

主成分分析による顔画像の基底生成と記述

崔 昌石+ 岡崎 透++ 原島 博++ 武部 幹+
+金沢大学工学部 ++東京大学工学部

顔の識別、特徴抽出など顔の認識において顔画像をどのように記述するかは大変重要な問題である。本論文では、顔画像を効率的に記述するための基底を生成する方法を提案する。この基底は、顔の形状と顔のテクスチャのそれぞれに対して主成分分析を行うことにより生成される。基底が生成されると、ある顔画像は座標系の1点として記述されることになる。基底の生成の際に必要な顔の形状は一般的な3次元形状モデル(ワイヤフレームモデル)を顔画像に整合することにより得られる。このように顔の3次元形状を考慮することにより、基底の生成において顔の背景や頭部の回転などのような顔画像の撮影条件による影響を排除することができる。また、リアルな顔画像が合成できるため、これらの座標系の任意の点に対応する顔画像を可視化することも可能となる。

Basis Generation and Description of Facial Images Using Principal-Component Analysis

by Chang Seok CHOI (Kanazawa University 20-40-2 Kotatsuno,
Kanazawa-shi, 920, Japan), Toru OKAZAKI, Hiroshi HARASHIMA
(The University of Tokyo) and Tsuyosi TAKEBE (Kanazawa University)

It is a very important problem how to describe facial images for characterizing, identifying and distinguishing a face automatically. We propose a method which generates bases of a best coordinate system for efficient description of facial images. The bases are generated separately for facial shape and texture by principal-component analysis, to get a real synthesis image. A shape information of a personal face is gained by adjusting a general 3-dimensional shape model (wire frame model) to its image. A facial image is described as a point in this coordinate system. This method is not only applicable for recognizing face pattern but also for suitable visualization of a description point because a very real image is synthesized.

1. ま え が き

人間生活の営みの中で、顔は多種多様な機能を果しており、古くから哲学者、心理学者、工学者の関心の対象であった。例えば、顔には個人のアイデンティティーを示す機能、個人間のコミュニケーション機能、視覚などの感覚機能、食物摂取機能などがある^[1]。この中で個人のアイデンティティーを示す機能やコミュニケーション機能は、次の3通りの信号によって担われていると考えられている^[2]。すなわち、顔型、骨格、皮膚の色、顔各部位（眉、目、鼻、口など）の位置関係のごとく静的なもの、深く刻み込まれた皺のようにゆっくり変化するもの、眉を上げる動作のように素早く変化するものである。静的あるいはゆっくり変化する信号からは人種・年齢・性別・性格・人柄・気性・健康状態などの情報を読み取ることができる。また、素早く変化する信号からは気分・感情・心理・精神状態などの情報が把握できる。

このような情報を対象に種々の立場から研究が行われている。心理学的立場からは顔の認知、顔の記憶などのように顔に関する情報処理過程を解明する研究がある^[1]。また、顔面表情と感情・精神状態との関係を明らかにする研究もある^[2]。これに対して工学的立場からは、顔に関する人間の機能をコンピュータを通じて実現する研究が多い。顔の同定システム^[3]や顔画像の分析・合成システム^[4-8]などがこれである。これ以外にも顔の3次元形状のモデリングに関する研究もある^[9]。これらの研究は独立ではなく、相互補完関係にある。例えば、顔および表情に関する体系的な研究には顔画像の分析・合成システムがツールとして要請される^[1]。また、このようなシステムの構築には顔に関する知識や顔形状のモデリング手法が必要となる。

筆者らは、工学的立場から様々な分野に応用できる柔軟な顔画像の分析・合成システムの構築を目指しており、その一つとして重み付き線形和による顔画像の分析・合成手法について検討を行ってきた^[5-6]。この手法では、いくつかの基底と

なる顔画像に適当な重みをつけて線形和を取ることにより顔画像を合成する。逆に、基底にどのような重みを与えることにより目標の顔画像が得られるかを分析する。この重みが目標の顔画像を記述するパラメータとなる。この際、顔画像の分析・合成をより効率的に行うために、直交した基底の顔画像を求めることは自然な流れである。

Sirovichらは顔画像の主成分分析を行い、その主成分により「Eigenpicture」と呼ばれる、直交した基底の顔画像を求めた^[10-11]。また、Turkらはこの基底を用いて目標の顔画像を記述し、記述されたパラメータから顔の同定を試みた^[12]。しかし、この方法では顔の形状を考慮していないため、同じ顔にも関わらず顔画像の背景と頭部の回転によりEigenpictureおよび記述の結果が異なる。また、記述したパラメータから再合成した顔画像が不自然になるため、パラメータの可視化が要請される分野では応用が困難である。

本論文では、顔画像を顔の形状と顔のテクスチャに分けて主成分分析を行う。また、それぞれの主成分を基底とし、顔画像を記述することを提案する。このように顔の形状を考慮することにより、上記の問題が改善されると同時によりリアルな合成画像が得られることが期待される。なお、本研究は筆者らが検討している重み付き線形和による顔画像の分析・合成システムの延長線にあり、基底が直交した場合として位置づけられる。

以下、2. では顔の形状を考慮するために、顔画像から顔の3次元モデルを構成し、正規化する方法について述べる。3. では、顔画像を顔の形状とテクスチャに分けて主成分分析を行い、それぞれの基底を求める方法について述べる。4. では、これらの基底を用いて顔画像を記述し、更に再合成する方法を示す。5. では、これらのシミュレーション結果を提示する。

2. 顔の3次元モデルの構成と正規化

2.1 顔の3次元モデルの構成

顔画像を3次元的に取り扱うために、対象人物

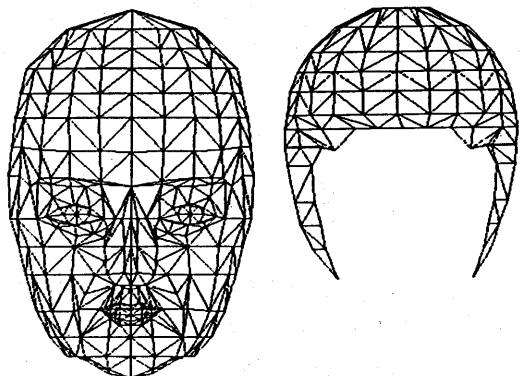


図1 一般的な顔の3次元形状モデル

に対する顔の3次元モデルを構成する。ここでは、顔の一般的な形状を表現するために、標準的な顔を頂点と線で近似した顔の3次元形状モデル(ワイヤフレームモデル)を用意する^[7]。また、様々な頭髪が近似できるワイヤフレームモデルを別途用意した^[8]。これらを図1に示す。

次に、これらのモデルを対象人物の正面像に整合させ、個人の顔の3次元形状モデルとする。この様子を図2に示す。この際、顔の輪郭、顔の各部位などのように精密に整合させるべき部位は、いくつかの特徴点の座標を対話的に指定し、それ以外の頂点の座標は特徴点の座標を用いて自動調整される。なお、奥行き座標は顔の左右幅に比例するように調整される。頭髪のワイヤフレームは頭部のワイヤフレームにかぶせるように変形する。

最後に、この個人の顔の3次元形状モデルのそれぞれの三角形パッチに対して顔の表面を定義して、正面像の濃淡情報を投影することにより対象人物に対する顔の3次元モデルが構成される。

2.2 顔の3次元モデルの正規化

大量の顔画像を用いて主成分分析を行う場合、同一条件下で撮影した顔画像を得ることは難しい。例えば、画面上での顔の方向と位置を一定にし、カメラとの距離が一定に保たれた顔画像を得ることは容易ではない。このような撮影条件により顔画像の主成分分析の結果が影響されるのは好ましくない。ここでは、この影響をなるべく排除する

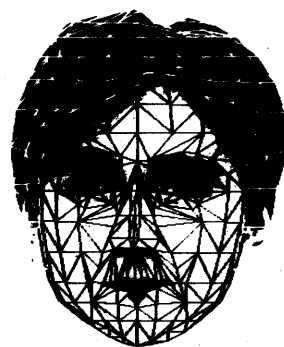


図2 正面像に整合した顔の3次元形状モデル

ために、顔の3次元モデルの正規化を行う^[5]。

(1) 顔の中心の移動: 顔の中心(左右眼頭の中心)が画面の中央に位置するように顔の3次元モデルを平行移動する。以下、画面の中心を原点とする。また、座標軸は正面から見て水平、垂直、奥行き方向を各々X, Y, Z軸とする。

(2) 顔の向き回転: 顔の向きが正面垂直となるように顔の3次元モデルを各軸回りに回転する。まず、顔の中心と両目尻間の距離が一致するようにY軸の回りの回転を行う。次に、顔の中心と鼻下点を結ぶ線がY軸と一致するようにZ軸の回転を行う。

(3) 顔の大きさの調整: 顔の大きさはカメラとの距離により異なる。これを補正するために、顔の大きさを調整する。すなわち、左右目尻の点と鼻下点を結ぶ三角形の面積が一定になるように、顔の3次元モデルを拡大・縮小する。

このような正規化を行うことにより顔の中心は画面中央に位置し、顔の方向は正面垂直になり、顔の大きさはほぼ揃うことになる。

3. 顔の固有形状と固有テクスチャの生成

顔画像を顔の形状と顔のテクスチャに分けて考える。顔画像からこれらを厳密に区別することは非常に難しい。顔画像は顔の3次元形状、顔面の肌の材質、光の反射率、光源の位置と強さ、視線の方向などさまざまな要素の複雑な組み合わせに

より得られたものであるからである。しかし、主成分分析により得られた顔画像が自然であれば目的は達成できるという立場から、顔画像から得られた3次元ワイヤフレームは顔の形状、顔画像そのものは顔のテクスチャと見なすことにする。

以下では、顔の形状と顔のテクスチャに対して主成分分析を行い、「顔の固有形状」と「顔の固有テクスチャ」を生成する方法について述べる。

3.1 顔の固有形状の生成

直交したいくつかの顔の形状により任意の顔の形状を記述することを考える。この直交した顔の形状を「顔の固有形状」と呼ぶことにする。以下、固有形状を生成する手順について述べる。

(1) ベクトルによる顔の形状の表現: 顔の形状はワイヤフレームにより表現されているので、それを用いて主成分分析を行うことにする。ワイヤフレームの形状は個人によってさまざまであってもトポロジー的には同じであるから、ワイヤフレームの頂点の x, y, z 座標により顔の形状を表すベクトルを定義する。これを Ψ とすると、

$$\Psi = (x_1, y_1, z_1, \dots, z_n)^T \quad (1)$$

となる。これを(個人顔の)形状ベクトルと呼ぶ。ここで、 n はワイヤフレームの頂点の数である。

(2) 差分形状ベクトルの作成: まず、個人顔の形状ベクトルの平均を取り、平均形状ベクトル $\bar{\Psi}$ を求める。

$$\bar{\Psi} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \Psi_i \quad (2)$$

ここで、 m は個人の数である。個人形状ベクトルと平均形状ベクトルの差分を取り、差分形状ベクトル Φ_i とする。

$$\Phi_i = \Psi_i - \bar{\Psi} \quad (3)$$

これは個人形状と平均形状の差分であるため、個人の特徴を表すベクトルであると思われる。

(3) 固有形状ベクトルの生成: 各個人の差分形状ベクトルを (m より少ない) いくつかのベクトルにより代表させることを考える。このベクトルを $u_k (k=1, 2, \dots, m)$ とすると、

$$u_k = \sum_{i=1}^m a_{ki} \Phi_i \quad (4)$$

となる。この a_{ik} を求めることは、差分形状ベクトルの分散行列 $C (c_{ij} = \Phi_i \cdot \Phi_j)$ の固有ベクトル a を求める問題に帰着される⁽¹³⁾。すなわち、

$$C a = \lambda a \quad (5)$$

となる。但し、

$$a = (a_1, a_2, \dots, a_m)^T \quad (6)$$

であり、 λ は固有値である。ここで、固有値 λ が大きいほど、それに対応する固有ベクトルが差分形状ベクトルをよりよく代表していることになる。各固有ベクトルに対する主成分ベクトル u_k が「顔の固有形状ベクトル」となる。

3.2 顔の固有テクスチャの生成

顔形状の場合と同様に、主成分分析により直交した顔のテクスチャを生成する。これを「顔の固有テクスチャ」と呼ぶ。この場合、個人の形状が異なるため、個人のテクスチャの画素同士は対応が取れない。これが文献[10-12]のEigenpictureおよび合成画像を不自然にする原因である。ここでは、各画素の対応が必ず取れるように、個人のテクスチャを平均形状にマッピングし、テクスチャの主成分分析を行う。以下、その手順について述べる。

(1) 個人顔のテクスチャの平均形状へのマッピング: 個人のテクスチャを平均形状に三角形毎にマッピングする。これを図3に示す。個人のワイヤフレームの三角形 P_a, P_b, P_c が平均形状のワイヤフレームの三角形 $\bar{P}_a, \bar{P}_b, \bar{P}_c$ に変形したとする。 P はワイヤフレームの頂点の位置ベクトルである。

まず、平均形状の三角形の内部の整数画素位置 \bar{P}_i に対応する個人形状の画素位置 P_i を算出す

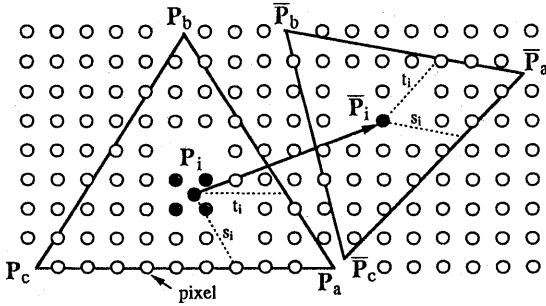


図3 三角形の変形による画素のマッピング

る。すなわち、逆マッピングを用いる。線形マッピングを仮定すれば、 P_i は

$$P_i = s_i (P_b - P_a) + t_i (P_c - P_a) \quad (7)$$

となる。ここで、 s_i, t_i は三角形の両辺($\bar{P}_b - \bar{P}_a$)と($\bar{P}_c - \bar{P}_a$)を軸とする斜交座標系において、 \bar{P}_i の座標である。

次に、画素 \bar{P}_i の濃淡値は画素 P_i の濃淡値に当たる。しかし、 P_i は必ずしも整数画素位置とは限らないので、その濃淡値は周辺の4画素から線形補間により求められる。

このようなマッピングをすべての画素に対して行うと、平均形状に対する個人顔のテクスチャが得られる。

(2) 顔の固有テクスチャベクトルの生成: 平均形状へのテクスチャマッピングにより得られた個人顔のテクスチャは同じ形状となるため、画素同士は対応が取れることになる。これらの画素の濃淡値から顔のテクスチャベクトルを表現する。このベクトルから3.1と同様の手順により「顔の固有テクスチャベクトル」が求められる。

この時、顔のテクスチャベクトルは顔の領域に属する画素のみにより表現されるため、背景に影響しない顔の固有テクスチャが得られる。また、画素同士の対応が取れているので、リアルな顔画像が再合成できる。

4. 顔画像の記述と合成

本章では、3. で求められた固有形状と固有テクスチャを基底として顔画像を記述し、記述されたパラメータから顔画像を再合成する方法について述べる。

4.1 顔画像の記述

顔画像の記述とは、固有形状と固有テクスチャを基底とする空間で個人の顔画像の位置を求めることである。この位置の座標が個人の顔画像を表すパラメータとなる。また、この空間の基底は互いに直交しているので、各基底を正規化することにより正規直交系となる。

顔画像を記述するために、まず差分形状ベクトルを作成する。正規直交系では、このベクトルに対する位置を各固有形状ベクトルとの内積により求められる。これは固有形状ベクトルにより張られた空間が正規直交系を成すためである。記述対象となる顔の差分形状ベクトルを Φ_d とすると、各固有形状に対する座標 r_k は、

$$r_k = \Phi_d \cdot u_k \quad (8)$$

となる。ここで、 u_k は固有形状ベクトルを単位ベクトルに正規化したものとする。

顔のテクスチャの場合は、顔画像を平均形状にマッピングして形状を一致させた後、差分テクスチャベクトルを作成する。このベクトルに対する位置座標を求める方法は形状の場合と同様である。

4.2 顔画像の合成

4.1では、顔画像を空間内の1点として記述した。これは、逆に空間内の任意の1点を顔画像として合成できることを意味する。固有形状により張られた空間内の1点の顔の形状ベクトルを Ψ' とすれば、

$$\Psi' = \sum_{k=1}^l r_k u_k + \bar{\Psi} \quad (9)$$

となる。ここで、 $l (= <m)$ は記述に用いる固有

形状の数である。

顔のテクスチャの場合も同様にして空間内の任意の1点に対応するテクスチャが求められる。これを形状 Ψ' にマッピングすることにより顔画像が合成される。

5. シミュレーション例

4枚の顔画像を用いて固有形状と固有テクスチャを生成し、顔画像の記述と再合成を試みた。ここでは、シミュレーション例を示しながらそれぞれの手順を整理することとする。

(1) まず、4枚の顔画像を用意する。これを図4に示す。ここでは若い成人男子を対象とした。なお、撮影条件には特別な制約を加えなかったので、撮影場所および日時、カメラとの距離は異なっている。

(2) これらの顔画像にワイヤフレームモデルを図2のように整合し、個人顔のワイヤフレームを得る。これらのワイヤフレームを画面中央に位置させ、正面垂直になるように正規化を行う。

(3) 正規化された個人のワイヤフレームから平均形状を求める。次に、4枚の顔画像を平均形状にテクスチャマッピングし、平均テクスチャを得る。これらを図5に示す。

(4) 個人のワイヤフレームから平均形状を除いて差分形状を得る。また、テクスチャに対しても同様な方法により差分テクスチャを得る。これを図6に示す。この濃淡値は $-255\sim 255$ となり得るのでそのままでは表示できない。ここでは、表示のために濃淡値を2で割り、128を加えた。

(5) これらの差分形状と差分テクスチャを用いて主成分分析を行い、固有形状と固有テクスチャを求める。表示のために固有形状には平均形状を加え、固有テクスチャには(4)でのように処理したものを図7に示す。()の内の数字はそれぞれの寄与率である。この寄与率は固有値の総和に対するそれぞれの固有値の比率とした。両方とも第3主成分までの累積寄与率がほぼ1になっている。これは、3つの固有形状と固有テクスチャがあれ

ば4つの顔画像は表現できることを意味する。

(6) 原画像の中の2枚(図4のa, b)を記述し、更にその座標パラメータから再合成した顔画像を図8に示す。これらは合形状に合成テクスチャをマッピングして得られたものである。図8の左から右にかけて第1主成分から順に加えながら得られたものである。()の内はそれぞれに対する累積寄与率である。主成分を多く用いるほど原画像をよく近似することになるが、第3主成分までを用いればほぼ原画像であることが視覚的にも確かめられる。

6. むすび

顔画像を効率的に記述するための基底となる「固有形状」と「固有テクスチャ」を主成分分析により求める方法について述べた。また、これらを用いて顔画像を記述し、そのパラメータから顔画像の再合成を試みた。以下、本方法の特徴をまとめる。

(1) 顔の3次元モデルを用いて顔画像を顔の形状と顔のテクスチャに分離して取り扱った。これにより顔の形状とテクスチャは別々に記述され、顔の情報のより柔軟な操作が可能となる。

(2) 顔の形状を考慮することにより顔と背景を分離し、背景に影響しない固有テクスチャと記述パラメータを得ることができる。また、顔のテクスチャにおける画素の対応が取れるので、実写のようなリアルな合成画像を得ることができる。これにより記述パラメータの可視化が要求される分野に応用が可能となる。

(3) 顔画像を3次元的に取り扱うことにより、顔の位置、方向、大きさなどを正規化することが可能となり、顔画像の撮影条件をそれほど強く制限しなくてもそれによる影響を排除することができる。

謝辞: 本研究は一部(財)東電記念科学技術研究所研究助成金ならびに文部省科学研究費の補助を受けて行われた。

【参考文献】

- [1]V. Bruce (吉川左紀子訳)：“顔の認知と情報処理”，サイエンス社(1990)
- [2]P. Ekman and W. V. Friesen (工藤 力訳)：“表情分析入門”，誠信書房(1987)
- [3]南 敏：“顔の識別技術”，計測と制御，25, 8, pp. 707-713(1986-08)
- [4]H. Harashima, K. Aizawa & T. Saito：“Model-Based Analysis Synthesis Coding of Videotelephone Images”，Trans. IEICE Japan, E72, 5, pp. 452-459(May 1989)
- [5]崔, 岡崎, 原島, 武部：“3次元構造モデルを用いた顔画像の中割り”，第20回画像工学コンファレンス, pp. 33-36(1989-12)
- [6]岡崎, 崔, 原島：“中割り手法を用いた顔画像の分析と合成”，1990信学春季全大, D-332
- [7]相沢, 原島, 斉藤：“構造モデルを用いた画像の分析合成符号化方式”，信学論(B), J72-B, 3, pp. 200-207(1989-03)
- [8]丹治, 森川, 相沢, 原島, 斉藤：“分析合成画像符号化のための3次元構造モデルの構成”，昭63信学春季全大, D-95
- [9]山本, 黒川, 土屋：“対象顔面に依存しない曲面構造による顔の3次元形状記述法”，計測自動制御, Human Interface, N&R, 4, pp. 13-18(1989)
- [10]L. Sirovich and M. Kirby：“Low-dimensional procedure for characterization of human faces”，J. Opt. Soc. Am. A, 4, 3, pp. 519-524 (Mar. 1987)
- [11]M. Kirby and L. Sirovich：“Application of the Karhunen-Loeve Procedure for the Characterization of Human Faces”，IEEE Trans. Pattern Anal. & Mach. Intell., PAMI12, 1, pp. 103-108(Jan. 1990)
- [12]M. Turk and A. Pentland：“Representing Faces for Recognition”，M. I. T Media Lab Vision Modeling Group Technical Report #132(Jan. 1990)
- [13]田中, 脇本：“多変量統計解析法”，第2章, pp. 53-88, 現代数学社(1988)



図4 原画像

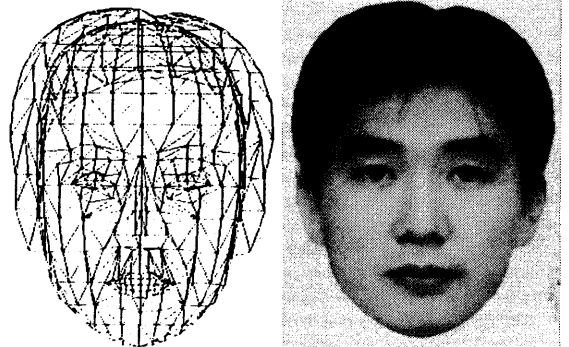


図5 平均形状と平均テクスチャ

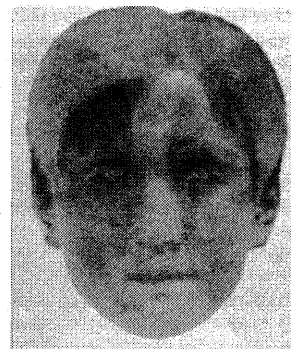
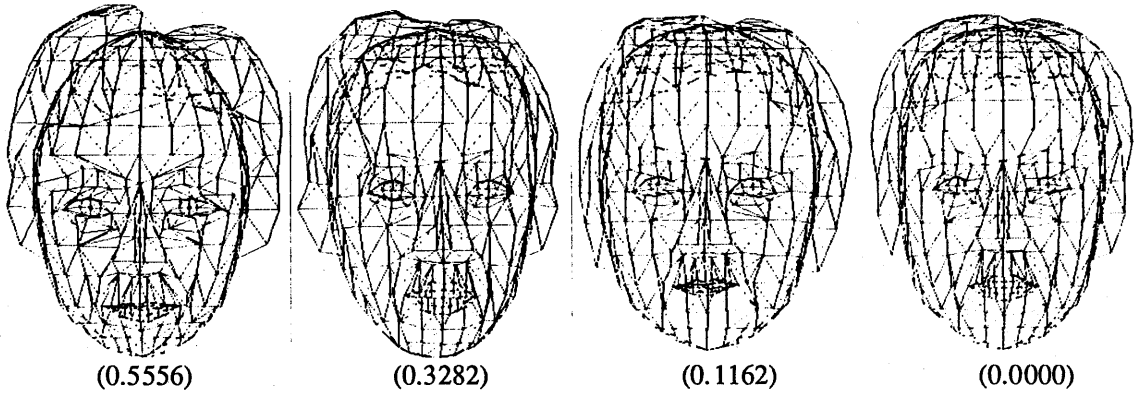
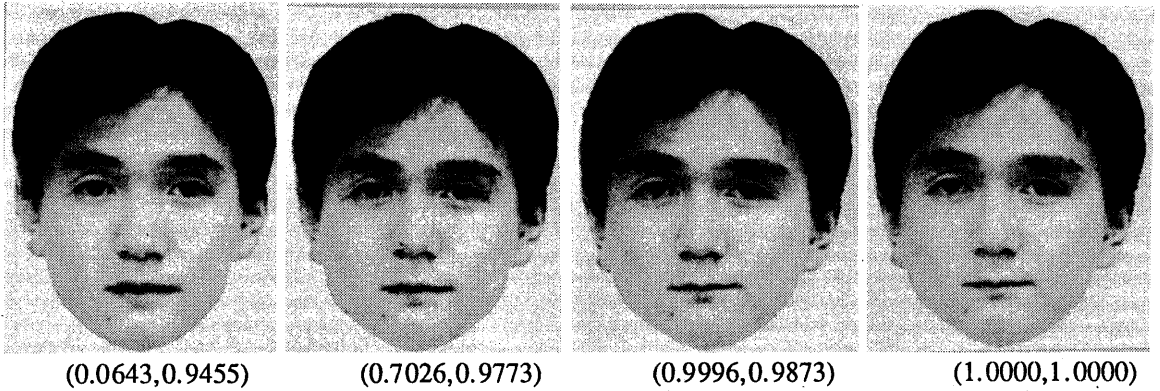


図6 図4の(a)に対する差分テクスチャ



第1主成分(0.5741) 第2主成分(0.2934) 第3主成分(0.1118) 第4主成分(0.0206)

図7 固有形状と固有テクスチャ



(0.4921, 0.1133) (0.9612, 0.3664) (0.9930, 0.9691) (1.0000, 1.0000)

図8 顔画像の記述とそのパラメータから合成した画像