

レンジファインダを用いた顔の3次元モーフィングモデルとその応用

矢野, 大亮 / 阿部, 千尋 / 石山, 亜希 / 赤松, 茂 / Yano, Daisuke / ABE, Chihiro / ISHIYAMA, Aki / AKAMATSU, Shigeru

(出版者 / Publisher)

電子情報通信学会

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

電子情報通信学会技術研究報告. IE, 画像工学 / 電子情報通信学会技術研究報告. IE, 画像工学

(巻 / Volume)

103

(号 / Number)

644

(開始ページ / Start Page)

13

(終了ページ / End Page)

18

(発行年 / Year)

2004-01-28

レンジファインダを用いた顔の3次元モーフィングモデルとその応用

矢野 大亮 *1 阿部 千尋 *2 石山 亜希 *2 赤松 茂 *1,*2

*1 法政大学大学院 工学研究科 システム工学専攻

*2 法政大学 工学部 システム制御工学科

〒184-8584 東京都小金井市梶野町 3-7-2

E-mail: {i03r6128, akamatsu}@k.hosei.ac.jp

あらまし 本論文では、異なる顔についてレンジファインダで取得した距離画像に対して、画像間に対応付けされて抽出された特徴点によって分割される領域ごとに顔表面の再サンプリングを行うことによって、個々の顔の3次元形状を近似的に多次元ベクトルデータとして表現した。多数の人物の顔からこのようにして得られた形状ベクトルに対して、グループ別に重み付けした平均化演算を行うとともに、顔集合の主成分分析によって得られる主成分ごとの重み係数という少数のパラメータを用いて顔形状の多様性を記述する3次元モーフィングモデルの構築を行った。そして顔の形状と印象との関係の科学的解明や、その知見にもとづく顔画像のイメージ変換など、3次元モーフィングモデルの応用可能性について論じた。

キーワード 3次元計測, レンジファインダ, 顔の3次元モデル, 主成分分析, モーフィング, 顔画像生成

A morphable 3-D face model obtained from range images of faces and its application to face image synthesis

Daisuke YANO *1 Chihiro ABE *2 Aki ISHIYAMA *2 Shigeru AKAMATU *1,*2

*1 Department of System Control of Engineering, Graduate School of Engineering, Hosei University

*2 Department of Systems Control Engineering, Faculty of Engineering, Hosei University

3-7-2, Kajino-cho, Koganei-shi, Tokyo, 184-8584 Japan

E-mail: † {i01r6123, akamatsu}@k.hosei.ac.jp

Abstract Human face differ in 3D shape and texture. This paper describes a vector representation of the 3D shapes acquired in the form of 2D range images by means of a range finder (NEC Danae-R). The vectorization was done by first extracting feature points that correspond to each other as the landmark among different 3D face shapes, and then re-sampling each surface region of the face divided by the landmarks in order to obtain corresponding elements of the 3D shape vector. A linear description of the 3D shape spaces obtained by principal component analysis allows a smooth morphable modeling of human face in terms of smaller number of projection parameter. A possible application of the morphable 3D model to face image manipulations that transform impressions on facial attributes is also discussed.

Keyword 3D Measurement, Range Finder, 3D Face Model, Principal Component Analysis, Morphing, Facial Image synthesis

1. はじめに

人間同士の対面コミュニケーションにおいて、顔が言葉によらない情報の伝達媒体として重要な役割を果たしていることはいまさら言うまでもない。顔は表情という形で表出される感情や意志を伝える媒体である

とともに、その人物が誰であるかという個人識別情報を視覚的に伝える媒体でもある。さらに人間は相手の顔からその人物の性別や年齢といった生物学的な意味での属性から、社会的帰属、性格、魅力といった広義の人物の属性に至るまでの様々な印象を得ている^[1]。

このように人間が顔から認知するさまざまな印象

と、個々の顔がもつ物理的な存在としての特徴を規定するパラメータとの関係がモデル化されれば、その工学的な応用としては、任意の人物の顔について人に与える印象を特定のイメージに操作・変換したり、また逆に与えられた顔画像からその人物の性別や年齢といった属性や印象を推定したりするように、顔が伝える感性情報を認識・生成するコンピュータの実現が現実のものとして期待できるようになる。さらには顔の物理的な特徴を表現するパラメータを媒介とすることによって、人間に認知される多重・多義的な印象相互の関係を定量的に明らかにし、視覚コミュニケーションにおける人間の感性の特性を科学的に理解することにも貢献するものと考えられる。

これまでも、顔が人に与える印象が顔パターンの物理的特徴と一定の関係をもっていることを示唆した幾つかの研究成果^{[2][3]}や、その工学的応用として顔の印象を人為的に操作・変換しようとするイメージ生成の試みも幾つか報告されている^[4]。しかしこれら従来研究の多くは、2次元パターンとしての顔画像を処理の対象としているものである。2次元顔画像を用いたイメージ生成の場合には視点方向が制限されており、ある決まった方向を向いた顔画像しか生成することができないことは言うまでもない。しかし顔はそもそも3次元構造をもった物体であるから、顔が人間に与える印象には顔画像として投影された2次元的特徴ばかりでなく、何らかの3次元的特徴もその印象に寄与していると考えるのが自然である。ならば、顔のもつ3次元形状の中で、どのようなパラメータが顔から人間が認知しうる様々な印象に大きく影響しているのかを明らかにすることが望まれる。それが明らかになれば、人間のイメージともよくマッチした顔の3次元像をCGによって生成したり、任意の方向から撮影された顔写真に対してもそのイメージ変換を容易に実現できるようになるなど、工学的応用面での期待も大きい。

しかし、2次元顔画像の処理の場合と同様あるいはそれ以上に、顔として共通の複雑な構造をもちながら微妙な形状の違いで各人の個性を表現しうる3次元特徴は量的に膨大なものとならざるをえないので、主成分分析に代表される多変量解析法によって3次元形状データを効果的に次元圧縮することで、顔の多様性を小数のパラメータで表現することが不可欠である。そのためには、顔の3次元形状を計測して得られる測定点の位置座標からなる多次元特徴量はベクトル空間を形成する必要がある^[5]。

本研究では顔の3次元形状を多次元ベクトルとして表現するために、顔に共通して存在する幾つかの造作の特徴点を基準点として抽出し、これら基準点の間の

領域ごとに予め決められた分割数で再サンプリングを行って、新たに顔面上の測定点を計算しなおすことにした。これによって、異なる顔の間で各成分が表す情報の対応づけがされている多次元ベクトルとして顔の3次元形状を表現することが可能となっている。

顔の3次元形状を多次元ベクトルで表現することで、顔のサンプル集合に対して主成分分析を行い、個々の顔を主成分への射影値からなる少数のパラメータで表現するというのが本研究のアプローチであるが、実はこれには類似した手法による先行研究が存在する^[6]。当該先行研究に触発されて、第4著者自身も以前に本研究とほぼ同様のアプローチを試みた結果についての報告を行っている^[7]。しかしながら、これらの先行事例では、顔形状の3次元計測手段としては頭部のまわり360度の顔面形状を物体中心座標系によって計測するサイバーウェア社の3Dスキャナーを使用していたのに対し、本研究では一方向から頭部の距離画像を取得するレンジファインダー（NEC製 Danae-R）で得られた距離画像を顔面形状データとして使用することになったため、改めてその結果を報告することにした。

2. 顔の3次元形状の多次元ベクトル化

2.1. 3次元形状データの取得

人物の顔の3次元の計測には、非接触型3次元形状計測用レンジファインダ（NEC製 Danae-R）を用いた^[8]。顔の形状データは顔表面における各サンプリング点の計測原点からの相対位置情報（XYZ座標値）と色情報（RGB値）からなる点群データとして出力される。なお、今回の実験は前者の形状データだけを使用することにした。

2.2. 顔の3次元姿勢の正規化

3次元データの計測において、顔の位置や方向を一定に保つことは困難である。よって、測定されたデータには、このような撮影条件の違いが反映し、モーフィングや主成分分析の結果に影響を与える恐れがある。これを避けるため、3次元データの正規化を行う。

2.2.1. 正規化を行うための基準点の取得

正規化を行うために基準となる特徴点としては、画面上で位置を特定しやすい部分を目視で抽出する左右目尻（ P_R, P_L ）、口の両端（ M_R, M_L ）の4点に、それらから求まる左右目尻の midpoint（ P_M ）、口の両端の midpoint（ M_M ）を加えた6点とした。

2.2.2. 顔の向き回転

図1のように P_R, P_L, M_M の3点からなる三角形 $P_R P_L M_M$ を考える。この三角形の法線ベクトル \vec{n} を顔

の正面方向とみなし、レンジファインダの設置位置によって定まる観察者中心の xyz 直交座標系 (x 軸は水平方向, y 軸は鉛直方向, z 軸はレンジファインダの攻軸方向にとる)において, 法線ベクトル \vec{n} が z 軸と, ベクトル $\vec{P_R P_L}$ が x 軸と一致するように, 回転に関する座標変換を行う。

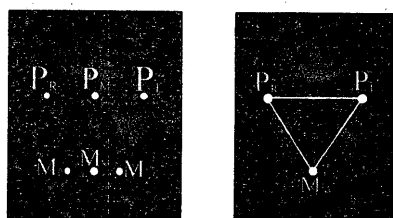


図1 正規化の基準点

2.2.3. 顔の中心の移動

xyz 直交座標系の原点が以下の位置と一致するように, 平行移動に関する座標変換を行う。

x 座標 : 口の両端を結ぶ線分の中点 M_M の x 座標

y 座標 : 左右の目尻を結ぶ線分の中点 P_M の y 座標

z 座標 : 口の両端を結ぶ線分の中点 M_M の z 座標

上記 2.2.1 における 3 次元表面上の特徴点の抽出, ならびに, 2.2.2, 2.2.3 における 3 次元物体の回転, 平行移動操作は 3 次元モデラ RapidForm2004 を使用した。

2.3. 再サンプリング処理

上記の顔の 3 次元姿勢の正規化によって, 顔の向きや方向は一致するが, n 番目の測定点は, ある顔では目尻に対応し, 別の顔では瞳の中心に対応するなどのように, 測定点同士の意味的な対応が取れていない。この結果, 個々の顔を 3 次元計測して得られる膨大な成分からなる特徴量は, ベクトル空間を満足しておらず, 顔の 3 次元形状を表す多次元データ間で種々の演算や多変量解析による分析を行うことができないという問題が応じる。そこで, 顔に共通して見られる造作に基づきいくつかの特徴点について個々の顔の対応づけを行い, さらに, そのような特徴点で定義された領域ごとに顔表面の再サンプリング処理を行うことにより, 異なる顔同士で特徴成分が近似的に対応の取れた多次元ベクトルデータの取得を行う。

再サンプリングは, 特徴点を基準に顔の表面を分割した, いくつかの小領域を予め決められた分割数で格子状に一定のピッチでサンプリングし, 顔表面上でのサンプリング点の座標を求めることにより行う。各顔でこのような特徴点の数と位置及び小領域内の分割数を同じように設定すれば, 異なる顔の間で対応するサンプリング点が近似的に同一の意味をもつ場所を示し

ていると考えることができる。

また, 顔の形状は正面方向に平坦ではなく, 目や鼻, 頬では曲率の変化が大きい。そのため, 直交座標系よりも極座標系のもとでピッチを一定にしながら再サンプリングを行ったほうが, 曲率によるサンプリングの誤差が少ないと考えられる。 r を原点からの距離, θ を xz 平面内での y 軸のまわりの角度, ϕ を xz 平面からの垂直方向になす角度とする極座標系 (r, θ, ϕ) において θ, ϕ について一定間隔で再サンプリング処理を行う。

2.3.1. 再サンプリングで必要な特徴点の取得

再サンプリングの領域分割に用いる特徴点は図 2 に示す 11 点とした。特徴点の指定は, 点 2, 3, 4, 5, 6, 8, 11 は目視で抽出した。点 9 は点 8 と点 2, 6 の中点の中点とし, 点 10 は点 3 と点 5 の中点とした。点 1, 7 は顔画像の z 方向の距離を求め, その距離を 3 等分する。3 等分された距離から鼻の頂点から z 方向に z 軸と垂直になる平面を考え, その平面と点 2, 点 6 の高さを一定で顔表面を通る曲線と交わる点とした。

これらの特徴点は, 3 次元モデラ RapidForm の機能を用いて, 画面上に表示された顔の 3 次元データ上で目視によって抽出された。

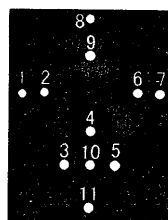


図2 特徴点

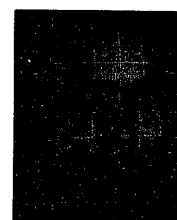


図3 領域分割

2.3.2. 再サンプリングのための顔の領域分割

得られた特徴点から, 再サンプリングを行う範囲を θ 方向に点 1 から点 7 まで, ϕ 方向に点 8 から点 11 とした。そして, 特徴点に従って, 再サンプリングを行う範囲を θ 方向に 6 領域, ϕ 方向に 5 領域, 計 30 領域に分割する。分割境界線はいずれかの特徴点を通るものとし, 図 2 より θ 方向は点 1-点 2-点 3-点 4-点 5-点 6-点 7 で分割された 6 領域, ϕ 方向は点 8-点 9-点 2-点 4-点 10-点 11 で分割された 5 領域と定めた。領域分割のイメージ図を図 3 に示す。

2.3.3. 再サンプリング

次に各領域の分割数を決定し, 再サンプリング処理を行う。今回は, 各領域を θ 方向に 85 分割, ϕ 方向に 100 分割, 計 8500 分割となるように設定した。再サンプリング点は一般にレンジファインダによる計測時のサンプリング点とは一致しないため, r の値を顔面形状の原データから直接求めることは困難である。そこ

で原データの点群のうち再サンプリング点の θ , ϕ に対する最近傍の 4 つの測定点 (オリジナル点) を抽出し, 各点における r の値の平均を求め, これを再サンプリング点の r の値とした。

2.3.4. 出力結果

以上の処理を各画像に対して行うことにより, 各画像間で成分の対応づいた形状ベクトルが得られる。図 4 に元画像と再サンプリング画像を示す。再サンプリングによって得られた顔表面の点群が元の顔の特徴をよく再現していることがわかる。

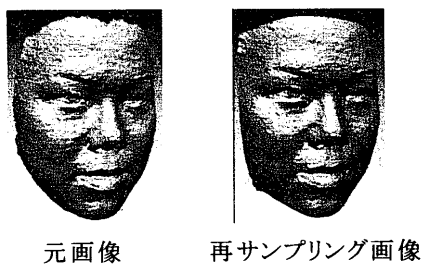


図 4 元画像と再サンプリング画像の比較

3. 多次元ベクトルで表された顔形状の平均化

以上の過程から, 顔の 3 次元形状は多次元ベクトルとして表現されるので, 3 次元計測した顔のサンプル集合に対する多次元ベクトルのシンプルな線形結合によって 3 次元の平均顔を作成することは容易である。ここでは 3 次元の平均顔を用いて, 顔の 3 次元形状と人間に認知される印象の一例として「魅力」との関係を探る予備実験を行った。

3.1. 2 次元画像における平均顔と魅力の関係

2 次元顔画像における平均顔と印象の関係については, 顔の形状の男女差と魅力の関係をとりあげた興味深い先行研究がある^[3]。男女それぞれの平均顔に対して, 性差による顔の形態的差異を図 5 に示すように強調することで得られた男性化・女性化した顔画像を視覚刺激として, 日英の被験者に魅力判断を行わせたところ, 男女いずれの顔の場合も純粋な平均顔よりも女性的特徴を 20% ほど強調した顔がより魅力的に判断されるという共通の傾向が確認されている。

ここで男性あるいは女性の平均顔が多次元ベクトル μ_M, μ_F で表され, 両者の差分を $\Delta\mu = \mu_M - \mu_F$ とすると, 例えば男性の平均顔の男性化・女性化の操作は

$$\mu'_M = \mu_M + k \cdot \Delta\mu \quad \dots(1)$$

と表され, $k > 0$ の時が男性化, $k < 0$ の時が女性化に

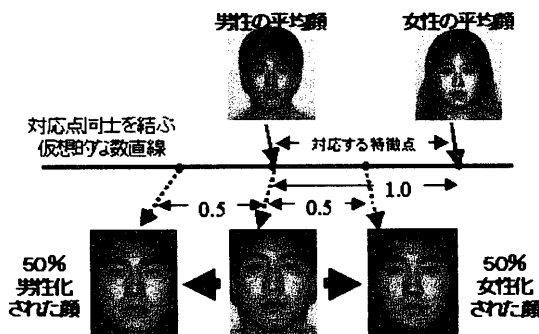


図 5 性差による顔形状の強調の原理

に相当する。

ここでは 3 次元的な平均顔の場合と対比するため, 小規模ではあるが, 上記の追試を行ってみた。図 6 は男女各 20 名の顔画像について得られた 2 次元平均顔, ならびに各平均顔を 10% 女性顔方向に強調した合成顔の例を示す。なお, 平均顔の作成, 性差の強調処理には, 顔画像合成ソフトウェア FUTON システム^[9]のモーフィング機能を利用した。今回の主観実験は, 被験者 56 名という小規模な実験であったが, 男女の平均顔のいずれも, 女性の特徴を強調した場合の方がより魅力的と判断する被験者が多数を占めたことで, 前述の顔の形状と魅力との関係を再確認できた。

	平均顔	10%女性化
男性		
女性		

図 6 2 次元画像の平均顔と女性化した合成顔

3.2. 3 次元形状に関する平均顔と印象の関係

前節に記した 2 次元の平均顔画像に対する男性化・女性化と同様の操作を, 3 次元形状データのベクトル表現に対して行った。顔のサンプルとして, 20 代の男女各 19 名, 計 38 名分の 3 次元形状データを取得した。撮影時にはヘアバンドで髪をとめて, 額に髪がかからないようにした。表情は真顔, 撮影方向は正面に固定した。図 7 に, 男性・女性の 3 次元形状の平均顔と, それらに対して男性化・女性化の操作を行った結果の 3 次元形状を画像として可視化した結果の例を示す。

男女の平均顔の 3 次元形状を変化させた合成顔画像を対象として, 20 代の男女計 30 名にもっとも魅力度の高いと思われる顔を選択してもらった。その結果, 男性顔については被験者の約 6 割が 25% 男性化した顔

	女性特徴を強調		平均顔	男性特徴を強調	
k	-50%	-25%	0%	25%	50%
男性顔					
女性顔					

図7 3次元形状に関する平均顔の操作

が最も魅力的と判定し、女性顔の場合も被験者の約9割が25%男性化した顔が最も魅力的と判定した。

この結果は、女性的特徴を強調した顔がより魅力的と判定された2次元顔画像を対象とした実験結果とは正反対な傾向を示している。これが顔面のテクスチャを無視して3次元形状のみをシェーディングによって可視化したことによる効果なのか、あるいは3次元の平均顔を求めるのに用いた顔のサンプルが少なかつたためなのか、また、顔の向きを変化させた場合にどうなるか、などの疑問については今後のより精度の高い主観評定実験の結果を待つことにしたい。

4. 顔の3次元形状の多様性の可能性

4.1. 顔形状を表す多次元ベクトルの主成分分析

M 名分の顔の3次元形状をベクトル化した N 次元ベクトルが $\mathbf{X}_m (m=1, 2, \dots, M)$ として与えられているとき、(2)式で与えられる標本共分散行列 \mathbf{C} に対して(4)(5)式を満足する固有ベクトル $\mathbf{U}_k (k=1, 2, \dots, K)$ は、 N 次元特徴空間での M 個のパターンのばらつき方向を表す正規直交基底をなすことが知られている^[10]。
($\mathbf{U}_1, \mathbf{U}_2, \mathbf{U}_3, \dots$ は対応する固有値の大なる順とする)

$$\mathbf{C} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M (\mathbf{X}_m - \boldsymbol{\mu}) \cdot (\mathbf{X}_m - \boldsymbol{\mu})^t \quad \dots(2)$$

$$\boldsymbol{\mu} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \mathbf{X}_m \quad \dots(3)$$

$$\mathbf{C} \cdot \mathbf{U}_k = \lambda_k \mathbf{U}_k \quad \dots(4) \quad \mathbf{U}_k^t \cdot \mathbf{U}_k = 1 \quad \dots(5)$$

この時、 \mathbf{X}_m は K 個の固有ベクトルを用いて、(6)式のように近似できることが知られている。

$$\mathbf{X}_m \approx \boldsymbol{\mu} + \sum_{k=1}^K f_{m,k} \mathbf{U}_k \quad \dots(6)$$

$$f_{m,k} = \mathbf{U}_k^t (\mathbf{X}_m - \boldsymbol{\mu}) \quad \dots(7)$$

ここで重み係数 $f_{m,k}$ は(7)式によって求まるが、その値を任意に変化させることによって、多様な形状の顔パターンに変形させることができる。

4.2. 多次元ベクトルに表される顔形状の多様性

k 番目の固有ベクトル \mathbf{U}_k が多次元ベクトル \mathbf{X}_m で表現された顔の3次元形状のどのような変化を担っているかを可視化するために、 \mathbf{U}_k に対して(8)式に示すように係数 $p_c (=0, \pm 1, \pm 2, \dots)$ によって段階的な重み付けした結果を顔画像として生成して、その変化を観察する^[11]。

$$\hat{\mathbf{X}}_{k,c} = \boldsymbol{\mu} + p_c \cdot \sigma \cdot \mathbf{U}_k \quad \dots(8)$$

ここで σ は各基底に対する重み係数の大きさを規格化するために、基底への射影値の標準偏差とした。

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{m=1}^M f_{m,k}^2} \quad \dots(9)$$

第1~3主成分について、係数 p_c を-3から+3に変化させた時の顔の形状の変化を図8に示す。

これを見ると、第1主成分は主として顔の全体的な大きさの変化を表現していることがわかる。また、第2主成分は主として顔の上部と下部の幅の大小関係を表しており、重み係数を正に変化させると顎がまるい下膨れの顔となり、負に変化させると顎のとがった逆三角形の顔となっている。さらに第3主成分は主として目のくぼみや彫りの深さを表していることがわかる。

5. おわりに

本論文では、レンジファインダから得られた顔の距離画像に対して、特徴点に基づいて、再サンプリング処理を行った結果、各顔画像間で近似的に対応のとれたベクトル表現が得られた。これにより個々の顔の3次元形状データの重み付き加算などの線形演算が可能になった。そこで、男性、女性の3次元平均顔を求めるとともに、男性の平均顔間の差分ベクトルを用いて、それぞれの平均顔を男性化あるいは女性化の方向で変化させた場合に人に認知される魅力の度合いを主観評定する予備実験を行った。これにより、顔の3次元形状と人間による印象との関係を探る研究の第一歩を踏み出すことができた。さらに顔の3次元形状データのサンプル集合に対して主成分分析を行うことに

		主成分		
		第 1	第 2	第 3
重み係数 p_c	-3			
	-2			
	-1			
	0			
	+1			
	+2			
	+3			

図 8 多次元ベクトルの上位 3 主成分が表す 3 次元形状の変化

よって、多次元ベクトルによって表された顔の 3 次元形状にどのような多様性が内在しているかを可視化することができた。

今回は比較的少数の顔サンプルについての予備実験を行ったが、今後はさらにサンプル数を増やしていく。また距離画像から得られる顔の 3 次元形状を表す特徴ベクトルだけでなく、同時に収集された顔表面のテクスチャ情報を表す特徴ベクトルに対しても同様の手法を適用していく。我々はこれまで、顔パターンを表現する多次元ベクトルを主成分分析して得られる次元圧縮されたパラメータ空間と、人間が顔から認知して得られるさまざまな印象との関係のモデル化を試みた。そして、得られた顔の印象を変換して可視化する手法に関しては、顔の 2 次元パターンがもつ形状とテクスチャを分離して表現した特徴表現法に基づく方法の研究を進めてきた^[12]。今後はそのアプローチを顔の 3 次元データに適用することで、3 次元的なパターンとして与えられた顔の印象を自在に変化させる顔のイメージ変換処理への展開を目指していきたい。

6. 謝辞

本研究の一部は、文部科学省の科研費 (15300076) の助成を得た。記して謝意を表す。

また、本研究で使用した FUTON システムは第 4 筆者らが(株)エイティアル人間情報通信研究所において顔認知の心理実験の視覚刺激作成用ツールとして開発した顔画像合成ソフトウェアである。

参考文献

- [1] V. Bruce, 顔の認知と情報処理, 吉川左紀子(訳), サイエンス社, 1990.
- [2] 山口真美, 加藤隆, 赤松茂, “顔の感性情報と物理的特徴との関連について-年齢/性の情報を中心に-,” 信学論, Vol.79-A, No.2, pp. 279-287, Feb. 1996.
- [3] D.I.Perrett, K.J.Lee, I.Penton-Voak, D.Rowland, S.Yoshikawa, D.M.Burt, S.P.Henzi, D.Castles, and S.Akamatsu, “Effects of sexual dimorphism on facial attractiveness,” Nature, vol.394,no.6696,pp.884-887, Aug. 1998.
- [4] 高橋正臣, 遠藤彩子, 赤松茂, “形状とテクスチャを分離した顔パターンの多様性の表現□印象を変化させるイメージ生成への応用□,” 信学技報, IE2002-209, Feb. 2003.
- [5] D.Beymer, and T.Poggio, “Image Representations for Visual Learning,” Science, Vol. 272, pp.1905-1909, 28 June 1996.
- [6] Blanz, V and Vetter, “A Morphable Model for the Synthesis of 3D Faces,” SIGGRAPH'99 Conference Proceedings, pp. 187-194, 1999.
- [7] 磯野勝宣, 赤松茂: “PCA による顔画像の生成のための 3 次元顔データの対応表現,” 信学技報, HIP96-17, pp. 1-6, Oct. 1996.
- [8] 坂本静生, “高精度・高速レンジファインダの開発,” 画像ラボ, pp.1-6, Dec.1999.
- [9] 向田茂, 蒲池みゆき, 尾田正臣, 加藤隆, 吉川左紀子, 赤松茂, 千原國宏, “操作性を考慮した顔画像合成システム: FUTON-顔認知研究のツールとしての評価-,” 信学論, Vol.J85-A, No.10, pp.1126-1137, Oct. 2002.
- [10] 永田明德, 岡崎透, 崔昌石, 原島博, “主成分分析による顔画像の基底生成と空間記述,” 信学論, Vol.J79-D-II, No.7, pp.1230-1235, July 1996.
- [11] T. Vetter and N. Troje, “A separated linear shape and texture space for modeling two-dimensional images of human faces,” Max-Planck-Institut fur biologische Kybernetik, Technical Report, No.15, 1995.
- [12] 小林敏和, 大図正孝, 大竹俊輔, 赤松茂, “形状, テクスチャ空間における線形判別関数を用いた顔画像の印象変換,” 本研究会にて発表予定 (Feb. 2004).