正面顔画像からの輪郭特徴抽出

Extracting Contours and Features from Frontal Face Images

学生会員 横山 太郎[†], 田中 克明^{††}, 久富 健介^{†††}, 八木 康史[†],
谷内田 正彦[†], 原 文雄^{††}, 橋本周 司^{†††}

Taro Yokoyama[†], Katsuaki Tanaka^{††}, Kensuke Hisatomi^{†††}, Yasushi Yagi[†], Masahiko Yachida[†], Fumio Hara^{††}
and Shuji Hashimoto^{†††}

Abstract The aim of this research is to locate a face in an input image, then extract the contour lines of the face and the facial features, such as the eyes, mouth, eyebrows and nose in a standard office environment. In this paper we describe a system for extracting the facial features required to reconstruct a 3D model of a face from a 2D image. The technique for extracting the eye and mouth contour lines is based on the combination of a quadratic approximation of the edges and an active contour model. The technique for face outline contour line relies on the hybridization of a symmetrical active contour model and an elastic contour model with a standard facial shape model. We applied this system to 46 faces and compared the results with manually detected contours: 90% of the eye and mouth contours and 80% of the jaw contours and pupil positions matched the hand-prepared contours closely.

キーワード：顔画像認識，輪郭抽出，輪郭抽出，動的輪郭モデル

1. ま え が き

コンピュータと人間との自然なコミュニケーションのためには、従来のような論理情報の伝達だけではなく、人間の心理的な側面をも考慮したより感性豊かなコミュニケーションメディアの開発が望まれている。そして、人間の日常生活において顔表情は大変重要な意味を持っており、人間と情報システムとの円滑なコミュニケーションメディアを実現するため、コンピュータによる顔情報処理の自動化は欠かせないものである¹⁶⁾。

このような中、我々を含む複数の研究機関が連携し、情報処理振興事業協会における独創的情報技術育成事業に関わる開発テーマのひとつとして、コンピュータによる顔情報処理に焦点を当てたプロジェクト「感性擬人化エージェントのための顔情報処理システムの開発」を

展開してきた。本プロジェクトでは、工学のみならず心理学や医学などの分野も含めた顔関連分野における共通の実験用ツールを広く提供することを目的とし、コンピュータの中に、擬人化エージェントを合成するための顔画像の認識・合成に関する顔情報処理システムの構築を行っている¹⁾。このシステムでは、カメラなどで撮影された正面顔画像に対し、標準的な3次元情報を持つワイヤフレームモデルを張り合わせる方法で、擬人化エージェントを生成している。従来、このような作業（実顔画像をワイヤフレームモデルに張り合わせる作業）は、人（ユーザ）の手作業により、各顔器官（目、口、鼻など）と顔の輪郭線を正確にワイヤフレームの対応する部分に合わせる必要があった。特に目や口といった表情変化や発話に伴い大きく変形する部分や顔の向きによりモデルとのフィッティング誤差が目立つ顔輪郭は、正確な位置合わせが要求され、このような作業はユーザにとって負担となっている。したがって、簡便で効率の良い擬人化エージェント生成のためにも、フィッティングの自動化が望まれる。

そこで本研究では、一般背景のもとで撮影された正面顔画像から、顔を発見し、各顔器官の輪郭線ならびに顔の輪郭線を自動的に抽出する方法を提案する。

従来、このような輪郭線抽出においては、顔器官、顔輪郭に関しての大局的な性質を利用する方法が多くとられてきた。たとえばYuilleらは、目、口に関して、そ

1999年1月 情報処理学会コンピュータビジョンとイメージメディア研究会で発表
1999年2月22日受付, 1999年7月28日最終受付, 1999年9月1日採録

[†] 大阪大学 大学院 基礎工学研究科

(〒560-8531 豊中市待兼山町1-3, TEL 06-6850-6363)

^{††} 東京理科大学 工学部

(〒162-8601 東京都新宿区神楽坂1-3, TEL 03-3268-3905)

^{†††} 早稲田大学 理工学部

(〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1, TEL 03-5286-3233)

[†] Graduate School of Engineering Science, Osaka Univ.

(1-3, Machikaneyama, Toyonaka-shi, Osaka 560-8531, Japan)

^{††} Faculty of Engineering, Science University of Tokyo

(1-3, Kagurazaka, Shinjuku-ku, Tokyo 162-8601, Japan)

^{†††} School of Science and Engineering Waseda Univ.

(3-4-1, Okubo, Shinjuku-ku, Tokyo 169-8555, Japan)

これらの輪郭形状を2次曲線でモデル化したデフォーマブルテンプレートと呼ぶ形状モデルを提案している²⁾。同様に、小林らも、目や口の輪郭線を2次曲線近似により抽出している³⁾。顔輪郭に関しては、Brunelliらは、顔輪郭を楕円と仮定することで、輪郭線の抽出を行っている⁴⁾。一般に楕円や2次曲線など、与えるモデルが単純な場合、安定に抽出できる反面、個人や表情による形状の違いを考慮すると表現できる形状は制限され、正確な輪郭抽出には適さないものと思われる。一方、自由な輪郭形状が抽出できる方法として、Kassらにより提案された動的輪郭モデルがあり¹⁾、口輪郭や顔輪郭の抽出に利用されてきたが、初期位置ならびに背景や局所的なノイズに影響されやすく、一般背景のように、照明や背景条件が一定でない環境での利用は適さなかった⁵⁾。それに対し、我々は、顔の持つ普遍的特徴である左右対称性を利用し、顔輪郭抽出を正確に行う手法を提案した。しかし、対称性の制約は顔の左右方向の検出には適するが上下方向に関しては拘束が弱く、対象によっては正確な輪郭抽出ができなかった。その他、より人の顔器官や顔輪郭を表現しやすい方法として、Cootesらは、あらかじめ対象の輪郭形状を学習することで、統計的モデルとして表現する手法を提案している⁶⁾。また我々も、弾性バネにより顔の輪郭形状を表現するモデルを提案している¹⁴⁾。この方法の場合、多数の顔画像からバネ係数をあらかじめ学習することで、学習時の顔に近い形状(標準顔)の人は、正確に求められる。しかし、Cootesらのモデルも、我々の弾性モデルも、教示データに偏りがある場合や標準顔とは異なる個性的な人に関しては、必ずしも正確な抽出ができるとは限らなかった。

そこで、本論文では、複数の形状モデルや手法の統合、選択的利用により、口や目の輪郭と顔輪郭を正確にかつ安定に求める方法を提案する。

以下、顔輪郭抽出システムの全体概要について述べた後、各処理の詳細を示し、最後に、手作業により得た輪郭線と、提案手法により抽出した輪郭線との比較実験結果を示す。

2. 顔特徴抽出システム概要

本システムでは、標準的なオフィス環境での利用を想定し、一般的な背景の下で正面から撮影された顔画像を用いる。被写体は、閉口、開眼時の東洋人とする。処理内容は、顔画像から顔を発見し、さらに眉、目、鼻、口といった顔器官と顔の輪郭線を正確に抽出する。具体的には、以下に示す4つのステップからなる(図1)。

(1) 顔の発見と瞳の抽出

瞳・目蓋・眉にかけての鉛直線上の輝度分布パターンを利用し瞳候補の抽出を行う。抽出された瞳候補が正しいかどうかの検証を、肌色情報に基づいて抽出された顔領域と瞳候補の位置関係から行う。

図1 顔特徴抽出システム
Facial feature extraction system.

(2) 顔器官の概略位置決定

瞳中心点の位置を基準にして、眉・目・鼻・口の各顔器官が標準的に含まれる方形領域を設定、その領域内でテンプレート照合を行い、各顔器官が含まれる最小矩形領域を決定する。

(3) 顔器官の輪郭抽出

顔器官のうち、目と口に関しては、各顔器官の最小矩形領域内で矩形中心を囲む2次曲線を発見し、その曲線を初期位置とした動的輪郭モデルを利用し正確な輪郭形状を抽出する。鼻ならびに眉に関しては、テンプレート照合の結果に基づいた輪郭抽出を行う。

(4) 顔輪郭の抽出

ここでいう顔輪郭とは、顔の外形輪郭のうち瞳中心の左右から顎先までの輪郭線を示す。各顔器官の概略位置から顔器官を含む多角形領域を設定し、その位置を初期位置とし、動的輪郭モデルにより顔輪郭の抽出を行う。

3. 顔の発見と瞳の抽出

瞳位置の特定のために、本手法では、まず、瞳候補抽出、顔領域抽出をそれぞれ行う。次に、瞳候補と顔領域の統合を次の手順で行う。顔領域内に瞳候補のある場合には、顔領域内での瞳候補絞り込みを行う。顔領域内に瞳候補のない場合には、顔領域に依らず瞳位置を決定する。以下、瞳候補の抽出法、顔領域の抽出法、瞳候補と顔領域の統合の手順を述べる。

3.1 相互相関による瞳候補の抽出

瞳候補の抽出では、筆者らの提案した相互相関による手法³⁾を用いることで複数の瞳座標の候補を抽出する。以下、瞳候補抽出手法の処理手順を説明する。瞳から鉛直線に沿った眉までの顔画像の輝度値分布は、顔が多少回転しても瞳の鉛直上方にはまぶた、その上に眉があり、瞳の黒、まぶたの肌色、眉の黒という輝度値パターンの配列は変わらない。そこで、図2に示すような瞳中心から眉までの鉛直線に沿った輝度値の分布パターンをあらかじめ複数の顔画像から抽出し、平均化することで、標準的な眉から瞳にかけてのテンプレート(基底)を作成する。そして、この1次元テンプレートを用い、相互相関法により瞳候補を探索する。従来手法では、相互相関

図 2 瞳抽出のためのテンプレートデータ
Template data for pupil extraction.

図 3 色相ヒストグラム
Hue histogram.

値の上位 2 候補を瞳として選択していた。しかし、背景が煩雑な場合、必ずしも上位 2 候補に両目の瞳が入るとは限らない。そこで、本手法では経験的に相互相関値上位 10 個を瞳候補として選び、3.3 節の処理により瞳位置を確定する。

3.2 肌色情報を基にした顔領域抽出

一般に顔の色は、たとえ東洋人を対象とした場合でも、個人差、季節の違いなどにより異なる。そのため、正確な肌色モデルをあらかじめつくることは難しい。したがって、肌色に基づく顔領域の抽出においては、動的に肌色を推定する必要がある。

本手法では、以下に示す手順により顔領域の抽出を行う⁷⁾。まず、入力画像から色相のみを取り出し⁸⁾、そのヒストグラムを生成、平滑化することで色相ヒストグラムを作成する(図 3)。次に、肌色分布は単峰となると考え、肌色が分布し得る色相範囲内(図 3)で、ヒストグラムの頻度が最大となる色相 h_{max} を肌色の中心とする。なお、肌色が分布し得る色相範囲に関しては、実測データから経験的に求めた。次に、最大色相点 h_{max} を中心に、肌色分布が単峰な色相範囲 ($h_{low} \sim h_{high}$) を求める。そして、この色相範囲上限および下限の頻度値のうち大きい側の頻度値 $P_{s_{min}}$ と、最大色相点での頻度値 $P_{s_{max}}$ とから、(1) 式に示す割合(頻度値 P_s)までを肌色範囲と定め顔領域の抽出を行う。

$$P_s = P_{s_{max}} - 0.95(P_{s_{max}} - P_{s_{min}}) \quad (1)$$

次に、求められた肌色画像から x , y 軸方向に各々 1 次元射影変換を行い、平滑化処理を施すことで、肌色ヒストグラムを作成する(図 4)。そしてこの肌色ヒストグラムに対し計数値が最大となる各々、 x , y 座標 x_{max} , y_{max} を求め、ヒストグラムの最大値 $P_{sx_{max}}$, $P_{sy_{max}}$ のそれぞれ 0.25 倍、0.5 倍を閾値 P_{sx} , P_{sy} とし、最大値周りで閾

図 4 一次元射影変換による顔領域抽出
Face region extraction by 1D projection.

図 5 瞳候補選別マスク

Comparison of relative location between pupil and face region.

値以上の区間 ($x_{left} \sim x_{right}$, $y_{top} \sim y_{bottom}$) を顔領域として抽出する。なお、閾値決定のためのパラメータ 0.25 倍と 0.5 倍は、実験を通して経験的に求めた。

3.3 瞳位置の確定

動的肌色抽出によって求められた顔領域の結果と瞳候補の位置関係から、正しい瞳の候補の組を抽出する。一般に、両瞳が顔領域に対し、上下方向や顔の下方に存在することはない。そこで、顔領域と両瞳の簡単な位置関係を制約に瞳位置の確定を行う。実際には、図 5 に示すように顔領域の外接矩形に対し、上部 2/3 の領域 A, B を各瞳の存在域とし、前述の瞳候補のうち、A, B の領域内各々で相互相関値が最大となるものを瞳位置として確定する。ただし、A, B 両領域内に瞳候補が存在しない場合は、顔領域または瞳位置の抽出失敗の可能性が考えられるが、経験的に上位 10 候補内には瞳が含まれていたことから、ここでは顔領域の失敗と仮定し、領域外で相互相関値が最も大きいものを瞳候補とする。このような処理を行うことで、たとえば瞳候補の上位が片方の領域に偏る場合、また領域外となる場合でも、顔領域から下位の候補を選択することができる。

図 6 は、相互相関法による抽出結果の一例である。この例は、相互相関値の上位が瞳位置にこない例で、相互相関法のみを用いると、複雑な背景の影響を受け、瞳と類似したパターンが上位候補となり、正しい瞳抽出ができなかったが、本手法では、顔領域の情報(図 7)から瞳が抽出できる(図 8)。ただし、このような場合、相互相関値が低いため、上位候補で瞳位置が得られる場合と比べ、瞳位置の抽出精度は下がる。しかし、以後の輪郭抽出のためには瞳内部にあればよく、本システムの遂行上では問題ない。

4. 瞳を中心とした顔器官位置関係限定

本章では、眉・目・鼻・口の各顔器官を含む領域を抽出

図 6 相互相関法による瞳抽出失敗例

A wrong result of pupil extraction with cross correlation.

図 7 肌色領域の抽出結果

A result of skin color region.

図 8 肌色領域と瞳抽出の併用による顔発見と瞳抽出の結果
A result of face region and pupil extraction with proposed method.

図 9 顔器官存在範囲

Search window region for facial features.

する手法について述べる。本手法は、顔器官の相対位置関係がすべての人に対して共通であるという特徴と、各器官の形状的な特徴を利用することで、以後の顔器官輪郭線を抽出するための各顔器官の存在領域を決定する。

4.1 顔器官領域の相対位置関係

多少の個人差はあっても、顔器官の大まかな位置関係は、ほぼ同じと考えることができる。これまで我々は、30人の人物の6基本表情を表出してもらった顔画像を用い、すべての人物のすべての表情において眉、目、鼻、口がそれぞれ含まれる領域を調べ、瞳間距離により正規化することで顔器官の存在領域の統計モデルを作成し(図9)、表情認識システムで利用してきた³⁾。しかし、このモデルでは存在範囲が広すぎるため、そのままでは正確な顔器官および顔輪郭抽出には適さない。本手法では、大きな表情変化のない顔画像を用いることを前提としていることから、上述の統計モデルに加え平常時の位置特徴を考慮することで、各器官の存在領域を限定する。

図 10 目領域

Eye region.

図 11 口領域

Mouth region extraction and polar coordinate representation.

4.2 顔器官の存在領域の抽出

(1) 目領域の獲得

目に関しては、前節の処理により瞳位置をあらかじめ求めていることで、位置関係に関する個人差は他の器官と比べ少ない。そこで、顔画像から計測した瞳間距離と目領域の大きさのデータに基づいて目の存在領域を限定する。そして、以降の輪郭抽出で必要となる目領域マップを作成する。目領域マップとは、図10(a)に示すように存在領域に内接する楕円領域内を瞳座標を中心とする極座標系に展開したもの(図10(b))をさす。図10(b)で、横軸は角度 θ (3deg/pixel)、縦軸は瞳座標からの距離(r)である。なお、楕円の極座標変換の場合、瞳座標からの距離 r が角度 θ により異なる。そこで、図10(b)では、楕円領域外となる部分に、便宜上、各方向での楕円輪郭部の値を入れている。

(2) 口領域の獲得

口領域に関しては、基準となる瞳位置から離れていることもあり、被写体による位置のばらつきが大きい。そこで、顔器官の統計モデルを処理領域として、以下に示す口領域抽出処理を施す(図11)。まず位置検出のために、微分処理(図11(a))を行い、平常顔時の口の大きさから経験的に求めた楕円形のテンプレート(楕円内部がすべて1)を用いたマッチングを行う(図11(b))。ここで口の外形サイズは他の顔器官に比べ大きさが様々であるため、テンプレートマッチングのみではテンプレート中央に口が位置しない場合が多い。入力画像上で、テンプレート内の領域を2値化し(図11(c))、黒色領域をラベリングする。そして、ラベル付けされた領域中の最大面積をもつ領域を口領域として抽出し(図11(d))、その重心を口の中心位置とする(図11(e))。さらに、目の場合と同様に、入力画像のうち、口中心位置を中心とする楕円テンプレート内を極座標変換することで、口領域マップを生成する(図11(f))。

図 12 各顔器官領域

An extracted window region of facial features.

(3) 眉・鼻領域の獲得

眉は髪の毛が掛かり、眉の位置すら判断するのが困難な場合がある。そこで、眉形状を矩形でだまかに近似できると考え、垂直方向の微分処理を行い、眉の上下の輪郭を強調し、このエッジ強度画像に対し、統計モデルで得られた存在範囲を探索域として矩形テンプレート（内点はすべて1）とのマッチング処理を行い、テンプレート内のエッジ強度の和が最大の座標を求めることで眉の位置を決める。なお矩形テンプレートの大きさは、平常顔時の大きさから経験的に求めた。

同様に鼻領域に関しても、鼻頭部の輪郭形状が円弧状ということから、半楕円形状のテンプレート（内部がすべて1）を用意することで、鼻の位置を推定する。そして、鼻輪郭線抽出のために、この鼻の位置を中心とした極座標変換マップを生成する。図 12 は、4.2 節において述べた手法により抽出された各顔器官領域の一例である。

5. 顔器官および顔輪郭線の抽出

本章では、眉・目・鼻・口の各顔器官および顔の輪郭線を抽出する手法について述べる。顔器官輪郭線の抽出は、エッジ列に対する2次曲線当てはめを基本とし、特に精度の高い抽出の求められる目、口については動的輪郭モデルを併用する。さらに、顔輪郭線については、2つの特性を持つ動的輪郭モデルの混成手法を用いる。

5.1 顔器官の輪郭抽出

(1) 目、口の輪郭抽出

筆者らはこれまで、目と口の輪郭抽出手法について“2次曲線当てはめ法³⁾”と“動的輪郭モデル法¹⁰⁾”の2つの手法をそれぞれ提案してきた。これらの2手法については、その手法の違いから、相反する長所と短所を持ち合わせていた。そこで、本稿では両者の長所を生かした形で組み合わせた手法を提案する。

(a) 従来手法の概要

(i) 2次曲線当てはめ法 目輪郭については、暗から明のパターンを持つテンプレートを用い、4章で作成した目領域マップ上で相互相関により瞳輪郭を抽出し、瞳の上下2点を基準座標として求める（図 13(a) 白円）。次に2つの基準座標を固定点とし、上下まぶた輪郭として図 15(a) 中、番号1から4と示された4本の2次曲線当てはめを行う。例えば図 15(a) 番号1の近似曲線の場合、2次曲線の右端となる点 (P_x, P_y) を固定、図 15(a)

図 13 2次曲線当てはめ法による目輪郭抽出

Eye contour extraction using quadratic approximation.

図 14 2次曲線当てはめ法による口輪郭抽出

Mouth contour extraction using quadratic approximation.

図 15 2次曲線当てはめ位置

The position of quadratic approximated lines for eye contours and mouth contours.

に示す斜線領域内で、(2) 式の近似曲線が最も当てはまる（実際には、2次曲線上の平均輝度が最小となる）位置 (u, v) を探索する。

$$y = \frac{v - P_y}{u^2} x^2 + P_y \begin{pmatrix} -180 \leq u \leq -90 \\ 0 \leq v \leq \frac{1}{10} x + P_y \\ P_x = 0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

同様に、番号2, 3, 4に対応する2次近似曲線を確定させた後、交差する2次曲線（図 15(a) ならば、番号1と3, 2と4）の交点として端点位置並びに輪郭線を求める（図 13(b)）。図 13(c) に2次曲線近似による抽出例を示す。また、口輪郭についても、口領域マップ上で、目と同様の相互相関計算を行うことで、口の両端を基準座標として求め（図 14(a)）、口両端点を決定する（図 14(b)）。両端点を基準とし唇上下部に対応する点列に対しては、画像の微分値を用い、唇中央部については、画像の暗点を用い、原画像に対して図 15(b) に示すように上唇2本、下唇2本、唇中央2本の2次曲線近似を行うことで口輪郭を抽出する（図 14(c)）。

(ii) 動的輪郭モデル法 動的輪郭モデル¹¹⁾は、滑らかな曲線を抽出するのに適した表現で、これまで多くの研究者により利用されてきた。一般に、目や口の輪郭は、2つの滑らかな曲線により表現される。そこで、これまで2本の動的輪郭モデルを目や口の上下から収束させることで、目や口の輪郭を抽出してきた¹⁰⁾。実際は、図 16 に示す存在領域の輪郭部（点線上）に各々上下まぶたに対応するように動的輪郭モデルを初期配置し、式3に示すエネルギー関数 $E_{\text{snake}}(v(s))$ を最小化することにより輪郭線抽出を行う。

$$E_{\text{snake}}(v(s)) = \int_0^1 E_{\text{internal}}(v(s)) + E_{\text{image}}(v(s)) + E_{\text{control}}(v(s)) ds \quad (3)$$

ここで、 $v(s)$ は輪郭モデル上の点、 $E_{\text{internal}}(v(s))$ は輪郭点列の滑らかさを示す内部エネルギー項、 $E_{\text{image}}(v(s))$

図 16 複数の動的輪郭モデルを用いた目輪郭抽出
Eye contour extraction using multiple snakes.

は輪郭点の画像特徴から得られる画像エネルギー項で

$$E_{\text{image}}(v(s)) = -w_{\text{edge}} |\nabla I(v(s))|^2 \quad (4)$$

の様に画像の1次微分とした。ここで、 $I(v(s))$ は輪郭上の点 $v(s)$ における画像の輝度値で、 w_{edge} は重み係数である。 $E_{\text{control}}(v(s))$ は輪郭線の法線方向から加える外部エネルギー項で、Cohenらにより提案¹²⁾された、輪郭線の法線方向から加わる圧力エネルギー $E_{\text{press}}(v(s))$ を用いた。 $E_{\text{press}}(v(s))$ は次のように定義される。

$$\frac{\partial E_{\text{press}}(v(s))}{\partial x} = w_{\text{press}} \frac{-v_s(s)}{\sqrt{v_s(s)^2 + 1}} \quad (5)$$

$$\frac{\partial E_{\text{press}}(v(s))}{\partial y} = w_{\text{press}} \frac{1}{\sqrt{v_s(s)^2 + 1}} \quad (6)$$

$v_s(s)$ は $v(s)$ の1次微分値である。このモデルでは、口の両端や目尻といった尖端部分は、2本の動的輪郭モデルの交点として表現できる。

(b) 提案手法

提案手法では、上述の2手法の特徴を活かすことで、正確な輪郭形状を安定に求めることを目指す。一般に、2次曲線当てはめ法では、2次曲線で輪郭形状を表現することから、複雑な輪郭は表現しきれないが、処理対象の目領域が大まかに合っていれば、ノイズなどの影響を受けにくく、安定に輪郭抽出ができるという長所がある。一方、動的輪郭モデルは、高次の曲線として輪郭線を表現するため、複雑な曲線も表現可能であるが、初期位置の影響を受けやすいという欠点がある。

そこで、本手法では、図17に示すように2次曲線当てはめ手法により輪郭の概略形状を抽出し、その位置を動的輪郭モデルの初期位置とすることで顔器官の輪郭線の抽出をする。具体的には、まず(i)と同様に、目輪郭、口輪郭を2次曲線で近似する(図17(a))。次に、求めた輪郭上に動的輪郭モデルを初期配置し(図17(b))、輪郭モデルをエネルギー最小となる形状へ変形させる(図17(c))。また、輪郭モデルの外部エネルギー項に、2次曲線当てはめにより得られた端点からの距離に応じた端点エネルギー $E_{\text{tip}}(v(s))$ を加えた。

$$E_{\text{control}}(v(s)) = E_{\text{press}}(v(s)) + E_{\text{tip}}(v(s)) \quad (7)$$

端点エネルギー $E_{\text{tip}}(v(s))$ は、(8)式のように定義した。

$$E_{\text{tip}}(v(s)) = -w_{\text{tip}} D_{\text{tip}}(v(s)) \quad (8)$$

ここで、 w_{tip} は重み係数、 $D_{\text{tip}}(v(s))$ は2次曲線当てはめにより得られた端点までの距離を示している。この端点エネルギー $E_{\text{tip}}(v(s))$ は、端点付近での $E_{\text{image}}(v(s))$

図 17 顔器官輪郭抽出
Facial feature contour extraction.

図 18 目輪郭抽出
Eye contour extraction.

黒枠は目領域、点線は2次近似曲線、矢印で囲まれる範囲を利用。

図 19 眉、鼻輪郭抽出
Eye-brow and nose contour extraction.

(a)は眉輪郭探索範囲を決める2次近似曲線設定方法、(b)は鼻輪郭抽出の過程

の影響が小さい場合においても、2次近似曲線から求めた端点に引っかかるためのエネルギー関数である。以上の動的輪郭モデルが収束した位置を最終的な輪郭抽出結果とする。

ただし、目輪郭線については、まぶたの影や瞳などの影響により、2次曲線近似で得られた輪郭線が両端点で実際の輪郭線より内側に誤る場合がある。このような場合でも、目の中央付近での輪郭は誤ることは少ない。そこで、動的輪郭モデルの初期位置には、2次曲線近似の結果のうち中央部分(3分の2)と、その両端点を目矩形領域の頂点と結んだ2直線上に配置することで、目輪郭の近傍から動的輪郭モデルの収束を可能にする(図18参照)。

(2) 鼻・眉の輪郭抽出

眉輪郭抽出は、4章において求めた矩形領域内で、眉上下部の形状を2次曲線近似する。近似曲線は、図19aで示すように、まず、下の輪郭について眉領域矩形左下点、右下点と、図中A1領域内の任意の点を通る2次近似曲線を描き、次に上の輪郭について、眉領域矩形左下点と、眉領域右上点の任意の点、図中A2領域内の任意の点を通る2次近似曲線を描きその内側領域を眉存在範囲とする。さらに、眉存在範囲内を2値化、ラベリングし、ラベル付けされた中で最大面積の領域を眉領域とすることで眉輪郭を決定する。

図 20 顔器官輪郭抽出結果例
A result of facial feature contour extraction.

図 21 口輪郭の手法別抽出結果
Comparison of mouth contour extraction.

次に鼻輪郭に関しても、目、口と同様に4章で作成した半楕円の放射状データマップ（図 19(b)-2)）を用い、鼻輪郭が比較的暗くなっていることから明（鼻）-暗（鼻の下影部）-明（鼻と口の間）という輝度変化パターンを角度軸方向に沿って、相互相関法により抽出することで鼻輪郭を決定する。

（3） 顔器官輪郭線の抽出例

以上の処理を用い、口、目、鼻、眉の各顔器官の輪郭線を抽出した結果の一例を図 20 に示す。図 21 は、特に精度の要求される口輪郭について、手法ごとの特徴がよく表れた図 20 とは別の対象に対する抽出結果の例で、従来の動的輪郭モデル法では、左上の薄いひげに影響を受け誤った輪郭線を抽出しており、また2次曲線当てはめでは、上唇の左右端付近で輪郭に沿わず誤っている。それに対し、提案手法では、ノイズの影響も受けず、実際の輪郭線に沿った正確な輪郭線の抽出ができています。

5.2 顔輪郭の抽出

本手法では、大局的特徴である軸対称性の拘束と、平均顔から作られた標準顔形状による拘束を持つ2種類の動的輪郭モデルを用意し、対象となる顔の形状に応じて、モデルを切り替えることで、顔輪郭を抽出する。以下、2つの顔輪郭抽出モデルおよび、提案する顔輪郭抽出のための動的輪郭モデル混成手法について述べる。なお、動的輪郭モデルを用いるには、初期位置を設定する必要があるが、入力画像の背景は、必ずしも一樣なものとは限らない。そこで、本手法では、初期位置を、図 22 の黒線に示すように顔器官を外側から囲む顔内側に設定する。

（1） 軸対称性拘束を持つ動的輪郭モデル

一般に正面顔の場合、顔輪郭の普遍的特徴として、左右対称性（軸対称性）がある。これまで、われわれは動的輪郭モデルのエネルギー項のひとつとして軸対称エネルギー項を定義することで、顔輪郭を抽出するための動的輪郭モデル（以降、軸対称モデルと呼ぶ）を提案して

図 22 顔輪郭線抽出のための初期位置
Initial position for extracting face outline contour.

図 23 弾性輪郭モデルと標準顔形状
Elastic contour model and standard face shape.

きた¹³⁾。この軸対称モデルは、Cohen らにより拡張された動的輪郭モデル¹²⁾を元に、収束時の各タイムステップ毎に対称軸を設定し、その軸に対する対称性を崩さないような拘束を持つモデルである。このモデルの特徴として、個人差によらない収束を期待することができるが、対称軸に垂直な方向への直接的拘束とはならないために、顎と首との境界があいまいな人に対しては、顎と首との境界付近での収束が不安定になりやすかった。

（2） 標準顔輪郭形状拘束を持つ顔輪郭抽出モデル

混成手法に用いるもう一方の輪郭モデルは、標準顔輪郭形状拘束を持つ顔輪郭抽出モデル¹⁴⁾（以降、標準顔形状モデルと呼ぶ）である。このモデルは、制御点列をバネで結合させた弾性輪郭モデル¹⁵⁾で、あらかじめ用意した標準顔輪郭形状との形状差からおきる弾性エネルギーと、画像特徴から得られる画像エネルギーの和を最小にすることにより輪郭線を求める方法である。

実際には、顔下部の輪郭モデルは、図 23 左に示すような制御点と隣接2制御点間と隣接3制御点間に張られた2種類のパネから構成される。このモデルの各辺には、その収縮、拡大に比例する復元力が作用し、隣接する2辺の挟角部分にはその角度変化に比例する復元力が作用する。したがって、あらかじめ定義しておいた標準顔輪郭形状（図 23 右）の辺、角度をこのモデルの自然長、自然角度とすることにより、標準顔輪郭形状との差が大きい状態は、その差を減らすような力を受け、より標準形状に近い形へと変化する。

この手法の特徴としては、輪郭が部分的に不明瞭な場合も、それらしい輪郭線を抽出することができる利点がある反面、標準顔形状から外れた輪郭の場合も標準顔形状に近い輪郭を出してしまう欠点がある。

（3） 最適モデル選択による顔輪郭抽出

軸対称モデルの問題点は、顔の縦方向の軸についての対称形拘束のため、軸と垂直方向の輪郭に対しては拘束とはならない点である。すなわち、撮影条件や被験者の特徴により、顎と首の境界が不明瞭な場合、正確な顎と

図 24 混成手法処理フロー

Processing sequence of hybrid facial contour extraction method.

首境界の輪郭線を抽出することが困難になることがある。また、標準顔形状モデルの問題点として、標準顔形状から離れた顔に対しては誤った収束をする傾向にあることと、初期位置によっては探索範囲の設定の不具合により収束結果が変わってくることが挙げられる。

そこで、本手法では、両モデルの長所を活かし、図 24 のような基準で両モデルを切り替えて用いることで、顔輪郭線を抽出する。以下に、処理の流れを示す。

まず、2つのモデルのうち、より大局的な特徴を捉えている軸対称モデルにより初期収束を行う。次にその結果に対し、標準顔形状モデルで用いる標準顔形状との形のずれを測る。標準顔形状モデルに近ければ、標準形状モデルを当てはめても正しく解が出せると考えられるため、最終収束は標準形状モデルで行う(図 24 経路 1)。

一方、初期収束の結果が、標準顔形状から逸脱した形であった時、その理由として、対象が標準的な顔輪郭をしていなかった場合と、誤った位置に収束しつつある場合、が考えられる。そこで、初期収束終了時点での顔輪郭モデルの輪郭点列に対し、顔輪郭としての信頼度を測り最終収束の方針を決定する。正しい顔輪郭にモデルが収束している場合、すべての輪郭点で画像エネルギーが小さくなると考えられることから、信頼度評価の基準は標準形状モデルの画像エネルギーの一部である輪郭線上の輝度値の総和を用いた。信頼度評価値が、閾値以下の場合には、軸対称モデルでは誤った収束をしていると判断し、標準顔形状モデルでの収束を行う(経路 2)。閾値以上の場合には、対象の顔形状が元来標準形から離れたものであったとして、引き続き軸対称モデルによる収束を行い、それを最終結果とする(経路 3)。また、標準顔形状モデルでの最終収束を行う場合(経路 1,2)には、探索範囲の決定も前述信頼度の大きさに応じて設定した。なお、輪郭付近は輝度値が低くなっているため、その総和は小さいほど信頼度は高くなる。また、信頼度の閾値は経験的に設定した。

(4) 顔輪郭線抽出例

2つの画像に対する軸対称モデル、標準形状モデルと提案手法による抽出例を図 25、図 26 に示す。

図 25 顔輪郭線抽出例 1

Face outline contour(example 1).

図 26 顔輪郭線抽出例 2

Face outline contour(example 2).

図 25 では、(b) の標準形状モデルが向かって右側のほほ付近で失敗している。ほほの外にある背景によってできたエッジを含めて構成される輪郭線が標準形状に近くなったためと考えられる。提案手法と、軸対称モデルでは、問題なく正確な輪郭線を求めることができた。図 26 は、(a) の軸対称モデルが向かって左側の首との境界付近で失敗している例である。失敗している付近では、軸対称の拘束が利きにくく、また、かなり連続した区間で不鮮明となっていることが原因である。このような画像に対しても、提案手法と、標準顔形状モデルでは、正しい輪郭線を抽出することができている。

6. 総合評価と検討

本章では、瞳中心、目輪郭線、口輪郭線、顔輪郭線について、手入力結果との比較実験を行った。以下各抽出結果を示す。

6.1 実験方法

顔特徴抽出システムの検証実験には、正面から撮影された、眼鏡、ヒゲなしの東洋人の顔画像 46 枚を用いた。目・口については、動的輪郭モデルのみを用いる方法と、2次曲線当てはめの方法、顎については、軸対称性拘束を持つ動的輪郭モデルと、標準顔輪郭形状拘束を持つ顔輪郭抽出モデルとの比較をした。評価のための基準として、実験を行なった顔画像上を、被験者 10 人にマウスで指示してもらった。1pixel は画面上、0.65mm で表され、顔全体は約 160×220mm の大きさに提示した。指示してもらった点は、左右の瞳中心 2 点、左右の目輪郭点それぞれ 12 点、口は 17 点、顎は 21 点の計 59 点である。瞳中心は指示してもらった点の平均点を基準点とし、目・口・顔の輪郭は、指示してもらった点を平均化し B-Spline 曲線近似を行った曲線を基準輪郭とした。

6.2 実験結果

10 人の被験者のそれぞれの入力と基準点および基準線からの距離を求めた。各器官ごとに、求めた距離の平均、

表 1 手入力誤差 (単位: pixel)
Hand input error.

	瞳	目	口	顔
平均	1.28	1.05	1.11	1.37
標準偏差	0.76	0.88	0.87	1.22
95パーセンタイル	2.24	2.73	2.82	3.39

瞳抽出結果手入力との誤差

図 27 瞳中心抽出結果

A result of pupil extraction.

表 2 目輪郭線抽出結果 (平均, 標準偏差) (単位: pixel)

Estimated error of eye contour extraction (average error, standard deviation).

	提案手法	動的輪郭モデル	2次曲線近似
誤差平均	1.20	1.40	1.33
標準偏差	0.94	1.13	1.65

標準偏差, 全データの95%が含まれる値(95パーセンタイル)を求めた(表1). 手入力でもある程度の誤差が起ることから, 以降では, 正解, 不正解の基準を95パーセンタイルとし, それ未満を正解, それ以上を不正解であると考えことにする.

(1) 瞳中心

背景は均一でないにもかかわらず, すべての画像においてほぼ正しく抽出することができた. 基準点からの距離は, 平均2.36pixel, 標準偏差2.81pixelであり, 内訳は図27のようになった. 正解の基準である95パーセンタイル以下(2.2pixel以下)のものは77%であった.

(2) 目輪郭線

瞳抽出の誤差の大きかったものも含めすべての画像に対して, 目輪郭線を抽出した結果の基準輪郭線からの距離は表2, 図28のようになった. 平均, 標準偏差とも他の2手法に比べ向上している. 目は比較的是っきりとした輪郭線が表れるため, どの手法でも90%の輪郭点で手入力95パーセンタイル以下となった. 2次曲線当てはめでは, 端点の決定を誤らなければ手入力に非常に近い輪郭線を抽出できていたが, 黒目と白目の境界付近も目の端点と似たパターンを示す場合があり, 端点を誤り大きな誤差となってしまう場合があった. 提案手法では, そのような大きなミスは起こらなかった.

(3) 口輪郭線

口輪郭線抽出結果の基準輪郭線との距離は表3, 図29のようになった. 距離の平均, 標準偏差, その内訳についてもすべての区分について, 他の2手法と比べ向上している. また88%の輪郭点で手入力95パーセンタイル(2.82pixel)以下となった.

(4) 顔輪郭線

提案する混成手法と, その元となる2手法を用いて輪郭抽出を行った結果を表4, 図30に示す. 誤差平均も,

目輪郭の手入力誤差

図 28 目輪郭抽出結果

Results of Eye contour extraction.

表 3 口輪郭線抽出結果 (平均, 標準偏差) (単位: pixel)

Estimated errors of mouth contour extraction (average error, standard deviation).

	提案手法	動的輪郭モデル	2次曲線近似
誤差平均	1.53	2.23	2.05
標準偏差	1.50	1.87	2.37

口輪郭の手入力誤差

図 29 口輪郭抽出結果

Results of mouth contour extraction.

表 4 顔輪郭線抽出結果 (平均, 標準偏差) (単位: pixel)

Estimated error of face outline contour extraction (average error, standard deviation).

	提案手法	軸対称モデル	標準顔輪郭モデル
誤差平均	2.83	3.95	4.09
標準偏差	4.45	5.79	5.09

顔輪郭の手入力誤差

図 30 顔輪郭抽出結果

Results of face outline contour extraction.

標準偏差も元となった2手法の結果を上回った. また全体の78%が95パーセンタイル(3.39pixel)以下となり, 正解率も元の手法に比べ向上していることがわかる. 軸対称モデルでは, 顎と首の境界付近で首まで広がって失敗することがあり, 標準顔形状モデルでは, 顎先と口の中間付近に標準形状の形に収束してしまう場合や背景によってできたエッジを含めて, 構成される輪郭線が標準形状に近くなったため失敗したものもあった. 提案する手法では, そのようなケースが減り, 軸対象モデル, 標準顔形状モデルの欠点を補いあうことができた. また, 実験を行った46例中, 39例が標準形状モデルで最終収

束を行い、7例が軸対称モデルが選択された。上記軸対称モデルが選択された7例中6例について標準形状モデルでの収束結果よりも良い結果が得られた。このことから、顔の形状が標準形状から外れても、正面顔の大局的な特徴である軸対称性の崩れることは少なく、本手法の実用上の妥当性も示されたと考える。

7. む す び

本研究は、顔画像を3次元モデルにフィッティングするための特徴点抽出を意識し、より精度の良い顔特徴点の自動抽出手法を提案し、顔特徴抽出システムとして実装した。また、本手法を複数の被験者の手入力による基準輪郭線に対する誤差を評価し、本手法の有効性を示した。本研究で対象とした顔特徴点は、顔画像のモデルフィッティングの目的だけでなく、顔の追跡や個人認識、表情認識など様々な顔認識のために利用できるものであると考えている。本稿で報告した顔特徴抽出システムは、以下のURLより、フリーウェアとして入手できる。

<http://www.ipa.go.jp/STC/senshin-dokusou-old.html>

本研究を進めるに当たり、議論を行っていただいた東京大学 原島博教授、電気通信大学 金子正秀助教授、成蹊大学 森島繁生助教授並びに、AAWG 合成グループの皆様にご感謝いたします。また、本研究グループを運営する上で協力いただいた(財)イメージ情報科学研究所、早稲田大学 青木義満君に感謝いたします。本研究の一部は、情報処理振興事業協会(IPA)「独創的情報技術育成事業」の一環として行われたものである。

【文 献】

- 1) 森島繁生, 八木康史, 金子正秀, 原島博, 谷内田正彦, 原文雄, 橋本周司: “顔の認識・合成のための標準ソフトウェアの開発”, 信学技報, PRMU97-282, pp.129-136 (1998)
- 2) A.L. Yuille, P.W. Hallinan and D.S. Cohen: “Feature Extraction from Faces Using Deformable Templates”, Int. Journal of Comp. Vision, 8, 2, pp.99-111 (1992)
- 3) 小林宏, 丹下明, 原文雄: “人の顔の6基本表情の実時間認識”, 日本ロボット学会誌学術論文, 14, 7, pp.994-1002 (1996)
- 4) R. Brunelli and T. Poggio: “Face Recognition: Feature Versus Templates”, IEEE Trans. Pattern Anal. and Mach. Intell., 15, 10, pp.1042-1052 (1993)
- 5) K. Sobottkar, I. Pitas: “Segmentation and Tracking of Faces in Color images”, Proc. of 2nd Int. Conf. on Automatic Face and Gesture Recognition, pp.236-241 (1996)
- 6) T.F. Cootes and C.J. Taylor: “Locating Faces using Statistical Feature Detectors”, Proc. of 2nd Int. Conf. on Automatic Face and Gesture Recognition, pp.204-209 (1996)
- 7) 久富健介, 橋本周司: “分散処理を用いた顔追跡システム”, 第3回日本顔学会大会論文集, p.38 (1998)
- 8) 久富健介, 橋本周司: “分散協調エージェントによる顔認識”, 信学技報, PRMU97-133, pp.33-38 (1997)
- 9) 工藤力 訳, P. Ekman and W.V. Friesen 著: “表情分析入門”, pp.1-277, 誠信書房 (1988)
- 10) 横山太郎, 呉海元, 谷内田正彦: “動的輪郭モデルを用いた色彩画像からの顔器官の同定”, 画像の認識理解シンポジウム96 (MIRU96), pp.319-324, (1996)
- 11) M. Kass, A.P. Witkin and D. Terzopoulos: “Snakes: Active Contour Models”, Int. Journal of Comp. Vision, 1, 4, pp.321-331 (1988)
- 12) L. Cohen and I. Cohen: “A fine Element Method applied to New Active Contour Models and 3D Reconstruction from Cross Sections”, Proc. 3rd Int. Conf. on Comp. Vision, pp.587-591 (1990)

- 13) 横山太郎, 八木康史, 谷内田正彦, 呉海元: “軸対称性を考慮した顔輪郭の自動抽出”, 信学論 D-II, J80-DII, 8, pp.2178-2185 (1997)
- 14) F. Hara, K. Tanaka, H. Kobayashi, and A. Tange: “Automatic Feature Extraction of Facial Organs and Contour”, 6th IEEE I.W. Robot and Human Communication, pp.386-391 (1997)
- 15) 上田修功, 間瀬健二, 末次康仁: “弾性輪郭モデルとエネルギー最小下原理による輪郭追跡手法”, 信学誌 D-II, J75-DII, 1 pp.111-120 (1992)
- 16) M. Kaneko and O. Hasegawa: “Processing of Face Images and Its Applications”, IEEE Trans. Information & Systems, E82-D, 3, pp.589-600 (1999)

よこやま たらう
横山 太郎 1996年, 大阪大学基礎工学部システム工学科卒業。1998年, 同大学院基礎工学研究科修士課程修了。現在, 同大学院基礎工学研究科博士課程在学中。1998年より日本学術振興会特別研究員。主としてコンピュータビジョンの研究に従事。

たなか かつあき
田中 克明 1997年, 東京理科大学工学部機械工学科卒業。1999年, 同大学院工学研究科修士課程修了。主として画像認識の研究に従事。

ひさとみ けんすけ
久富 健介 1997年, 早稲田大学理工学部応用物理学科卒業。1999年, 同大学院理工学研究科修士課程修了。主としてコンピュータビジョンの研究に従事。

やぎ やすし
八木 康史 1983年, 大阪大学基礎工学部制御工学科卒業。1985年, 同大学院修士課程修了。三菱電機(株)産業システム研究所を経て, 1990年, 大阪大学基礎工学部助手。現在, 同大学院基礎工学研究科助教授。1995年～1996年, オックスフォード大学客員研究員。全方位視覚センシング, 画像理解, 知能ロボットに関する研究に従事。工学博士。

やちだ まさひこ
谷内田正彦 1971年, 大阪大学大学院工学研究科修士課程修了。同基礎工学部制御工学科助手, 助教授を経て, 現在, 同大学院基礎工学研究科システム科学分野教授。1967～1968年, デンマーク原子力研究所留学。1972～1973年, 米イリノイ大にて Research Associate。1980～1981年, 西独ハンブルグ大 Research Fellow。1982年, 米ミネソタ大 CDC Professor。コンピュータビジョン, 人工知能, 移動ロボットの研究に従事。工学博士。

はら ふみお
原 文雄 1965年, 東大工学部機械工学科卒業。1970年, 同大学院博士課程修了。1971年, 東京理科大学工学部助教授。1983年, 同教授。流体関連振動の研究, 機械システムの異常診断, 水中ロボット, ロボティクスにおける形態と知能, 顔ロボット, アクティブ・ヒューマン・インターフェイスの研究に従事。工学博士。

はしもと しゅうじ
橋本 周司 1970年, 早稲田大学理工学部応用物理学科卒業。東邦大学講師, 助教授, 早稲田大学助教授を経て, 現在, 早稲田大学理工学部教授。画像処理, ヒューマン・インターフェイス, ロボティクス, 音楽情報処理の研究に従事。工学博士。