

## 輪郭線図形の局所的平滑化による近似に基づく形状要素の生成

本谷 秀堅

出口 光一郎

東京大学大学院  
工学系研究科

東北大学大学院  
情報科学研究科

輪郭線図形の大局的形状を表す部分図形のことを、本稿では輪郭線図形の形状要素と呼ぶ。本稿では、与えられた複数の輪郭線図形が共通して持つ大局的形状を表す形状要素を作成する手法を提案する。まず各輪郭線図形の近似図形を、局所的平滑化を利用して作成する。近似図形は、元図形の大局的な形状を反映している。次に近似図形を角点により分割し、個々の輪郭線図形の形状要素を作成する。そしてそれぞれの形状要素を比較し、形状の似たもの同士で集合に分ける。最後に各集合の平均を求めることにより、与えられた複数の輪郭線図形が共通して持つ、大局的な形状を表す形状要素を作成する。近似図形の作成、および近似図形の分割に用いる角点の抽出には平滑化を利用する。実験により、本手法が与えられた輪郭線図形より形状要素を作成できることを確認した。

## A Method of Shape Component Generation for Contour Figure Based on Approximation by Local Adaptive Smoothing

Hidekata Hontani

and

Koichiro Deguchi

Faculty of Engineering,  
University of Tokyo,  
Bunkyo, Tokyo, Japan

Graduate School of  
Information Sciences,  
Tohoku University,  
Sendai, Miyagi, Japan

We propose a method for generating primitive shape components of given contour figures. The generated primitive shape components describe global shapes which are common to a set of the contour figures. We, first, approximate each contour figure by local smoothing. An approximated contour figure represents a global shape of the original contour. Then, the approximated contour figure is split at corner points into shape components. Comparing the shapes of the components, we cluster them into some sets of components of similar shapes. Finally, average shape components of every cluster are generated. The generated shape components are regarded as primitive shape components which describe global shapes of all contours. We use a smoothing operation to approximate a contour figure and to select corner points splitting the contour. Experimental results show feasible primitive shape components are generated from given contour figures.

## 1 はじめに

輪郭線図形の形状特徴を記述するために、輪郭線図形の近似図形を作成する手法がこれまでに提案されてきた。輪郭線図形の近似図形とは、図形上の局所的な構造をより単純な図形で置き換え消去したものである。ここで構造とは、輪郭線上の個々の凹凸のことであるとする。

著者らは、輪郭線上の局所的な構造の消去に用いる部分図形を、元図形自身から作成しつつ近似する手法を提案した [1]。この近似手法は、輪郭線図形の平滑化を用いることにより、輪郭線図形上の構造およびそれらの大きさを求める。そして小さな構造のみをそれぞれの構造の大きさに適応させて平滑化する。近似する際、より大きな構造までを平滑化すれば、元図形のより大局的な形状特徴を反映した近似図形を作成することができる。この結果、一つの輪郭線図形より、近似の度合いの異なる有限個の近似図形が作成される。

様々な輪郭線図形の近似図形を作成し、比較すると、元図形上では形状が異なるにも関わらず、近似図形上では形状の一致している部分が存在することがある。特に大局的な形状の似通った複数の輪郭線図形の近似図形を比較すると、多くの近似図形に共通する部分図形が見られる。複数の輪郭線図形の近似図形に共通して見られる部分図形は、それら複数の輪郭線図形が共通して持つ、大局的な形状特徴を反映していると考えられる。本稿の目的は、このような、与えられた複数の輪郭線図形に共通する大局的な形状特徴を反映した、部分図形を得ることである。次章において本稿の目的について詳しく述べる。

## 2 輪郭線図形の形状要素

輪郭線図形の形状は、輪郭線に沿った凹凸の組み合わせにより定まる。前章でも述べた通り本稿では、輪郭線に沿った凹凸の一つ一つを構造と呼ぶ。本稿で用いる輪郭線図形の近似手法は、輪郭線上の構造のうち、小さな構造のみを部分的に平滑化して消去する。輪郭線上の各構造の具体的な抽出法は 3.2 節において述べる。

ここで、小さな構造を消去することにより現れる、輪郭線図形の大局的な形状を反映した部分図形のことを、形状要素と呼ぶことにする。輪郭線の大局的な形状は、複数の形状要素の組み合わせにより記述できる。例えば輪郭線図形の線分近似手法は、

形状要素として線分を用い、その組み合わせにより大局的な形状を記述している。一方本稿では、形状要素を輪郭線図形自身より作成する。

線分近似された図形は、形状要素(線分)が角点により接続されている。本稿においても輪郭線図形の近似図形は、形状要素が角点により接続されて構成されているとみなすことにする。ただし角点とは、曲率の大きさの極大点のことである。

形状要素を作成するために、輪郭線図形を近似し、近似図形を角点により分割する。分割により得られた個々の部分図形を形状要素と見なす。ただし分割に用いる角点は、元図形の大局的な形状を反映した角点でなければならない。先に述べた通り、輪郭線上の各構造の大きさは輪郭線図形を平滑化することにより求められる。同様に元図形上に複数ある角点に対しても、輪郭線図形の平滑化を用いることにより、局所的な角点と大局的な角点の区別をすることができる [2]。

本稿の目的は、複数の輪郭線図形が与えられたとき、まずそれぞれの輪郭線から形状要素を作成し、次に各輪郭線図形に共通してみられる形状要素を抽出することである。抽出された形状要素は、与えられた複数の輪郭線図形に共通する大局的な形状特徴を反映したものとなる。

以下、まず個々の輪郭線図形の近似手法を述べ、次に各近似図形を角点により分割し形状要素を作成する手法について述べた後、最後に複数の輪郭線図形に共通する形状要素を抽出する手法について説明する。

## 3 輪郭線図形の近似手法

まず近似図形の求め方について説明する [1][3]。

### 3.1 輪郭線図形の平滑化

各輪郭線図形  $C(u) = (x(u), y(u))$  の構造の大きさを捉えるために次式 (1) を満たす曲線  $F(u, t)$  を考える。ただし  $u$  は輪郭線に沿ったパラメータである。

$$\begin{cases} F(u, 0) = C(u) \\ \partial F / \partial t = -\kappa N \end{cases} \quad (1)$$

ただし  $\kappa$  は曲率、 $N$  は単位法線ベクトルである。また、 $t$  をスケールパラメータと呼ぶことにする。

$t$  を 0 から次第に増加させると、輪郭線  $F(u, t)$  上の各点は法線方向に曲率の大きさだけ移動していく。スケールパラメータ  $t$  の増加による  $F(u, t)$  の変

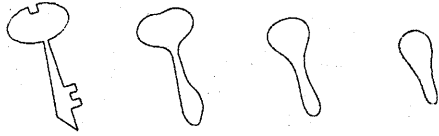


図 1: 式 (1) による図形の変化。元図形の輪郭線の長さは 540(pixel)。左より  $t = 0, 100, 500, 900$ 。

形の例を図 1 に示す。本稿においては、形状要素およびそれら大きさが式 (1) による変形操作に基づいて定義される。この定義については後に説明する。

スケールパラメータ  $t$  が変化する際の輪郭線図形  $F(u, t)$  の変形には次のような性質がある [4][5]。ここで輪郭線に沿った長さを表すパラメータを  $s$  とおく。

- $t$  について半群の性質を持っている。
- $t$  の増加とともに曲率変曲点 ( $\partial^2 \kappa / \partial s^2 = 0$ ) の数が増えることはない。変曲点の消滅は、複数の変曲点が融合することにより起こる。
- $C(u)$  の面積を  $A$  とおく。このとき  $C(u)$  は  $t = A$  で点へと収束する。また、 $t < A$  において凸図形となり、収束する際の形状は円である。

与えられた輪郭線図形  $C(u)$  より  $F(u, t)$  を求める手法には、Level Set を用いる手法 [6] や、ガウス関数による平滑化を利用する手法 [7] がある。本稿では輪郭線図形  $C(u)$  上の各点を  $t$  を増加させる際に追跡する必要があるため、点の追跡をより容易に行えるガウス関数を用いる手法を採用した。

### 3.2 輪郭線の構造とその大きさ

前章で述べた通り、本稿では輪郭線上の個々の凹凸を構造と呼んでいる。各構造およびその大きさを式 (1) に基づく変形操作に基づき定義する。

前節で述べた通り、式 (1) に基づく変形により任意の閉曲線は円へと収束する。また、収束の過程で曲率の変曲点の数は単調に減少する。このことは、 $u-\kappa$  グラフの凹凸がスケールパラメータ  $t$  の増加に伴い減少し、曲率一定のグラフへと変化していくことを意味する (図 2 左)。本稿ではスケール  $t$  の増加に伴う変曲点の消滅を、輪郭線上の構造の消滅とみなす。

スケール  $t$  の変化に対する曲率の変曲点の変化を捉えるために  $u-t$  の空間を考える。この空間はスケール

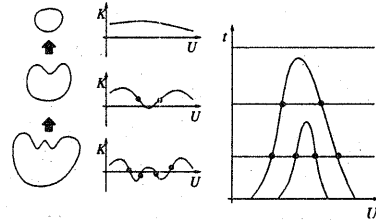


図 2: 左:  $t$  の変化に対する図形の変化。中:  $u-\kappa$  グラフの変化。 $t$  の増加に伴い曲率の変曲点の数は減少する。右: スケールスペースにおける変曲点の軌跡。必ず上に閉じた曲線となる。

ルスペースと呼ばれている [8]。各スケール  $t$  において曲率の変曲点を求め、スケールスペースの対応する位置にプロットする。スケール  $t$  の増加に伴い変曲点の位置は変化し、スケールスペースに曲線を描く。変曲点は単独では消滅せず、複数の変曲点が出会うことにより消滅する。このためスケールスペースにおける曲率の変曲点の軌跡は図 2 右に示すように、上に閉じた曲線となる。

$t$  の増加により曲率の変曲点がペアで消滅し、 $u-\kappa$  グラフの凹凸が減り、輪郭線形状は円形へと近づいていく。本手法では曲率の変曲点を輪郭線上の各構造の端点とみなす。そして消滅する際に融合した変曲点により挟まれた領域を一つの構造とみなす。さらに各構造が消滅したスケールを、その構造の大きさとする。

### 3.3 局所的平滑化による近似

元図形上の構造のうち小さな構造のみを消去することにより、元図形の近似図形を作成する。本手法は、小さな構造のみを平滑化することにより消去する。ここで平滑化の量は、各構造の大きさにより定めることにより適切に構造を消去する。具体的には次のようにして近似図形を作成する。

1. 近似の度合  $t_0$  を定める。
2. 対象となる輪郭線図形  $C(u)$  より、スケール  $t$  について  $0 \leq t \leq t_0$  の範囲で式 (1) を満たす曲線群  $F(u, t)$  を作成する。スケール  $t$  が増加するに従い、 $F(u, t)$  は円に近づいていく。
3. 各スケール  $t$  の図形  $F(u, t)$  より曲率の変曲点を求め、スケールスペース  $u-t$  空間にプロットする (図 3(a))。スケールスペースに描かれる曲

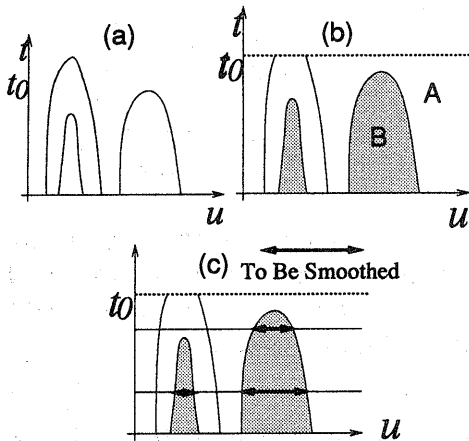


図 3: 輪郭線図形の近似手順。元図形上の小さな構造のみを平滑化する。

線が各構造の端点に相当し、上に閉じた曲線がスケール  $t_0$  までに消滅した構造、すなわち大きさが  $t_0$  より小さい構造に対応している。

- 変曲点の曲線を境界として、スケールスペースを直線  $t = t_0$  を含む領域 (領域 A) と含まない領域 (領域 B) とに分割する (図 3(b))。
- 元図形を用意し、スケールスペース内の領域 B に対応する箇所のみを式 (1) に従って変形させる。式 (2) を満たす図形  $G(u, t)$  を得る。  $G(u, t_0)$  を近似図形とする。

$$\begin{cases} G(u, 0) = C(u) \\ \partial G / \partial t = 0 & ((u, t) \in \text{領域 A}) \\ \partial G / \partial t = -\kappa N & ((u, t) \in \text{領域 B}) \end{cases} \quad (2)$$

### 3.4 近似結果とその性質

局所的な形状のみが異なる二つの輪郭線図形の近似結果を図 4 に示す。本手法により得られる近似図形は、近似の度合い  $t_0$  を連続的に変化させても、とびとびに変化する。すなわち、一つの輪郭線図形から得られる近似図形は有限個となる。図 4 には元図形から得られた近似図形の全てが表示されている。

図 4 に示した二つの元図形は、鍵先の構造が異なっている。しかし近似の度合いが大きな近似図形においては、鍵先の構造がそれぞれ平滑化されており、互いに似通った形状となっている。このことは、与

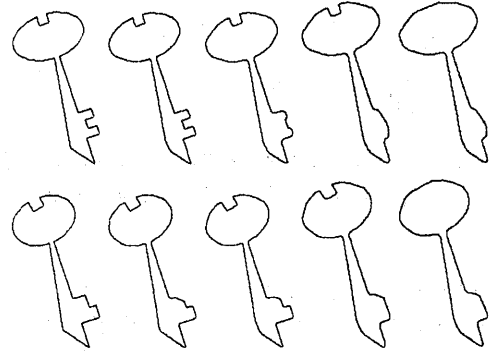


図 4: 鍵図形の近似結果

えられた二つの輪郭線図形の大局的な形状が似通っていることの実現とみなすことができる。図 5 にスケールスペースとあわせて結果を表示する。

本手法により得られる近似図形の主な特徴をまとめると次のようになる。

- 元図形上の小さな構造のみ平滑化されている。平滑化の量は図形自身より定められる。
- 一つの輪郭線図形から得られる近似図形の数は有限である。
- 共通した部分形状を持つ図形の近似図形は、共通した部分形状を持つ。

## 4 近似図形からの形状要素の作成

本稿では、輪郭線上の小さな構造を消去することにより現れる大局的部分図形を、形状要素と呼ぶ。本章では、複数の輪郭線図形の近似図形より、それら輪郭線図形に共通する大局的形状を記述するのに有用な、形状要素を作成する手法について述べる。

### 4.1 平滑化を利用した大局的な角点の抽出

本稿のはじめに述べた通り、ここでは近似図形を、複数の形状要素が角点により接続されたものとみなす。ここで角点とは、曲率の絶対値の極大点のことである。近似図形を形状要素に分割するために、近似の程度を考慮し、大局的な角点を抽出する。そのため Chin らの手法 [2] を利用する。以下簡単に Chin らの手法を説明する。

式 (1) に基づき元図形  $C(u)$  を平滑化し、  $F(u, t)$  を得る。平滑化された図形  $F(u, t)$  上の各点にお

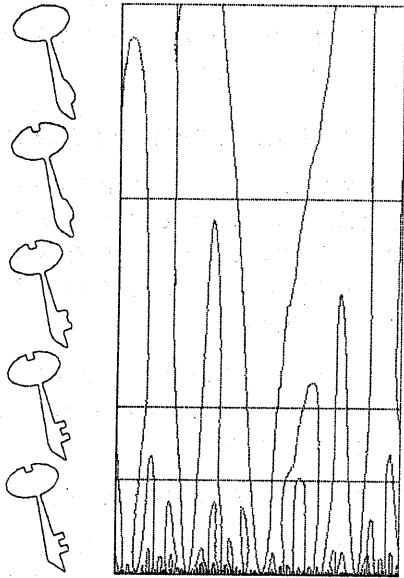


図 5: 鍵図形の近似結果とスケールスペース。スケールスペースに引いてある横軸がそれぞれの  $t_0$  に対応している。

る曲率を  $\kappa(u, t)$  で表す。このとき各スケール  $t$  における図形  $F(u, t)$  上の角点を、次式を満たす点のこととする。

$$\begin{cases} \kappa(u, t) > 0, \\ \partial\kappa(u, t)/\partial u = 0, \\ \partial^2\kappa(u, t)/\partial u^2 < 0, \end{cases} \quad \text{or} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \kappa(u, t) < 0, \\ \partial\kappa(u, t)/\partial u = 0, \\ \partial^2\kappa(u, t)/\partial u^2 > 0. \end{cases}$$

各スケール  $t$  における  $F(u, t)$  上で式 (3) を満たす角点を抽出し、その位置を  $u-t$  空間にプロットする。角点はスケールの増加とともに輪郭線上を移動し、消滅していく。

図 1 に示した例において、 $u-t$  空間にプロットされた角点の軌跡を図 6 に示す。スケール  $t$  の増加とともに、角点の数が減少していることが分かる。 $u-t$  空間における角点の軌跡のうち直線  $t = t_0$  と交わるものは、スケール  $t_0$  による平滑化を行っても消えなかった角点に対応している。

近似図形は、ある大きさよりも小さな構造を消去することにより作成される。近似図形を分割する角

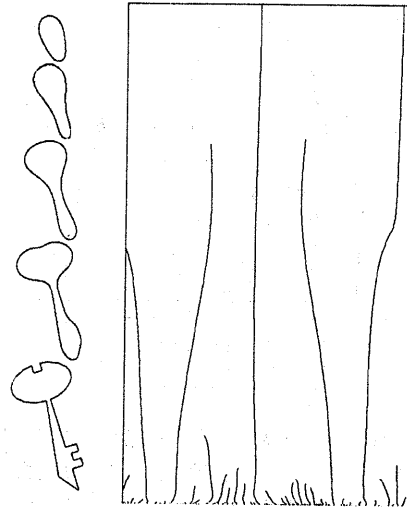


図 6: スケール  $t$  の変化にともなう輪郭線形状の変化(左)と、各スケールで抽出された角点の  $u-t$  空間における軌跡(右)

点は、消去した構造の大きさにあわせて抽出する。次にこのことについて述べる。

#### 4.2 近似図形の角点における分割と形状要素作成

前章で述べた通り、本手法は平滑化による曲率の変曲点の消滅により構造の消滅とみなす。曲率の変曲点の消滅は、図 7 中の  $\times$  印で示すように  $u-t$  空間における変曲点の軌跡の頂点で起こる。

形状要素の端点として、各構造が消滅したスケールにおいて、各構造の消滅が起こった点を挟む角点を二点抽出する。すなわち図 7 に示すように、ある構造が消滅したスケールを  $t_1$  とおくと、 $u-t$  空間において直線  $t = t_1$  と角点の軌跡との交点のうち、構造の消滅が起こった点を挟む二点を抽出する。このことにより、消去する構造の大きさにみあう大局的な角点を抽出できる。

抽出した角点の元図形における位置を求めるために、角点の軌跡を  $t = 0$  に向かって追跡する(図 7)。  $u-t$  空間において曲率の変曲点の軌跡と角点の軌跡とは接することはあっても交差することはない。このため、元図形を部分的に平滑化することにより近似図形を作成しても、上記のようにして得られた元図形上の角点の位置は移動しない。

近似図形をこれら角点により分割した結果を、元図形の大局的な形状の、複数の形状要素の組み合わせ

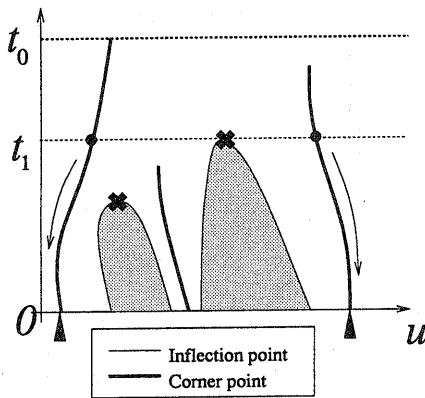


図 7: 形状要素の端点としての角点の抽出。各構造が消滅することにより、新たな形の形状要素が現れる。対応する形状要素の端点は、 $u-t$  空間における角点の軌跡と曲率の変曲点の軌跡とにより抽出することができる。三角が大局的角点の位置。

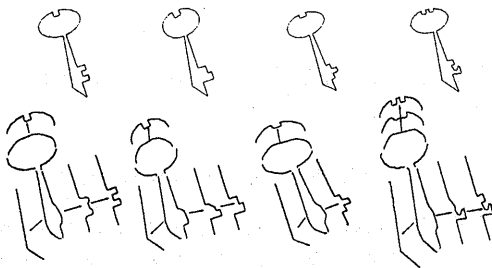


図 8: 形状要素による階層的記述結果。上: 元図形。下: 形状要素による記述。

せによる記述とみなす。より大きな構造に対応する形状要素は、より小さな構造に対応する形状要素にさらに分割される。このようにして、各輪郭線の形状を、形状要素を用いて階層的に記述することができるようになる。図 8 に、似た形状を持つ四つの輪郭線図形の記述結果を示す。大局的な形状が似ていることや、鍵先や取手の局所的な形状が異なることなどが記述の階層構造に反映されている。

様々な輪郭線図形の近似図形を作成してみると、多くの図形に共通して現れる形状要素のあることに気付く。特に図 8 に示したように大局的な形状の似通った輪郭線図形の近似図形を作成すると、それぞれの近似図形に共通した形状要素が現れる。各近似図形に共通して現れる形状要素は、それら複数の輪

郭線図形の形状記述に有用な形状要素である。次節において、複数の輪郭線図形に共通した形状要素を抽出する手法について述べる。

#### 4.3 複数の輪郭線図形に共通する形状要素抽出

複数の輪郭線図形に共通した形状要素を抽出するために、各輪郭線図形より作成した形状要素を集合に分ける。集合に分けるためには、形状要素間の距離を定める必要がある。本稿では、各形状要素間の距離を次のように定めた。

1. 各輪郭線図形の長軸を 2 次モーメントを用いて求め、長軸の長さにより輪郭線図形の大きさを正規化する (図 9(A)).
2. 各輪郭線図形の形状要素を作成する。
3. 各形状要素の一方の端点を原点に、もう一方の端点が  $x$  軸の正の部分に乗るよう回転する (図 9(B)).
4. 形状要素に沿って等間隔となるよう、サンプリングする (図 9(C)). サンプリングする点の数  $N$  は全形状要素に共通。
5. 形状要素  $i$  と  $j$  の間距離  $D(i, j)$  を次のように定める。

$$D(i, j) = \sum_{k=1}^N \|s_k^i - s_k^j\|, \quad (4)$$

ただし、 $s_k^i = (x_k^i, y_k^i)$  は形状要素  $i$  上の  $k$  番目のサンプリング点とする (図 9(D)). 曲線が一致するときのみ、 $D(i, j) = 0$  となる。

図 8 に示した 4 つの輪郭線図形の各形状要素を、端点の一方を重ね他方が  $x$  軸と重なるように表示 (図 9(B) に相当) すると図 10 が得られる。

形状要素の分布を見易く表示する目的で各形状要素  $i$  を  $2N$  次元のベクトル

$v_i = (x_1^i, x_2^i, \dots, x_N^i, y_1^i, y_2^i, \dots, y_N^i)$  で表現し、主成分分析を行い、第 1, 2, 3 主成分の張る空間に各形状要素を正射影すると図 11 が得られる。

本稿では適当な閾値  $R$  を定め、形状要素間の距離について  $D(i, j) < R$  であれば形状要素  $i$  と  $j$  は同一集合、そうでなければ異なる集合であると判断し ([9]pp.323-354)、形状要素を集合に分けた。図 11 に示した複数の形状要素に対して実験したところ、 $R$  の値の変化に対して安定して 4 つの集合が得

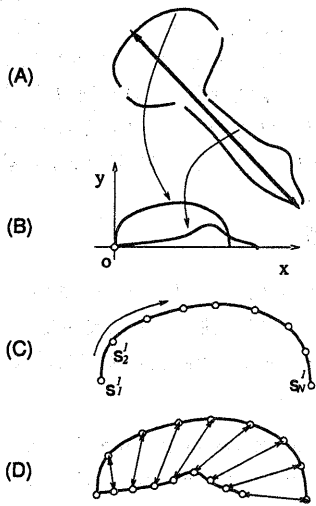


図 9: 形状要素間の距離の計り方

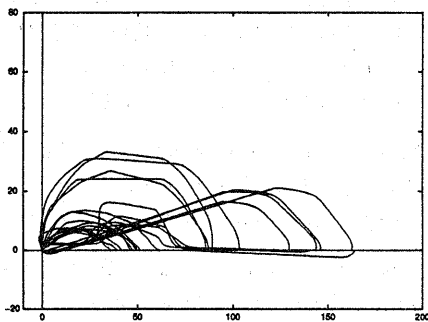


図 10: 各輪郭線より作成された形状要素

られた。同一の集合に属する形状要素は、各図形に共通して現れる形状要素であると判断する。

それぞれの集合を代表する形状を求めるために、同一の集合に属するベクトル  $v_i$  の平均を求めたところ図 12 左に示した結果が得られた。鍵の取っ手の圆弧など、各輪郭線図形に共通して見られる部分形状を得ることができている。得られた形状要素を用いると、鍵型は図 12 右のよう表現される。

図 8 にも示した通り、各輪郭線図形の形状要素は階層構造を持っている。同一の集合に属する形状要素の階層構造を参照することにより、例えば与えられた複数の輪郭線図形の形状を比較するときに、どの個所の形状が互いの識別にとって大きな役割を果

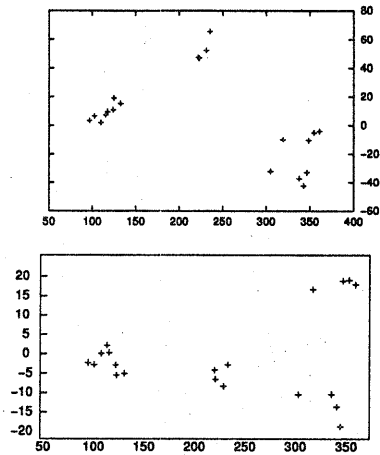


図 11: 形状要素の分布。上: 第 1, 2 主成分への射影。下: 第 1, 3 主成分への射影。表示のためにのみ利用。

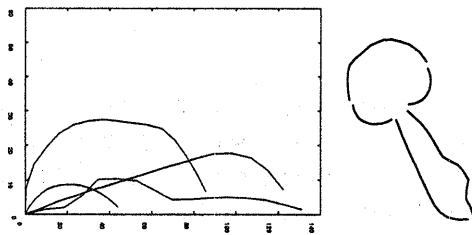


図 12: 図 10 に示した複数の形状要素を集合に分け、それら集合の平均として得られた 4 つの形状要素 (左) と得られた形状要素により記述された鍵型 (右)

たすのかを判断することができる。図 8 に示した 4 つの輪郭線図形全体の階層的な記述を作成すると、図 13 のようになる。共通する大局的形状から、次第に局所的な形状の差により分岐していく図形列が得られている。

## 5 おわりに

局所的な平滑化を利用した輪郭線図形の近似手法を利用して、複数の輪郭線図形に共通してみられる部分形状を抽出し、形状要素を作成する手法を提案した。本手法は、従来の線分近似手法などにおける線分のような、対象としている複数の輪郭線図形を記述するために用いる形状要素を対象自身より作成す

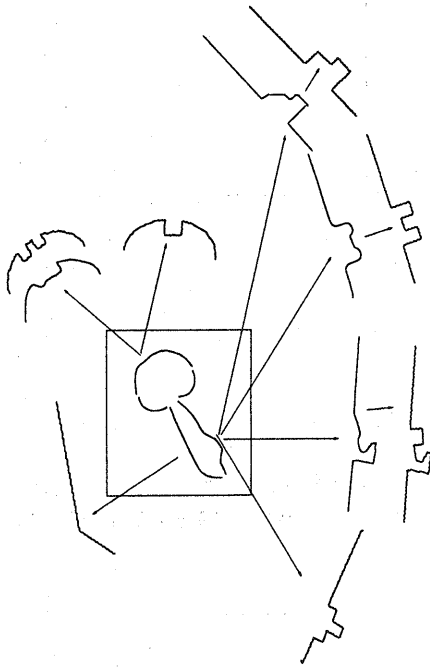


図 13: 形状要素を基にした、図 8 に示した 4 つの輪郭線図形の階層的記述。輪郭線のどの部分の形状が共通しており、どの部分の形状がそれぞれ異なるのかが、階層的に記述されている。

る。

元の輪郭線図形における構造およびその大きさの定義、小さな構造の消去、形状要素間の角点の抽出のそれぞれに、輪郭線図形の平滑化を利用した。各構造の位置やその大きさ、元図形上の角点の重要度などは、輪郭線を十分に平滑化してはじめて知ることができる。

各構造の大きさを求め、各構造の大きさにより平滑化の程度を適応させることにより、一つの輪郭線図形から有限個の近似図形を得ることができる。得られた近似図形の階層構造を元に、共通する部分形状を同一の集合に分類する。各集合の平均は、与えられた複数の輪郭線図形に共通する大局的な部分形状となる。鍵型の輪郭線図形を用いて、本稿で提案する手法が基本的に有効であることを示した。

他の多くの図形による実験、形状要素間の距離の定義や形状要素を集合に分ける分け方に関する考察、得られた階層的記述を利用した具体的な認識手法の提案などを今後の課題とする。

画像の認識システムを作成する際、対象画像群を元にして認識に用いるモデルセットを変更する手法が必要となることがある。本稿で提案したように、与えられた画像群から、それら画像群を記述するのに適した形状要素を作成することは、認識に適したモデルの作成手法にとって有用であると考えられる。

## 参考文献

- [1] 本谷秀堅 出口光一郎. スケールスペース解析に基づく局所ぼけ変換を用いた輪郭線図形のマルチスケール近似. 情報処理学会論文誌, 35(9):1722-1731, 9 1994.
- [2] Anothai Rattarangi and Roland T. Chin. Scale-Based Detection of Corners of Planar Curves. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 14(4):430-449, Apr. 1992.
- [3] 本谷秀堅 出口光一郎. 局所的平滑化による輪郭線図形の形状変化について. 情報処理学会研究報告コンピュータビジョンとイメージメディア研究会, 98-CVIM-112:37-42, 9 1998.
- [4] M.Gage and R.S.Hamilton. The Heat Equation Shrinking Convex Plane Curves. *J.Differential Geometry*, 23:69-96, 1986.
- [5] Matthew A.Grayson. The Heat Equation Shrinks Embedded Plane Curves To Round Points. *J.Differential Geometry*, 26:285-314, 1987.
- [6] J.A.Sethian. *Level Set Methods*. Cambridge, 1996.
- [7] Farzin Mokhtarian and Alan K.Mackworth. A Theory of Multiscale, Curvature-Based Shape Representation for Planar Curves. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 14(8):789-805, 8 1992.
- [8] Andrew P. Witkin. Scale Space Filtering: A New Approach to Multi-Scale Descriptions. In *IJCAI83*, pages 1019-1022, 1983.
- [9] Keinosuke Fukunaga. *Introduction to Statistical Pattern Recognition*. Academic Press, 1972.