

平均化操作を用いた 閉曲線図形の特徴抽出と階層的分割 松山隆司、米沢比呂志、東圭三 (京都大学)

"Feature extraction and hierarchical decomposition for a closed curve
using averaging operations"

Takashi Matsuyama, Hiroshi Yonezawa, Keizo Azuma
Kyoto University

Decomposing a complex shaped region into a set of primitive sub-regions is an important technique to obtain structural shape description. This paper describes two fundamental techniques for the decomposition: 1) extraction of local symmetric axes and corners, and 2) hierarchical decomposition using concave corners. Uniform and Gaussian weighted averaging operations of various "strength" along a region boundary are used to perform the analysis in multiple resolutions. Several experimental results are shown to illustrate the performance of these techniques.

1. はじめに

人間の持つ図形認識能力は非常に多機能かつ優秀なものであり、この能力を計算機に持たせようとする研究が、いろいろと試みられてきた。二次元図形の形状認識を計算機を用いて行う場合、まず図形の特徴を何らかの表現方法で記述する必要がある。その一つとして図形をより基本的な要素からなる図形の集合として構造的に記述する方法がある[1]。図形を簡単な部分図形の集合としてとらえることは、人間による図形認識の方法とも、うまく一致するものと考えられる。

人間は図形を分割する場合、多くの観点から種々の特徴を得、それらを総合的に判断して行っていると考えられ、計算機も多様な観点から図形を解析する必要がある。図形の特徴記述を求めるための一つの観点としては、図形の解像度を変化させて特徴抽出を行うという方法[2][3]が考えられる。複数の解像度における特徴を組合せることにより、図形における特徴が大局的なものか、局所的なものかを判断することができる。一方、解像度が固定されている場合でも、種々の異なる特徴(たとえば、曲率、骨格線、対称軸)によって図形を記述する方法がある。こうした方法と、上記の解像度変化とを組合せることによって、多くの観点から図形を総合的に解析することができる。ここでは、平均化を用いて解像度を変化させながら、次の二つの特徴によって、閉曲線図形の形状記述を行う。

第一は局所的な対称性[3]についてであり、局所的対称軸の抽出を行う。この方法では、閉曲線に対して曲線に沿った平均化を行い、その平均化の度合を変化させることによって、閉曲線上のすべての点に対し、その点を中心とした局所的な対称区間が計算される。この情報を用いることにより、局所的対称軸の抽出、角と変曲点の検出が行える。

第二は角の大きさという観点である。この方法では、閉曲線に対してガウス関数による荷重平均を施し、平均化された曲線の凹点を抽出する。さらに平均化の度合を変化させて同様の操作を行うことにより、原図形における凹点の大きさを判断する。さらに、その情報を用いて図形の階層的分割を行う。

2. 平均化操作

閉曲線図形に対する一様平均及びガウス平均について定義を行う。入力図形は八連結でつながった一つのデジタル閉曲線で、各点は整数値の直交座標値(X, Y)で表される。入力図形がL個の点で構成されているとすると、各点は接続順に番号

が0, 1, 2, ..., L-1, Lと付けられる。但し0番目の点とL番目の点は同じ点を表す。接続番号順に図形は左回りに入力されるものとする。以下の説明では入力図形のi番目の点は、添字s(Source)を用いて(Xs(i), Ys(i))で表す。また平均化操作によって得られた図形については、一様平均によるものは添字a(Average)を用いて(Xa(i), Ya(i))、ガウス平均によるものは添字g(Gauss)を用いて(Xg(i), Yg(i))で表す。

2. 1 一様平均

平均化距離Kで一様平均を施すとは次のようなことである。外周線として入力された原図形上の任意の点Ps(i) (Xs(i), Ys(i))に対して、外周線に沿って距離K以内にある点のX座標値、Y座標値それぞれについての平均座標値Pa(i, K) (Xa(i, K), Ya(i, K))を求めることである。すなわち、

$$\left. \begin{aligned} X_a(i, K) &= \frac{1}{2K} \int_{-K}^{+K} X_s(i+m) \cdot dm \\ Y_a(i, K) &= \frac{1}{2K} \int_{-K}^{+K} Y_s(i+m) \cdot dm \end{aligned} \right\} (1)$$

ここで、Xs(i+m)、Ys(i+m)は点Ps(i)から距離mにある外周線上の点の座標を表す。この距離mは外周線の全長を法とする。また、平均化操作によって得られた図形{Pa(Xa, Ya)}を原図形{Ps(Xs, Ys)}に対して平均化図形、ベクトルPs(i)Pa(i, K)を移動ベクトルと呼ぶ。一般にこの移動ベクトルの大きさは、Ps(i)における曲率の大小に比例し、その方向は、点Ps(i)から閉曲線上で左右に平均化距離K離れた二つの点ではさまれた部分曲線が、点Ps(i)について対称であるならば、その対称軸方向と一致する。

2. 2 ガウス平均

ガウス平均とは、ガウス関数による荷重平均のことであり、次式で表される。

$$\left. \begin{aligned} X_g(i, \sigma) &= \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} X_s(i+m) \cdot \exp(-m^2 / (2 \cdot \sigma^2)) \cdot dm}{\int_{-\infty}^{+\infty} \exp(-m^2 / (2 \cdot \sigma^2)) \cdot dm} \\ Y_g(i, \sigma) &= \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} Y_s(i+m) \cdot \exp(-m^2 / (2 \cdot \sigma^2)) \cdot dm}{\int_{-\infty}^{+\infty} \exp(-m^2 / (2 \cdot \sigma^2)) \cdot dm} \end{aligned} \right\} (2)$$

σは一様平均の平均化距離Kに相当する変数であり、図形の解像度を制御する。(2)式で積分範囲は-∞~+∞であるが、本

論文での処理としては $-2\sigma \sim 2\sigma$ に限定している。また平均化操作は一種の周波数フィルタであり、ガウス平均の周波数特性は、一様平均のそれに比べ、高周波成分の除去能力が優れている。

図1に σ を大きくすることによって、平均化図形がどのように変化するかを蝶を例として示す。一般に解像度に対応する変数である平均化距離が大きい値で平均化操作を図形に対して施すと、局所的な特徴がぼかされ、図形上の大まかな特徴のみが残された図形が得られる。逆に零に近い平均化距離で平均化操作を施すと、高解像度で眺めたような図形が得られる。

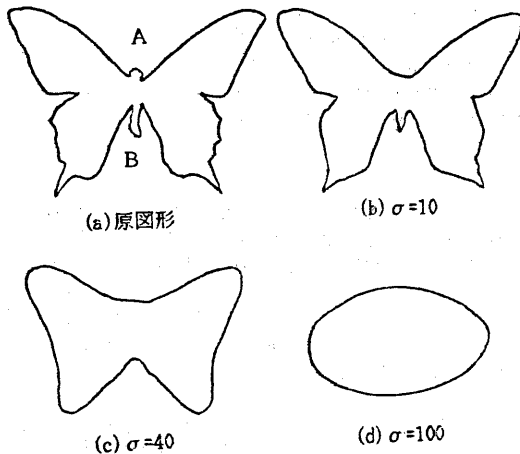


図1 σ の変化に対する図形の変化

3. 局所的対称軸の抽出

閉曲線の持つ局所的な対称性は、閉曲線で囲まれた領域を分割する上で重要な情報を与える。ここでは閉曲線図形に対する局所的な対称軸の抽出アルゴリズムについて述べる。本アルゴリズムでは、一様平均を用いて、大きさの異なる区間での平均化操作を行うことにより、閉曲線上の全ての点に対してその点を中心とした対称な区間が計算される。この情報を利用することにより、局所的対称軸の検出、角や変曲点の抽出が行える。

3.1 MSDの定義

図2に示すように、閉曲線上の任意の点Pについて、閉曲線上で対称性を保持する最大区間RR'の半区間PR (又はPR')

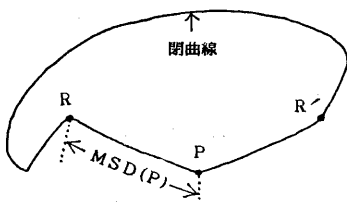


図2 MSDの定義

3.2 処理の流れ

処理は図3に示すように三つの部分から成る。つまり、まず閉曲線上のすべての点に対してMSDを計算する。次にそ

の情報をを用いて局所的対称軸の抽出、角と変曲点の検出を行う。

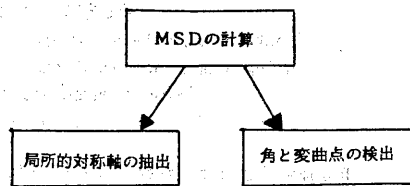


図3 処理の流れ

3.3 MSDの計算

閉曲線上の各点に対し、平均化距離を逐次増加させながら、一様平均化操作を行い、次の手順でその点におけるMSDを計算する。

(1) 対称軸方向の決定

2. 1で述べたような、移動ベクトルの性質を用いて以下のように対称軸方向を決定する。すなわち、閉曲線上の任意の点において、小さな平均化距離(実験では6)を用いて、一様平均化操作を行う。このとき、移動ベクトルの大きさが大きい(曲率が大きい)点では、移動ベクトル方向をその点における対称軸方向とする。移動ベクトルの大きさが小さい(曲率が小さい)点では、その点の近傍を最小二乗法によって直線近似し、その直線に垂直な方向をその点を中心とした対称軸方向とする。

(2) 対称軸に垂直な方向のずれの計算

図4(a)において、点 $Ps(i)$ に平均化距離 K で一様平均化操作を行った時の移動ベクトル $Ps(i)Pa(i,K)$ の対称軸に垂直な成分を $Q(i,K)$ で表すと、点 $Ps(i+K)$ から対称軸までの距離と、点 $Ps(i-K)$ から対称軸までの距離の差 $d1Ps(i+K)$ は、次式で計算される。

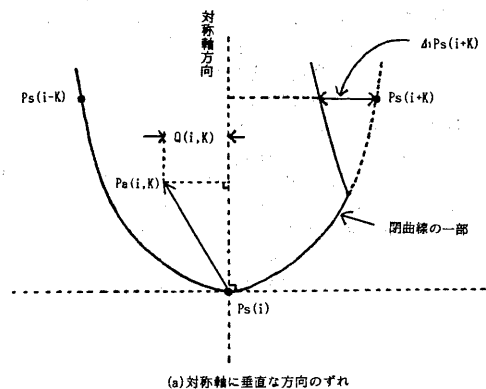
$$d1Ps(i+K) = 2 \cdot K \cdot Q(i,K) - 2 \cdot (K-1) \cdot Q(i,K-1) \quad (3)$$

(3) 対称軸に平行な成分のずれの計算

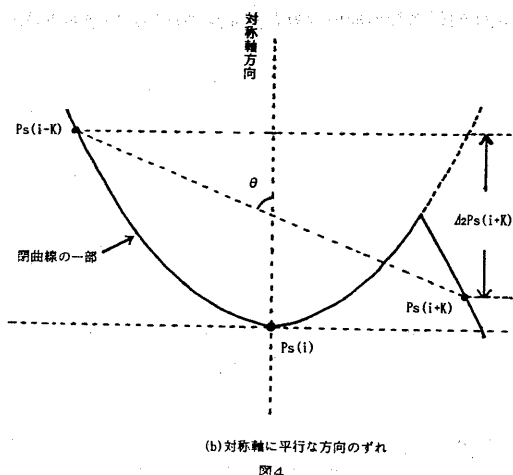
図4(b)において、ベクトル $Ps(i-K)Ps(i+K)$ の対称軸に平行な成分 $d2Ps(i+K)$ は、次式で計算される。

$$d2Ps(i+K) = |Ps(i-K)Ps(i+K)| \cdot \cos \theta \quad (4)$$

ただし、 θ は $Ps(i-K)Ps(i+K)$ と対称軸の交角である。

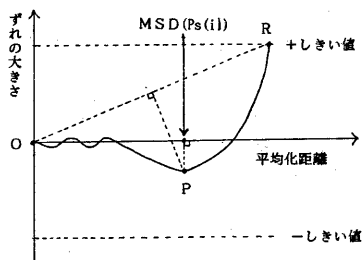


(a) 対称軸に垂直な方向のずれ



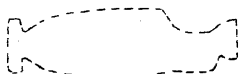
(4) MSDの決定

任意の点 $Ps(i)$ について、平均化距離 K を逐次増加させながら、(3)式、(4)式を用いて、対称軸に垂直、及び平行な方向のずれの大きさを計算する。この時、 K の変化に対するずれの変化の様子をそれぞれ、図5のように、横軸に平均化距離、縦軸にずれの大きさをとってグラフとして表す。そして、いずれかの方向のずれの大きさが、しきい値(垂直、平行方向とも、しきい値は5.0)を越えた時、次のようにしてMSDを決定する。つまり、図5に示すように、点 R をずれがしきい値を越えた点とし、そのずれの変化曲線上の点の中で、線分 OR に対して一番距離のある点を P とすると、その P の横軸座標が、点 $Ps(i)$ が持つMSDの値である。この方法では、しきい値自身の値はそれほど厳密に設定する必要がなく、比較的安定してずれが大きくなり始める点を検出できる。

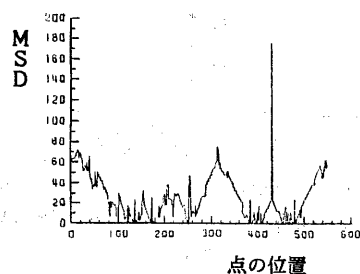


(5) MSD変化曲線の作成

上記(1)~(4)の操作を閉曲線上のすべての点に施し、すべての点についてのMSD値を求める。横軸に閉曲線上の点の位置(0番目の点からの閉曲線上の距離)、縦軸にその点におけるMSDの値をとってMSD変化曲線を作成する。一例として、図6(a)の入力図形に対するMSD変化曲線を図6(b)に示す。



(a) 入力図形



(b) MSD変化曲線

図6

3.4 局所的対称軸の抽出

3.3で得られたMSD変化曲線から局所的な対称軸を抽出する方法について述べる。

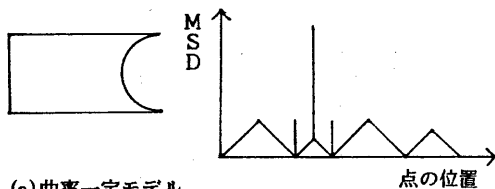
まず、直線と円弧からなる閉曲線(曲率一定モデルに従う図形と呼ぶ)に対するMSD変化曲線が持つ特徴について述べる。図7(b)に、図7(a)の曲率一定モデルに従う図形に対するMSD変化曲線を示す。図7(b)より、つぎのような特徴のあることがわかる。

- (a) 三角形とインパルス状のピークから成る。
- (b) 三角形の二辺の長さは等しく、その傾きは、 ± 1 である。
- (c) インパルス状のピークを除き、三角形の部分だけを考えると、MSDがゼロになる点が角や変曲点である。
- (d) 三角形の頂点が、曲率一定区間の中心点である。

曲率一定モデルに従う図形においては、局所的な対称軸は、角または曲率一定区間の中心点に存在すると考えられ、そのような点は、上記の特徴から、MSD変化曲線上で極大値を持つ点であることがわかる。よって、曲率一定モデルに従う図形からは簡単に局所的対称軸を持つ点を選ぶことができる。

実際の原因図形は曲率一定モデルに従う図形ではないので、このような規則正しいMSD変化曲線を持たない。したがって、単に極値を持つ点が局所的対称軸を持つ角や曲率一定区間の中心点とは限らないのである。しかし、原因図形のMSD変化曲線は、曲率一定モデルに従う図形のMSD変化曲線によく似た波形を示すので、以下のようにして局所的対称軸を抽出する。

まず、図8に示すように、小さなしきい値(実験では10.0)でMSD変化曲線を切り、MSDの値がしきい値を越えた点から、次にしきい値より小さくなる点までを一つの区間とすると、MSD変化曲線がいくつかの区間に分割される。このそれぞれの区間は曲率一定モデルに於ける曲率一定区間、または角に相当すると考えられる。よって、それぞれの区間でMSDの値が最大となる点を局所的対称軸を持つ曲率一定区間の中心点、または角とみなすことができる。このようにして、図6(b)から実際に得られた局所的対称軸を図9(a)に示す。図9(a)では局所的対称軸は次のようにして描かれる。いま、点 P が上記の方法で局所的対称軸をもつ点として選ばれ、点 P から閉曲線上で左右にMSD(P)離れた点 R 、 R' を求め、点 P と線分 RR' の二等分点 P' を結んだ線分 PP' を点 P が持つ局所的対称軸とする。



(a) 曲率一定モデル
に従う図形

(b) MSD 変化曲線

図7

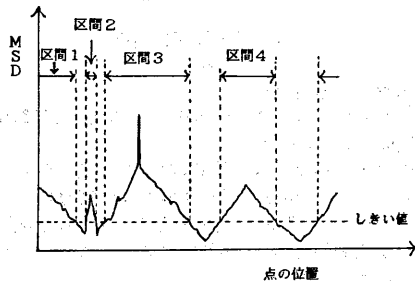
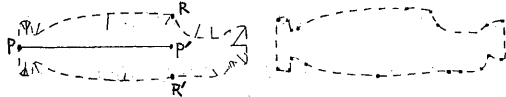


図8 局所対称軸の抽出方法



(a) 局所対称軸の抽出

(b) 角と変曲点の検出

図9

3.5 角と変曲点の検出

閉曲線上の任意の点 $P(i)$ において、その点を持つ MSD の値 $MSD(P(i))$ は、定義より次のような意味を持っている。つまり、点 $P(i)$ から閉曲線上で左右に $MSD(P(i))$ 離れた二つの点 $PL(i)$ 、 $PR(i)$ の少なくとも一方は角または変曲点であるということである。このような意味を持つので、MSD 変化曲線から閉曲線上の角と変曲点が検出できると考えられる。以下では $PL(i)$ 、 $PR(i)$ は角や変曲点の候補点と呼ぶ。

閉曲線上のすべての点について、その点に対する角や変曲点の候補点の位置を求め、横軸に閉曲線上の点の位置、縦軸にその位置に存在する角や変曲点の候補点の個数をとってヒストグラムを作成する。MSD は上記のような意味を持つので、閉曲線上で実際に角や変曲点の存在する点ではヒストグラムは高い値のピークを持つと考えられる。よって、次のようにして角や変曲点の抽出を行うことが出来る。上で求めたヒストグラムのピークはそれほど尖鋭ではないので、反復法 [4] を用いてヒストグラムを尖鋭化し、その後極大値をとることによって角や変曲点を求める。図 6 (b) の MSD 変化曲線から、角や変曲点を抽出した結果を図 9 (b) に示す。

3.6 実験結果及び考察

図 10 に局所対称軸の抽出、及び角と変曲点の検出の実験例を示す。これを見てもわかるように、多少、人間の認識と異なる所がある。これは次の二つの理由による。

第一は、3.3 (1) で述べた対称軸方向の決定において、雑音や曲率の激しい変化などによって、方向が正確に決定できない場合があるからである。

第二は、3.3 (4) で述べたしきい値処理において、大きなずれの変化をとらえる目的でしきい値を大きくしたために、逆に小さな曲率の変化をみのがすからである。

以上のような問題を含んではいるが、多くの場合ほぼ正確

に局所対称軸の抽出や角と変曲点の検出ができると考えられる。

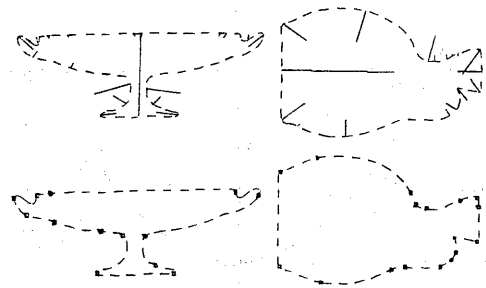


図10 実験例

4. 階層的分割

一般に図形は複雑であり、さまざまな種類の凹や凸があり、しかもそれらは様々な "大きさ" を持っている。そして、それらは図形の大局的構造を構成するものであったり、単なる小さな部分構造として大局的構造に付属する部分であったり、さらには雑音等の誤差が原因であるものまで存在する。ここでは図形の大局的構造を与える凹や凸を大局的特徴と呼び、部分的構造を与える凹や凸を局所の特徴と呼ぶことにする。図形の大局的特徴と局所の特徴を同一レベルで考え、分割に利用することは望ましくない。局所の特徴は大局的特徴に付属しているものであるから、図形の特徴をとらえるためには、図形の各部分をその大きさに従って階層的に取り扱う必要がある。これを実現するためにガウス平均化操作を用いる。ここでは、平均化操作によって図形を階層的にとらえ、それから得られる大局的特徴と局所の特徴を用いて図形の分割を行う。

4.1 処理の流れ

図形分割の全体の流れは、図 11 のように、平均化操作、特徴点抽出、特徴点連結、分割の四つの部分から構成される。

処理の流れとしては次のようになる。まず複数の異なる平均化距離によって原図形をガウス平均化する。次に平均化操作によって得られた解像度の異なる図形それぞれについて、凹や凸の角を特徴として抽出する。この時、大きな平均化距離で平均化されて得られた図形からは、大局的な凹や凸の特徴が抽出され、逆に小さな平均化距離によって平均化された図形からは局所的な凹や凸が得られる。図形を階層的に分割するには、解像度の異なる図形から得られた凹や凸の角中で同一の部分を表しているものについては、対応関係を付ける必要がある。したがって図形分割処理の第三番目の段階では、それぞれの凹の角が最初に現われる平均化距離やその後の変化の様子等の情報に基づき、凹の角の対応付けを行う。最後にこの結果を利用して図形を階層的に分割する。

ここでは、図形の分割法として凹の角を利用する方法を採用する。すなわち同じ種類、大きさの凹の角が二つあれば、その二つの凹の角を結び、その直線によって図形を分割する。しかもより大きな平均化距離において現われた凹の角、つまり原図形においてより大局的な凹の角から分割を行っていく。二つの凹の角を結んで分割する理由は、凹の角の存在しない、つまりすべて凸部分からなる図形はより基本的な図形と考えられるからである。したがって特徴点の連結は、凹の角に対してのみ行う。凸の角の特徴は凹の角が一つしか

い場合の分割などに対して補助的に用いるので、連結は行わないが、抽出しておく必要がある。

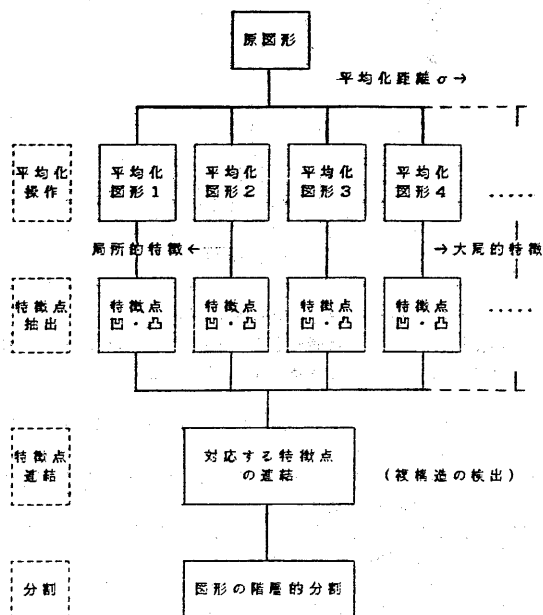


図 11 階層的分割方法

4.2 平均化操作

ここでは、ガウス平均化操作を用いる。2.2でも述べたが、一般に、ガウス平均化操作は、一様平均化操作に比べ高周波成分除去能力が優れており、4.3において特徴点を抽出する場合に、不必要な点を選びにくいという長所を持っている。

このガウス平均における図形の解像度を变化させる変数である σ (ここでは一様平均化操作の K にあたるものとして、平均化距離と呼ぶ。) を (5) 式の規則にしたがって变化させて、そのつど平均化図形を求める。

$$\sigma(n) = \sigma_0 + n \cdot \alpha \cdot (n-1) \cdot \alpha / 2 \quad (5)$$

$$(\sigma_0 = 4.0, \alpha = 1.0, n = 0, 1, 2, \dots)$$

一般に小さい σ では σ の変化に対する図形の形状変化が激しく、逆に大きな σ では σ の変化に対する図形の変化は小さい。したがって、 σ が小さい所では細かく σ を変化させ、 σ が大きくなるにつれて粗く σ を変化させる必要がある。

4.3 特徴点の抽出

図形の基本的特徴として、ここでは凹部分、凸部分について考える。外周線として入力された原図形に対して平均化操作を施して得られた平均化図形も外周線としてその形が与えられる。そこでまず外周線を凹部分からなる凹区間と凸部分からなる凸区間とに分ける。このため、外周線上の凹凸の変化を数的に表す必要がある。図 12 にその方法を示す。この方法では平均化図形上の任意の一点 P_g に対して、外周線に沿った距離が r (実験では 5) である左右の二点 PL_g, PR_g を求める。特徴量はベクトル $\overrightarrow{P_g PR_g}$ のベクトル $\overrightarrow{PL_g P_g}$ に対する角 θ で与えられる。

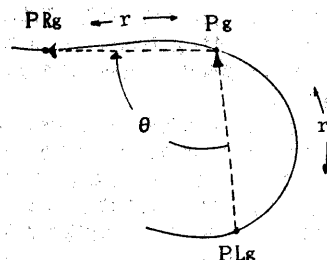


図 12 特徴量 θ の求め方

$$\theta = \angle(\overrightarrow{PL_g P_g}, \overrightarrow{P_g PR_g}) \quad (6)$$

θ を用いれば、 θ の符号によって凹凸を区別できる。 $\theta > 0$ である部分は凸部分、 $\theta < 0$ である部分は凹部分である。

特徴点としては凸部分における θ の極大値を凸頂点、凹部分における θ の極小値を凹頂点および凹部分と凸部分の境界点 ($\theta = 0$) を抽出する。特徴点の位置は、原図形上の対応する点の番号で表す。このようにして得られた頂点は、平均化距離 σ の解像度において原図形をながめた時の基本的構造を表す点である。

4.4 特徴点の階層的連結

4.3 で抽出された特徴点は、平均化距離 σ ごとに独立したものであり、 σ の値を離散的に変化させているので、 σ の異なる値間での特徴点の対応関係に関する情報は得られていない。たとえば σ の大きい値における一つの凹頂点が、 σ のより小さい値におけるいくつかの凹頂点のうちのどれに対応するのかわからない。つまり同じ凹部分を表している凹頂点間の対応関係が知られていない。そこでここでは平均化距離 σ ごとに個々に得られている凹頂点の対応関係を調べ、図形の同じ部分を表している凹頂点を連結し、一つの凹特徴点としてまとめる。そうすることによって、図形上において図形の基本的構造を表す凹頂点が、平均化距離 σ を大きな値から小さな値へと徐々に変化させるにつれて、どのように変化するか、あるいは新たに発生してくるかを調べることができる。

凹頂点の σ の変化に対する変化として重要なものは、凹頂点の分岐があげられる。凹頂点の分岐が起こるのは、原図形の一部分に“複構造”が存在する場合である。たとえば、図 1(a) の A、または B のように、大きな凹部分の中に小さな凸部分が存在すると、この部分における凹頂点の変化はつぎのようになる。まず大きな σ において大きな凹構造を表す凹頂点が現われる。 σ の値を小さくしていくにつれて小さな凸構造の影響が現われ、一つの凹頂点が二つの凹頂点に分岐する。またさらに σ を小さくするとこれら二つの凹頂点の間に一つの凸頂点が現われる。したがって図形を階層的に分割するためには、この複構造による分岐を的確に見つけ出す必要がある。

つぎに実際の処理について述べる。一般に凹や凸を表す頂点の数は、 σ が大局的特徴の度合を示す変数であるので、大きい値の σ では少なく、 σ を小さくするにつれて局所的特徴が現われるため増加する。そこで特徴点の連結は、大きい値の σ での凹頂点から小さい値の σ での凹頂点へと行うことにする。図 13(a) に示すように、まず複構造による凹頂点の分岐は考えずに、単純に凹頂点 1 から凹頂点 2、3、4、5、6 と連結する。同一の部分を表している凹頂点の位置の

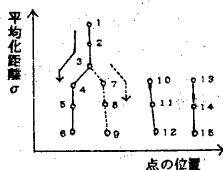
σ の変化によるずれは、異なる凹頂点間の距離に比べて小さいと考えられるので、単純接続は σ の差による位置のずれが、最も小さくなる凹頂点どうしを同一の部分を表していると考え、連結する。

単純接続は大きい σ の値の凹頂点から小さい値の σ での凹頂点へと行うので、小さな値の σ での凹頂点の中には未接続な点(凹頂点1、2、3、4、5、6以外の点)も含まれる。この未接続な点は新たに現われた凹頂点あるいは複雑構造によって分岐した凹頂点である。そこで未接続な凹頂点のうち複雑構造によって分岐した点を探す。複雑構造によって分岐した二つの凹頂点のうち、一方はすでに単純接続によって連結されており、このすでに連結されている凹頂点の特徴量 θ と未接続の凹頂点の特徴量 θ との差は小さいと考えられる。したがって複雑構造の分岐条件としては、次の三つを用いている。

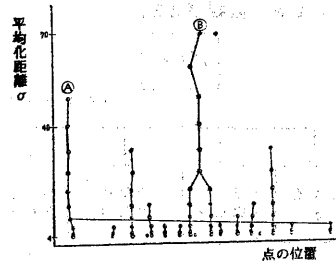
- (1) 特徴量 θ の差が小さい。(θ は分岐が初めて現われる段階での σ における値である。)
- (2) 二つの凹頂点の間に上位の σ における凹頂点が存在する。
- (3) 二つの凹頂点間には、他の凹頂点は存在しない。

以上の三つの条件を満たす場合、複雑構造分岐と認める。図13(a)では、凹頂点7が複雑構造分岐であり、凹頂点3から凹頂点7、8、9と連結される。単純接続、複雑接続どちらの処理においても上位の σ における凹頂点と接続されなかった凹頂点(1~9以外)は、新たに出現してきたものとみなし、上記の操作を繰返す。図1(a)の蝶に対して、特徴点の連結を行ったものを図13(b)に示す。図1(a)のA、Bは図13(b)のA、Bに対応する。複雑構造を持っている部分では、凹頂点の分岐が起こることがわかる。最終的に木構造を用いて凹頂点の連結構造を表す。また、以降の処理においては、連結操作によって繋がれた凹頂点群を一つの凹特徴点と考える。但し複雑構造を持つ凹頂点は、分岐後二つの凹特徴点に分かれるものとし、分岐前の凹特徴点と合わせて、三つの凹特徴点から構成されるものとする。各凹特徴点は、連結に対する情報以外に次の四つの情報を持っており、これらの値は4.5で述べる図形の分割において用いられる。

- (1) $\sigma_{\max}$: その凹特徴点が始めて現われた時の σ 。但し複雑構造によって分岐した点では、初めて分岐した時の σ
- (2) $\sigma_{\min}$: その凹特徴点における最も小さい σ 。但し複雑構造に分岐する点では、分岐直前の σ
- (3) θ ($\sigma_{\min}$): $\sigma_{\min}$ における特徴量 θ
- (4) 位置: $\sigma_{\min}$ における位置。



(a) 特徴点の連結方法



(b) 特徴点の連結

図13

4.5 凹特徴点の接続による図形の分割

平均化操作によって階層化されて抽出された凹特徴点を用いて分割を行う。分割の基本方針は以下の通りである。

分割ルール

- (1) より大きな σ で現われてきた凹特徴点から分割ルールを適用していく。
- (2) 二つの類似した凹特徴点が存在すれば、その二点を結ぶ線分によって図形を分割する。
- (3) 類似した凹特徴点が存在しない場合、隣接する凹特徴点または凸頂点を利用して分割する。
- (4) 一回の分割によって図形は、二つに部分図形と一つの分割線との三つの部分に分割されるとして扱う。
- (5) 分割に用いられる凹特徴点は、再度分割に使用されることはない。

以上の五つのルールの適用順序を次に示す。まず(1)のルールを適用するために、すべての凹特徴点の中で $\sigma_{\max}$ の最も大きい点を選び、その $\sigma_{\max}$ を初期分割レベル σ_{sg} とする。次に σ_{sg} に近い値の $\sigma_{\max}$ を持つ凹特徴点に対してルール(2)を適用し、図形を分割する。この時ルール(2)が適用可能な凹点の組み合わせが複数個存在する場合、後に述べる類似度を評価し、その値の最も高い二つの凹特徴点を優先させて、それぞれの位置を線分で結んで分割する。但し、ルール(2)を適用可能な凹特徴点が、複雑構造を持ち、下のレベルにおいて二つの凹特徴点に分岐する場合、分割に用いられる位置は下のレベルにおける二つの凹特徴点の位置(二つ存在する)とし、分割線は二本になるものとする。この時、分割線自身が一つの領域となる(ルール(4))。また、ルール(2)の適用可能な二つの凹特徴点が、どちらも複雑構造を持ち、下のレベルでそれぞれ二つの凹特徴点に分かれる場合は、図14のA、Bに示すように分割する。また、類似した凹特徴点のない凹特徴点に対しては、上記のルール(3)(後に説明する)を適用する。次にそれぞれの部分図形について、その図形中の凹特徴点の中で $\sigma_{\max}$ が最大の点を求め、その点の $\sigma_{\max}$ を σ_{sg} として上記の操作を繰返して図形をさらに分割していく。また、ルール(2)、ルール(3)で、ある凹特徴点が一度分割に用いられると、その凹特徴点は再度分割に用いられることはない(ルール(5))。凹特徴点が、複雑構造を持つ場合は上のレベルの凹特徴点で一度分割されると、下のレベルの凹特徴点では分割されない。

凹特徴点どうしの類似度は以下のように評価している。

類似度評価

- (1) $\sigma_{\max}$ がほぼ同じである。
- (2) θ ($\sigma_{\min}$)がほぼ同じである。
- (3) 二つの凹特徴点の直線距離が近い。

以上の三つの観点から、二つの凹特徴点間の類似度を次のように評価している。

二点 a 、 b における評価関数 $S(a,b)$:

$S1=f(\sigma_{\max}(a), \sigma_{\max}(b))$

$S2=f(\theta(\sigma_{\min}(a)), \theta(\sigma_{\min}(b)))$

但し $f(x,y)=\max(x,y)/\min(x,y)$

$S3=(\text{二点}a,b\text{の直線距離})$

$S(a,b)=S2+S3/128$

但し $S1>2$, $S2>3$ のうち一つでも真であれば $S(a,b)=\infty$

以上のように定義された $S(a,b)$ が最小となる二つの凹特徴点 が、最も類似していると考える。

次に分割ルール(3)について説明する。ルール(2)では二つの凹特徴点を利用して分割するため、類似した凹特徴点をもたないものに対しては分割できない。類似した凹特徴点を持たない凹特徴点を分割する場合、図15のように $\sigma_{\max}$ のレベルにおける隣接する二つの特徴点(凹特徴点でも凸頂点でもどちらでもよい)の midpoint と分割する凹特徴点の位置とを結ぶ直線によって分割を行う。

図1(a)の蝶に対して以上のような方法で分割を行ったのが、図16(a)である。図16(a)は全体図であり、実際には分割された各要素は階層的構造を構成する。それを図16(b)に示す。分割によって図形は三つの要素に分けられる。図16(b)の○で囲まれた要素は、三つの部分のうちの一つの分割線による部分を表す。たとえば蝶の胴体部分は右の羽と左の羽を分割する分割線として分離される。このように一つの部分図形が分割線として振る舞うのは、この部分が複構造を持つためである。またその他の○で囲まれた要素は、単なる分割線であり、複構造を持たないので一つの独立した部分図形とはならない。

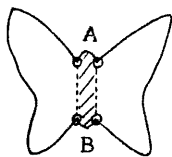


図14 ルール(2)による分割

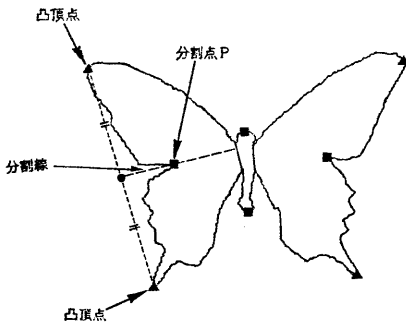
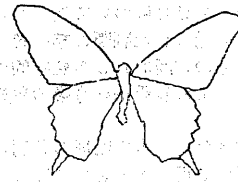
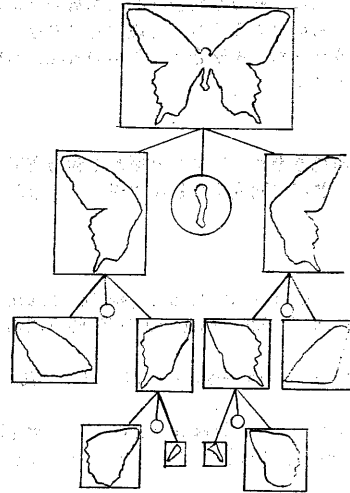


図15 ルール(3)による分割



(a)蝶の分割



(b)階層的分割

図16

4.6 実験及び考察

図17に二種類の壺に対して分割を行った結果を示す。これらを見てもわかるように図形の特徴を大局的なものから局所的なものへと階層的にとらえ、それによって分割を行うという方法は、かなり有効な方法であることがわかる。

ここでの基本的な分割方法は、単純に二つの類似した凹特徴点を直線によって結びその線分によって分割する方法である。そのため、必ずしもすべての図形に対して満足できる結果が得られるわけではない。例で用いた蝶の図のように凹凸の特徴がはっきりしているものや、対称な図形に対しては、類似した二つの凹特徴点を見つけやすく、比較的良好の結果が得られる。しかし類似した凹特徴点が多数あるものに対しては、凹特徴点の組合わせ方によって、様々な分割の行われ方が存在し、このような場合には必ずしも満足のいく結果が得られるものではない。

また一度分割点として用いられた凹特徴点を再度分割点として用いることはない。しかし実際には一つの凹特徴点を何度も利用して分割したい場合があるので、このことに対応する必要もある。

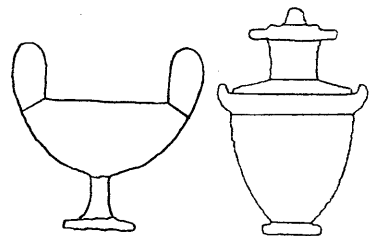


図17 実験例

5. おわりに

ここでは、図形を分割するための二つの観点、つまり局所的な対称性及び角の大きさについて述べた。本論文での特徴抽出、及びそれらを元にした判断は常に確定的に行われている。しかし、これらの判断はむしろ確率的に表現されるべきものであり、そのための表現法は今後の研究課題の一つである。

また、先にも述べたが、本来図形の分割は一つや二つの観点からの特徴を用いて行うべきものではなく、多くの観点から得られる特徴を総合的に用いて行うべきである。ここで述べたアルゴリズムは、そうした総合的な解析のための基本モジュールとなるものと考えられ、今後は更に異なった図形の特徴計測法、及びそれらを統合するための方法について検討を進める予定である。

謝辞

最後に、本研究を進めるにあたり暖かく御指導下さいました長尾真教授、並びに研究室の各氏に対して、心から御礼申し上げます。

参考文献

- [1] T. Pavlidis, A Review of Algorithms for Shape Analysis, COMPUTER GRAPHICS AND IMAGE PROCESSING 7, 243-258, 1978
- [2] Andrew P. Witkin, Scale-Space Filtering, IJCAI-83, 1019-1022, 1983
- [3] 麻田, Smoothed Local Symmetriesによる二次元図形の階層的記述, 情報処理学会研誌, コンピュータビジョン, 32-5, 1984
- [4] K. Sakaue and M. Takagi, Separation of Overlapping Particles by Iterative Method, Proc. 5th ICPR, pp. 522-524, 1980