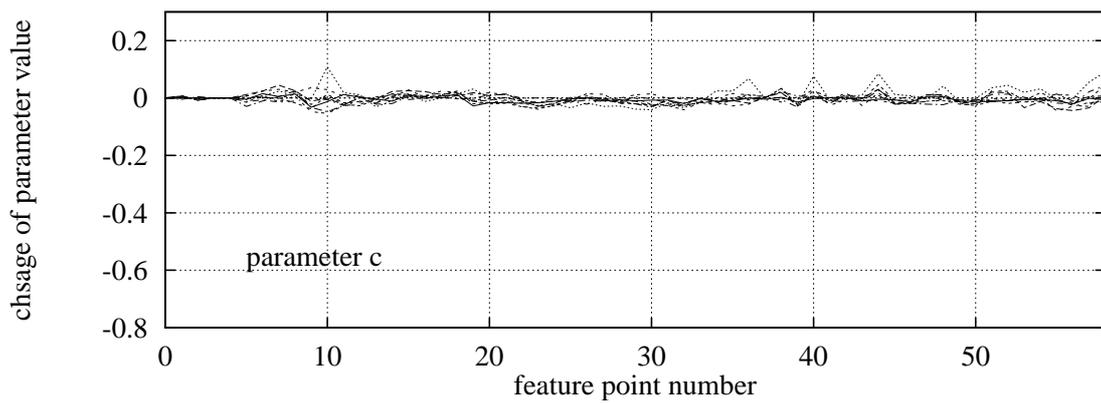
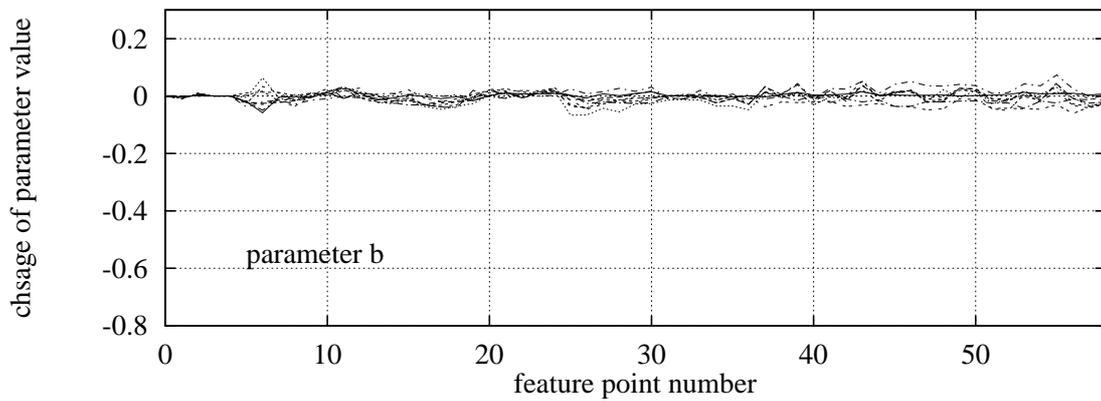
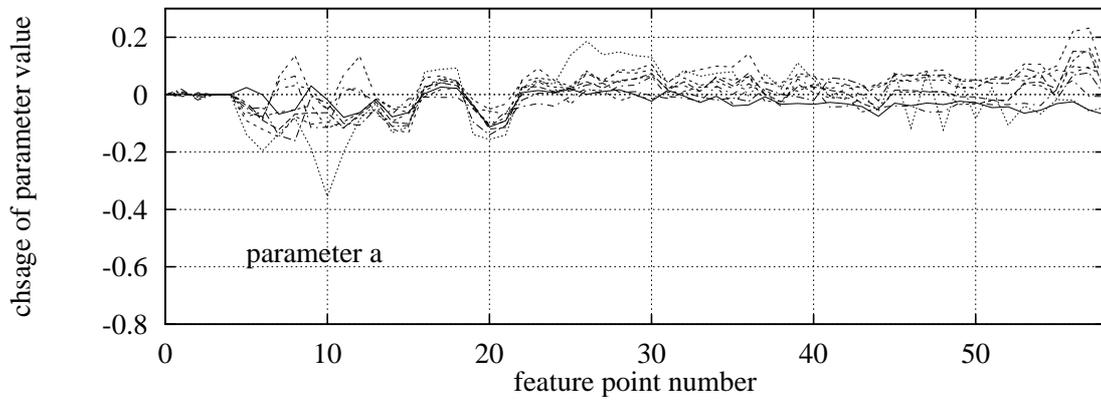


図 22 「悲しみ」の表情時の無表情時からのパラメータ変化量

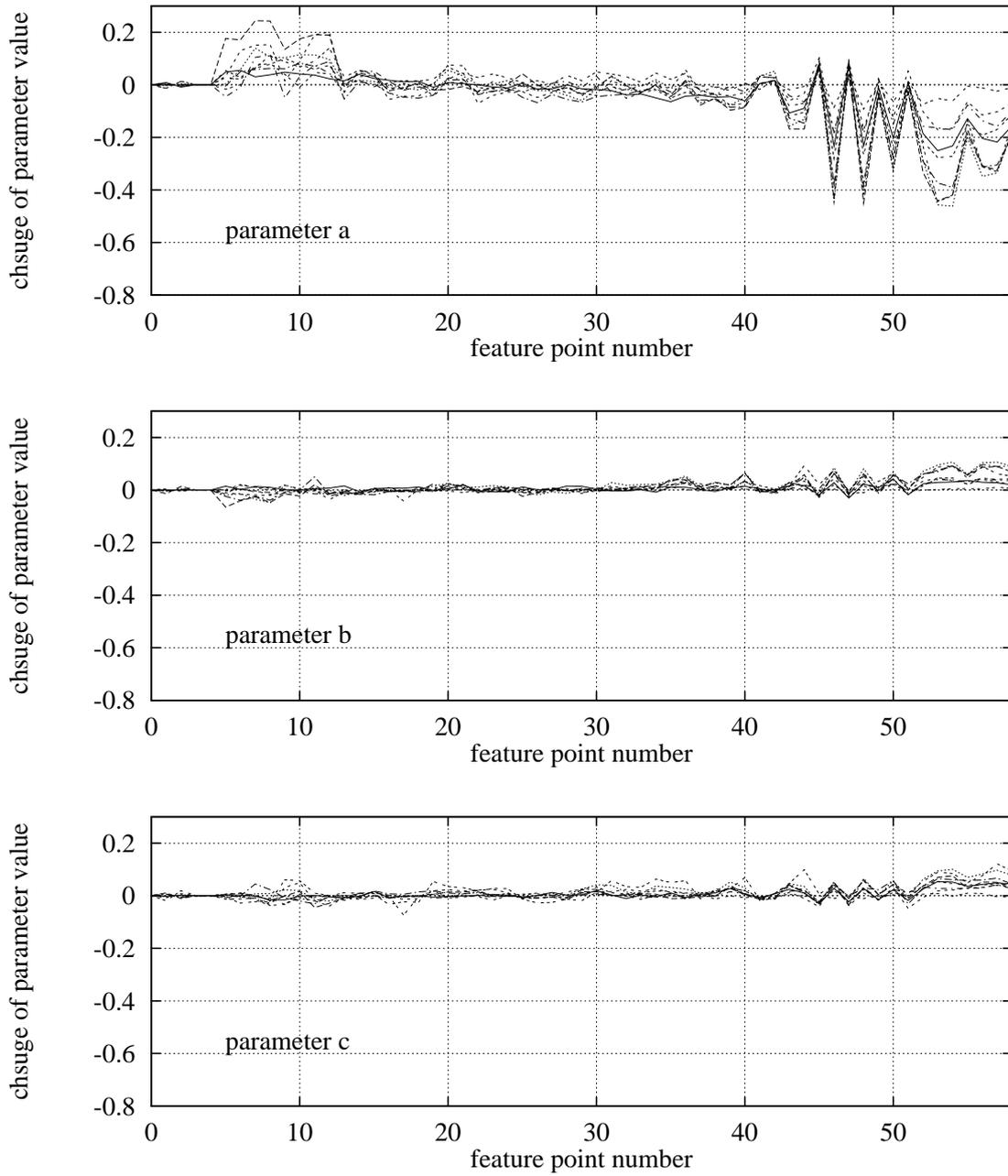
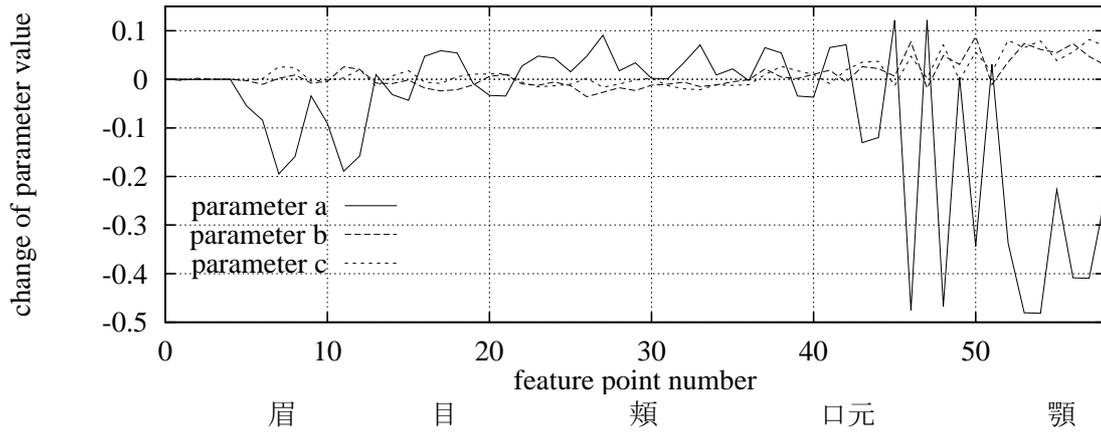


図 23 「驚き」の表情時の無表情時からのパラメータ変化量

怒り」



嫌悪」

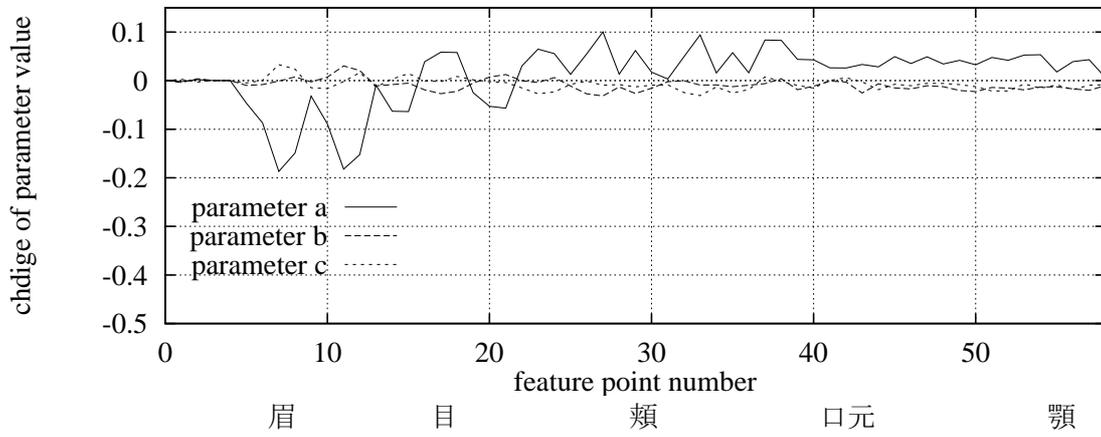
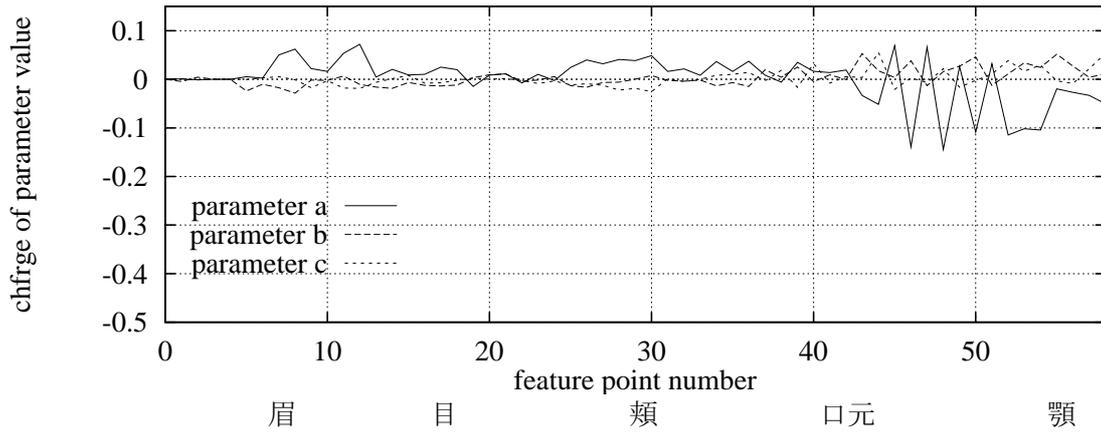


図 24 「怒り」、 「嫌悪」 の表情時の平均パラメータ変化量

「恐怖」



「驚き」

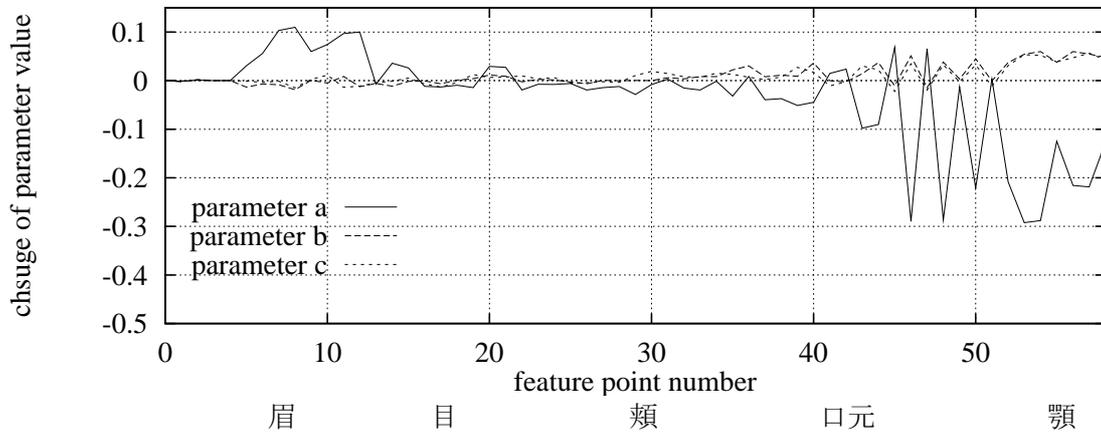
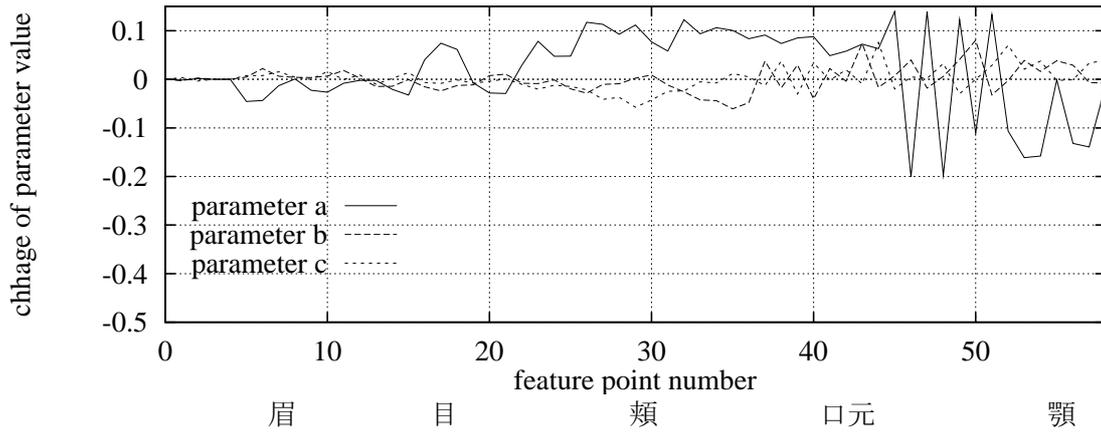


図 25 「恐怖」、 「驚き」 の表情時の平均パラメータ変化量

喜び」



悲しみ」

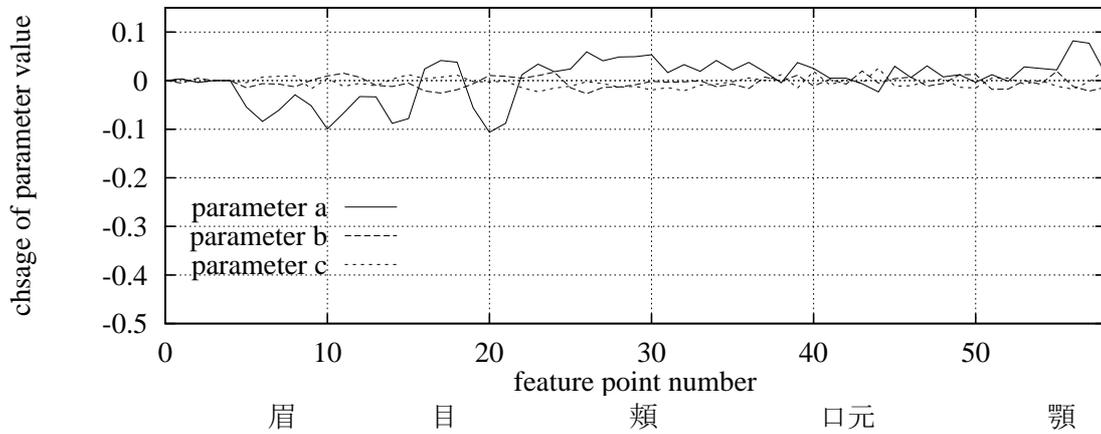


図 26 「喜び」、 「悲しみ」 の表情時の平均パラメータ変化量

## 4.2 解析結果に基づく基本 6 表情の合成

本節では、まず、口が開くといった不連続性にも対応した画像ワーピング手法を提案する。そして、3.4 節で得られた無表情時の標準パラメータ量と、4.1 節で得られた基本 6 表情表出時の標準パラメータ変化量を利用し、無表情顔画像を画像変形させて 3 次元顔表情画像を合成する。

### 4.2.1 動径的基底関数に基づく画像変形

ワーピングは画像を任意の形状に変化させる画像変形の一手法である [3, 23]。デジタル画像ワーピング技術は、近年広範囲のアプリケーションにおいて利用されている。本研究で用いた画像変形手法は、変形前の原画像と、原画像上の複数の点、そしてそれらの点に対応する目的画像上の複数の点を利用して、目的画像上の他の点の補間を行なうこと基本としている。以下、簡単にその手法について説明する。

まず以下の様な関数  $\mathbf{f}$  を考える。

$$\mathbf{f}(\mathbf{p}_i) = \mathbf{q}_i, \quad i = 1, \dots, n, \quad (3)$$

ここで、 $(\mathbf{p}_i, \mathbf{q}_i)$  は原画像と目的画像において一致する 1 組の特徴点である。この式 (3) を満たすような  $\mathbf{f}$  を求め、その  $\mathbf{f}$  に原画像上の全点を代入して、各点の移動後の目的画像上での位置を得ることができる。この関数  $\mathbf{f}$  としては、様々な関数が考えられているが、本稿においては動径的基底関数 (Radial Basis Functions) を用いた手法 [21, 22] を採用することにした。この手法においては、補間関数  $\mathbf{f}$  は以下のような線形結合の式で定義されている。

$$\mathbf{f}(\mathbf{p}) = \sum_{i=1}^n \alpha_i f_i(d(\mathbf{p}, \mathbf{p}_i)) + p_m(\mathbf{p}), \quad (4)$$

$\mathbf{p}$  は原画像上の点を意味し、 $d(\mathbf{p}, \mathbf{p}_i)$  は  $\mathbf{p}$  と  $\mathbf{p}_i$  の距離を表わす。すなわち、関数  $f_i$  は特徴点  $\mathbf{p}_i$  からの距離のみに依存する。 $\alpha_i$  は係数ベクトルであり、式 (3) を満たすように、 $(\mathbf{p}_i, \mathbf{q}_i)$ ,  $(i = 1, \dots, n)$  を式 (4) に代入して解くことにより求まる。また、 $p_m(\mathbf{p})$  は  $m$  次の多項式である。

関数  $f_i$  として様々なものが提案されているが、本研究においては以下の関数を使用している [22]。

$$f_i(d(\mathbf{p}, \mathbf{p}_i)) = \{(d(\mathbf{p}, \mathbf{p}_i))^2 + r_i^2\}^\mu, \quad (5)$$

$$r_i = \min_{i \neq j} d(\mathbf{p}_i, \mathbf{p}_j). \quad (6)$$

ここで、 $\mu = -1$  とし、また  $p_m(\mathbf{p})$  として1次の多項式を考え、 $p_m(\mathbf{p}) = \mathbf{p}$  としている [22]。

#### 4.2.2 不連続部を含む画像変形への対応

従来の画像ワーピング手法で問題となるのは、画像内に図 27 に示すような不連続部分がある場合である。図において、 $\mathbf{p}_1$  と  $\mathbf{p}_2$  は前項で述べた画像変形に用いられる原画像上の特徴点で、それぞれ目的画像上の  $\mathbf{q}_1$  と  $\mathbf{q}_2$  に移動するものとする。今、点  $\mathbf{p}$  を点  $\mathbf{q}$  に移動させたい場合に、前項で述べた関数をそのまま適用すると、点  $\mathbf{p}$  は特徴点  $\mathbf{p}_1$  と  $\mathbf{p}_2$  からほぼ等距離にあるので、両方から同程度の影響を受けて、 $\mathbf{q}'$  に移動してしまう。そこで、この問題を解決するために、式 (4) に、原画像上と目的画像上において対応する特徴点の組  $(\mathbf{p}_i, \mathbf{q}_i)$  を代入して係数ベクトルである  $\alpha_i$  を求める際に、以下のことを考える。原画像上の2つの特徴点  $\mathbf{p}_m$  と  $\mathbf{p}_n$  が不連続部を間に狭む位置にある場合、 $(\mathbf{p}_m, \mathbf{q}_m)$  を式 (4) に

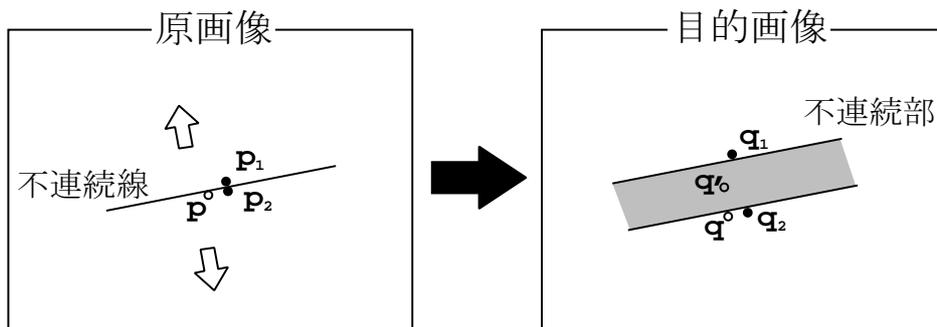


図 27 不連続部を含む画像変形

代入したときに、点  $\mathbf{p}_n$  の関数  $f_n$  にかかる係数  $\alpha_n$  を意図的に 0 にする。逆に、 $(\mathbf{p}_n, \mathbf{q}_n)$  を代入するときには、 $\alpha_m$  を 0 にする。これを全特徴点に対して行ない、連立方程式を解いて補間関数  $\mathbf{f}$  を求める。こうして求めた  $\mathbf{f}$  では、各特徴点は不連続部を狭んで位置する他の特徴点の影響は受けなくなっている。そして、原画像上の点  $\mathbf{p}$  を  $\mathbf{f}$  に代入して目的画像上の位置を得る際に、各特徴点  $\mathbf{p}_i$  との間には不連続部がないかどうかを調べ、もし不連続部がある場合は  $\alpha_i$  を 0 とし  $\mathbf{f}(\mathbf{p})$  を求める。

### 4.2.3 3次元顔表情画像の合成

無表情時の距離画像と表面カラー画像、および3.4節で得られた無表情時の標準パラメータ量と、4.1節で得られた各基本6表情についての標準パラメータ変化量から、前述の画像変形手法を用いて3次元の顔表情画像を生成する。

距離画像を用いて3次元ワーピングを行うためには、4.2.1項における  $\mathbf{p}$  を  $(p_x, p_y, v)$  とする。ここで、 $p_x$  と  $p_y$  は距離画像における画素位置を示し、 $v$  は画素値を意味する。また、「怒り」、「驚き」、「恐怖」、「喜び」の表情において、口が開くことに対応し、以下の図28に示す特徴点43～52に囲まれる口の中の部分を、前項で述べた不連続部として関数  $\mathbf{f}$  を求める。そして  $\mathbf{f}$  により、原距離画像上の各画素の目的距離画像上での位置と画素値を求める。表面カラー画像に関しては、距離画像ワーピングに利用した関数  $\mathbf{f}$  を適用し、表面カラー原画像の各画素を画素値はそのままで目的画像上のしかるべき位置に移す。

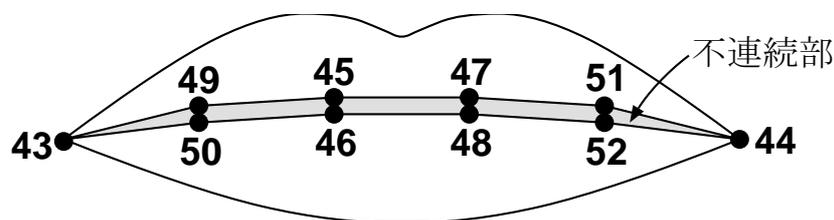


図 28 口の不連続部

上述の手法を用いて、無表情画像から表情を持つ画像を生成する具体的な手順

を以下に示す。

1. 被験者の無表情時を全周計測レンジファインダで計測し、距離、表面カラーの両画像を得る。
2. 基準点 5 点と口の不連続部の 6 つの特徴点 (43, 44, 45, 47, 49, 51) を手作業で抽出し、基準点から基準ベクトルを求める。
3. 3.4 節で得られた無表情時の標準パラメータ量と被験者の基準ベクトルを用いて、その他の顔面内特徴点位置を求める。
4. 4.1 節で得られた表情表出時の標準パラメータ変化量を無表情時の標準パラメータ量に足しあわせて、目的画像上の全ての特徴点位置を求める。
5. 補間関数  $f$  を求め、原距離画像、表面カラー画像上のすべての点の目的画像上での位置および画素値を求める。

標準パラメータ量により推定された特徴点位置は実際の位置とは微妙にずれるが、口が開く部分ではその微妙なずれでも不自然さを招くので、口の不連続部の特徴点は手作業で抽出している。また、46, 48, 50, 52 の特徴点はそれぞれ、45, 47, 49, 51 の特徴点より 1 ピクセル下の点とした。

図 29、図 30 は、この手順に従って合成した基本 6 表情を異なる視点で表示したものであり、自然な表情を 3 次元的に合成できていることがわかる。ただし、今回の手法では、「怒り」、「喜び」などの口の内部において本来見えるべきである歯や喉などを考慮していないので、やや不自然に見える。これを解決するには、前もって口の内部のデータを取っておいて合成するなどの方法を検討する必要がある。また、もうひとつの問題点として、「怒り」、「嫌悪」、「恐怖」などにおいては顔の皺も表情を表わすものとして重要であるが、今回の手法では対応できていないということが挙げられ、これも検討を要する。



原画像 (無表情)



怒り」



恐怖」



悲しみ」



嫌悪」



喜び」



驚き」

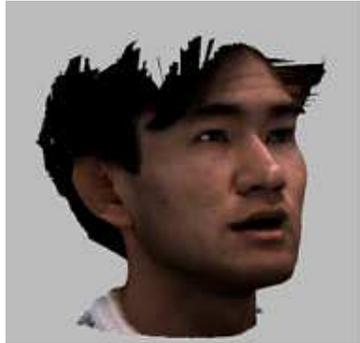
図 29 基本 6 表情の合成画像例 1



原画像 (無表情)



怒り」



恐怖」



悲しみ」



嫌悪」



喜び」



驚き」

図 30 基本 6 表情の合成画像例 2

#### 4.2.4 表情の強度

次に、徐々に表情を変化させるために、標準パラメータ変化量にかける係数の値を段階的に変えて、表情に強度を与えた。その結果を図 31～36 に示す。各図中の数値は標準パラメータ変化量にかけた係数値である。なお、原画像(無表情)における係数値は 0 であり、1.0 は元の標準パラメータ変化量を表わしている。

係数値の刻み幅を更に小さくして複数の画像を合成することにより、無表情から基本 6 表情へと変化する表情アニメーションを作ることが可能である。



原画像 (無表情)



0.25



0.5



0.75



1.0



1.25



1.5



1.75

図 31 表情の強度を徐々に変えて生成した「怒り」の3次元顔表情画像



原画像 (無表情)



0.25



0.5



0.75



1.0



1.25



1.5



1.75

図 32 表情の強度を徐々に変えて生成した「嫌悪」の3次元顔表情画像



原画像 (無表情)



0.25



0.5



0.75



1.0



1.25



1.5



1.75

図 33 表情の強度を徐々に変えて生成した「恐怖」の3次元顔表情画像



原画像 (無表情)



0.25



0.5



0.75



1.0



1.25



1.5



1.75

図 34 表情の強度を徐々に変えて生成した「喜び」の3次元顔表情画像



原画像 (無表情)



0.25



0.5



0.75



1.0



1.25



1.5



1.75

図 35 表情の強度を徐々に変えて生成した「悲しみ」の3次元顔表情画像



原画像 (無表情)



0.25



0.5



0.75



1.0



1.25



1.5



1.75

図 36 表情の強度を徐々に変えて生成した「驚き」の3次元顔表情画像

## 5. むすび

本論文では、従来よく用いられてきた FACS の AU に基づいて表情を合成する方法ではなく、円筒座標系で表現された距離画像から得られる 3 次元情報を利用して、表情表出時の顔面内特徴点の移動量について定量的に解析を行ない、その解析結果に基づいて 3 次元顔表情画像を合成する手法を提案した。その特長としては以下のことが挙げられる。

- 頭部に設定した物体中心座標系を用いて、顔面内特徴点位置を、計測時の位置、姿勢に不変で、かつ頭部の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ている。
- 表情変化による各顔面内特徴点の無表情時からの移動をパラメータの変化量として捉え、基本 6 表情の定量化を行なっている。
- 解析結果を利用した、動径的基底関数に基づく画像ワーピング手法を無表情顔画像に適用し、また口が開くという不連続性も考慮した画像変形を行ない、基本 6 表情すべての合成を実現している。
- 標準パラメータ変化量に係数を与えることにより、表情に強度を持たせることが可能で、それにより表情変化アニメーションを作ることができる。

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なかで、人間とコンピュータのコミュニケーションの円滑化のためのインタフェースの充実と向上を目的として進められている。本研究を発展させることにより、擬人化エージェントへの応用や、また表情の変化を伴いながら異なる人物あるいは動物や物体への 3 次元画像変形も考えられる。また、本研究の解析結果はワイヤフレームなどを用いた既存の頭部 3 次元モデルにおける表情合成にも利用することが可能であると思われる。

最後に、今後の課題としては、基本 6 表情以外の表情についての解析および合成と、より自然な表情合成を実現するために、眼球の動きや、口が開いた時に歯や喉を見せるといったこと、そして皺などにも対応した合成手法の検討などが挙げられる。

## 謝辞

本研究を行なうに際し、終始暖かく御指導を頂いた、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、竹村治雄助教授、岩佐英彦助手に感謝いたします。

本研究の協同研究者である辰野由美子さんと、本研究の実験を行なうに際し、快く被験者として協力して下さった、同研究室の学生みなさんに感謝いたします。

## 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] G. Wolberg: *Digital Image Warping*, IEEE Computer Society Press, Los Alamitos, CA, 1990.
- [4] 金出 武雄: “人の同定のための画像処理”, 信学誌, Vol.59, No.11, pp.1278-1285, 1976.
- [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.
- [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.
- [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, CG60-2, 1992.
- [8] 新井 清志: “大局的変形と局所変形を用いた顔の 3 次元アニメーション”, 情処研報, グラフィックスと CAD 64-2, 1993.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.

- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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, 1993.
- [19] O. Hasegawa, K. Yokosawa, M. Fujiki and M. Ishizuka: “Realtime Facial Image Recognition in Unconstrained Environment for Interactive Visual Interface”, *Proc. 1st Asian Conf. on Computer Vision*, pp.763-766, 1993.
- [20] J. Ohya, Y. Kitamura, H. Takemura, F. Kishino and N. Terashima: “Real-time Reproduction of 3D Human Images in Virtual Space Teleconferencing”, *Proc. IEEE Virtual Reality Annual Int. Sympo. '93*, pp.408-414, 1993.
- [21] N. Arad, N. Dyn, D. Reisfeld and Y. Yeshurun: “Image Warping by Radial Basis Functions: Application to Facial Expressions”, *CVGIP: Graphical Models and Image Processing*, Vol.56, No.2, pp.161-172, 1994.
- [22] D. Ruprecht and H. Müller: “Image Warping with Scattered Data Interpolation”, *IEEE Computer Graphics and Applications*, pp.37-43, 1995.
- [23] T.Beier and S.Neely: “Feature Based Image Metamorphosis”, *Computer Graphics*, Vol.26, No.2, pp.35-42, 1992.

- [24] 辰野 由美子: “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”, 修士論文, 奈良先端科学技術大学院大学, 1995.
- [25] 辰野, 横矢, 竹村: “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”, 第 50 回情処全大, 3C-01, 1995.
- [26] 鈴木, 辰野, 横矢, 岩佐, 竹村: “距離データを用いた基本 6 表情の定量的解析”, 第 51 回情処全大, 7S-02, 1995.
- [27] S. Suzuki, Y. Tatsuno, N. Yokoya, H. Iwasa and H. Takemura: “Analysis and Synthesis of Human Facial Expression Using Range Images”, *Proc. 2nd Asian Conf. on Computer Vision*, Vol.2, pp.474-478, 1995.
- [28] 辰野, 鈴木, 横矢, 岩佐, 竹村: “距離データを用いた顔基本 6 表情の解析と合成”, 情処研報, PRU95-195, 1996.
- [29] 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.