

顔のモデリングと認識

橋本 周司

概要

顔のモデリングはリアルな顔画像合成には欠かせない技術である。特に、医学応用においては顔の表層ばかりでなく骨格、筋肉を含めた解剖学的力学モデルが必要となる場合が多い。また、顔の認識は、ヒューマンインタフェースや人間共存ロボットの視覚系に必要とされる重要な機能である。筆者らは、顔の筋肉系をバネ力学系で表現する顔の物理モデルの提案すると共に、ロボットに搭載にするための顔認識システムの研究を行ってきた。ここでは、最近の研究の中から、歯科診断において撮影される X 線規格画像に基づく顔の個人モデルの生成法と複数の手掛かりによるカメラ画像からのロバストな顔認識について紹介する。

Modeling and Recognition of Face

Shuji Hashimoto

Abstract

Facial modeling is one of the key issues in realistic facial image generation. Especially, in medical application it is required to model not only surface structure but also physical characteristics of head including skin, skull and muscles. On the other hand facial recognition is required in the fields of human interface and human friendly robotics. This paper introduce two of our recent research on facial image processing. One is 3D head model construction of individuals utilizing standard models and X-ray photogrammetry. Another is robust facial recognition technique to employ multiple keys.

1. はじめに

テレビ電話・遠隔地会議などの知的画像通信[1]、仮想空間内でのリアルな人物像表現を実現するため、顔形状のモデリングは重要な要素技術となっている。医療分野においては、CT や MRI から得られた情報から、頭部の 3 次元画像を合成、可視化して治療、診断に役立てるといった試みがなされている[2][3]。また、心理学における顔の印象評価実験などにも顔の CG モデルと表情合成技術が効果的に利用されるようになってきている。このように、顔のモデリング及び顔画像合成は、工学にとどまらず、顔に関わる情報処理を扱う広範な学際分野において有用な技術となっている[4]。

一方、画像情報や音声情報などをもとに人と対話し処理を行う知的インタフェースや人間共存ロボットでは、イメージ・シーケンス中からユーザの

早稲田大学理工学部応用物理学科
Dept. of Applied Physics, Waseda University

顔を自動的に抽出・認識し、その表情変化や個人属性などをリアルタイムに検出することが不可欠となる[5][6]。ここでは、顔画像に関する我々の最近の研究の中から、歯科診断などにおいて撮影される X 線規格画像に基づく顔の個人モデルの生成法と複数の手掛かりによるカメラ画像からのロバストな顔認識について紹介する。

2. X 線写真からの顔モデル生成

顔モデリングの一つの手法として、多方向から撮影した顔画像から得られる顔の輪郭線形状・特徴点座標など、各画像での 2 次元情報を統合することで顔の 3 次元形状を再現する方法がある。また、3D デジタイザのデータを利用すればより精密なモデリングが可能である。しかしながら、歯科手術や顔面麻痺のシミュレーションに応用する場合は、顔表面ばかりでなく、皮下の軟組織や硬組織も含めた 3 次元モデルの構築が必要となり、

CT のデータから精巧な頭部モデルを構築する試みも行なわれている。

筆者らは、これまで主に医学的な応用を目的とし、解剖学的知見に基づいた人物頭部の物理モデルについて研究してきた[7][8]。[7]では、3次元CTデータを用いたモデリング手法を提案し、筋肉・骨格の運動とそれによって表出される表情との関連について検討した。CTは内部も含めた3次元データを取得する強力な方法であるが、X線被曝線量の問題などから、通常の診断では、幾つかの方向からのX線写真を用いることが多い。そこで、診断用X線写真に基づく個人頭部モデルの構築手法を検討した[9]。

2. 1 標準頭部モデルの構成

個人の頭部モデルを構築するための土台となる標準的な頭部モデルをCTデータに基づいて製作した。

1) 顔表層モデル

顔表層モデルは、頭部3次元CTデータから得た点列群をもとに三角形パッチを構成していくことで作成した。パッチを構成する各辺は全て非線型バネの性質を有しており、弾性係数を変化させることで皮膚の弾性を再現することが可能である。モデルを構成する点は751個、ポリゴン数は1288である(図1(a))。

2) 筋肉モデル

顔面筋は骨格から起始し、皮膚に付着するといった形態をとっており、これらの収縮運動によって顔表面に複雑かつ微妙な表情を生み出している。本モデルでは、表情表出に関わっている顔面筋を非線型バネとして表している。顔面筋は大きく放射状筋と輪状筋に分類できるが、放射状筋は骨格と皮膚を結ぶ直線状のバネで、輪状筋の場合はバネを輪状に結合することでその形態を表現した。放射状筋としては前頭筋・頬筋群など12種類を、輪状筋としては眼輪筋・口輪筋の2種類をシミュレートしている(図1(b))。各筋肉の強度を表す弾性係数については、表情生成実験を通して得られた経験的な値を用いている。また、筋肉の走向については解剖学に基づき、標準的な位置に配置した。

3) 骨格モデル

骨格形状モデルには既存のポリゴンモデル(米ViewPoint社製, 5072点, 7757ポリゴン)を用いた(図1(c))。このモデルは頭蓋、上下歯列、下顎の4つの部分から構成されており、下部は各軸周りの回転運動、平行移動など、自由度の高い顎運動

の再現が可能である。

4) 軟組織モデル

骨格と皮膚の間に位置する軟組織として、骨格上特徴点の近傍面に対する法線方向(顔表面に向かう向き)にばねを配置することで、顔表層-骨格モデル間の隙間をうめ、筋肉・骨格運動時に顔表層の特徴点群が滑らかに動くようにしている。これら顔表層・筋肉・骨格・軟組織の結合関係を図2に示した。顔表層-筋肉-骨格の接続関係は全て顔表層モデルと骨格モデルを結ぶそれぞれの特徴点番号で定義されており、個人の頭部形状にフィッティングを行った後でも、標準的な表情筋配置となる。

表層と骨格の形状の整合をCTデータにより行い、骨格モデル、顔表層モデルを重ね合わせて、両者の間に筋肉、軟組織層を挿入することで、図1(d)に示すような階層構造をもった3次元頭部モデルを構築した。

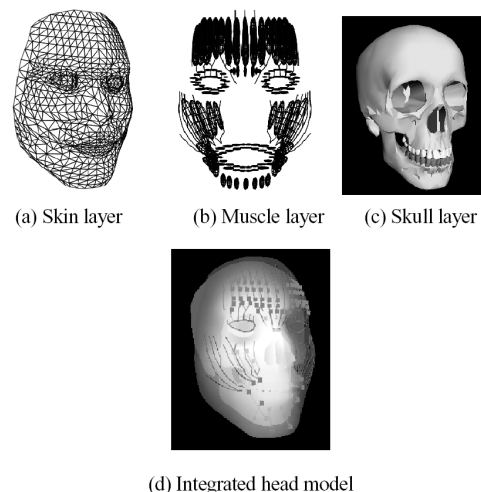


図1 3次元頭部モデル

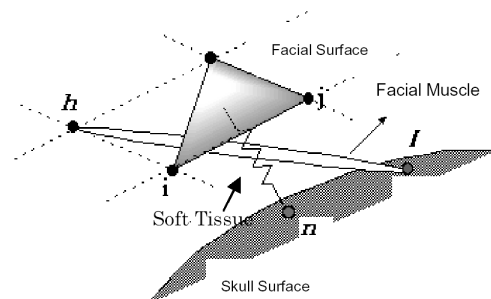


図2 顔皮膚下の階層モデル

2. 2 表情生成機構のモデル

顔面筋の収縮運動と骨格運動の2つの物理的要因によって顔の表情が決まる。顔面筋の収縮による表情生成では、各筋肉の収縮程度をパラメータ化した筋肉収縮率を与え、それに伴う顔面の変形を式(1)の運動方程式を解くことで算出する。筋肉収縮率 C_r は、筋肉が最も縮んだ状態を100%と定義した際の筋肉の収縮程度であり、顔面にマーカを貼付して各筋肉の最大収縮時の長さを求め、収縮率決定時の基準とした。また、骨格運動による顔面変形は、各軸まわりの下顎骨の回転角、及び各軸に沿った平行移動量をパラメータとして与え、同じく式(1)の運動方程式を解くことで得ることができる。

$$m_i \frac{d^2 r_i}{dt^2} = - \sum_{i,j} k_{ij} (c_r) (r_i - r_j) + m_i g - R \frac{dr_i}{dt} \quad (1)$$

ここで、 r_i 、 r_j はそれぞれ皮膚モデル上の特徴点 i とそれとバネでつながった特徴点 j の位置ベクトル、(1)式の右辺の第1項は弾性力、第2項は重力を、そして第3項は粘性項を表している。なお、 R は粘性定数である。弾性係数 k_{ij} の値は筋肉収縮率 C_r によって2段階に変化させ、皮膚及び筋肉の非線形性を近似している。

2. 3 X線画像上の解剖学的計測点の設定

上に述べた標準頭部モデルをもとに、正面・側面2方向より撮影した頭部X線規格画像(セファログラム:以下、セファロ)と正面顔画像から得られる顔・骨格形状情報を用いて個人頭部モデルを構築するためには、まず、セファロ上の計測点を定める必要がある。

同一の計測点が正貌・側貌セファロ画像上にそれぞれ投影されていれば、各画像上での2次元座標を統合することでその計測点の3次元座標が得られる。この手法はセファログラム3次元計測法として既に報告されている[10][11]。セファロ画像上にプロットして得られる各計測点の3次元座標をこの計測法により取得し、骨格と顔形状のフィッティングを行う。計測点は骨格輪郭線上に21点(うち解剖学的計測点13点)、顔輪郭線上に21点(うち解剖学的計測点10点)それぞれ選定し、これらに対応する特徴点を骨格、顔モデル上から選択した。計測点の抽出は、読みこんだ正貌・側貌セファロ画像上でマウスをクリックし、順次計測点をプロットすることで行った。図3にセファロ

上にプロットされた計測点を示す。

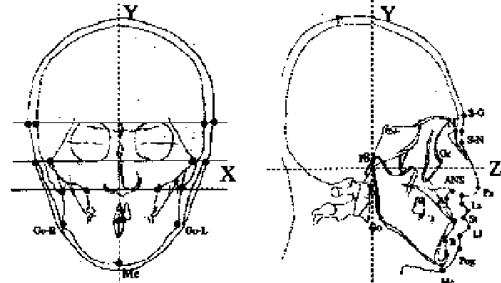


図3 セファロ画像上の解剖学的計測点

2. 4 計測点座標の取得

1) 拡大率の修正

セファログラムは図9に示すようにイヤーロッドによって頭部を固定し、X線源、被写体、撮像面間の距離を一定に固定した状態で撮影される。被写体上の計測点 A_0 はセファロ画像上では拡大された像として投影される(図4中 A_{LAT})。したがって、

への拡大率が変化する。求めるべき被写体上の計測点の3次元座標を (x_0, y_0, z_0) とし、側貌セファロ上での座標を (y_{LAT}, z_{LAT}) とすると、拡大補正式は以下のようなになる。

$$y_0 = y_{LAT} \times \frac{L_1 + k}{L_2} \quad z_0 = z_{LAT} \times \frac{L_1 + k}{L_2} \quad (2)$$

k は各計測点によって決まる値で、Y軸上における計測点では $k=0$ である。それ以外の点における k の値については、山崎らの人類学的計測に基づく日本人の平均値を参照した[10]。

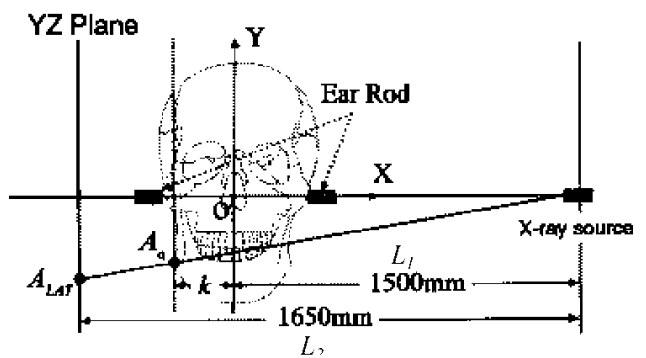


図4 側貌セファログラム撮影時の画像の拡大

2) 正貌セファロ撮影時の回転補正

正貌セファロ撮影時には、頭部をイヤードッドで固定してはいるものの、図5のようにX軸まわりの回転が生じる可能性があるため、補正処理を施す必要がある。セファロ画像水平軸(Z軸)とイヤードッドと眼窩下縁点(Or)を結ぶ線分のなす角度を θ とし、正貌セファロ上での座標を (x_{PA}, y_{PA}) とすると y_{PA} は次式より求められる。

$$y_{PA} = \frac{L_2(L_1+k)(z_{LAT} \sin \theta + y_{LAT} \cos \theta)}{L_1L_2 + (L_1+k)(z_{LAT} \cos \theta - y_{LAT} \sin \theta)} \quad (3)$$

3) 正貌セファロからの X_{PA} 値の取得

$Y=y_{PA}$ の直線を正貌セファロ上に表示し、その直線と骨格・顔表面輪郭線との交点をプロットすることで、各計測点の x_{PA} 値を得る。最後に、 x_{PA} を式(4)に代入することで、最終的な計測点の3次元座標 (x_o, y_o, z_o) を求める。

$$x_o = x_{PA} \times \frac{L_1 + z_o}{L_2} \quad (4)$$

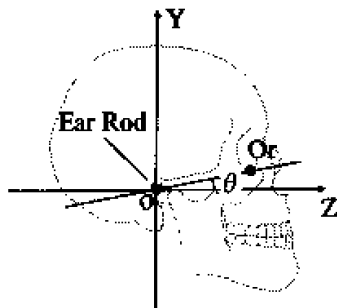


図5 正貌セファログラム撮影時の頭部の回転

2. 5 フィットティング方法

1) セファロ計測点データによる変形

セファロ画像から抽出した計測点の3次元座標データを利用し、標準頭部モデルを変形する手法について説明する。まず、頭部の幅のフィッティングを行う。図6中の x_1, x_2 はそれぞれ骨格輪郭上の計測点における幅を示している。この2つの線分の長さとして標準モデル上の対応する部分の長さ $(x_{1(std)}, x_{2(std)})$ の比を各計測点において求め (x_{r1}, x_{r2}) 、モデルの特徴点*i*における変換倍率 x_{ri} を次式の線形補間によって求め、特徴点を移動する。 S_n は補

間のステップ数である。

$$x_{ri} = \frac{i x_{r2} + (S_n - i) x_{r1}}{S_n} \quad (5)$$

次に、頭部の高さ及び奥行き方向のフィッティングを行う。図7に示すように、頭部を3つの部分(下顎前部、後部、上顎以上前部)に分け、それぞれの部分において変形を行う。2点の計測点における変位量 p_1, p_2 を用い、次式の線形補間によってモデルの各特徴点における移動ベクトル Δr_i を求め、モデルを変形する。

$$\Delta r_i = \frac{i p_2 + (S_n - i) p_1}{S_n} \quad (6)$$

2) 顔特徴点による変形

セファログラムからは顔の輪郭形状の情報しか得られないため、目や鼻、口など顔構成部位については顔特徴点を正面の顔面規格画像から抽出し、フィッティングを行う。

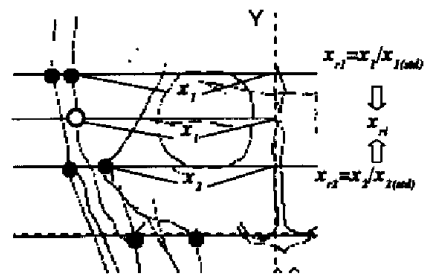
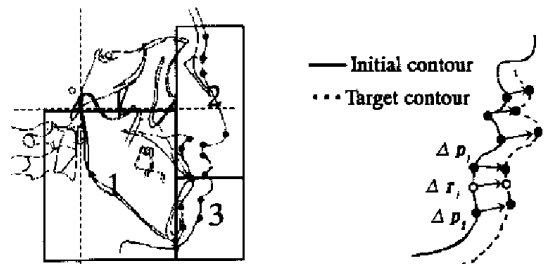


図6 頭部の幅のフィッティング



(a) Area division

(b) Vector interpolation

図7 頭部の高さ・奥行き方向のフィッティング

2. 6 フィッティングとシミュレーション結果

術前の顎変形症患者の頭部モデルを構築し、手術後の顔面形状変化を予測するシミュレーションを行った。上述の手法により、X線画像から抽出した計測点データと正面顔画像から抽出した顔特徴点を用い、頭部形状のフィッティングを行った結果を図8に示す。

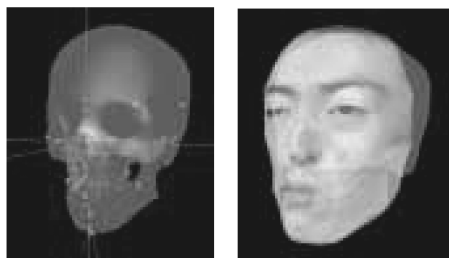
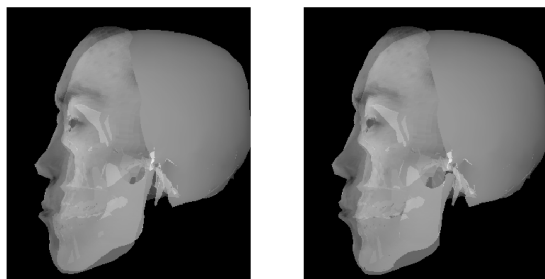


図8 骨格及び顔表面のフィッティング結果

この実験では、突出している下顎骨部分を後方に移動した際の顔形状変化をシミュレーションした。図9に術前のモデルと術後のシミュレーション結果を示す。予測結果は、若干の誤差を含んではいるものの、実際の術後顔輪郭と比べて比較的良好な結果が得られている。手術計画の立案と術後の予測については、従来は医師が正貌・側貌セファロから顔輪郭形状を平面的に予測する、あるいは、経験に基づいて骨格の立体像を予測するなど、主観的な判断によるところが大きかった。本手法は術後の顔の3次元的な変形を、頭部の解剖学的な構造を考慮に入れたモデリングを行った上で物理計算によって予測するものであり、任意視点からの頭部3次元画像が可視化できる。

現在、臨床データによる有効性の確認を行なっているところであるが、正面・側面のX線写真からの頭部立体モデルの構築手法は、精度は若干劣るものの、CTを利用する場合に比べて簡便かつ安全であり、幅広い臨床応用が期待できる。



(a) 術前

(b) 術後

図9 手術シミュレーション結果

3. 複数の手掛かりによる顔認識

シーン中での顔領域の切り出しは、これらの前処理として必要不可欠であり、色情報や動領域に着目した手法など多くの手法が提案されてきた[5][6]。色情報に着目する場合、環境の変化によって、着目する色の色相値・彩度が変化するという問題点がある。また、動領域に着目する手法は、パンチルトカメラや自律移動ロボットに搭載されたカメラのように、撮像系が動く場合に有効ではなく、その適用範囲は限定される。撮像系の変化に対して柔軟な手法としては、形状情報に着目した、画像間パターンマッチング手法が考えられる。しかしながら、大きさ、向き、位置が不明なパターンを探し出すための2次元画像のパターンマッチングにおいては、それぞれ可能なすべての場合について、類似度を計算する必要があり、計算量が極めて多くなる。また、一般的に、顔の向きや位置が時々刻々変化するため、単一のテンプレートによる探索では検出が困難であり、何らかの工夫が必要である。

ここに述べる筆者らの手法[12]は、テンプレート画像を対象画像上で縦横方向にずらして相関度を計算する前に、あらかじめ画像中の各点において、ニューラルネットワークによる縮尺・回転角度の推定を行う前処理を行い、推定された縮尺・回転角度を用いて類似度の計算を行うため、計算の手間が大幅に省けることが特徴である。さらに、部分テンプレートを複数枚用意し、検出結果を統合することで、対象画像中の顔の一部が隠れる場合でも顔を安定して発見することができる。

3. 1 処理手順

顔の部分に対応する、テンプレートとなるパターンを、大きさ $m \times n$ ピクセルの濃淡画像 $P(i,j)$ とする。また、探索対象となる入力画像の位置 (i,j) における輝度値を $I(i,j)$ とし、一致度の評価を行う対象領域の中心座標を (X,Y) とする。まず、 (X,Y) を中心とする $m \times n$ ピクセルの領域において、輝度値の正規化を行う。次に、対象領域中に目指すパターン P が存在するとした場合の回転角度・縮尺をニューラルネットワークにより推定する。続いて、ニューラルネットワークの出力である顔の縮尺と回転角度の推定値に基づいてテンプレート画像の向きとスケール変換を行い、姿勢と大きさの合ったテンプレートを作成した後に正規化相関度を計算する。部分テンプレートは東京大学原島研究室で公開している平均顔を元にして、顔の全体、

左右、中央、上下の部分を用いた。作成したそれぞれの部分テンプレートを用いて対象領域における相関値を計算し、最後に、得られた結果を統合することにより、顔領域を特定する。

なお、本システムは、撮影対象となる人物がカメラの前で大きく前後に動かない場合(机の前や車内)を想定しているため、顔の縮尺推定の際には、変動範囲をある程度限定して行った。また、顔の回転角度推定の際には、変動範囲を左右40度の範囲に限定した。

3.2 テンプレート用の顔画像の作成

平均顔画像(<http://www.hc.t.u-tokyo.ac.jp/>)に対して、幾何学変換(縮小・回転)を行うことにより、図10のようにテンプレート用画像を作成した。平均顔画像の大きさは100×100ピクセル、一番大きな顔全体のテンプレートの大きさは16×16ピクセルである。実際にテンプレート画像を作成する際には、以下の式7で表される逆変換により、テンプレート画像(変換後の画像)の各位置から、平均顔画像(元画像)における位置を計算し、その位置の最近傍の画素値を参照した。このような幾何学変換を行う場合、一般的には、変換後の位置と、その周囲の画素までの距離に応じた輝度値をそれぞれの画素から補間する必要があるが(線形補間法)、本システムでは、変換後の画像に対して比較的大きいサイズの元画像を用意しているため、これに似た効果を自動的に得ることができる。

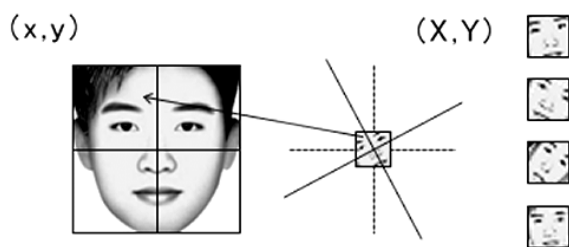


図10 テンプレート作成の例

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X/a \\ Y/b \end{pmatrix} \quad (7)$$

(x, y) : 平均顔画像の座標

(X, Y) : テンプレート画像の座標

a, b : 横軸、縦軸方向の縮小率

θ : 回転角度

3.3 ニューラルネットワークを用いた参照画像中の顔の回転角度・縮尺の推定

参照領域中に顔領域が存在すると仮定した場合の回転角度・縮尺をニューラルネットワークにより推定する。今回は、3層のパーセプトロン型ニューラルネットワークを利用した。入力信号として、最大16×16ピクセルの顔画像の輝度値(正規化処理後)を用いるため、入力層のセル数は最大で256の3層パーセプトロンとなる。縦方向・横方向の縮尺、回転角度を出力とするため、出力層のセル数は3であり、中間層のセル数は40とした。

ニューラルネットワークの学習段階では、様々な回転角度と縮尺を持つテンプレート画像を入力とし、各画像に対応する縦方向・横方向の縮尺、角度を教師信号として、バックプロパゲーション法で学習を行った。

テンプレートマッチングにおいては、学習後のニューラルネットワークを用いて、対象領域に顔が存在すると仮定した場合の縮尺と回転角度を求める。

図11と図12は、学習後のニューラルネットワークによる角度推定と様々な角度の顔画像に対する横方向縮尺推定の結果である。角度推定エラーの平均値は約3度であり、縦軸方向縮尺推定のエラーは8.3%であった。

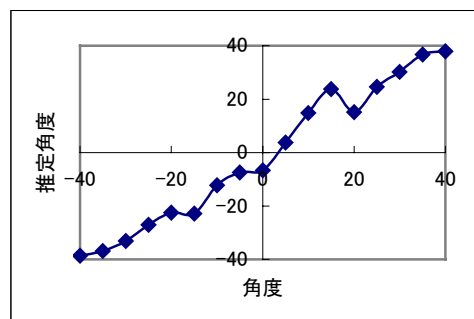


図11 NNによる角度推定

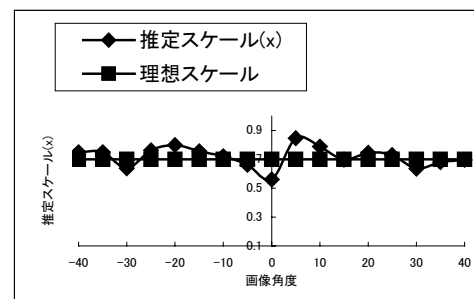


図12 NNによるスケール推定(縦軸方向)

3. 4 部分顔テンプレートと統合処理

図 1 3 のように、顔全体、顔の左右、中央、上下の 6 枚を部分テンプレートとし、それぞれのテンプレートについて、探索画像中の各点における類似度を、正規化相関により計算する。

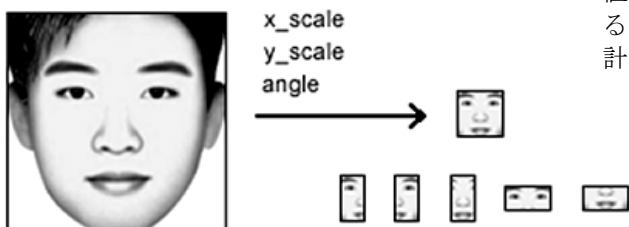


図 1 3 部分テンプレートの作成

次に、各部分テンプレートによるマッチングの結果を統合することにより顔領域を抽出する。まず、各部分テンプレートを用いたマッチングの結果をもとに、それぞれのテンプレートに対して、相関値の大きいものから上位 7 位までの位置を求める。最後に、検出位置・検出順位・相関値・テンプレート同士の位置関係を考慮して、顔が存在する可能性が高い場所にポイントを与える。この作業を行うことで、顔領域が含まれると推定される位置周辺の累積ポイントが高くなる。この領域を顔領域として特定する。

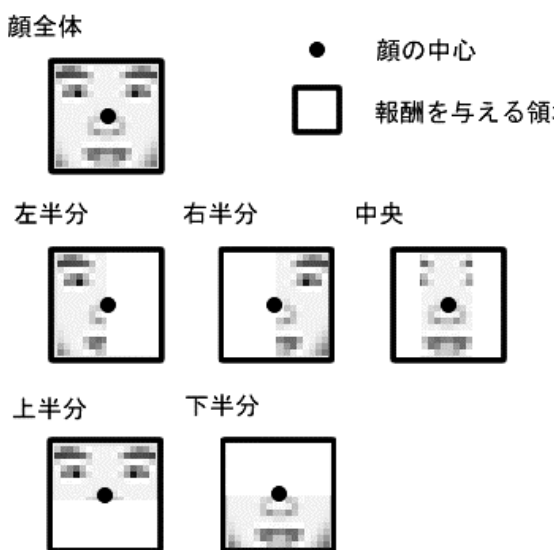


図 1 4 部分テンプレートと顔領域

報酬 1 : 検出位置・相関値を考慮した報酬

各部分テンプレートに対して、相関値が大きくなる位置において、それぞれ顔領域があると考えられる領域(図 1 4)に、以下の式に従う報酬 *Point* を与える。この評価式は、検出順位と相関値を考慮した式であり、検出順位が高いほど、あるいは相関値が高いほど大きな値を取るよう設計されている。

$$Point = \{6 + (7 - Rank)\} \times Value \quad (8)$$

Rank : 相関値順位

Value : 相関値

報酬 2 : 部分テンプレート同士の位置関係

それぞれの部分テンプレート同士の位置関係を考慮し、正しい位置関係を持つ場合、ボーナスとしてさらに報酬を与える。報酬の位置関係の評価は、図 1 5 のように、各部分テンプレートに対して、顔の中心となる座標間の距離計算し、これが 4 ピクセル以内の場合、正しい位置関係にあるとして、それぞれの中心を結んだ線分の中点を中心とする 16×16 ピクセルの領域に 3 ポイントの報酬を与える。

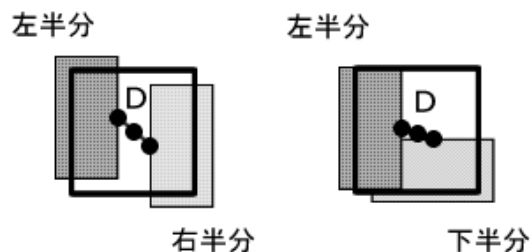


図 1 5 部分テンプレートの位置関係

3. 5 実験結果

最初に、各部分テンプレートによるマッチング結果の例として、正面顔と右半分の部分テンプレートによる結果を示す。図 1 6 に正面顔のテンプレートを、図 1 7 に右半分のテンプレートを用いてマッチングを行った場合の類似度が上位 7 位までの結果である。

これらを統合し、報酬の累積値をもとに特定された顔領域の特定結果を図 1 8 に示す。単独の部分テンプレートによるマッチングでの誤検出の影響を受けずに安定して顔を検出していることが分かる。



図 16. 正面顔のテンプレートによるマッチング結果



図 17 右半分テンプレートによるマッチング結果



図 18 . 累積結果に基づく顔の位置特定結果

4. まとめ

最近の研究の中から、歯科診断において撮影される X 線規格画像に基づく顔の個人モデルの生成法と複数の手掛かりによるカメラ画像からのロバストな顔認識について概要と結果を紹介した。

医学応用では、患者個人のモデル化が不可欠であり、かつ、かなりの精度が要求される反面、診断時の制約のために利用できるデータは制限されることが多い。したがって、データのない部分については、解剖学的な知見に基づいた標準モデル適用するなどして、与えられた条件の下で可能な限り個人に近づけるモデリングが必要となる。

一方、顔の認識においても、実応用を考えると得られるデータのバラツキや不完全性は避けられ

ない。ここでは、ニューラルネットワークを用いたテンプレートの姿勢推定と、部分テンプレートを用いたパターンマッチングを組み合わせ、画像中から顔領域を抽出する手法について述べた。

人間の認識系は、モデリングと識別処理のダイナミックなループ系によって、不完全データから状況に応じた処理を行なうことができるのだと思われる。我々の次の目標は、顔画像処理全体を統合することによって達成されるこのようなロバストネスである。

参考文献

- [1] 原島博, “知的画像符号化と知的通信,” テレビ誌, vol.42, no.6, pp.519-525, (1988).
- [2] N.Suzuki : “Planning system and support system for surgery using virtual reality,” Proc. 1st Int’l Symp.on Computer Aided Surgery, pp.20-21, 1994.
- [3] Yoshimitsu Aoki, Masahiko Terajima, Akihiko, Nakasima, Shuji Hashimoto : ” Simulation of Postoperative 3D Facial Morphology using Physics-base Head Model, The Visual Computer, Vol.17, Issue 2, pp.121-131, 2001
- [4]長谷川修, 森島繁生, 金子正秀, “「顔」の情報処理,” 信学論(D II), vol.J80-D- II, no.8, pp.2047-2064, 1997
- [5]赤松茂: “コンピュータによる顔の認識-サーベイ-,” 信学論(D II), Vol.J80-D- II, No.8, pp1215-1230, 1997
- [6]橋本周司, ”顔の認識と合成”, システム制御情報学会誌, Vol. 44, No. 3, pp. 102-109, 2000.
- [7]青木義満, 橋本周司: ”解剖学的知見に基づく顔の物理モデリングによる表情生成,” 信学論(A), vol.J82-A, no.4, pp.573-582, April 1999.
- [8]青木義満, 橋本周司: ”顔の物理モデルと計測への応用” パターン計測シンポジウム, pp.31-36, Oct. 1997.
- [9]青木義満, 寺嶋雅彦, 中島昭彦, 橋本周司: ” 頭部 X 線規格画像を用いた 3 次元頭部物理モデルの構築とその臨床応用”,通学論, Vol.J84-D-II, No.2, pp.390-399, 2001
- [10]山崎俊恒, 岩澤忠正: ”頭部における下顎の立体的位置および形態の研究,” 日矯歯誌, vol.40, no.2, pp.20-227, 1981.
- [11] B.Grayson et al. : ”The Three-dimensional Cephalogram:Theory, technique, and clinical application,” Am J Orthod Dentofac Orthop, vol.94, no.4, pp.327-337, Oct. 1988.
- [12]中北学, ピトヨハルトノ, 橋本周司: “複数テンプレートを用いたシーン中からの顔検出” 第4回動画像処理実利用化ワークショップ, 2003