

## 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

本谷 秀 堅<sup>†</sup> 出口 光一郎<sup>†</sup>

輪郭線図形の近似図形を求めることは、形状認識に適した表現による、対象図形のより大局的な形状特徴の記述を行うことにあたるといえる。この大局的な形状記述を行うための図形の重要な性質の一つにスケール、すなわち、図形のもつ構造の細かさをどの程度まで記述するかの問題がある。従来の近似手法の多くは、この近似する際のスケールをあらかじめ与えておく必要があった。これでは、対象図形のスケールについて、何らかの合理的な基準が定められないときには、認識には不適當な近似図形を与えることになる。ここでは、対象図形のスケールを対象図形自身から決定しつつ近似を得ることを考える。そのために本手法では、対象図形に弧長を考慮したぼけ変換をほどこし、そのときの対象の図形の変化を、いわゆるスケールスペース上で各スケールでぼかした輪郭線の曲率の二階微分のゼロ交差を追跡することで行う。ぼけ変換を加えると、より小さなスケールの構造ほどより小さなぼかし量で消去され、このゼロ交差も消滅する。これをもとにして構造の消去をスケールスペース上で捉え、対象図形の各位置で近似にふさわしい構造のスケールを求める。そして、小さなスケールをもつ構造にのみぼけ変換をほどこし、近似図形を求める。この近似法では、一つの対象図形から得られる近似図形は離散的にとびとびのものとなり、それらは、それぞれに対象図形のある大きさの構造を表している。また、あるスケールでの近似図形をさらに近似すると、元図形のより大きなスケールでの近似図形と一致する図形を得ることができるなど、良い性質を持つ。

### Multiscale Contour Approximation Based on Scale Space Analysis with Local Adaptive Smoothings

HIDEKATA HONTANI<sup>†</sup> and KOICHIRO DEGUCHI<sup>†</sup>

In this paper, a new approximation method for contour figures is proposed. The main objective of the approximation is to form a description of a given figure which is suitable for shape recognition. Such the description can be obtained by smoothing out its local details while leaving its global features as they are. One important characteristic of figures is their scales which are locally inherent sizes of structures at every points. In our method, the local scales of a given figure are extracted for its point by point based on so-called scale space analysis. Then, the approximation is generated by Gaussian filters with those scales. For this approximation, first, we propose a modified Gaussian blurring, which generates a strict ordered series of blurred figure to plot stable scale space *finger print* maps. Next, a new method to characterize a given contour is presented, where the locally inherent scales for point by point on the contour are extracted, and approximating figures are generated by a Gaussian blurring filters with those scales. As the result, this method has important properties: Only a finite number of the approximated figures are given, which represent global characteristics of the original figure. An approximation of an approximated figure at some scale is also the approximation of the original one at the total scale, which cannot hold by conventional figure smoothing methods.

#### 1. はじめに

図形形状は、いくつかの異なる大きさの構造から成り立っている。そのうちの大局的な形状を近似して記述することは、図形の形状認識の際に有用なことである。そのため輪郭線図形の近似図形を求める手法が、古くから数多く提案されてきた<sup>1)~6)</sup>。これら手法で

は、局所ごとの複雑な形状をより単純な形状により置き換える。例えば輪郭線図形の多角形近似においては、一定区間の複雑な形状を線分により置き換えている。本論文ではこの置き換えるべき単純な形状を、対象図形を平滑化することにより得ることとする。ただし、図形全体を一様に平滑化すると、局所的な構造が消去される一方、大局的な構造も変形を受け不鮮明になってしまう。これに対して、本論文では、大局的な構造を鮮明に残したまま、局所的な構造のみを平滑化

<sup>†</sup> 東京大学工学部計数工学科

Faculty of Engineering, University of Tokyo

して消去することにより、対象図形を近似する手法を提案する。

ここで、大局的・局所的を区別するための基準が必要となる。ここではこの基準のことを、スケールと呼ぶことにする。このスケールはあくまで図形を観察する側が持つ主観的なもので、具体的にはおおよそ、構造の大きさを測る物差しを意味している。物差しには、その目盛りに相当する分解能がある。粗い目盛りをもつ物差しは、細かな構造を無視して、より大局的な構造を観測するのに適している。どの程度の細かさの構造までを局所的と見なして無視するか、言い換えるとどの程度の分解能で対象を観測するかを定めるパラメータを、スケールパラメータと呼ぶ。従来の輪郭線図形の近似手法の多くは、このスケールパラメータの値を近似に先立ち与える必要があった<sup>1),2),4)</sup>。そして、このパラメータに応じて、連続的に粗さを変えた近似結果を得ていた。

しかし、対象図形の近似図形を形状認識に有用に対象の記述であると考えるとき、対象図形の観測に適したスケールパラメータは、単に観測者が主観的に与えるものではなく、対象図形自身からも働きかけられるものであるべきである。さらに、認識に有用なスケールは連続的に無数に存在するのではないと考えられる。そして対象図形自身からの相互作用によって、これら対象に適したスケールを決定しつつ近似することができれば、より一般的な形状認識系を構築する出発点となり得る。

図形の多角形近似について、このような観点から、実際に対象図形自身から適切なスケールパラメータを求め、そのスケールにより図形を近似する手法が最近いくつか報告されている<sup>5),7)</sup>。ここでは、より一般的な手法を考える。

本論文では、次のように輪郭図形の平滑化を考える。

輪郭線を一周する  $x, y$  座標をそれぞれ弧長をパラメータとして表現する。そして、その  $x, y$  座標の変化を、分散  $\sigma^2$  のガウス関数で平滑化する。以下では、 $t = \sigma^2/2$  を単位として、上記のスケールを表現する。すなわち、輪郭線上のある構造がちょうど  $\sigma_0^2$  のガウス関数で平滑化した時に消去され、それ以下では消去されないとき、この構造のスケールは  $t_0 = \sigma_0^2/2$  であるとする。

まず、輪郭図形をだいたいこの程度の滑らかさで近似したいという目安として、スケールの値  $t_0$  を仮に

与える。これが先に述べた観察者の主観によるスケールである。この  $t_0$  を基準にして、輪郭線の平滑化のスケール  $t$  を輪郭線上の場所ごとに適切に決定することが、ここでの課題である。この場所ごとに適切なスケールを、以下の方針のもとに決定する。

- スケール  $t_0$  のガウス関数で平滑化され消去されてしまう構造は、それを消去し得る可能な限り小さなスケールで消去する。
- スケール  $t_0$  のガウス関数で消去されない構造は、平滑化せずもとのまま残す。

このとき、対象図形の各構造の細かさの程度が有限個であれば、主観的なスケール  $t_0$  を連続に変化させても、得られる近似図形は連続に変化せず、とびとびに変化することが期待できる。そこで得られた有限個の近似図形は、その対象図形のスケールに関する階層的な記述となるであろう。

ただし、このように場所ごとに異なるスケールを用いて平滑化し、スケールに関して階層的な近似図形を得るためには、次の二つの問題を解決しておかねばならない。まずこのような平滑化が可能であるためには、それぞれのスケールで平滑化した図形上の各点と、元の図形上の各点との対応がとれていなくてはならない。そしてもう一つには、後に示すように本手法によって確かに上記のようにとびとびの近似図形を得るが、その一連の近似図形が階層的記述になっているためには、近似の程度において一列に並べられたとき、どの部分を見てもその順序性を保っていないとてならない。

ガウス関数による平滑化はスケールパラメータに関して半群の性質を持ち、理論的にはこれらの問題を解決するいい性質をもっているはずである。しかし実際には必ずしもこのようにはならない。これは、平滑化によって弧長が変化し、輪郭線を表現しているパラメータの意味が変わってしまうからである。

この問題点に対して、Mokhtarian らが最近、平滑化された図形どうしの各点で対応がとれ、かつ上記の半群の性質も保つ平滑化法を提案している<sup>8)</sup>。ここでは、彼らの手法に従って平滑化を行う。

以上が、ここで提案する輪郭図形の近似法のあらましである。本手法によって、対象図形のスケールと線分など形状のプリミティブを仮定することなく輪郭線図形を近似する一般的な手法が可能になる。その結果、一つの対象図形からその特徴を表現する有限個の近似図形が得られ、また、あるスケールでの近似図形

をさらに近似すると、元の図形のより大きなスケールでの近似図形と一致することなどが確認された。

まず次章で、Mokhtarian らによる弧長を考慮した安定な平滑化（ぼけ変換）を、ここでの応用に則して簡単に説明する。本手法では、図形内の位置によるスケールの違いを考慮するためにスケールスペースと呼ばれる空間を考える。第3章において図形の構造とスケールの定義を述べ、具体的な近似手法について説明する。そして第4章において、輪郭線図形への本手法の適用例を示し、本手法の持ついくつかの特徴について述べる。

## 2. スケールスペースを用いた輪郭線図形の近似手法

### 2.1 弧長の変化を考慮した輪郭線のぼけ変換

図形の輪郭線上の点  $r$  を、弧に沿ったパラメータ  $u$  を用いて次のように表現する。

$$r = (x(u), y(u)). \quad (1)$$

このとき輪郭線上のある点からの弧長  $s$  は次のように表される。

$$s(u) = \int_0^u |\dot{r}(v)| dv,$$

$$\text{ただし } \dot{r}(v) = \frac{dr}{dv}.$$

また、この点での単位接ベクトルは  $t(u) = \frac{\dot{r}}{|\dot{r}|}$  となる。法ベクトルを  $n$ 、曲率を  $\kappa$  と表すと弧長  $s$  を用いて

$$\dot{t}(s) = \kappa(s)n(s).$$

となる。ところで、

$$\dot{t}(s) = \frac{dt}{ds} = \frac{dt}{du} \frac{du}{ds}.$$

であるから、各点における曲率は次のように表される。

$$\kappa(u) = \frac{\dot{t} \cdot n}{|\dot{r}|}. \quad (2)$$

以下、もとの輪郭線図形  $\Gamma$  を、弧長を全周の長さで正規化したパラメータ  $w$  で表現するものとする。

$$\Gamma = \{(x(w), y(w)) | w \in [0, 1]\}.$$

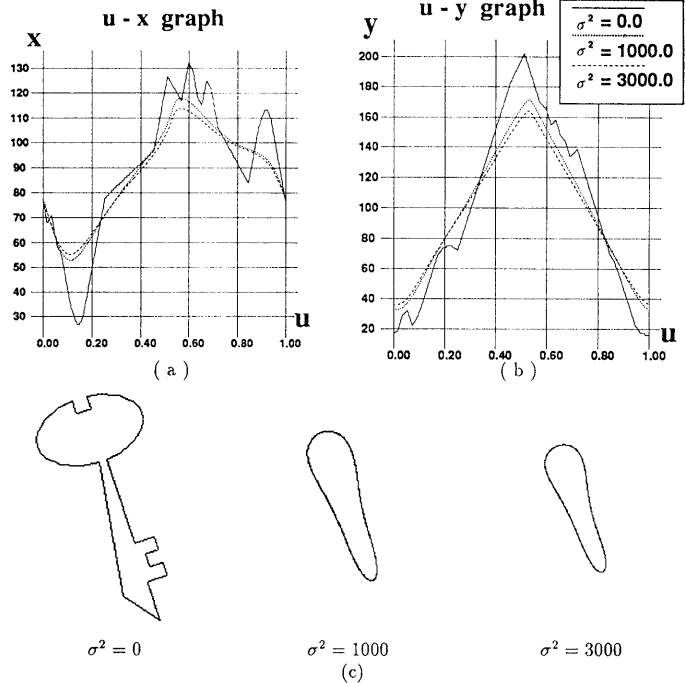


図1 ぼけ変換による図形の変化  
Fig. 1 Smoothings of a contour figure with simple Gaussian blurrings. (a), (b) X- and Y-coordinates of contours obtained with  $\sigma^2=0, 1000, 3000$ . (c) Smoothed figures with  $\sigma^2=0, 1000, 3000$ , respectively.

この図形を分散  $\sigma^2$  のガウシアンフィルタを用いて以下のようにぼかす。

$$\Gamma_\sigma = \{(X(u, \sigma), Y(u, \sigma)) | u \in [0, 1]\}.$$

ただし

$$X(u, \sigma) = x(u) * G(u, \sigma),$$

$$Y(u, \sigma) = y(u) * G(u, \sigma),$$

$$G(u, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-u^2/2\sigma^2}.$$

$x(w), y(w)$  は周期1の周期関数とみなすことができ、これらのぼけ操作を加えた結果  $X(u, \sigma), Y(u, \sigma)$  も周期1の周期関数になる。このぼけ変換による  $X(u, \sigma), Y(u, \sigma)$  と図形の  $\sigma$  の値による変化の例を図1に示す。

ここで注意しなくてはならないのは、一般に輪郭線図形にぼけ操作を加えると輪郭線の長さは短くなる。曲率の大きかったところでは点が密集するからである(図2)。したがって、もとの関数  $x(w), y(w)$  のパラメータ  $w$  は元の図形では弧長という物理的な意味を持っていたが、ぼけ操作を加えられた後の関数  $X(u, \sigma), Y(u, \sigma)$  のパラメータ  $u$  は弧長を表現していない。

このため次のようなことがおこる。そもそもガウス関数はスケールに関するパラメータ  $t = \sigma^2/2$  に関して半群の性質を持っていて  $G(u, t_a) * G(u, t_b) = G(u, t_a + t_b)$  が成り立つ。しかし、図形を  $t_a$  でぼかした図形をさらに  $t_b$  でぼかした結果が、元の図形を  $t_c = t_a + t_b$  でぼかした結果と一致しない。図形をそれぞれ  $t_a, t_b, t_c$  でぼかした図形どうしは、元の図形を介してのみ互いに関係をもち、直接これらのスケールパラメータによってお互いが関係をもっているわけではない (図 3(a))。これはいろいろな値のスケール  $t$  でぼかすことで得られた図形の特徴を比較して論じていく上で不都合である。

そこで、ぼかす操作を加えている間、弧長を表現し続けるようなパラメータによるぼけ変換がスケールの解析には望ましい。このような変換を用いれば、ぼかした図形どうしがスケールパラメータにより直接結びつく。結果として、より小さなスケールでぼかした図形が、より大きなスケールによってぼかした図形を潜在的に内包しているような、スケールパラメータによる図形の系列が作られ、スケールの概念もすっきりしたものになる (図 3 (b))。そのようなぼけ変換が Mokhtarian らによって報告されている<sup>9)</sup>。以下、これに従って弧長の変化を考慮したぼけ変換について説明する。

ぼかしたあとの輪郭線上の点を  $R$  とおき、任意の  $t$  でぼかしたあとも弧長を表現しているパラメータ  $W$  で表現する。

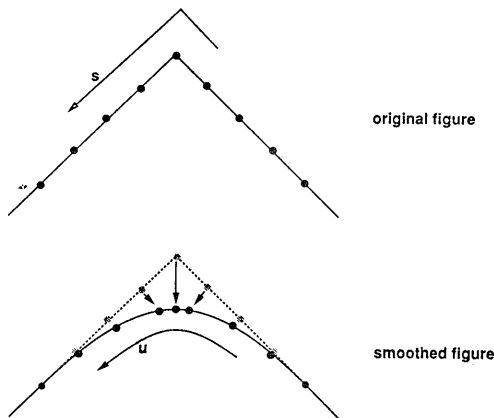


図 2 ぼかすことによって、パラメータ  $s$  は弧長を表現しなくなる  
 Fig. 2 This figures shows that the parameter  $s$  of arc length for the original figure will no longer make sense for its smoothed figures.

$$R = (X(W, t), Y(W, t)).$$

ただし

$$X(W, t) = x(W) * G(W, t),$$

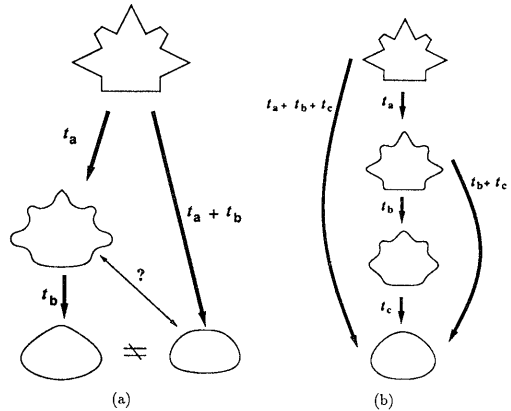


図 3 (a)ぼかした図形をさらにぼかしても、元図形を大きくぼかした図形と一致しない。(b)弧長を考慮したぼけ変換による図形の系列  
 Fig. 3 (a) Blurring with  $t_a$  then with  $t_b$  does not necessarily equivalent to the blurring with  $t_a + t_b$  in conventional scale space analyses. (b) Desired stable blurring and its resulted series of blurred figures.

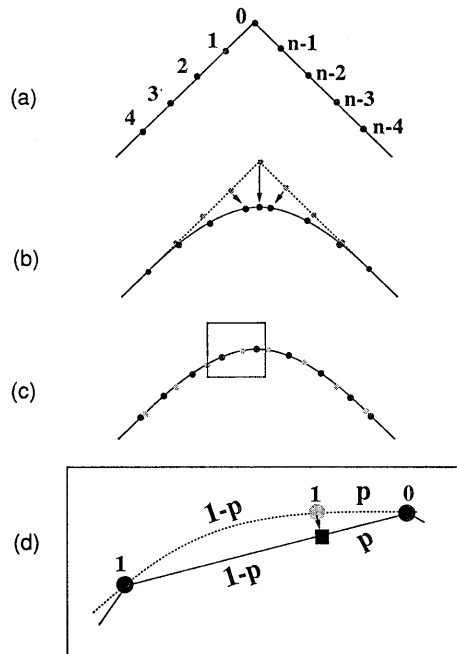


図 4 サンプルしなおすことで弧長を考慮する  
 Fig. 4 Schematics of resampling procedures to keep the parameter representing the arc length while smoothing.

$$Y(W, t) = y(W) * G(W, t).$$

ここで  $W = W(w, t)$ ,  $t = \sigma^2/2$  である.

ガウス関数は拡散方程式のグリーン関数なので次の式が成り立つ.

$$\frac{\partial \mathbf{R}}{\partial t} = \kappa \mathbf{n}. \quad (3)$$

この式は、輪郭線上の点は、ぼけ操作で法線方向に曲率分だけ移動することを表している。式(3)から、次の式が得られる.

$$\frac{\partial}{\partial t} \left| \frac{\partial \mathbf{R}}{\partial u} \right| = - \left| \frac{\partial \mathbf{R}}{\partial u} \right| \kappa^2. \quad (4)$$

輪郭線の全周の長さを  $L$  とおくと上式より,

$$\frac{\partial L}{\partial t} = - \int_0^L \frac{\partial}{\partial t} \left| \frac{\partial \mathbf{R}}{\partial u} \right| du = - \int_0^L \left| \frac{\partial \mathbf{R}}{\partial u} \right| \kappa^2 du.$$

となる。つまり,

$$\frac{\partial W}{\partial t} = - \int_0^W \kappa^2(U, t) dU. \quad (5)$$

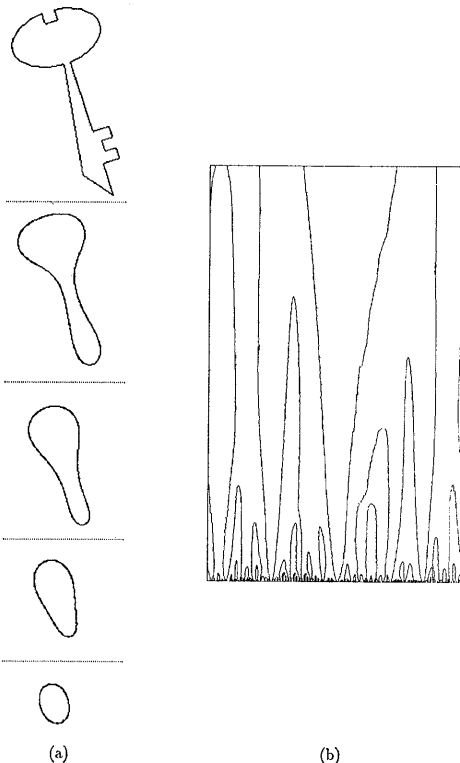


図5 弧長の変化を考慮したぼけ変換による図形の変化とスケールスペース (例1)

Fig. 5 (a) Example of smoothed contour figures using Gaussian blurrings with modified arc length. (b) The zero-crossings of second differentiated curvature.

したがって、輪郭線の長さは  $t = \frac{\sigma^2}{2}$  を変化させると、曲率の二乗の積分値分だけ短くなることがわかる。これは次のようにも表せる.

$$W(w, t) = - \int_0^t \int_0^W \kappa^2(U, T) dU dT + w. \quad (6)$$

ちなみに、 $W(w, 0) = w$  になっている.

また、接線  $\mathbf{t}$ , 曲率  $\kappa$  について以下の式が成立する.

$$\frac{\partial \mathbf{t}}{\partial t} = \kappa(s) \cdot \mathbf{n}. \quad (7)$$

これよりスケールが変化するときの接線の変化は、曲率の位置に関する微分値の大きさに比例することがわかる.

このようなパラメータ  $W(w, t)$  によるぼけ変換では、ぼかした図形どうしがスケールパラメータによって直接関係付けられる.

ところで実際の計算機上では、式(6)から  $W$  を計算するのは困難である。そこで小さな値  $\Delta t$  でぼかしては、その結果を弧長で表現し直すことで実現することになる。具体的には、弧長で表現しなおす際、輪郭線上に不均一に散らばった頂点を等間隔にサンプルしなおす (図4)。このとき  $\Delta t \rightarrow 0$  のとき式(6)に収束することが証明されている<sup>8)</sup>.

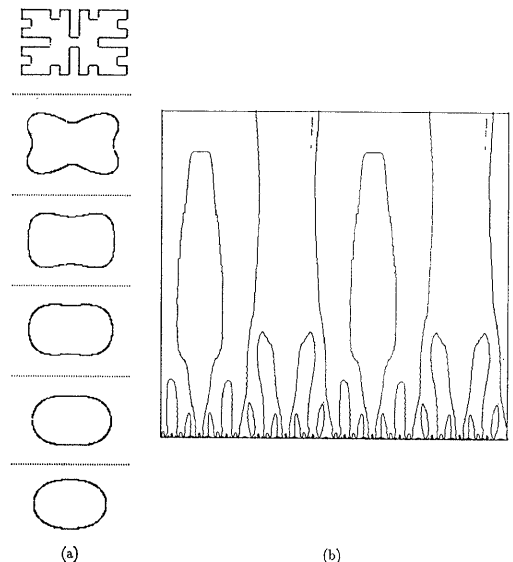


図6 弧長の変化を考慮したぼけ変換による図形の変化とスケールスペース (例2)

Fig. 6 (a) Another example of smoothed contour figures using Gaussian blurrings with modified arc length. (b) The zero-crossings of the second differentiated curvature.

この操作によって実際に図形をぼかした例を **図 5 (a)**, **図 6 (a)** に示す.

**2.2 スケールスペースについて**

輪郭線図形の形状をスケールを変化させて解析する際には, スケールスペースと呼ばれている空間を考える<sup>5),9)</sup>. これは横軸に輪郭線上の位置, 縦軸にスケールをとった空間である.

この空間に各スケールでぼかした図形の曲率のゼロ交差をプロットし, そのゼロ交差のパターンによって図形を記述することがよく行われている<sup>10)</sup>. スケールを大きくすることで新たなゼロ交差は生じないこと<sup>11)</sup>, ゼロ交差のパターンと元の図形とが一對一に対応すること<sup>12)</sup>などが分かっている. これらの性質は曲率の  $n$  階微分のゼロ交差についても成り立つ. 本手法では, スケールスペース上での解析に, 曲率の 2 階微分のゼロ交差を用いる. **図 5 (b)**, **図 6 (b)** は, これら図形に対する曲率の 2 階微分のゼロ交差のスケールスペース上へのプロットである.

ここまで輪郭線図形を表現するための, 輪郭線に沿ったパラメータとして  $w$ ,  $W(w, t)$ ,  $u$  がでてきた.  $w$  は元の図形上で弧長を表していたパラメータ,  $W$  は各スケールでぼかした図形での弧長を表しているパラメータ,  $u$  は単に輪郭線に沿っているだけで弧長とは関係なくなってしまうパラメータであった.

式(3)などにおけるスケールパラメータ  $t$  による偏微分は,  $w$  の値を固定した上での微分であり,  $W(w, t)$  や  $u$  の値を固定しているのではない. このことから, 図形上の各点の, スケールの変化に対する形状の変化を捉えるには, 各スケールに対して  $w$  の値を固定して観測する必要があることがわかる.

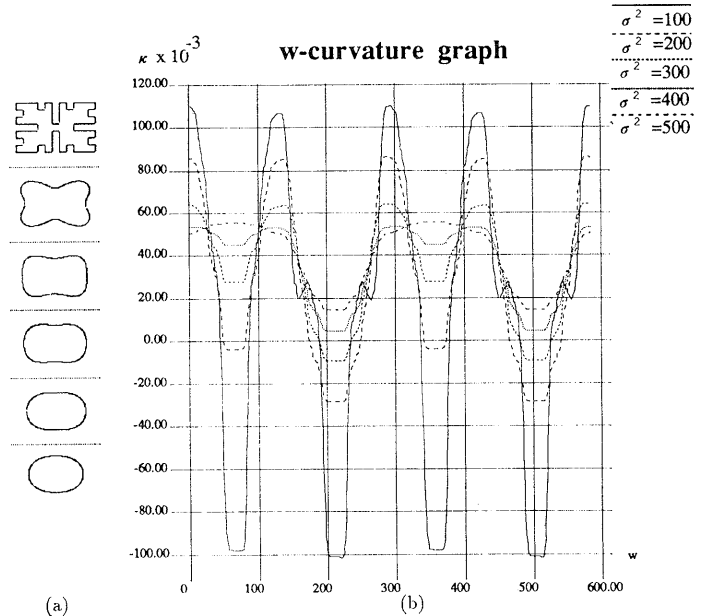
式(6)により, ぼかした図形上で各点に対応した  $w$  の値を求めることが原理上できる. しかし式(6)を用いて  $w$  の値を計算することは困難である. そこで実際には, 計算機上で図形を順次少しずつぼかし, 元の図形上の各頂点が, ぼかした図形上のどの頂点に対応しているかを追跡するほうがよい. 前節で述べたようにこのぼけ変換では, スケール

$t_0$  まで対象図形をぼかすのに小さな値  $\Delta t$  のぼけ変換をほどこし, ぼかした図形の輪郭線を等間隔にサンプルしなおすという操作を繰り返す. 実際には, デジタル曲線に対しては,  $\Delta t$  は 1 画素の間隔程度にとる. 元の図形上の各頂点の, 各スケールにおける位置は, サンプルしなおして新たに作られた各頂点間の内分比で記録しておくことにする (**図 4 (d)**).

**3. スケールスペースを用いた近似手法**

**3.1 図形の構造とそのスケールの定義**

一般に図形形状は, いくつかの異なる大きさの構造から成り立っている. この位置ごとに異なる各構造のスケールを求めると, スケールスペースを利用する. スケールスペースを用いて各位置に特徴的なスケールを求めている例として, 飯島の安定視点木法<sup>13)</sup>などが挙げられる. 安定視点木法における安定視点のような, 特徴点のスケールを定める手法をもちいると, 特徴点以外の点におけるスケールが定まらない. 本手法では, 対象の各点にその点のスケールに応じたぼかし量のぼけ変換を施すことで近似図形を求めると, 対象図形のすべての点のスケールを定める. そこで本手法では, 対象図形の各構造の境界を定義し, そ



**図 7** ぼけ変換による図形と曲率の変化. ぼかすに従い曲率グラフは平坦になっていく  
**Fig. 7** (a) Example of the smoothed contour figures, and (b) the plottings of their curvatures  $\kappa$  with respect to  $w$ .

の境界点に注目した。

図1, 図5(a), 図6(a)にも見られるように, 輪郭線図形にぼけ変換をほどこすと, その形状は次第に円に近付いていく. 各スケールでの対象図形の形状と曲率グラフの例を図7に示す. この形状の変化は輪郭線上の各点の曲率の変化によって捉えられる. すなわち曲率グラフ  $\kappa(w)$  が, ほかすに従い次第に凹凸がなくなり定数に近付いていく (図7(b)). そこでここでは, 図形のもつ構造の境界を, 曲率の変曲点, すなわち位置に関する二階微分のゼロ交差により定義する.

先に図5(b), 図6(b)に示したように, 曲率の二階微分のゼロ交差のパターンは, スケールが大きくなるに従い消滅していく. このゼロ交差を構造の境界と定義すると, このパターンの消滅をもって該当する構造の消滅と見なすことができる.

ここで各構造のもつ大きさは, ゼロ交差のパターンが消滅するスケールにより定義することができる.

### 3.2 局所的なぼけ変換による構造の消去

図形にぼけ変換をほどこすことにより近似図形を求める問題に戻って考える. ここでスケール  $t_0$  で近似するとは, 対象図形の構造のうちスケールが  $t_0$  以下の構造を消去することとする. このとき, スケールが  $t_0$  以下の構造には, その構造を消去し得る可能な限り小さなスケールでぼけ変換をほどこし, スケールが  $t_0$  より大きい構造にはぼけ変換をほどこさず鮮明に残しておく. このほかし操作は, 具体的には次のようになる.

1. 対象図形を第2.1節で述べた手法により順次平滑化する. 横軸に輪郭上の位置  $w$ , 縦軸にスケール  $t$  をとったスケールスペース上にその曲率の二階微分のゼロ交差をプロットし図8(a)に示すマップが得られているものとする. このゼロ交差が図形上の各構造の境界線であり, 境界線が会って消滅するスケールがその構造のスケールである.
2. ゼロ交差のパターンを境界として, 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8(b)). すなわち, この二つの領域の境界を  $t=t(w)$  とすると, この境界線は図8(a)のゼロ交差のパターンのどれかの上であり, 各  $w$  で,
  - i)  $0 \leq t(w) \leq t_0$ ,
  - ii)  $t(w)$  と  $t_0$  の間には  $t_0$  以下で閉じているゼロ交差のパターンが存在しない, という性質をもっている.
3. 与えられた図形に対してぼけ変換をほどこし, 近

似図形を求める. 各点  $w$  におけるほかしのスケールは前記の領域AとBとの境界  $t=t(w)$ , すなわち, 図8(c)に示す斜線の領域の下端に沿った値である. こうすることで, スケール  $t=t_0$  以下の構造のみが, それが消去し得る最小のスケールで消去され, それより大きなスケールをもつ構造は鮮明なまま残る.

## 4. 局所的なぼけ変換による近似結果

### 4.1 近似するスケールを連続に変化させたときの, 近似図形の変化

図9, 図10に, 観測者によって与えられるスケール  $t_0$  を変化させて得られる, 本手法による近似結果を示す. 図5, 図6に示した一様にほかしたときの結果と比較すると, それぞれ細かな構造のみが消去され, 大局的な構造は鮮明に残っていることが分かる.

図9(a)は, (b)のスケールスペースに横線で示し

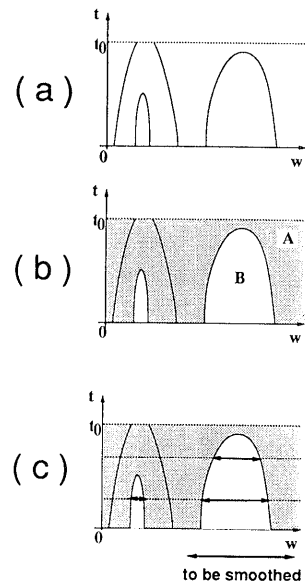


図8 スケールスペースを用いた図形の近似のためのスケール決定法

Fig. 8 The determination of proper local blurring scales for proposed approximation method. (a) The given zero-crossings of the contour figure. (b) Area B includes the part of contour whose structure has the scale smaller than  $t_0$ . (c) For given blurring scale  $t_0$ , at each point the contour should be smoothed with the scale of upper boundary of Area B to smooth out the smaller structures and keep the bigger ones.

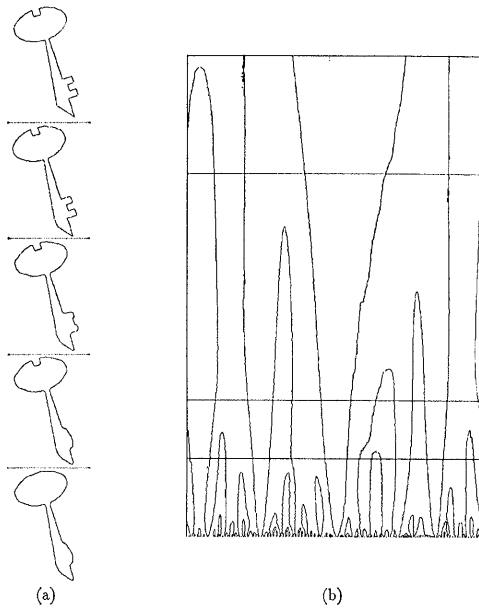


図 9 本手法による近似結果  
 Fig. 9 (a) Results of proposed approximation method for silhouette contour of a key.  
 (b) The zero-crossings for this figure.

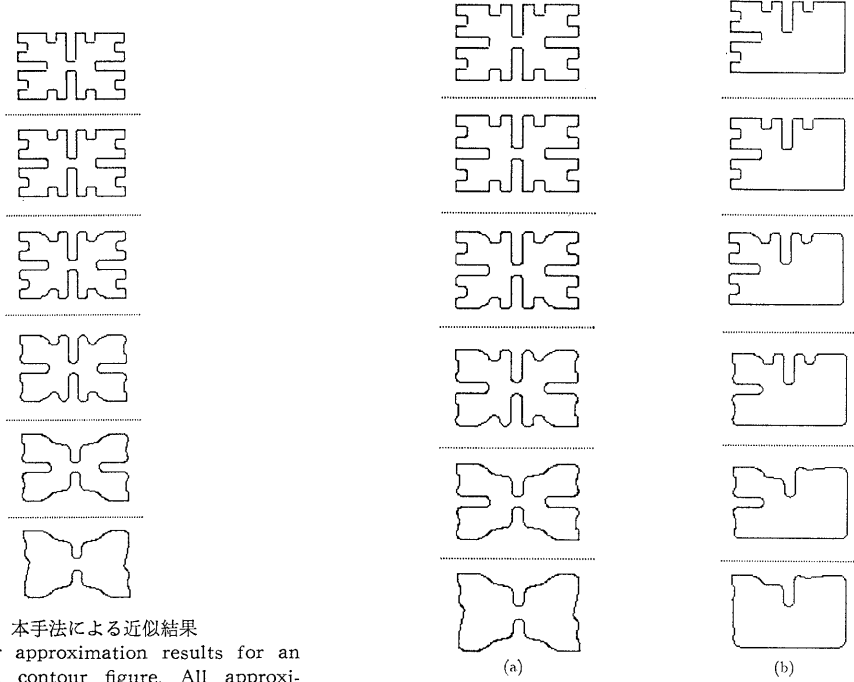


図 10 本手法による近似結果  
 Fig. 10 Another approximation results for an artificial contour figure. All approximated figures of the original figure (top) appear here and no other type of approximation are obtained. The zero-crossings of this figure is shown in Fig. 6(b).

た  $t_0$  からそれぞれ得られた近似である。

ここで重要なことは、近似するスケール  $t_0$  を連続に変化させても、得られる近似結果は連続に変化した多様な図形ではなく、 $t_0$  の変化に対してとびとびに変化したものであることである。これはスケールスペース上でのゼロ交差の消滅をもって各構造のスケールとし、その構造のスケールによって近似を行っているからである。図 10 には、図 6 (b) に示したスケールスペースの範囲でスケールを連続的に変化させたときに得られる近似図形がすべて示されている。本手法による近似では、これ以外の図形は得られない。

4.2 一部分に同じ構造をもつ図形の近似結果

一部分に同じ構造をもつ二つの図形の近似結果を図 11 に示す。各近似図形を比較すると、同じ構造をしている部分は近似図形でも同じ構造をしていることがわかる。両図形をそれぞれ一様にぼかしていくと、そうはならない。二つの似通った形状間の類似性はその記述にも反映されているべきであるが<sup>14)</sup>、本手法はその要求を満たしている。

図 11 一部分に同じ構造をもつ二つの図形の近似結果

Fig. 11 The approximation results for two figures which have the same structures in respective parts.



### 4.3 近似図形の近似

対象図形の近似図形を新たな対象図形として、その近似図形を求めてみた。結果を図 12 に示す。近似図形の近似として得られる図形は、元の図形をより大きなスケールで近似したときに得られる近似図形と一致する。この意味において、より小さなスケールによる近似図形は、より大きなスケールによる近似図形を内包している。

このようなスケールの異なる近似図形どうしの包括関係を考えている例として Eklundh らの多角形近似の手法がある<sup>15)</sup>。Eklundh らの手法による輪郭線の多角形近似では、より大きなスケールによる近似多角形の頂点が、より小さなスケールによる近似多角形の頂点に含まれる。

ここでは、自然な平滑化においてもそのような包括関係を保つことが可能となる一手法を示したことになる。この性質も二つの異なる形状間の類似性の反映と考えることができ、形状認識のための図形の記述とし

て重要な性質である。

## 5. 考 察

本論文では、平面上の輪郭線図形の新しい近似手法を提案した。

従来の輪郭線図形の近似手法の多くは、対象を記述する際のスケールを近似に先だてて与える必要があった。ある図形を観察するとき、その図形をどの程度の細かさで見るとかを定める必要が観察者にあることは当然であるが、しかし適切なスケールを与えなくては不自然な近似図形しか得られない。

本研究では一旦与えたスケールから、対象図形の各部分の構造にふさわしい固有のスケールを別々に求め直し、この各構造に固有のスケールに応じたばけ変換を施すことにより細かな構造を消去した。このことは、多角形近似における線分による細かな構造の消去などとは、本質的に異なる点である。

また認識は、認識系がもっている外界に関するモデルと、対象図形の記述とのマッチングの過程と捉えることができる。そしてこのマッチングの過程は、より普遍的な性質を表しているモデルから、より個別的对象の個性を表しているモデルへのマッチングの過程として捉えることができる<sup>14)</sup>。

このように認識を捉えるとき形状認識とは、大きなスケールによる大局的な表現から、小さなスケールによる局所的な表現へとモデルを変化させていき、次第に対象を同定していく作業であるということが出来る。

本近似手法では、スケールパラメータを連続に変化させても近似図形は有限個しか得られなかった。これにより、一つの対象図形をスケールによって階層的に記述できる。また一部分に同じ構造をもつ二つの図形が近似図形においても同じ構造を持つこと、近似図形の近似図形が、元の図形のより大きなスケールによる近似図形と一致することなどが実験により確認された。これらの性質は形状認識を上記のように捉えるとき、極めて重要な性質である。

構造スケールの定義の仕方により、図形の近似結果も異なってくる。構造やスケールの定義の仕方の評価を行うには、例えば本近似手法がなんらかのエネルギー関数を最小にしていかなど、数理的な解析が必要である。スケールを変化させたときの対象図形の変化から、その図形の空間的な構造を捉えている例としては、ウェーブレットを用いたフラクタル次元解析

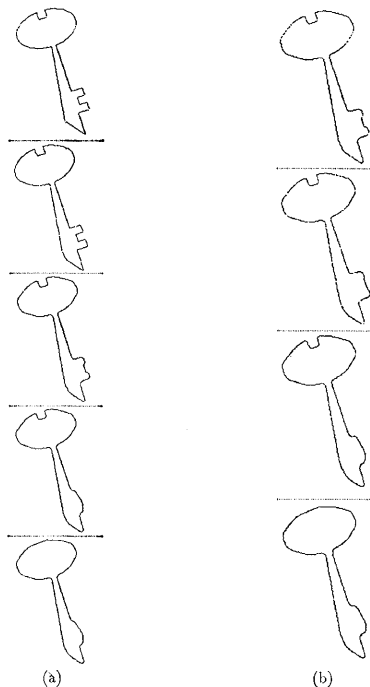


図 12 近似図形の近似は、元図形の大きなスケールによる近似図形と一致する

Fig. 12 Example of approximations of an approximated figure. (a) The approximation results for a key contour of the top and (b) the approximation results for the figure of the middle of (a).

などが挙げられる。ぼけ変換とガウス関数を核とするウェーブレット変換とは同等のものであり<sup>16)</sup>、本手法を数理的に解析する際に参考になると考えられる。

ぼけ変換に限らず対象になんらかの操作を加え、そのときの対象の変化の仕方から対象に固有な性質を導出することは、これからの認識系を考える上で重要なことである。

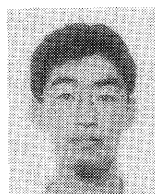
### 参 考 文 献

- 1) Rosenfeld, A., Thurston, M. and Lee, Y. H. : Edge and Curve Detection: Further Experiments, *IEEE Trans. Comput.*, Vol. C-21, No. 7, pp. 677-715 (1972).
- 2) Rosenfeld, A. and Johnston, E. : Angle Detection on Digital Curves, *IEEE Trans. Comput.*, Vol. C-22, No. 9, pp. 875-878 (1973).
- 3) Teh, C. and Chin, R. T. : On the Detection of Dominant Point on Digital Curves, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. PAMI-11, No. 8, pp. 859-872 (1989).
- 4) Freeman, H. and S. Davis, L. : A Corner-Finding Algorithm for Chain-Coded Curves, *IEEE Trans. Comput.*, Vol. C-26, pp. 297-303 (1977).
- 5) Rattarangsi, A. and Chin, R. T. : Scale-Based Detection of Corners of Planar Curves, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 14, No. 4, pp. 430-449 (1992).
- 6) Asada, H. and Brady, M. : The Curvature Primal Sketch, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. PAMI-8, No. 1, pp. 2-13 (1986).
- 7) 青木 伸, 出口光一郎: 輪郭線図形の認識のための正則化多角形近似法, *情報処理学会論文誌*, Vol. 32, No. 2, pp. 168-178 (1991).
- 8) Mokhtarian, F. and K. Mackworth, A. : A Theory of Multiscale, Curvature-Based Shape Representation for Planar Curves, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. PAMI-14, No. 8, pp. 789-805 (1992).
- 9) Lu, Y. and Jain, R. C. : Behavior of Edges in Scale Space, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. PAMI-11, No. 4, pp. 337-356 (1989).
- 10) Mokhtarian, F. and K. Mackworth, A. : Scale-Based Description and Recognition of Planar Curves and Two-Dimensional Shapes, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. PAMI-8, No. 1, pp. 34-43 (1986).
- 11) Yuille, A. L. and Poggio, T. A. : Scaling Theorems for Zero Crossings, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. PAMI-8, No. 1, pp. 15-25 (1986).
- 12) Mokhtarian, F. : Fingerprint Theorems for Curvature and Torsion Zerocrossings, *Proc. IEEE CVPR (San Diego, CA)*, pp. 269-275 (1989).
- 13) 飯島泰蔵: パターン認識, コロナ社 (1973).
- 14) デビッド・マー: ヴィジョン—視覚の計算理論と脳内表現一, 産業図書 (1987).
- 15) Bengtsson, A., Eklundh, J.-O. and Howako, J. : Shape Representation by Multiscale Contour Approximation, Department of Numerical Analysis and Computing Science, TRITANA-8607, Royal Institute of Technology, Sweden (1986).
- 16) Mallet, S. and Zhong, S. : Characterization of Signals from Multiscale Edges, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. PAMI-14, No. 7, pp. 710-732 (1992).

(平成5年10月29日受付)  
(平成6年6月20日採録)

#### 本谷 秀堅 (正会員)

1968年生。1991年東京大学工学部計数工学科卒業。1993年同大学院修士課程修了。同年(株)東芝入社。現在同社研究開発センターにて画像認識システムの研究に従事。



#### 出口光一郎 (正会員)



1976年、東京大学大学院修士課程修了(計数工学)。同年より東京大学工学部助手、講師を経て、1984年、山形大学工学部情報工学科助教授、1988年、東京大学工学部計数工学科助教授、現在に至る。この間、1991年~1992年、米国ワシントン大学客員準教授。コンピュータビジョン、画像計測、並列コンピュータの研究に従事。計測自動制御学会、電子情報通信学会、形の科学会、IEEEなどの会員。