

# 顔平面を用いた顔表情解析

福井大学・長谷 博行, 富山大学・根岸 秀行,  
福井大学・東海 彰吾, 富山大学・酒井 充, 富山大学 米田 政明

## Facial Expression Analysis using Face Plane

Hiroyuki Hase · Fukui University, Hideyuki Negishi · Toyama University,  
Shogo Tokai · Fukui University, Mitsuru Sakai, Masaaki Yoneda · Toyama University

**Abstract** Changes in facial expressions or differences in individual faces appear not only in distinctive features such as eyes, nose and mouth but also in the bone structure or the movement of facial muscles. We present a new concept that reflects the differences of the bone structure of a face and/or the movement of facial muscles and name this a face plane. The face plane can be described by a few parameters and reduce facial vague features. This paper presents the concept and shows some experimental results of the face expression analysis using the face plane.

### 1. まえがき

顔表情の認識や顔による個人同定の研究は過去 20 年の間盛んに研究されてきた。この研究には 2 次元データと 3 次元データを利用するアプローチがある。前者はデータの取得が容易であり、これまでの研究の主流をなしている。顔表情認識や個人同定の研究は目、鼻、口などの顔部品を抽出し、それらの動きを検出することにより行われてきた [1]。しかし、顔画像からのそれらの部品を正確に抽出することは困難である。たとえ抽出できたとしても微妙な動きを区別することは簡単ではない。故に、顔部品を用いず顔画像をパターンとして捉え、統計的パターン認識法を利用する方法が提案された。Turk 等[2,3]は PCA を利用した固有顔を提案した。この方法の欠点としては顔の位置や大きさの規格化が要求されることである。栗田等[4]は顔の大きさや位置の変化にロバストな高次局所自己相関関数を提案した。2 次元画像データを使ったこれらの方法の能力や安定性は選択すべき特徴に大きく依存する。

3 次元データから 2 次元の横顔シルエット画像を作り、その自己相関関数により認識する方法が Kaufman 等[5]によって提案された。Harimon[6]はシルエットデータの幾何的特徴からよい認識結果を得ている。これらの研究は 3 次元データを使っているが、結局 2 次元画像としての解析である。

3 次元データを使った顔解析の研究は 1990 年代から

始まった。距離画像を用いて顔表面の境界線[7]や顔部品の相対距離[8]、そして曲率[9]などの特徴を用いた解析・認識法が提案された。しかし、3 次元データから解析・認識に有効な特徴を選択することは困難であった [10]。

本論文では、3 次元データを用いてこれまで注目されなかった表情筋や骨の動きを数量化するために効果的な方法を提案する。すなわち、頬などの 3 次元的な動きを 2 次元空間上に写像し、この空間上で数量化を行うことを考案した。本論文ではこの 2 次元空間を顔平面と呼ぶが、以下ではその概念と 2 つの基準を用いて顔平面を導出する方法を述べ、そして顔平面による解析の有効性を定性的に示す。

### 2. 顔平面の概念

顔平面は頭部を横切る仮想平面である。その概念を次に示す。まず、3 次元データで取得した顔の表面を微小領域に分割し、その微小平面上の法線を想定する。顔の形状から法線の大部分は頭部の中心に向う。図 1 に示すように頭部は楕球形をしているため、法線群はある場所において集束する位置があると考えられる。次に頭内部に仮想的な平面を考えると、平面上には法線が交わる点の分布が生じる。この点の広がり仮定平面の位置や傾きに依存し、法線の集束位置に平面を仮定すると交点分布が最小になると考えられる。また、

個人差や表情の変化により集束位置が変わると考えられる。

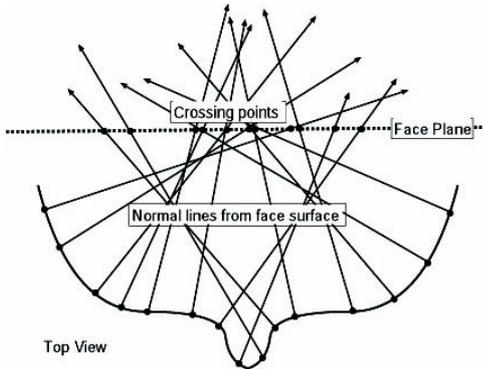


図1 顔平面の概念

我々はこの集束位置に平面を設定することにより交点分布の解析を行う。この仮想平面を顔平面と呼ぶことにする。この必要性は、平面上に分布を投影して解析する場合、平面は対象の動きに依存した位置に設定する必要があるためである。以下に、分散最小基準と距離最小基準の2つの評価量に基づく顔平面の導出法を示し、顔平面を用いて表情変化を視覚化しその効果を示す。

### 3. 顔平面の導出

#### 3.1 分散最小基準による導出法

本節では頭部を横切る平面と顔表面からの法線との交点を作り出す分布の分散を最小にする基準で顔平面を求める手法について述べる。

レンジファインダにより観測された3次元データを  $\mathbf{p}_i = (a_i, b_i, c_i)^t, (i=1, \dots, N)$  と表す。ここに、 $(\bullet)^t$  は転置を表す。レンジファインダの光軸を  $z$  軸にし、顔は  $z$  軸上の負の位置に置く。 $x, y$  軸はそれぞれ水平、垂直軸であり、 $x-y$  平面は  $z$  軸に垂直である。 $x, y, z$  軸は右ねじの関係とする。

今、顔表面上の点  $\mathbf{p}_i$  を通る規格化された法線ベクトルを  $\mathbf{f}_i = (l_i, m_i, n_i)^t$  とする。その時、法線の方程式は(1)式により表される。

$$\mathbf{x} = \mathbf{p}_i + t \cdot \mathbf{f}_i \quad (1)$$

ここに、 $\mathbf{x} = (x, y, z)^t$  は法線上の点であり、 $t$  は実数である。式(1)を要素ごとに表すと式(2)となる。

$$\begin{aligned} x &= a_i + t \cdot l_i \\ y &= b_i + t \cdot m_i \\ z &= c_i + t \cdot n_i \end{aligned} \quad (2)$$

頭部内に仮想平面を想定し式(3)で表す。

$$Ax + By + Cz + D = 0 \quad (3)$$

ここに、 $C=1$  とすると他の3つのパラメータにより平面は固定される。式(3)に式(2)を代入すると、 $t$  の値  $t_i$  を求めることができる。

$$t_i = -\frac{Aa_i + Bb_i + Cc_i + D}{Al_i + Bm_i + Cn_i} \quad (4)$$

次に  $t_i$  を(1)式に代入すると、仮想平面と法線との交点  $(x_i^*, y_i^*, z_i^*)^t$  を求めることができる。この交点分布は平面のパラメータ  $A, B, D$  の値に依存する。法線の大部分は頭部内で集束することに注目すると、分散最小の平面が存在することが予想される。この基準により求めた平面を「分散最小基準による顔平面」と呼ぶことにする。 $V(x^*), V(y^*), V(z^*)$  を交点の  $x, y, z$  軸方向の分散とし、総合分散を式(5)で定義する。

$$V = V(x^*) + V(y^*) + V(z^*) \quad (5)$$

$V(x^*)$  は式(2)と式(4)を使って次のように表すことができる。

$$\begin{aligned} V(x^*) &= E[x^{*2}] - (E[x^*])^2 \\ &= \frac{1}{N} \sum_i a_i^2 + \frac{1}{N} \sum_i t_i^2 l_i^2 + \frac{2}{N} \sum_i a_i t_i l_i - \left( \frac{1}{N} \sum_i a_i \right)^2 \\ &\quad - \left( \frac{1}{N} \sum_i t_i l_i \right)^2 - 2 \left( \frac{1}{N} \sum_i a_i \right) \left( \frac{1}{N} \sum_i t_i l_i \right) \end{aligned} \quad (6)$$

ここに、 $N$  は有効データ数である。 $V(y^*), V(z^*)$  も同様に計算できる。

パラメータ空間  $\{A, B, D\}$  において式(5)の  $V$  を最小にするため、 $V$  の微係数を計算する。式(5)よりそれらは次のように計算することができる。

$$\frac{\partial V}{\partial A} = \frac{\partial V(x^*)}{\partial A} + \frac{\partial V(y^*)}{\partial A} + \frac{\partial V(z^*)}{\partial A}$$

$$\frac{\partial V}{\partial B} = \frac{\partial V(x^*)}{\partial B} + \frac{\partial V(y^*)}{\partial B} + \frac{\partial V(z^*)}{\partial B} \quad (7)$$

$$\frac{\partial V}{\partial D} = \frac{\partial V(x^*)}{\partial D} + \frac{\partial V(y^*)}{\partial D} + \frac{\partial V(z^*)}{\partial D}$$

式(7)のそれぞれの微係数は、例えば

$$\frac{dV(x^*)}{dA} = \frac{dV(x^*)}{dt_i} \cdot \frac{dt_i}{dA} \text{より求めることができる。}$$

本稿では紙面の都合によりそれらの微係数の式は省略する。微係数の式からパラメータ  $\{A, B, D\}$  を決定的に求めることができないが、微係数は数値計算により求まるので、次の式(8)を用いて  $V$  の極値を示す  $\{A, B, D\}$  を求めることができる。

$$\begin{aligned} A^{new} &= A^{old} - k_A \cdot \frac{\partial V}{\partial A} \\ B^{new} &= B^{old} - k_B \cdot \frac{\partial V}{\partial B} \\ D^{new} &= D^{old} - k_D \cdot \frac{\partial V}{\partial D} \end{aligned} \quad (8)$$

ここに、 $k_A, k_B, k_D$  は収束速度に関する係数である。この方法による実験結果は4.3で示す。

### 3.2 距離最小基準による導出法

今、ある点  $P$  から式(1)上に降ろした垂線の長さ  $d_i$  は式(9)で表すことができる。

$$\begin{aligned} d_i^2 &= \|P - p_i\|^2 - (P - p_i, f_i)^2 \\ &= (P - p_i)'(E - f_i \cdot f_i')(P - p_i) \end{aligned} \quad (9)$$

ここで、 $E$  は単位行列、 $(\bullet, \bullet)$  は内積を表す。次に、垂線の長さの二乗和が最小になる点  $P$  を求める。これは  $Q = \sum d_i^2$  を  $P$  に関して微分することにより求めることができる。

$$\frac{dQ}{dP} = \sum_j (E - f_j \cdot f_j')(P - p_j) = 0 \quad (10)$$

この式を解くと、式(11)が得られる。

$$P = \left\{ \sum_j (E - f_j \cdot f_j') \right\}^{-1} \cdot \sum_i (E - f_i \cdot f_i') p_i \quad (11)$$

仮想平面はこの点  $P$  を通るように考える。後は仮想平面の方向を決定すればよい。今、仮想平面の法線ベク

トルを  $\mathbf{n}$  とすると、式(12)を最大にする  $\mathbf{n}$  を持つ仮想平面は、顔微小表面の法線群との角度が最も直角に近くなると予想される。この平面を「距離最小基準による顔平面」を呼ぶことにする。

$$S = \sum_i (f_i, \mathbf{n})^2 = \mathbf{n}' \left( \sum_i f_i \cdot f_i' \right) \mathbf{n} \quad (12)$$

これは固有値問題に帰着し、 $(\mathbf{n}, \mathbf{n}) = 1$  の条件下で固有方程式を解くことにより 3 組の固有値と固有ベクトルを得る。固有値は実数となり、これらを  $\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3$  とし、対応する固有ベクトルを  $\phi_1, \phi_2, \phi_3$  とすると、距離最小基準で求める顔平面の方向  $\mathbf{n}$  は  $\phi_1$  とすればよい。

## 4. 実験

### 4.1 計測機器

レーザー光による非接触型レンジファインダ(ミノルタ VIVID700)を用いて顔の立体形状の計測を行う。この装置は三角測量の原理で対象までの距離が計測でき、分解能は測定物までの距離などに依存するが、もっとも良い条件では奥行き方向におよそ 0.3mm であり、出力画素数は  $200 \times 200$  である。一枚の距離画像を得るのにおよそ 0.6 秒かかる。一画素は  $x, y, z$  座標(単位:mm)とカラーデータをもつ。被験者にはカメラから 1.5m 程度離れた場所で、カメラ方向を向いてもらい、撮影する。このように撮影することで、40,000 画素中、およそ 15,000 個の有効画素を得ることができた。顔表面の微小領域は、注目画素の右隣の画素と真下の画素の 3 つの有効画素から構成して法線ベクトルを計算した。

### 4.2 前処理

測定データにおいて、頻繁に首や耳等が顔領域と連結して測定されることがある。そのためそれらを除く必要があるが、顔領域を限定する基準がないため、次の処理で顔領域を定義した。分散最小基準と距離最小基準の両基準とも顔平面を導出する際、最初に生成される顔平面は、顔表面にほぼ平行で、その位置は顔表面と耳の間に生成される傾向があることが実験により確認されている。そこで、導出された顔平面の後方のデータを除去し、前方にあるデータのみを有効データとして再度顔平面を導出する。すると次に導出される顔平面の位置は若干変わるが、この処理を数回行うと顔平面はほぼ安定した位置に定まり、平面の位置は固定される。このように、顔平面より前面のデータを顔領域と定義する。本実験ではこの繰り返し導出を最大 20 回行った。途中で変化しなくなった時点で計算を終

了する。

### 4.3 分散最小基準による結果

分散最小基準での顔平面導出は、パラメータ  $A, B, D$  の初期値を設定し、式(8)を使って計算する。ここで初期顔平面のパラメータは 2 通り試みた。ひとつは、 $A = B = 0, C = 1$  とし、 $D$  は顔データの  $Z$  座標の平均値とした。これを初期条件 1 とする。他のひとつは距離最小基準で求められた平面とし、これを初期条件 2 とする。式(8)の係数は、 $A, B, D$  の数値の大きさを考慮して  $k_A = k_B = 10^{-7}, k_D = 10^{-2}$  とした。以上の条件で 168 データに対して顔平面を求め、目視により導出の成否を確認した。成功の指標として、

- ・ 顔平面の法線ベクトルは顔の方向に向いている。
- ・ 顔平面が顔表面よりも後ろにある。

を基準とした。これは事前実験を行って得た経験による。

結果として、初期条件 1 では 168 データ中 92 データにおいて導出が成功、初期条件 2 では 152 データにおいて導出の成功が確認できた。それらのデータにおいて分散は単調に減少し、100 回程度の繰り返し演算で安定に求めることができた。しかし、導出失敗の例として次のような現象が見られた。

- ・ 顔平面が顔を縦に割るように導出された。
- ・ 顔平面が顔表面よりも前に導出された。

前者の原因として、特に初期条件 1 では収束時に局所解に陥っていると考えられる。失敗したものの多くは、髪の毛が多く含まれており、雑音成分に強く影響されたと考えられる。パラメータ  $k_A, k_B, k_D$  の選び方により導出平面は多少変化するが、導出に失敗する確率はこれらのパラメータを恣意的に数パターン変えて実験しても同程度であった。後者の原因としては、耳や首などのノイズ除去による導出手順に起因していると考えられる。すなわち、求めた平面の前方のみのデータを次の計算に用いているため、データ数が減少し、それが分散を減少させる原因になり、平面が徐々に前に出たものと考えられる。

### 4.4 距離最小基準による結果

距離最小基準による方法は、解析的に解が求まり、決定的に顔平面を導出することができる。こちらも同じ 168 データに対して導出実験し、結果として 100% の成功率を得た。距離最小基準による顔平面の導出例と、繰り返し導出過程の 1 回目、3 回目、5 回目の結果

を図 2 に示す。図 2 において、横線はカメラ座標系の  $Z$  軸を表す。図 2 の(b)(c)を比較すると平面の位置にほとんど変化がないことがわかる。図 3 に繰り返し回数毎の平面パラメータを示す。このグラフには平面パラメータ  $A, B, D$  の推移が表されており、ほぼ 3, 4 回で定常となることがわかる。これらの実験を通して、分散最小基準による方法はデータ量が分散値に影響を及ぼすということと、初期値の与え方により局所解に陥る可能性があることで、安定性に欠けることが明らかになった。以後、本論文では安定した顔平面が解析的に求まる距離最小基準を使うことにする。

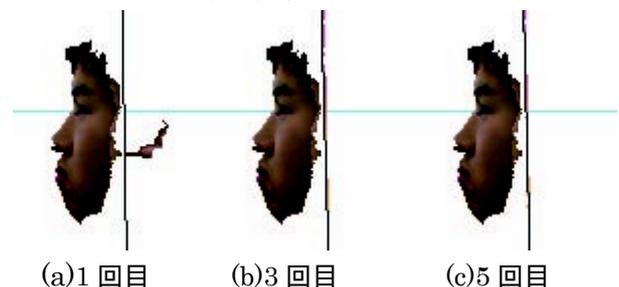


図 2 前処理の過程

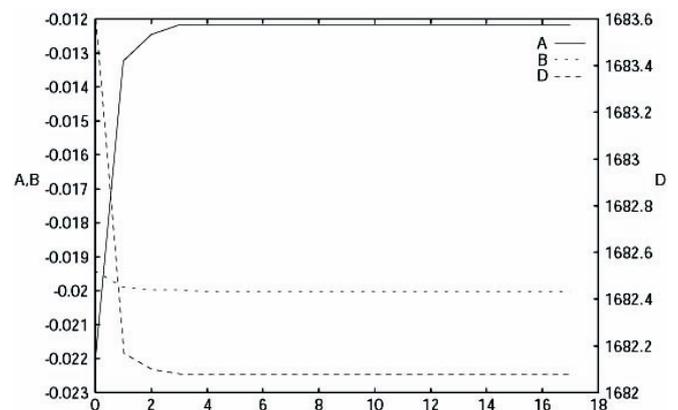


図 3 前処理過程における係数の変化

## 5. 顔平面による表情変化の視覚化

### 5.1 正規化

本章では、前もって記憶している平常顔と笑顔などの表情顔を比較することにより、表情筋の変化を視覚化する。測定時には位置ずれが生じるので、まず表情顔を平常顔の位置に合わせる。この処理を正規化と呼ぶことにする。本研究では、位置合わせに用いる特徴点として比較的的表情変化に影響されない

- ・ 鼻の頂点、
- ・ 右目尻、
- ・ 左目尻

を手動で選んだ。選択は手動で行い、二つの顔データから選択した 3 点からなる三角形が一致するように移動・回転処理をした(詳細は割愛する)。このように正規

化を行うと、両顔データの格子点はずれているので、基準顔の  $x, y$  座標における表情顔の  $z$  座標を線形補間により求めた。

## 5.2 視覚化の方法と結果

平常顔と笑顔の全体の法線による顔平面上の全体の交点分布からは表情の検出は困難である。また、平常顔から表情顔に表情変化するとき、顔のどこがどのように変化したかを調べる場合、共通の平面で表情変化を捉える必要がある。そのため、平常顔の顔平面と表情顔の顔平面の中間の平面を共通の顔平面とすることにした。これからは、表情の異なる二つのデータが前節の正規化により重ね合わされた状態で議論する。

今、表情筋の動きによる微小平面の傾きに変化があると、同じ点から出た二つの法線ベクトルは顔平面上で異なった位置に交点を持つ。そのときの交点の位置的な相違を数量化し視覚化する。ここでは、変化のパラメータとして「大きさ」と「角度」を考える。「大きさ」は共通顔平面上の移動の絶対量を表し、「角度」は移動方向を示す。次に、この変化量を顔平面上で表現するため、2次元座標系を顔平面上に作る。鼻頂点から顔平面へ降ろした垂線の足を原点とし、位置合わせで用いた左目尻から顔平面への垂線の足と右目尻から降ろした垂線の足を結ぶベクトルを  $x$  方向、このベクトルに垂直で原点(鼻の頂点からの垂線の足)を通るベクトルを  $y$  軸にとり、この2次元座標系で変化量を表す。以上の手順で共通顔平面上の動きを視覚化すると、基準顔として図 4(a)(平常顔)、表情顔として同図(b)(笑顔)としたとき、同図(c),(d)のようになる。(c)は変位の大きさを表し、変化が大きいほど輝度が高くなっている。(d)は変位の大きさが 18mm 以上の変化方向を色で表現しているが、方向と色との対応は図 4 下に示す。(c)(d)とも対象外点は白色になっている。ここで作成した図を表情マップと呼ぶことにする。これは表情筋の変化を可視化したものである。図(d)では、左頬は赤く、右頬は青く、目の下は紫色となっているが、この色変化の意味は、左頬、右頬、目の下の表情筋に膨らみが生じたことを表している(本稿は白黒印刷のため見難い)。図 5 は別の「笑顔」のサンプルであるが、表情マップのパターンが良く類似していることが分かる。図 6 は「しかめ顔」の例であるが「笑顔」の表情マップと異なり、目の周囲に大きな変化が表れていることがわかる。

実験として平常顔、笑顔の 84 データセットを用いて表情マップを作成した。強弱の差こそあれ、笑顔の場合、目の下あたりや口の周囲に強い変化が表れる傾向がみられた。

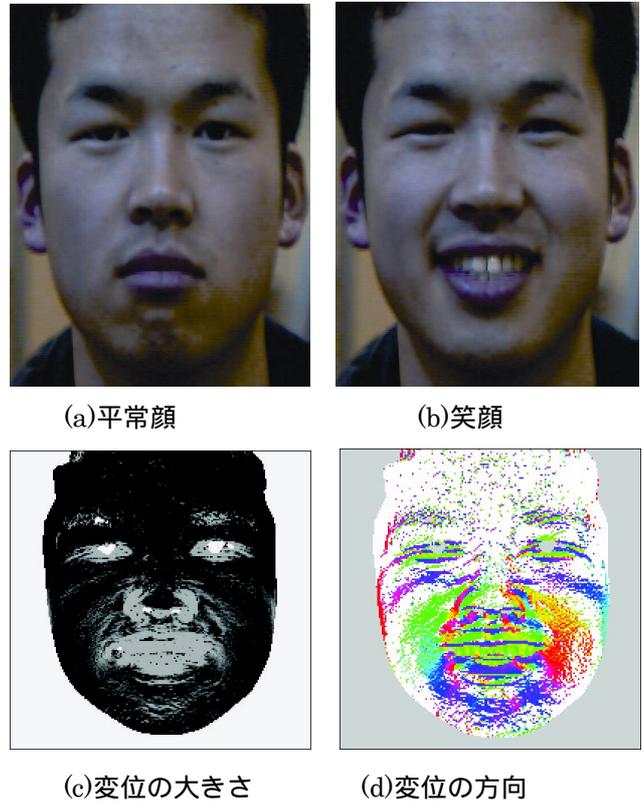
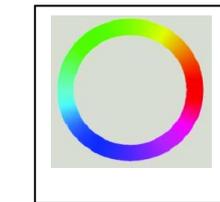


図 4 表情変化の視覚化例 1



さて、表情研究の一つに FACS ( Facial Action Coding System ) が有名であり[11]、表情関連研究で広く用いられている。FACS は全 44 種の AU(Action Unit)の組み

み合わせで表情を分類するものであるが、例えば「微笑み」は「AU6(頬を持ち上げる)+AU12(唇端を引張り上げる)」で作成することができる。「笑顔」の場合、「大頬骨筋」と「上唇挙筋」、「笑筋」が頬の変移を表出しており、「眼輪筋」が眼周りの変移を表出するが、図 5 ~ 7 の結果においてもその傾向が見られ、本手法の結果と符合する。

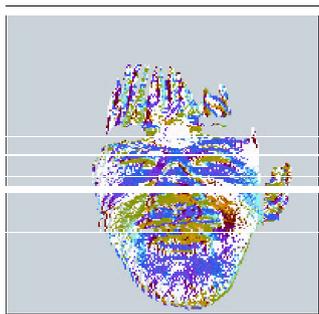
## 6 . あとがき

従来、表情解析には目、口など顔部品の動きの研究が中心であったが、顔平面は捉えどころのない表情筋の動きに注目している。顔平面により、表情筋の 3 次元の変化を 2 次元に落とすことが可能になり、次元の削減とともに変動の数量化を容易にする利点がある。本論文では顔平面の導出法として「分散最小基準」と「距離最小基準」による二通りの求め方を示した。



(a)平常顔

(b)笑顔



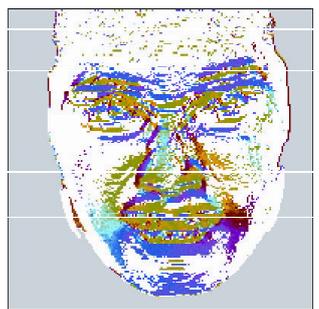
(c)変位の大きさ

(d)変位の方向



(a)平常顔

(b)しかめ顔



(c)変位の大きさ

(d)変位の方向

図7 表情変化の視覚化例3

実験の結果「距離最小基準」による導出法がきわめて安定であることがわかった。最後に、「距離最小基準」により求めた顔平面を用いて表情変化を可視化する試みを行った。実験の結果「笑顔」は口の周りの表情筋と目元の表情筋がある方向に変化することが、また「しかめ顔」では眉の周囲と口元に変化が表出することが

明らかになった。この結果を FACS の研究と照らし合わせ、結果の妥当性を検証した。最後に、本論文では手法の提案が主な目的であったため、今回扱った表情は「笑顔」が中心であったが、表情は一般に基本6感情と呼ばれる、驚き、恐怖、嫌悪、怒り、喜び、悲しみに分類されるのが一般的であり、今後はこれらの表情についても順次実験を行い、研究を進めていきたいと考えている。

## 文 献

- [1] T.Kanade: "Picture processing system by computer complex and recognition of human faces", Ph.D. Thesis Kyoto University (1973).
- [2] M.Turk and A.Pentland: "Eigenfaces for recognition", Journal of Cognitive Neuroscience, 3,1,pp.71-86 (1991).
- [3] M.Turk and A.Pentland: "Face recognition using eigenfaces", Proc. IEEE Conf.on Computer Vision and Pattern Recognition, pp.586-591 (1991).
- [4] T.Kurita, N.Otsu and T.Sato: "A face recognition method using higher order local autocorrelation and multivariate analysis", Proc. of Int. Conf. on Pattern Recognition, pp.213-216 (1992).
- [5] G.J.Kaufman and K.J.Breeding: "The automatic recognition of human face from profile silhouettes", IEEE Trans. Syst.,Man. & Cybern., SMC-6, 2, pp.113-121 (1976).
- [6] L.D.Harmon, M.K.Khan, R.Lasch and P.F.Ramig: "Machine identification of human faces", Pattern Recognition, 13,2,pp.87-110 (1981).
- [7] J.T.Lapreste, J.Y.Cartoux and M.Richetin: "Face recognition from range data by structural analysis", NATO ASI Series, F45, Syntactic and Structural Pattern Recognition, Springer-Verlag (1989).
- [8] 阿部,阿曾,木村: "3次元表面形状による人間の顔の自動識別 - B-スプライン曲面の制御点を利用して -", 信学論, J73-D-II,9,pp.1477-1484 (1990).
- [9] H.Tanaka and F.Kishino: "Facial identification using curvature", IEEE Trans. CV-73,pp.17-24 (1991).
- [10] S. Suzuki, Y. Tatsuno, N. Yokoya, H. Iwasa, H. Takemura, "Analysis and synthesis of human facial expression using range images" Proc. 2nd Asian Conf. on Computer Vision (ACCV'95), Vol.II, pp.474-478 (1995).
- [11] Ekman, P. and Friesen, W., Facial action coding system : a technique for the measurement of facial movement, Consulting Psychologists Press, 1978.