似顔絵生成のための顔と瞳の輪郭抽出方式

瀬川 能 昭[†], 遠藤 利 生^{††}, 村上 和 人[†],
鳥 生 隆^{††}, 正会員 興 水 大 和[†]

A Method for Extracting Faces and Irises for Facial Caricaturing

Yoshiaki Segawa[†], Toshio Endoh^{††}, Kazuhito Murakami[†],
Takashi Toriu^{††} and Hiroyasu Koshimizu[†]

Abstract As the first step for developing the system that generates facial caricatures automatically, we developed a method of extracting the facial region and the irises. The facial region is extracted by a thresholding procedure in which the threshold is selected based on the degree of the coincidence between the outermost edges and the region boundary. Then, another type of thresholding is performed in the facial region, and the boundary of the binary image is detected. Next, using a Hough transform, a number of small circles are detected as candidates for the irises. On the basis of the geometrical relation between the left and right irises, a pair of circles are finally selected as irises. We experimented with 30 face images. The facial regions were successfully extracted for all of images and irises were successfully recognized for 29 images. It was found that the unsuccessful case could be recovered by a verification process.

1. ま え が き

似顔絵システム PICASSO¹⁾²⁾では、個々人の顔や顔部品の輪郭と、多数の人の顔や顔部品の輪郭の平均との差異を特徴と考え、この特徴を強調することによって似顔絵を作成している。これまで顔や顔部品の輪郭は手入力で行ってきたが、今回、それを自動化する検討を行った。

本稿ではその第一ステップとして顔の輪郭と瞳の輪郭抽出に焦点を置く。顔部品の中で特に瞳を選んだ理由は、人間の顔の認知において瞳は重要な位置を占め

ており、似顔絵における顔記述において、瞳を正確かつ安定に抽出することは必要不可欠であるからである。また、画像処理の観点から、抽出した瞳を位置の基準とすれば、他の顔部品の抽出が容易になると考えたからである。

これまでに、最小2乗法によって瞳を抽出する方法³⁾が提案されているが、最小2乗法は瞳以外に起因するエッジ等のノイズの影響を受けやすいので、瞳がほぼ画像の全域を占めるように画像を入力することによって精度を上げている。似顔絵システムでは顔全体を処理する必要があるため、この方法は適切ではない。

キーワード：似顔絵生成、顔の初期記述、外側エッジ、2値化閾値処理、Hough変換

1996年8月、国際会議 PRICAI で発表

1997年4月7日受付、1997年8月13日再受付

[†] 中京大学 情報科学部 (〒470-03 豊田市貝津町床立101, TEL 0565-45-0971)

^{††} 株式会社 富士通研究所 (〒470-03 豊田市貝津町床立101, 中京大学人工知能高等研究所内 TEL 0565-43-0063)

[†] School of Computer and Cognitive Sciences, Chukyo University (101 Tokodate, Kaizu-cho, Toyota-shi, Aichi 470-03, Japan)

^{††} Fujitsu Laboratories Ltd. (101 Tokodate, Kaizu-cho, Toyota-shi, Aichi 470-03, Japan)

筆者らは、ノイズの影響を受けにくい Hough 変換に基づいて瞳を抽出することとした。一般に Hough 変換では複数の解が得られるが、本稿では後処理として 2 つの瞳の位置関係に関する知識を利用して最適解を選択するようにした。

処理手順の概要は以下の通りである。まず、無地の背景の基で画像を入力することとし、2 値化処理および穴埋め処理によって顔領域を抽出する。次に、顔領域を対象として再び 2 値化処理を行い、2 回目の 2 値化処理における図と地の境界をエッジとして円の Hough 変換および後処理によって 2 つの瞳を抽出する。

ここで問題となるのは、これらの 2 値化処理において閾値をどのように選択するかということである。1 回目の 2 値化処理では、背景は一樣であるが顔の内部では濃淡の変化が大きいため、濃度ヒストグラムの谷の部分を選択するのは適切ではない。また、2 値化したときの境界と画像を微分して得られるエッジができるだけ一致するように閾値を選択する手法⁵⁾が提案されているが、この方法も、顔の内部に多数のエッジが存在するため、選択される閾値が背景と顔領域を分けるための閾値としては適切でない。そこで、本稿では、最も外側のエッジ⁴⁾ (外側エッジ) だけに着目し、それが 2 値化したときの境界とできるだけ一致するように閾値を選択する新たな手法を提案する。具体的には原画像を 2 値化して得られる 2 値画像の境界と外側エッジが一致するような画素の数が最大になるように外側エッジを検出するための微分画像に対する閾値と、背景と顔領域を分離するための原画像に対する閾値とを最適化する。この方法は無地の背景からどのような絵柄を持つかが未知であるような物体を高速に抽出するのに適した一般的な手法である。文献 5) ではすべてのエッジを対象としているが本稿では外側エッジだけを対象としており、すべての閾値に対して実際に 2 値化を行わなくても外側エッジである画素の数を算出できるアルゴリズムを提案したことが新しい。このアルゴリズムによれば画像の画素数に比例する少ない演算量で閾値を決定できる。次に、2 回目の 2 値化処理は、顔の内部では瞳部分におけるエッジ強度が強いことが期待されるので文献 5) の方法を適用することとした。

以下、2 章では PICASSO の概要、3 章では外側エッジと 2 値画像の境界ができるだけ一致するような 2 値化処理によって顔領域を高速に抽出する方法、4 章では Hough 変換と後処理によって瞳を抽出する方法について述べる。また、5 章では実験によって本手法の有効性を確認し、6 章では本稿の結論をまとめるとともに、今後の課題について述べる。

図 1 似顔絵の一例

An example of facial caricature.

2. PICASSO の概要

筆者らが開発中の似顔絵システム PICASSO では、顔をパターン平面上の x - y 座標値 $(x_i, y_i) (i = 1, \dots, N)$ で表現し、これらを直線で結び、線画として顔を生成・表現している。入力顔 P 、および、ある参照となる顔 (= 基準顔) R を与え、誇張率 b を用いた次式

$$\begin{cases} x_i^{(Q)} = x_i^{(P)} + b(x_i^{(P)} - x_i^{(R)}) \\ y_i^{(Q)} = y_i^{(P)} + b(y_i^{(P)} - y_i^{(R)}) \end{cases} \quad (1)$$

の変形 (中割り法) により、似顔絵 Q を生成する。誇張率 b を増加させるに従い、顔の個性特徴をより誇張した似顔絵が得られる。図 1 に似顔絵の一例を示す。

3. 外側エッジの情報を利用した 2 値化閾値選択アルゴリズム

無地の背景から未知の絵柄を持つ物体を抽出する方法として外側エッジを利用する方法⁴⁾が提案されている。外側エッジとは微分画像を左右 (上下) の両端から水平 (垂直) 方向に画像を走査したときに、最初にあらかじめ定めた閾値 t 以上となる画素である。背景が完全に一樣であれば充分小さい閾値 t で検出される外側エッジが物体の輪郭と一致するので、外側エッジを利用することによって容易に物体の輪郭が抽出できる。

しかし、無地の背景の前に物体を置いて入力した画像でも、様々な要因でノイズが重畳するため背景は完全に一樣とはならない。したがって、両端から画像を走査したとき、閾値 t が小さすぎると物体の輪郭に到達する前に閾値 t 以上である画素に遭遇する確率が高くなり、物体の輪郭で外側エッジを検出する確率が低くなる。一方、閾値 t が高くなると、背景のノイズが外側エッジとして検出される確率は低くなるが、物体の絵柄が未知であるような場合には、画像を走査したときに物体の輪郭も通過してしまう確率が高くなって

しまう．最適な閾値を決定するために文献 4) では、(1) 背景に重畳する雑音が正規白色雑音でありその分散が既知であること、(2) メディアンフィルタによってそれらの雑音を低減化すること、および、(3) 画像の端から物体の輪郭までの距離の平均値が既知であることという 3 つの条件を前提として、物体の輪郭の上で外側エッジが検出される確率があらかじめ定めた値以上になるような最小の閾値 t を算出する方法が提案された．しかし、多くの前提条件を満足させる必要があるために中広い状況の下で利用するのは容易でなかった．

そこで、本稿では、物体の輪郭が原画像をある閾値 s で 2 値化したときの境界に含まれるような場合を想定し、外側エッジと画像を 2 値化したときの境界ができるだけ一致するような微分画像に対する閾値 t と原画像に対する閾値 s を選択するアルゴリズムを提案する．すなわち、閾値 t で抽出される外側エッジの集合 $E_{out}(t)$ と閾値 s で入力画像 $I(i, j)$ を 2 値化した時の境界の集合 $B(I, s)$ の一致の度合い C_{out} を

$$C_{out} = N(E_{out}(t) \cap B(I, s)) \quad (2)$$

で定義し、この評価値が最大になるように閾値 t と閾値 s を選択する．ここで $N(S)$ は集合 S の要素の数である．この式の右辺は外側エッジでありかつ 2 値化した時の境界であるような画素の総数を表している．なお、エッジと 2 値画像の境界をできるだけ一致させる文献 5) の方法では、エッジかつ境界である画素の総数をエッジまたは境界であるような画素の総数で正規化したものを評価値としているが、ここではそのような正規化は行っていない．その理由は、微分画像を 2 値化する閾値 t が減少してゼロに近くなるとほとんどの画素がエッジとなり、その結果、正規化しない場合には t がゼロのときに評価値が最大になってしまうのに対し、外側エッジの数は内部のエッジの数を含まないので、 t がゼロに近くなっても外側エッジの位置が外側にずれるだけで、その数は変化しないからである．

(2) 式を評価するひとつの方法は、すべての閾値 t に対して外側エッジを検出し、また、すべての閾値 s に対して原画像を 2 値化して境界を検出した後、すべての閾値の組合せ (t, s) に対して一致の度合いを算出することである．この方法では、外側エッジの検出と境界検出の処理を濃度レベル数の 2 乗回行う必要があるため、演算量が膨大となる．本章では、以下、(2) を画像の画素数に比例するオーダーで評価する方法を述べる．

まず、外側エッジと境界を以下のように定義する．まず、閾値 s で画像 I を 2 値化して得られる 2 値

図 2 定義の概略図
Schematic description of definitions.

画像において、値が 1 である画素の集合を領域、値が 0 である画素の集合を背景と定義する．従来、2 値画像の境界 (boundary) は図 2(b) に示すように背景 (background) に隣接した領域 (region) の画素 (pixel) として定義されていた．この定義は領域と背景の間で対称ではないので、図 2(a) に示すように隣接する 2 つの画素の画素対 (pixel pair) の特徴として境界を定義することとした．具体的には、画素対 $b_v(i, j)$ を横方向に隣接した画素 (i, j) と $(i+1, j)$ の対として定義し、画素対 $b_h(i, j)$ を縦方向に隣接した画素 (i, j) と $(i, j+1)$ の対として定義する．以上の定義の基で、ここでは、2 値画像において、一方の画素が領域に属し、他方が背景に属するような画素対を境界と呼ぶことにし、閾値 s で 2 値化した画像の境界の集合を $B(I, s)$ で表すことにする．また、濃淡画像において、一方の画素の画素値と他方の画素の画素値の差が閾値 t 以上であるような画素対をエッジと呼び、垂直方向のエッジの集合を E_v と水平方向のエッジの集合 E_h と表すことにする．つまり

$$E_v = \{b_v \mid |I(i, j) - I(i+1, j)| \geq t\},$$

$$E_h = \{b_h \mid |I(i, j) - I(i, j+1)| \geq t\} \quad (3)$$

と定義する．ここで、 E_v を定義する式の右辺において、 i は 1 から画像の水平サイズより 1 小さい数までの整数であり、 j は 1 から画像の垂直サイズ以下の整数である．また、 E_h を定義する式の右辺において、 i は 1 から画像の水平サイズまでの整数であり、 j は 1 から画像の垂直サイズより 1 小さい数までの整数である．一方、外側エッジの集合 E_{out} は左側エッジの集合 E_{left} 、右側エッジの集合 E_{right} 、上側エッジの集合 E_{up} 、下側エッジの集合 E_{down} から構成される． E_{left} は画像の左端から水平に画像を走査したときに最初につく垂直方向のエッジの集合である．ただし、ある走査線において垂直方向のエッジが 1 つしか存在しない場合はそのエッジは E_{left} の要素とはみな

さない。つまり、左側エッジ E_{left} の要素と右側エッジ E_{right} の要素は常に対になっていることを要請する。ここではこれらのエッジの間に内部領域が存在することを想定している。すなわち、 E_{left} は次式で定義される。

$$\begin{aligned} E_{left} = \{ & b_v(i, j) \mid b_v(i, j) \in E_v, \\ & \forall i' < i \quad b_v(i', j) \notin E_v, \\ & \text{and } \exists \tilde{i} > i \quad b_v(\tilde{i}, j) \in E_v \} \quad (4) \end{aligned}$$

右、上、下側エッジの集合も同様に定義する。

次に、(2) 式を評価する方法であるが、その準備として、まず、閾値 s で 2 値化した時の境界の総数 $N(B(I, s))$ を算出する方法について述べる。境界の集合 $B(I, s)$ は垂直な境界から成る集合 $B_v(I, s)$ と水平な境界から成る集合 $B_h(I, s)$ から構成され、 $N(B(I, s)) = N(B_v(I, s)) + N(B_h(I, s))$ である。まず、ある画素対 $b_v(i, j)$ が境界である必要充分条件はその画素対の一方の 1 つが s より大きいとか等しく、他方の画素が s より小さいことであることに注意する。この条件は

$$\begin{aligned} \max\{I(i, j), I(i+1, j)\} & \geq s \\ \text{and } \min\{I(i, j), I(i+1, j)\} & < s \end{aligned} \quad (5)$$

と等価である。ただし、 $\max\{x, y\}$ は x と y の最大値を表し、 $\min\{x, y\}$ は x と y の最小値を表す。 $I_{max}(i, j) = \max\{I(i, j), I(i+1, j)\}$ 、 $I_{min}(i, j) = \min\{I(i, j), I(i+1, j)\}$ と表せば、垂直な境界の数は

$$\begin{aligned} N(B_v(I, s)) & = N(\{b_v \mid I_{max}(i, j) \geq s\} \\ & \quad \cap \{b_v \mid I_{min}(i, j) < s\}) \\ & = N(\{b_v \mid I_{max}(i, j) \geq s\} \\ & \quad \cap \neg\{b_v \mid I_{min}(i, j) \geq s\}) \end{aligned} \quad (6)$$

で算出できる。ここで、 $I_{max}(i, j) > I_{min}(i, j)$ なので、 $\{b_v \mid I_{max}(i, j) \geq s\} \supseteq \{b_v \mid I_{min}(i, j) \geq s\}$ であることに注意すると

$$\begin{aligned} N(B_v(I, s)) & = N(\{b_v \mid I_{max}(i, j) \geq s\}) \\ & \quad - N(\{b_v \mid I_{min}(i, j) \geq s\}) \end{aligned} \quad (7)$$

が得られる。

(7) 式から、 $N(B_v(I, s))$ は次のように算出される。 $hist(s; I_{max})$ を $I_{max}(i, j) = s$ であるような垂

直画素対の数とする。 $hist(s; I_{max})$ は I_{max} のヒストグラムにおいて濃度 s に対応する度数を表している。このとき、 $I_{max}(i, j) \geq s$ であるような画素対の数は、 $hist(s; I_{max})$ を s の値が大きいく方から累積することによって計算される。その累積ヒストグラムの s における度数を $chist(s; I_{max})$ と表すと

$$N(B_v(I, s)) = chist(s; I_{max}) - chist(s; I_{min}) \quad (8)$$

が得られる。このようにして、垂直方向の境界の総数は、実際にそれぞれの閾値 s に対して境界を抽出しなくても I_{max} 、 I_{min} の累積ヒストグラムから算出できる。したがって、必要とされる計算量のオーダは画像の画素数に比例する。水平方向の境界についても同様である。

次に、外側エッジの数 $N(E_{out}(t))$ を算出する方法について述べる。外側エッジも垂直な成分と水平な成分から成り、 $N(E_{out}(t)) = N(E_{outv}) + N(E_{outh})$ である。これら評価するために、 $I^v(i, j)$ を

$$\begin{aligned} I^v(i, j) & = \min \\ & \{ \max\{|I(i', j) - I(i' - 1, j)|; i' \leq i\}, \\ & \max\{|I(i', j) - I(i' + 1, j)|; i' \geq i\} \} \end{aligned} \quad (9)$$

によって定義する。ここで、 $\{\max\{|I(i', j) - I(i' - 1, j)|; i' \leq i\}\}$ は画素 (i, j) より左側の画素における微分の絶対値 $|I(i', j) - I(i' - 1, j)|$ の最大値を表す。(3)、(4)、(5) 式から容易にわかるように、ある画素対 $b_v(i, j)$ が閾値 t に対する外側エッジであるための必要充分条件は、その画素対が $I^v(i, j)$ を閾値 t で 2 値化して得られる 2 値画像の境界であることである。したがって (8) 式を導いたときと同様にして

$$\begin{aligned} N(E_{outv}(t)) & = chist(t; I_{max}^v) \\ & \quad - chist(t; I_{min}^v) \end{aligned} \quad (10)$$

によって外側エッジの総数が算出できる。水平な外側エッジについても同様である。

最後に、外側エッジかつ境界である画素対の数 $N(E_{out}(t) \cap B(I, s))$ を得る方法について述べる。垂直な外側エッジは I^v の境界であるから

$$\begin{aligned} N(E_{outv}(t) \cap B(I, s)) & = N(B_v(I^v, t) \cap B_v(I, s)) \end{aligned} \quad (11)$$

である。(6) 式と同様に (11) 式の右辺は

$$N(B_v(I^v, t) \cap B_v(I, s))$$

$$\begin{aligned}
&= N(\{b_v \mid I_{max}^v(i, j) \geq t\} \\
&\quad \cap \neg\{b_v \mid I_{min}^v(i, j) \geq t\} \\
&\quad \cap \{b_v \mid I_{max}(I; i, j) \geq s\} \\
&\quad \cap \neg\{b_v \mid I_{min}(i, j) \geq s\}) \quad (12)
\end{aligned}$$

と表される． $\{b_v \mid I_{max}(i, j) \geq s\} \supseteq \{b_v \mid I_{min}(i, j) \geq s\}$ ， $\{b_v \mid I_{max}^v(i, j) \geq t\} \supseteq \{b_v \mid I_{min}^v(i, j) \geq t\}$ であるから

$$\begin{aligned}
&N(B_v(I^v, t) \cap B_v(I, s)) \\
&= N(\{b_v \mid I_{max}^v(i, j) \geq t\} \\
&\quad \cap \{b_v \mid I_{max}(i, j) \geq s\}) \\
&\quad + N(\{b_v \mid I_{min}^v(i, j) \geq t\} \\
&\quad \cap \{b_v \mid I_{min}(i, j) \geq s\}) \\
&\quad - N(\{b_v \mid I_{max}^v(i, j) \geq t\} \\
&\quad \cap \{b_v \mid I_{min}(i, j) \geq s\}) \\
&\quad - N(\{b_v \mid I_{min}^v(i, j) \geq t\} \\
&\quad \cap \{b_v \mid I_{max}(i, j) \geq s\}) \quad (13)
\end{aligned}$$

となる．(8) 式を導出したときと同様に， $I_{max}(i, j) = s$ ， $I_{max}^v(i, j) = t$ であるような垂直画素対の数を表す 2 次元ヒストグラム $hist_2(s, t; I_{max}, I_{max}^v)$ を導入する．このとき， $N(\{b_v \mid I_{max}(i, j) \geq s\} \cap \{b_v \mid I_{max}^v(i, j) \geq t\})$ は $hist_2(s, t; I_{max}, I_{max}^v)$ を値が大きい方から累積することによって算出される 2 次元累積ヒストグラム $chist_2(s, t; I_{max}, I_{max}^v)$ として得られる．よって

$$\begin{aligned}
&N(B_v(I^v, t) \cap B_v(I, s)) \\
&= chist_2(s, t; I_{max}, I_{max}^v) \\
&\quad + chist_2(s, t; I_{min}, I_{min}^v) \\
&\quad - chist_2(s, t; I_{max}, I_{min}^v) \\
&\quad - chist_2(s, t; I_{min}, I_{max}^v) \quad (14)
\end{aligned}$$

$N(B_h(I^h, t) \cap B_h(I, s))$ も同様にして得られる．したがって， $N(E_{out}(t) \cap B(I, s))$ は 2 次元累積ヒストグラムを計算すれば得られる．

以上の議論から，(2) 式の評価関数は画像の画素数に比例する低い計算コストで計算されることが示された．

4. 瞳抽出アルゴリズム

4.1 概要

今回開発した瞳抽出アルゴリズムは図 3 に示すように「前処理部 (preprocessing)」，「Hough 変換部 (Hough transform)」，「後処理部 (postprocessing)」の 3 つ

図 3 瞳抽出アルゴリズムの流れ
Processing flow of the extraction of irises.

の処理部からなる．「前処理部」ではまず，背景から外側エッジの情報を利用した閾値処理によって顔領域を抽出し，次に，顔領域を対象として再び閾値処理を行う．そして，2 回目の閾値処理における図と地の境界を瞳境界候補として抽出する．なお，1 回目の閾値処理は顔輪郭に関する初期記述生成を行っていることに相当する．次に，「Hough 変換部」で円の Hough 変換を適用し，瞳の候補を抽出する．最後に，「後処理部」で瞳の位置関係を基にした条件を設定し，その条件にあったものを瞳の候補から選択・抽出する．以下に各処理部の詳細を説明する．

4.2 前処理部

まず， 5×5 のメディアンフィルタ処理 (removal of noises) を原画像に対して行い，前章で提案した外側エッジの情報を利用した 2 値化閾値処理を施したあと，穴埋めの処理を行って顔領域を抽出する (extraction of facial region)．

次に，抽出された顔領域のみに対して濃淡画像の処理領域を限定し，文献 5) で述べられた閾値処理アルゴリズムで 2 値化閾値処理を行う．このとき抽出された 2 値画像で最大面積である髪領域を削除し，残りの部分の境界を抽出し，これを瞳境界候補 (extraction of candidates for irises boundary) とする．

4.3 Hough 変換部

まず簡単に，円の Hough 変換の原理について述べる．

エッジ画像上のあるエッジ点 $(x_i, y_i) (i = 1, 2, \dots)$ を円周上に持つ円群は，パラメータ空間 (a, b, r) においてはエッジ点の座標が中心となる式

$$(a - x_i)^2 + (b - y_i)^2 = r^2 \quad (15)$$

の円の集合として表され，最も多くのエッジ点を通過する円を求めたい場合，エッジ点ごとにパラメータ空

間内に円錐を描き、これらの円錐面の交差の度数を数え、その度数のピークを見つければ目的の円を求めることができる。

すなわち、投票度数が最大となるパラメータの組 (a_0, b_0, r_0) を求めた後

$$(x - a_0)^2 + (y - b_0)^2 = r_0^2 \quad (16)$$

のような中心 (a_0, b_0) 、半径 r_0 の円を描けば、結果的にこれが最も多くのエッジ点を通過する円となっている。本研究の場合、このようにして求めた上位の円が瞳の候補となる。

「前処理部」で抽出した瞳境界候補に対して円の Hough 変換を適用し、瞳候補を抽出する (extraction of candidates for irises)。ここで、円の Hough 変換の適用後、パラメータ空間において投票度数が極大になっており、かつ、投票度数がある閾値以上であるパラメータを瞳候補として検出する。なお、顔領域を中心線で左右に分離し、瞳候補は左右のそれぞれの領域において独立に検出する。

4.4 後処理部

前述の処理によって、顔領域の中心線で分けられる左右の領域のそれぞれにおいていくつかの瞳の候補が検出されるが、左右の領域のそれぞれから1つずつ選んだ瞳候補の対の中から最も確からしい対を選択する (selection of irises)。このとき、以下の事実に留意する。

- ・左右の瞳はほぼ水平に位置する。左右の瞳候補の垂直距離の上限を $dist_{th}$ とする。

- ・左右の瞳の半径はおおむね同じである。半径の差の上限を $radi_{th}$ とする。

- ・2つの瞳候補の水平距離が実際の瞳の水平距離より α 以上小さくなることは経験的にほとんどない。

最も確からしい対の選択は次のような手順で行う。

- (1) 左右の領域のそれぞれにおいて少なくとも1つの瞳の候補が存在するような投票度数の中で最大の度数を k とする。
- (2) 投票度数が k 以上である円を瞳の候補として抽出する。
- (3) 左右の領域のそれぞれから1つずつ候補を選択して得られる円の対すべてのリストを作成する。
- (4) 左右の円の半径の差がある閾値 $radi_{th}$ 以上ならリストから削除する。
- (5) 左右の円間の垂直距離の差がある閾値 $dist_{th}$ 以上のものをリストから削除する。
- (6) 左右の円間の水平距離 x_{lr} が最小であるもの

(x_{min}) を求め

$$x_{lr} \geq x_{min} + \alpha \quad (17)$$

ただし、 α は定数値

を満たすものをリストから削除する。

- (7) もし、この時点でリストに円の対の候補が1つだけ残っているならば、それを左右の瞳として抽出する。また、複数の円の対が残っているならば、ほぼ等しいものとしてその中から任意の対を選び、それを左右の瞳として抽出する。また、すべての円の対の候補がリストから削除されていたなら、 $k = k - 1$ とし、(2) へ戻る。

5. 実験と考察

原画像は白色無地の背景の基で撮影した 640×480 、8ビットの濃淡画像 30 枚である。正面から照明を施し、眼鏡は外してある。

5.1 外側エッジを利用した顔領域抽出処理

図4に原画像の一例、それに対して 5×5 のメディアンフィルタを施した後、3章で述べた方法によって2値化した。

メディアンフィルタ処理後の画像のヒストグラムを図5に示す。図中、矢印 (a) は大津の方法⁶⁾、矢印 (b) は文献5)の方法、矢印 (c) は3章で述べた方法によって選択した閾値を示す。また、それぞれの方法で2値化した結果を図6、図7、および、図8に示す。図8に対して穴埋め処理をした後、面積が最大である領域を抽出した結果が図9である。

図6と図8とを比較すると、大津の方法では原画像を2値画像によってできるだけ忠実に表現するという観点では優れているが、耳の一部分が欠けている。一方、提案した手法では顔の内部の構造が失われているが、実際の顔の輪郭のすべてが2値化した画像の境界

図4 原画像
Original image.

図5 ヒストグラム
Histogram.

図6 大津の方法による2値化画像
Binary image obtained by the Ohtsu's method.

の一部になっている。2章で述べたように似顔絵生成の過程で誇張処理を行うので、耳の一部が欠けているだけでもそれが誇張されてしまい、高品質の似顔絵が生成できなくなる。それに対して、提案した手法では、実際の顔の輪郭のすべてが2値化した画像の境界に含まれているので、生成された2値画像を基に穴埋めなどの処理によって似顔絵に適した顔領域の抽出が可能であることがわかる。このような観点から、実際の顔の輪郭のすべてが2値画像の境界の一部になっているときにこの2値化処理は成功したとみなすと、この基準の下で、大津の方法では30枚の画像に対して8枚成功したのに対して、提案手法では30枚すべてが成功であった。この結果から提案手法が似顔絵生成システムにおける顔領域抽出手法として有効であることが確認された。

一方、エッジと2値画像の境界の一致度を評価値と

図7 文献5)による2値化画像
Binary image by the method in ref. 5).

図8 提案手法による2値化画像
Binary image obtained by the proposed method.

図9 顔領域の抽出
Extracted facial region.

する文献5)の方法では、顔内部の髪部分と肌の境界や瞳の輪郭部分に強いエッジが存在するために、その部分が境界となるように閾値が選択されている。この傾向は残りの29枚の画像でも同様であった。このことから、無地の背景の基で撮影した画像から顔の輪郭を抽出する目的のためには、すべてのエッジに着目するのは適当ではなく、外側エッジに着目する手法が有効

図 10 瞳境界候補の抽出
Candidates for irises boundary.

図 11 認識された瞳
Recognized irises.

表 1 後処理の経過 (1)
Post processing (1).

左目	右目		
	x	y	r
	y	x	r
	390	223	11
	409	234	12

であることがわかる。

5.2 Hough 変換と後処理による瞳抽出処理

顔領域内において文献 5) の方法によって再び 2 値化した画像の境界を図 10 に示す。また、それに対して円の Hough 変換および後処理を施して瞳を抽出した結果を図 11 に示す。瞳がまぶたによって半分ほど隠されていても、瞳がうまく抽出されていることがわかる。

本例では、Hough 変換部で抽出された瞳候補の中から、左瞳候補が 2 個、右瞳候補が 1 個抽出された。これらの候補から後処理によって最適なものを選ばれる過程を表 1 に示す。表中 x, y, r はそれぞれ円の中心座標と半径 (画素単位) を表す。表の各項における○や

表 2 後処理の経過 (2); 1 度目の試行
Post processing (2); the first trial.

左目	右目		
	x	y	r
	y	x	r
	381	414	11
	393	242	12

表 3 後処理の経過 (2); 2 度目の試行
Post processing (2); the second trial.

左目	右目		
	x	y	r
	y	x	r
	376	419	11
	381	414	11
	383	411	11
	384	410	11
	393	242	12

表 4 後処理の経過 (2); 3 度目の試行
Post processing (2); the third trial.

左目	右目		
	x	y	r
	y	x	r
	375	232	10
	375	234	9
	376	419	11
	381	414	11
	383	411	11
	384	410	11
	389	401	9
	393	242	12
	399	389	9

×の列は、左から順に後処理部における半径の差に対するテスト、垂直距離に対するテスト、水平距離に対するテストの結果を表す。これらテストにおける閾値はそれぞれ $radi_{th} = 2$, $dist_{th} = 10$, $\alpha = 3$ である。これらの値は経験的に適切なものを選択した。

また、◎は最終的に選ばれた円の対を表している。この例では、半径の差と垂直距離に関する最初の 2 つのテストには両方の対が共に合格したが、水平距離に関するテストで下段の対が不合格となり、上段の対が選択された。

別の例を表 2~表 4 に示す。この例では、1 度目の

図 12 瞳抽出の失敗例
The unsuccessful case.

試行ではテストに合格する円の対が存在しなかったため、投票度数に対する閾値 k を 1 減じて得られる 5×3 の対に対して 2 度目の試行が行われた。しかし、これらの対もすべて不合格となったため、さらに投票度数に対する閾値を 1 減じ、 9×4 の円の対に対して 3 度目の試行が行われた。その結果、3 つの対がすべてのテストに合格し、そのうちから、任意に 1 つが最終的に選択された。ここでは、最後に合格した対を出力している。

同様なプロセスを経て入力画像 30 枚のうち 29 枚に対して瞳抽出処理が成功した。瞳の抽出に失敗した唯一の例を図 12 に示す。この例では、Hough 変換において向かって右側の瞳に対応する円の投票度数よりも眉尻の部分に対応する円の投票度数のほうが多かったため、後処理の結果、この眉尻が誤抽出された。30 枚の画像のうちこれが唯一の失敗例である。

ここで、前章の方法のロバストネスを増すために、前章の方法とは独立した方法で目の概略位置を検出し、前章の方法で検出した瞳が正しいかどうかを検証するプロセスを設けた⁷⁾。具体的には、まず、顔領域において、2 値化した後に境界を検出するのではなく、微分処理をした後に 2 値化してエッジを検出する。次にそのエッジ画像を水平方向と垂直方向に射影し、これらの射影パターンを基に目、眉、鼻、口の概略位置を、図 13 に□印で示すように、検出する。そして、前章の方法によって抽出した瞳が目の位置になれば、これらの瞳を候補から除外して前章の「後処理部」に戻り、再度瞳の抽出を試みるようにした。この方法を用いれば、上記の唯一の失敗例が修復され、結果として、30 枚すべての画像の瞳が完全に抽出された。修復された瞳の結果を図 13 に示す。なお、瞳の概略位置の検出が間違っている可能性もあるので、Hough 変換による瞳抽出結果と瞳の概略位置の検出に矛盾が生じたときに

図 13 検証処理によって修復された瞳
Recovered irises by verification.

どちらを優先するかを判定する基準を設ける必要があるが、これは今後の課題である。

6. まとめと今後の課題

本稿では、無地な背景の基で撮影した画像から顔輪郭を抽出するための最適な閾値として、外側エッジと 2 値画像の境界をできるだけ一致させるような閾値を画素数に比例する少ない演算量で算出するアルゴリズムを提案した。また、顔領域の内部をさらに 2 値化閾値処理を行って得られる境界に対して円の Hough 変換を施すことによって瞳の候補を抽出し、2 つの瞳の位置関係に関する知識を利用して最適な候補を選択する方式を提案し、その有効性を実験的に示した。また、瞳輪郭抽出アルゴリズムに対する検証処理を設けることで、瞳輪郭抽出処理をよりロバストにする可能性について論じた。

今後は、瞳輪郭抽出アルゴリズムに対する検証処理を強化し、よりロバストな瞳輪郭抽出アルゴリズムを作成する。また、抽出された瞳の情報を基に他のすべての顔部品の輪郭抽出を行い、抽出された顔部品の輪郭を似顔絵生成の初期記述に合うようにリサンプリングを行う予定である。

日頃、ご支援、ご理解をいただく関係各位に深く感謝致します。なお、本研究の一部は、1996 年度科研費 (08207222, 07680415, 08780313)、IMS 研究プロジェクト「製品のライフサイクルにおける感性・官能評価システム」による。記して感謝する。

【参 考 文 献】

- 1) 村上和人, 奥水大和, 中山晶, 福村晃夫: “錯視を用いた似顔絵生成システム PICASSO について”, 情処学論誌, **34**, 10, pp.2106-2116 (Oct. 1993)
- 2) 村上和人, 奥水大和: “似顔絵生成と表情生成の統合について”, テレビ誌, **50**, 10, pp.1515-1521 (1996)
- 3) 伴野, 岸野, 小林: “瞳孔の抽出処理と頭部の動きを許容す

る視線検出装置の試作”，信学論，**J76-D-II**, 3, pp.636-646 (Mar. 1993)

- 4) 鳥生隆，後藤敏行，山本栄一郎：“メディアンフィルタ特性の解析と輪郭抽出の最適化”，信学論，**J68-D**, 4, pp.489-495 (Apr. 1985)
- 5) 鳥生隆，岩瀬洋道，後藤敏行：“最小値フィルタを利用した2値化のしきい値選択法”，信学論，**J72-D-II**, 11, pp.1800-1806 (Nov. 1989)

6) 大津展之：“判別および最小2乗基準に基づく自動しきい値選定法”，信学論，**J63-D**, 4, pp.349-356 (Apr. 1980)

- 7) Segawa, Y., Sakai, H., Endoh, T., Murakami, K., Toriu, T., and Koshimizu, H.: “Face Recognition Through Hough Transform for Irises Extraction and Projection Procedures for Parts Localization -for Facial Caricaturing System PICASSO-”, Proc. PRICAI'96, pp.625-636 (Aug. 1996)

せ がわ よしあき

瀬川 能昭 1995年，中京大学情報科学部情報科学科卒業。1997年，同大学大学院情報科学研究科修士課程修了。同年，富士通(株)入社。画像処理，主に顔画像処理，顔部品認識の研究に従事。

えんどう としお

遠藤 利生 1987年，東京大学工学部計数工学科卒業。同年，(株)富士通研究所入社。以来，画像処理，画像理解の研究に従事。視覚の計算論に興味をもつ。工学博士。

むらかみ かずひと

村上 和人 1984年，名古屋大学理学部物理学科卒業。名古屋市工業研究所勤務を経て，1991年，中京大学情報科学部助手。現在，同講師。Hough変換アルゴリズム，X線画像処理，似顔絵生成システムなどの研究・開発に従事。

とり う たかし

鳥生 隆 1980年，京都大学大学院理学研究科博士課程修了。1982年，(株)富士通研究所入社。以来，画像処理，画像理解の研究に従事。理学博士。

こしみず ひろやす

興水 大和 1975年，名古屋大学大学院工学研究科博士課程修了。その後，名古屋大学工学部助手，名古屋市工業研究所勤務を経て，1986年より中京大学。現在，情報科学部教授。画像パターン認識，マシンビジョンの研究に従事。最近，似顔絵生成など感性情報処理，Hough変換などに興味あり。工学博士。正会員。