

濃淡画像の多重解像度解析に基づく 図形に固有な形状および大きさの抽出法

本谷 秀 堅[†] 出口 光 一郎[†]

本稿では、濃淡画像中の図形形状の抽出を、形状抽出に適切なスケールを画像自身より求めつつ行う手法を提案する。ここでスケールとは、形状抽出を行う演算子とその形状をとらえることのできる構造の大きさのことである。一般に画像は局所的な構造から大局的な構造まで、様々な大きさの構造を持つ。各構造の大きさを求めつつそれら構造の形状特徴を抽出するために、画像のマルチスケール解析の手法を用いる。与えられた画像をガウシアンフィルタによりぼかす。フィルタのスケールを変化させたときの画像の変化を、画像の濃淡を表す曲面の主曲率によりとらえる。ここで、直交する2軸に2つの主曲率を対応させた主曲率平面を導入する。画像の濃淡を表す曲面の各位置における主曲率を各スケールにおいて求め、対応する点を主曲率平面にプロットする。主曲率平面上においては、原点からの距離が画像の濃淡を表す曲面の曲がり具合を、原点からの方向が濃淡を表す曲面の形状を表す。スケールを変化させると、主曲率平面上の対応する点が移動する。この主曲率平面上の軌跡より原点からの距離が極大となる点を求めるとき、そのスケールが対応する構造の大きさを、原点からの方向がその構造の形状を表している。このことを利用し、画像上の各位置において各構造の大きさと形状とを抽出する手法について述べる。また実験結果により、提案手法が有効に作用することを示す。

A Method for Detection of Inherent Shape Type and Size of Figures Based on Multi-scale Image Analysis

HIDEKATA HONTANI[†] and KOICHIRO DEGUCHI[†]

We propose a method for detection of shapes and sizes of figures in an image. We use the multi-scale analysis to detect local structures in an image. The proposed method blurs an image by Gaussian filters. As the scale of the filter changes, the principal curvatures of the image gray-level profile change. To characterize their changes, we introduce the *principal curvature plane*, whose two coordinates are two respective principal curvatures. In this plane, the phase angle corresponds to the local shape-type of the image profile, and its distance from the origin shows the sharpness of the profile. For every scale, two principal curvatures of the local profiles are calculated, and corresponding points are plotted to the plane. As the scale changes, the corresponding point moves. By tracing the movement, we obtain scales at which the shape of the local profile becomes the sharpest. This selected scale indicates the size of the local structure, and the ratio of the two principal curvatures at the selected scale indicates the shape-type of the structure.

1. はじめに

画像中の図形形状をとらえることは、画像認識などにおいて重要なことである。濃淡画像中の図形形状は、画像の濃淡を表す曲面の構造によりとらえることができる。このため画像の濃淡を表す曲面の、尾根線やエッジなどの構造を抽出する手法が数多く提案されてきた^{1),2),7)}。しかしこれら手法の多くでは、構造抽出を行う演算子を画像に作用させても、その演算子のス

ケール程度の大きさの構造しかとらえることができなかった。

たとえば、図1(左)に示した画像は、円環状に配置された線分により構成されている。仮に尾根線検出演算子をこの画像に適用すると、演算子の大きさが線分の幅程度の大きさであれば、各線分を抽出することができる。しかしこのとき大局的な円環の構造は抽出できない。逆に尾根線検出演算子の大きさが十分大きいときには、円環の構造は抽出できるかもしれないが、局所的な線分の構造抽出には失敗する(図1(右))。

一般に画像は様々なスケールの構造により構成されている。局所的な構造から大局的な構造まで、画像の

[†] 東京大学工学部計数工学科
Faculty of Mathematical Engineering and Information
Physics, University of Tokyo

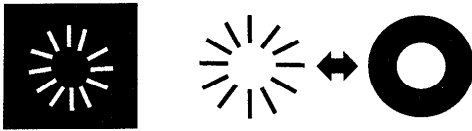


図1 画像の局所的構造と大局的構造

Fig. 1 Local and global structures in an image.

多様な構造を抽出するためには、構造抽出を行う演算子のスケールを、各構造の大きさにあわせる必要がある。このとき各構造の大きさは、画像自身より求めなくてはならない。

本稿では画像中の図形形状を、その大きさを求めつつとらえる手法を提案する。画像中の各構造の大きさを求めつつそれら構造の形状をとらえるために、画像のマルチスケール解析の手法^{4),8)}を用いる。ここでは、与えられた画像をガウシアンフィルタによりぼかす。ガウシアンフィルタの分散を表すパラメータをスケールパラメータと見なし、スケールの大きさを変化させる。スケールを大きくするに従い、小さな構造が消去され大局的な構造が現れてくる。このようなスケールの変化に対する画像の変化を観測することにより、画像内の各構造の大きさや形状をとらえる。

エッジや尾根など画像より抽出する構造の種類をあらかじめ決めておき、それら構造を抽出するのに適したスケールを定める手法は、これまでもいくつか提案されてきた^{5),6)}。たとえば、Lindeberg⁵⁾は画像から尾根線を抽出する際に、濃淡を表す曲面の各位置における尾根線の「強度」を定め、その強度が極大となるスケールを各位置ごとに求める手法を提案した。ところがこの手法によると、尾根抽出に適したスケールを画像自身から位置ごとに定めることはできず、スケールの変化による図形形状の変化をとらえることができなかった。

画像中の各構造の形状は、画像を観測する際のスケールに依存して変化する。たとえば、画像中の点線は、局所的には点だが大局的には線状の図形である。逆に文字などは局所的には線状の図形だが、大局的には塊状の図形である。これまでの手法は、このような、画像中において様々な形状・大きさを持つ構造の多様性を直接とらえることができなかったわけである。

本稿の構成を述べる。まず2章において、本稿が用いる画像のマルチスケール解析の手法、特にガウス関数によるぼけ変換、および画像の濃淡を表す曲面の主曲率の求め方を説明する。スケールの変化による画像の変化を、画像の濃淡を表す曲面の主曲率の変化によりとらえる。このために3章において主曲率平面を

導入する。4章では、各スケールにおいて画像内の各構造の位置を表す点を求める手法が説明される。5章にアルゴリズムを、6章に結果を示し、まとめを7章に述べる。

2. 画像のマルチスケール解析

本手法では、濃淡画像内の図形の大きさおよび形状をとらえるために画像のマルチスケール解析を行う。画像のマルチスケール解析の手法には様々なものが存在するが、ここでは等方的なガウス関数により、画像を一様にぼかす手法を用いる。そしてぼかしの程度を表すスケールパラメータを変化させたとき、画像がいかに変化するかを観測する。画像の変化は、画像の濃淡を表す曲面形状の変化によりとらえられる。本章において、ガウス関数による画像のぼけ変換、および画像の濃淡を表す曲面形状の主曲率の解析について説明する。以下本稿においては、画像の濃淡を表す曲面を略して濃淡曲面と呼ぶ。

2.1 スケールスペース

濃淡画像 $f(x, y)$ を次に示すようなガウシアンフィルタ $g(x, y; t)$ でぼかす。ここで分散を表すパラメータ t をスケールパラメータと呼ぶ。 t は [長さ]² の次元を持っている。

$$g(x, y; t) = \frac{1}{2\pi t} e^{-(x^2+y^2)/2t} \quad (1)$$

ガウス関数のスケールパラメータを変化させることにより、スケールスペース $L(x, y; t)$ を作成する。

$$\begin{cases} L(x, y; 0) = f(x, y), \\ L(x, y; t) = g(x, y; t) * f(x, y) \\ = \int g(x', y'; t) f(x - x', y - y') dx' dy'. \end{cases} \quad (2)$$

図2にスケールパラメータ t を0から増加させたときの画像の変化の例を示す。スケールの増加にとともに、ストロークなどの小さな構造が消え、図形“H”の全体に対応する塊状の形状が現れてきている。

2.2 濃淡曲面の形状解析

画像内の図形形状を、濃淡曲面の形状によりとらえる。たとえば、線図形に対応する濃淡の曲面形状は尾根状になり、塊状の図形は饅頭状の濃淡の分布を与える。濃淡を表す曲面の各点における形状をとらえるために、その点における主曲率を利用する。本節において主曲率の計算手法と、主曲率を用いた形状分類のために導入した主曲率平面について説明する。

曲面の各点における主曲率および主曲率方向は $L(x, y; t)$ の第2基本形式の固有値および固有ベクトルにより求めることができる。 $\partial L / \partial x$ を L_x などと

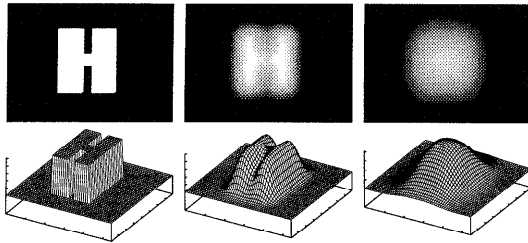


図2 ぼけ変換のスケールの変化による画像の変化(上列)と濃淡を表す曲面の変化(下列). 画像サイズ 112 × 80 に対してスケール t は左から順に 0 (元画像), 20, 100

Fig. 2 The change of an image with respect to the blurring scale. Right column shows their gray-level profile. The image size is 120 × 80. The scale t are 0, 20, and 100, respectively, from left to right.

表すと、濃淡を表す曲面の点 (x, y) での第2基本形式 $II(x, y; t)$ は次の行列で与えられる.

$$II(x, y; t) = \frac{1}{\sqrt{1 + L_x^2 + L_y^2}} \begin{pmatrix} L_{xx} & L_{xy} \\ L_{yx} & L_{yy} \end{pmatrix}. \tag{3}$$

各点における主曲率を κ_1 および κ_2 と表すと次の関係が成り立つ.

$$\begin{aligned} \kappa_1 &= \frac{-(L_{xx} + L_{yy}) + \sqrt{(L_{xx} - L_{yy})^2 + 4L_{xy}^2}}{2\sqrt{1 + L_x^2 + L_y^2}}, \\ \kappa_2 &= \frac{-(L_{xx} + L_{yy}) - \sqrt{(L_{xx} - L_{yy})^2 + 4L_{xy}^2}}{2\sqrt{1 + L_x^2 + L_y^2}}. \end{aligned} \tag{4}$$

求められる主曲率の大きさは、濃淡曲面のその点での曲がり具合を表している。また2つの主曲率の比は、濃淡を表す曲面のその点での形状を表す。たとえば、2つの主曲率の値が等しければ、濃淡を表す曲面の形状はその点で饅頭状の形状であり、一方の主曲率のみが0であればその点での形状は尾根状である。

本稿では、スケールの変化にともなう画像の変化を、濃淡曲面の各位置における曲がり具合と形状の変化によりとらえる。そのために、主曲率平面³⁾と呼ばれる平面を用いる。主曲率平面とは、 κ_1, κ_2 を直交2軸とする平面のことである。画像内の各位置において濃淡を表す曲面の主曲率 κ_1 および κ_2 を求め、主曲率平面内の対応する位置に点を打つ。この主曲率平面内の各位置は、図3にも示すとおり曲面の形状を反映しており、次のような性質を持つ。

- 原点 ($\kappa_1 = \kappa_2 = 0$) は平面に対応する。
- 極座標表示したときの動径成分 $R = \sqrt{\kappa_1^2 + \kappa_2^2}$ は曲面の“曲がり具合”を表す。
- 極座標表示したときの角度成分 $\alpha = \tan^{-1}(\kappa_2/\kappa_1)$

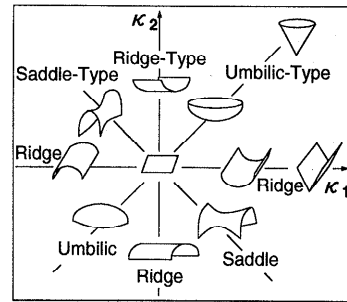


図3 主曲率平面

Fig. 3 The principal curvature plane.

は形状を表す。すなわち、

- $\alpha = 0$ or $\pm \frac{\pi}{2}$ のときは尾根(楯)点,
- $\alpha = \frac{\pi}{4}$ or $\frac{5\pi}{4}$ のときは臍点,
- $\alpha = -\frac{\pi}{4}$ or $-\frac{5\pi}{4}$ のときは鞍点.

3. スケールの変化と濃淡曲面の変化

スケールを0から次第に大きくしていくと、画像内の細かな構造から消去され、次第に大局的な構造が現れてくる。構造が現れるとき濃淡曲面は、その構造を反映して形状を変化させる。この濃淡を表す曲面形状の変化を各点でとらえるために、前章で述べた主曲率平面を用いる。ただし、スケールを増加させるに従い画像が平滑化されるため、各点で求められる主曲率は一般にスケールの増加に対して単調に減少する傾向がある。そこで本手法では、このスケールの影響を補正するため、位置のパラメータ x, y をスケールパラメータ t により無次元化して主曲率を計算する⁴⁾。スケールパラメータは[長さ]²の次元を持つ。そこで位置に関する偏微分を t を用いて次のように正規化する。正規化した偏微分を $\partial_{\cdot, \text{norm}}$ で表す。

$$\partial_{x, \text{norm}} = \sqrt{t} \frac{\partial}{\partial x}, \quad \partial_{y, \text{norm}} = \sqrt{t} \frac{\partial}{\partial y}. \tag{5}$$

以下、位置に関する偏微分にはこの $\partial_{\cdot, \text{norm}}$ を用いる。すると $\partial_{\cdot, \text{norm}}$ による画像の位置に関する微分は次のように表現される。

$$\underbrace{L_x \cdots x y \cdots y}_{m \quad n}, \text{norm} = t^{\frac{m+n}{2}} \cdot \frac{\partial^{m+n} L}{\partial x^m \partial y^n}(x, y; t), \tag{6}$$

第2基本形式の成分 L_{xx} などをすべて $L_{xx, \text{norm}}$ などで置き換え、このときに求まる主曲率を $\kappa_{1, \text{norm}}, \kappa_{2, \text{norm}}$ と表す。前章で述べた主曲率平面の κ_1, κ_2 軸のそれぞれを $\kappa_{1, \text{norm}}$ および $\kappa_{2, \text{norm}}$ に変更し、スケール t の変化に対する濃淡曲面の形状の変化を主曲

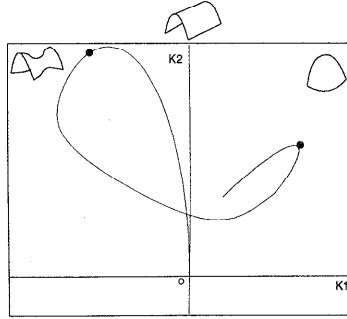


図4 図2に示した図形“H”の中央における、正規化した主曲率の変化

Fig. 4 The change of the normalized principal curvatures of the image gray-level profile at the center of the figure “H” shown in Fig. 2.

率平面上で観測する。式(5)より、 $t = 0$ においては $\kappa_{1,norm} = \kappa_{2,norm} = 0$ となる。

画像をぼかすスケール t を0より次第に増加させ、各スケールにおいて、画像内の各位置における正規化された主曲率を求める。求められた主曲率に対応する主曲率平面上の位置に点を打つ。スケールが変化するに従い、主曲率平面上の点の位置が移動する。このときの主曲率平面上での軌跡を観測する。

図2に示した画像中、“H”の形をした図形の横ストローク中央の位置における主曲率の変化を、 $\kappa_{1,norm} - \kappa_{2,norm}$ 平面にプロットしたものが図4である。先に述べたとおり主曲率平面においては、原点からの距離 $R_{norm} = \sqrt{\kappa_{1,norm}^2 + \kappa_{2,norm}^2}$ が曲面の“曲がり具合”を、動径の方向 $\alpha_{norm} = \alpha = \tan^{-1}(\kappa_{2,norm}/\kappa_{1,norm})$ が曲面の形状を表す。

図4によると、 $t = 0$ のとき $\kappa_{1,norm} = \kappa_{2,norm} = 0$ であり、 t の増加に従わず $\alpha_{norm} = 3\pi/4$ の方向にグラフが延びている。これはこの点での濃淡を表す曲面の形状が次第に鞍型に変化していることを示している。さらに t を増加させると、あるスケールでグラフが $\alpha_{norm} = \pi/4$ の方向へと大きく移動する。大きなスケールでぼかされることにより図形全体が1つの塊となり、曲面が臍状に変化したことを示している。

同じ α_{norm} に対しては R_{norm} の値が大きいほど、その曲面の形状がはっきりしていると見なすことができる。そこで本稿では R_{norm} の極大点を与えるスケールを、濃淡特徴抽出に適したスケールとして選択する。選択されるスケールにおいては、次に示す条件が成り立っている。

$$\frac{\partial R_{norm}(x, y; t)}{\partial t} = 0 \quad \text{かつ} \quad \frac{\partial^2 R_{norm}(x, y; t)}{\partial t^2} < 0. \tag{7}$$

図4に示した例においては、 R_{norm} が2カ所の極大点を持っている。一方は局所的な鞍点に、他方は大局的な臍点に対応する。 R_{norm} が極大値をとるスケール t_{max} により、その点まわりの図形の大きさを知ることができる。元画像が次に示す関数 f^1, f^2, f^3, f^4 で表現できる場合を例として、 t_{max} がその点まわりに図形の大きさに対応していることを示す。

$$\begin{aligned} f^1(x, y) &= \frac{1}{2\pi t_0} e^{-(x^2+y^2)/2t_0} \\ f^2(x, y) &= \begin{cases} 1 & \text{if } x^2 + y^2 < t_0, \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases} \\ f^3(x, y) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi t_0}} e^{-x^2/2t_0} \\ f^4(x, y) &= \begin{cases} 1 & \text{if } x^2 < t_0, \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases} \end{aligned} \tag{8}$$

f^1, f^2 はそれぞれ原点 $(x, y) = (0, 0)$ に位置する半径 $\sqrt{t_0}$ の円を、 f^3, f^4 は y 軸上に位置する幅 $\sqrt{t_0}$ の直線を表す。濃淡曲面の形状は f^1 および f^3 はガウス関数状であり、 f^2 および f^4 は矩形状となっている。

画像 f^1, f^2, f^3, f^4 をスケール t のガウス関数でぼかしたときの、原点における濃淡曲面の曲がり具合 $R_{norm}^1(0, 0; t), R_{norm}^2(0, 0; t), R_{norm}^3(0, 0; t), R_{norm}^4(0, 0; t)$ を求めると次のようになる。

$$\begin{aligned} R_{norm}^1(0, 0; t) &= t/(\sqrt{2\pi}(t+t_0)^2) \\ R_{norm}^2(0, 0; t) &= e^{-t_0/(2t)} t_0/t \\ R_{norm}^3(0, 0; t) &= t/\sqrt{2\pi}(t+t_0)^3 \\ R_{norm}^4(0, 0; t) &= e^{-t_0/2t} \sqrt{2t_0}/\sqrt{\pi t} \end{aligned} \tag{9}$$

それぞれについて、条件(7)を満たすスケール $t_{max}^1, t_{max}^2, t_{max}^3, t_{max}^4$ を求めると式(10)のようになる。

$$\begin{aligned} t_{max}^1 &= t_{max}^4 = t_0, \\ t_{max}^2 &= t_{max}^3 = t_0/2. \end{aligned} \tag{10}$$

条件(7)を満たすスケールが t_{max} であるとき、図形の幅を $\sqrt{t_{max}}$ として求めることにする。 $\sqrt{t_{max}}$ を求めることにより、図形が円形の場合、濃淡曲面の形状がガウス関数状であれば標準偏差 $\sqrt{t_0}$ を求めることができ、一方、プロファイルの形状が矩形の場合には半径の $1/\sqrt{2} (\approx 0.7)$ 倍の値が求まる。図形が線状の形状である場合には、濃淡曲面の形状がガウス関数状の場合に標準偏差の $1/\sqrt{2}$ が求まり、矩形の場合には線幅が求まる。

一般に濃淡画像中の図形は、多様な濃淡曲面形状を持つ。個々の図形より求められる大きさは、図形形状が同じであっても、その濃淡曲面の形状に依存して変

化する⁶⁾。個々の図形の正確な「大きさ」を求めるためには、濃淡曲面の形状変化にともないスケール選択の基準を変化させる必要があると思われるが、そのような手法はまだ知られていない。

本稿の目的は、画像中の濃淡図形が持つ構造の階層性と形状とをとりとえることである。条件(7)を満たすスケールによれば、画像の場所ごとに各構造の相対的な大小関係を抽出し、階層性をとりとえることができる。そこで本稿では、濃淡曲面の形状によりスケール選択の基準を変えることなく、条件(7)を満たすスケールによって各図形の大きさを見積もることとする。

ところで上に示した例において、原点以外の点において R_{norm} が極大となるスケールを求めても、元画像中の構造の大きさを求めることはできない。濃淡曲面の頂点に着目し、その点において R_{norm} が極大となるスケールを求めることにより、はじめてその頂点まわりの構造の大きさが求められる。次章において、濃淡曲面の「頂点」に着目するための手法について説明する。

4. 濃淡曲面の頂点もしくは尾根点

濃淡曲面は、場所ごとに臍状や尾根状の様々な形状を持つ。前章で述べたとおり、濃淡曲面が臍状であるような領域においては、その濃淡曲面の頂点において R_{norm} が極大となるスケールを求めることにより、その臍状領域の大きさを求めることができる。求める大きさは、画像上における塊状の図形の、中央から境界までの距離に相当する。同様に濃淡を表す曲面が尾根状の領域においては、その領域の尾根線の上で R_{norm} が極大となるスケールを求めることにより、尾根の幅を求めることができる。これは画像上の線図形における、線幅の $1/2$ に相当する。

画像をぼかすスケールを変化させる際、濃淡曲面の頂点や尾根線を各スケールにおいて求める。これら濃淡曲面の頂点や尾根線は次式のように表すことができる。まず画像の各点において、その点における主曲率方向に沿った位置を表すパラメータを p, q とおく。ただし p, q はそれぞれ κ_1, κ_2 に対応させる。

$$\begin{cases} |\kappa_{1,\text{norm}}| \leq |\kappa_{2,\text{norm}}|, \\ \frac{\partial L(x, y; t)}{\partial q} = 0, \end{cases} \quad \text{または} \quad (11)$$

$$\begin{cases} |\kappa_{1,\text{norm}}| \geq |\kappa_{2,\text{norm}}|, \\ \frac{\partial L(x, y; t)}{\partial p} = 0. \end{cases}$$

式(11)により抽出される点は、主曲率方向の一方が濃淡の勾配方向と一致し、その方向で見たとき濃淡曲面 $L(x, y; t)$ の法曲率が最も 0 に近くなる点である。このような点は濃淡曲面の頂点や尾根線となる。

5. 濃淡画像の特徴点抽出手法

本手法は、 x - y - t のスケール空間において式(7)および(11)を同時に満たす点を与えられた画像の特徴点として抽出する。特徴点のスケールにより各構造の大きさを知ることができ、形状も α_{norm} の値により知ることができる。このように画像内の各構造の形状が大きさとともに求められることは、画像の特徴を記述する際に有用なことである。濃淡画像の特徴点を抽出するためのアルゴリズムは次のようになる。

- i) 式(2)に従って、与えられた画像をぼかす。ぼかしのスケール t の値を 0 から次第に増やしていく。
- ii) 各スケールにおいて、ぼかした画像のすべての点において $\kappa_{1,\text{norm}}, \kappa_{2,\text{norm}}, R_{\text{norm}}$ および α_{norm} を計算する。
- iii) 各スケールによってぼかした画像中で、式(11)を満たす点を求める。求められる点は、各スケールの濃淡曲面の「頂点」に位置している。
- iv) あるスケール t_0 において画像中のある点 (x_0, y_0) が式(11)を満たす「頂点」上に位置し、なおかつそのスケール t_0 において点 (x_0, y_0) における R_{norm} がスケールの変化に対して極大となるならば、スケール空間中の点 (x_0, y_0, t_0) を特徴点として抽出する。

6. 実験結果

本章において提案手法の実験結果を示す。いずれの実験においてもスケール t の値は 0 から $\Delta t = 1/3$ 刻みで増加させた。 R_{norm} を極大とするスケールの抽出は、画像内の各位置で、連続する 3 つのスケールで求めた R_{norm} の値を比較することで行った。先に述べたとおり画像より抽出される各特徴点は、濃淡曲面の形状を表すパラメータ α_{norm} の値を持つ。ここでは求められた α_{norm} の値により、濃淡曲面の形状を臍状・尾根状・鞍状の 3 つに分類した。分類は図 5 にも示すように、次のように行った。

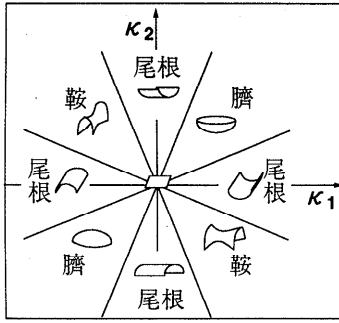


図 5 濃淡曲面の形状の主曲率平面上での分類
 Fig. 5 Classification of the shape-type of a local image gray-level profile on the principal curvature plane.

$$\begin{array}{l}
 -\pi < \alpha_{\text{norm}} \leq -\frac{7\pi}{8} \quad \text{または} \\
 -\frac{5\pi}{8} < \alpha_{\text{norm}} \leq -\frac{3\pi}{8} \quad \text{または} \\
 -\frac{\pi}{8} < \alpha_{\text{norm}} \leq \frac{\pi}{8} \quad \text{または} \\
 \frac{3\pi}{8} < \alpha_{\text{norm}} \leq \frac{5\pi}{8} \quad \text{または} \\
 \frac{7\pi}{8} < \alpha_{\text{norm}} \leq \pi \\
 -\frac{7\pi}{8} < \alpha_{\text{norm}} \leq -\frac{5\pi}{8} \quad \text{または} \\
 \frac{\pi}{8} < \alpha_{\text{norm}} \leq \frac{3\pi}{8} \\
 -\frac{3\pi}{8} < \alpha_{\text{norm}} \leq -\frac{\pi}{8} \quad \text{または} \\
 \frac{5\pi}{8} < \alpha_{\text{norm}} \leq \frac{7\pi}{8}
 \end{array}
 \left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{尾根} \\ \\ \\ \\ \\ \text{臍状} \\ \\ \text{鞍状} \end{array} \quad (12)$$

最初に弓形の図形の 2 値画像に対して本手法を適用した例を図 6~8 に示す。用いた画像のサイズは 200 × 200, 弓状の図形の幅は 29 pixel である。まず図 6 (左) にスケール t の変化による画像の変化を示す。また, 図 6 (右) に, 画像中の直線 $y = 100$ 上の各点において R_{norm} が極大となったスケールを, $x-t$ 平面にプロットしたものを示す。曲線の中央 ($x = 100$) で R_{norm} が極大となったスケールは $t_{\text{max}} = 205.3$ であった。 $\sqrt{205.3} \approx 14.3$ であり, 図形の幅の 1/2 とほぼ一致した。

続いて図 7 中に, 各スケールにおいて式 (11) を満たす点, すなわち濃淡曲面の「頂点」を求めた結果を示す。この例においては濃淡曲面は帯図形に対応して尾根状の形状となり, その尾根線が画像中の帯図形中央に沿って各スケールにおいて抽出されている。図 7 (右) は, スケールスペース内の平面 $y = 100$ 上にプロットされた, 各スケールにおける「頂点」の位置の図である。

図 6, 7 に示した結果をもとに本手法が抽出した特

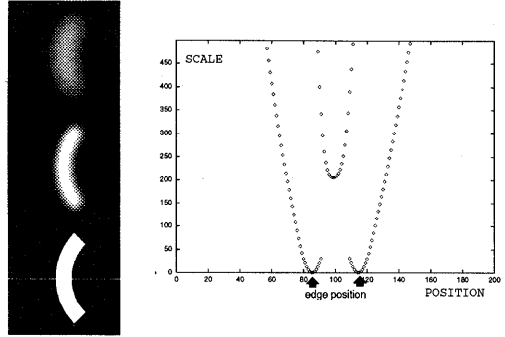


図 6 (左) ぼけ交換のスケールの変化に対する画像の変化。画像サイズは 200 × 200。下より順に $t = 0, 100, 500$ 。 $t = 0$ の画像中に示した横線は直線 $y = 100$ である。(右) $y = 100$ における, R_{norm} が極大となるスケールの分布。矢印により元図形の輪郭の位置を示す。

Fig. 6 Example of scale selection. (left) The blurred images with the scale values $t = 0, 100$, and 500. The line in the bottom original image indicates the position of the section of the scale-space, which is shown in the right diagram. The edge positions in the original image are shown with arrows.

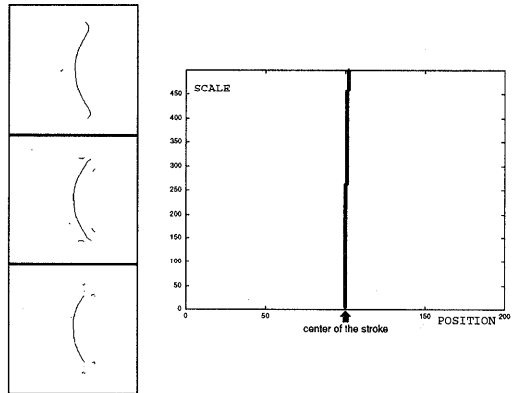


図 7 (左) 左の画像それぞれにおける濃淡曲面の「頂点」の位置。下より順に $t = 0, 100, 500$ 。(右) 原画像中の水平線で示した位置でのスケールスペースの断面における, 各スケールで濃淡曲面の尾根線的位置。

Fig. 7 Example of extracted shape representational points. (left) The extracted shape representational points. (right) A section of the the scale-space.

徴点を, 図 8 に示す。元画像中の図形中央に沿って, 帯の幅に相当するスケールを持つ特徴点が抽出された。各特徴点は濃淡曲面の形状を表す特徴量 α_{norm} を持つが, ここに示した例ではいずれの特徴点においても $\alpha_{\text{norm}} \approx \pi/2$ であり, 尾根状の形状であることを示していた。このことから, 抽出された図形が線図形であることを判断できる。線状の図形であるという形状特徴の抽出が線幅抽出とともになされたことが分かる。

先の例では, スケールを変化させても図形形状はそ

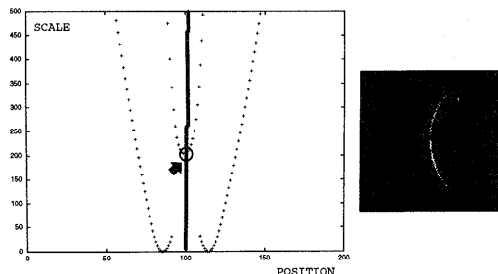


図 8 (左) 特徴点抽出の例。図 6 に示した画像中の各点において R_{norm} が極大となるスケールの分布と、図 7 に示した各スケールにおける濃淡曲面の「頂点」の交点が、特徴点として抽出される。图中、矢印により示された円で囲まれた点が抽出される特徴点。(右) スケールスペースより抽出された特徴点を画像上に投影したものの。

Fig. 8 Example of extracted feature points. (left) A section of the scale-space. (right) Feature points projected on the given image.

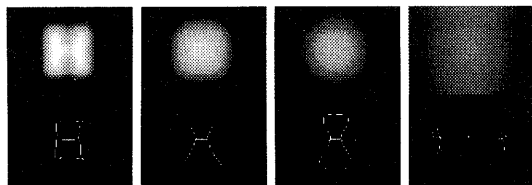


図 9 (上段) はけ変換のスケール変化による画像の変化。スケールは左より $t = 20, 100, 200, 800$ 。(下段) 各スケールにおける、画像の濃淡を表す曲面の頂点および尾根線。

Fig. 9 The change of the image and of the shape representational points. The scale t are 20, 100, 200, and 800, respectively, from left to right.

れほど変化しなかった。次にスケールの変化にともない図形形状が変化する例を示す。図 9~11 は、図 2 に示した“H”の画像に対する本手法の適用結果である。まずスケールの変化にともなう画像の変化と、各スケールにおいて濃淡曲面の「頂点」を求めた結果を図 9 に示す。濃淡曲面の尾根線は、スケールの変化にともない複雑に変化している。

図形“H”より最終的に抽出された特徴点を図 10 の左に示す。“H”の各ストロークの中央に沿って特徴点が抽出されている。式 (12) に示したように、各特徴点における α_{norm} の値によって各々の特徴点が示す形状を分類した。図 10 の中央に「尾根状」と判断された特徴点を、図 10 (右) に「臍状」と判断された特徴点を示す。図形のストロークの中央に沿って線図形であることを示す尾根状の特徴点が抽出され、線分の交点や端点の位置に塊状の図形に対応する臍状の点が抽出された。

各特徴点のスケール t は、その特徴点まわりの構造の大きさを示す。ここでは、各特徴点を中心とし半径

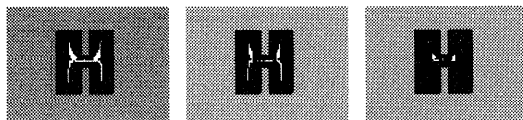


図 10 (左) 全特徴点。(中) 全特徴点のうち α_{norm} の値により形状が尾根状と判断されたもの。(右) 臍状と判断されたもの。

Fig. 10 The extracted feature points. (left) All feature points. (middle) Ridge-type points. (right) Umbilic-type points.

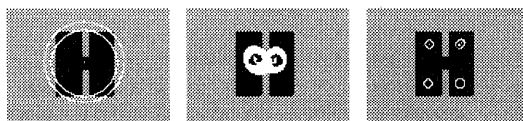


図 11 臍状の特徴点において選択されたスケール。見やすく表示するために、特徴点におけるスケールの大きさにより 3 つに分けて図示した。

Fig. 11 The selected scales at the umbilic feature points.

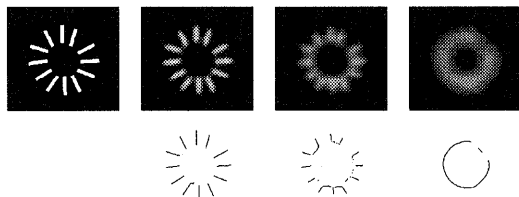


図 12 (上段) はけ変換のスケール変化に対する画像の変化。画像サイズ 190×180 に対してスケールは順に 0, 20, 60, 200。(下段) 各スケールにおける、濃淡曲面の頂点および尾根線。

Fig. 12 (top row) The original and blurred images. The scale $t = 0, 20, 60, \text{ and } 200$. (bottom row) Extracted shape representational points at each scales. The image size is 190×180 .

\sqrt{t} の円を描くことにより、各特徴点で選択されたスケールを図示する。臍点と判断された特徴点について選択されたスケールを図示すると、図 11 が得られる。見やすく表示するために、スケールの大小により 3 つに分けて図示してある。

図形中央の位置に現れた臍点のスケールは、図形全体の大きさを示していた。また、尾根線の端点もしくは分岐点に現れた臍点はおおよそストロークの幅を示していた。「尾根状」と判断された特徴点のスケールも、各々ストロークの幅に対応していた。この結果により、図形“H”が大局的には塊状の形状を持ち、局所的には線状の形状を持つことが分かる。またここでいう大局的・局所的な構造の各々の大きさも知ることができる。

次いで、図 1 に示した、局所的な線分が大局的な円環状に配置された画像に対する本手法の適用結果を示す。図 12 はスケールの変化に対する、画像および濃淡曲面の「頂点」の変化をそれぞれ示したものであ

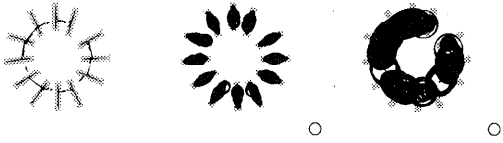


図 13 (左) 図 12 に示した画像より抽出された全特徴点。(中・右) 各特徴点のスケールの大きさを、図中右下の円により示したスケールにより大小に分けて図示。

Fig. 13 (left) Extracted feature points. (middle) Feature points which have smaller scales than the circle shown in the bottom right. (right) Feature points which have larger scales.

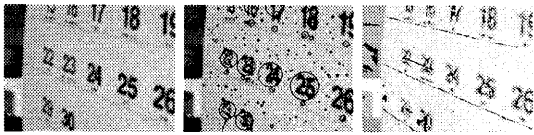


図 14 (左) 原画像。(中) 抽出された特徴点のうち、臍状と判断されたものをスケールを表す円とともに図示。(右) 尾根状の特徴点

Fig. 14 (left) The original image. (middle) The extracted umbilic-type feature points. The selected scales at each point are shown with the circles. (right) The extracted ridge-type points.

る。各線分の幅は 8 pixel であり、長さは 33 pixel である。線分の線幅もしくは線の長さにおおよそ対応したスケールにおいては、それぞれ局所的な線分もしくは円環状の構造に対応した尾根線が抽出されている。一方、その中間のスケールにおいては、放射状の線分と大局的円環とが影響しあった中途半端な尾根線が抽出されている。

本手法により抽出された特徴点を図 13 に示す。局所的な線分もしくは大局的な円環に沿った特徴点のみが抽出されていることが分かる。スケール $t = 25$ 程度の小さなスケールを持ち $\alpha_{\text{norm}} \simeq \pi/2$ であることから、線状の図形と分かる特徴点が局所的な線分に沿って抽出され、 $t = 220$ 程度の大きなスケールを持ち $\alpha \simeq \pi/2$ である特徴点が円環に沿って抽出された。スケールの大きさを表す円を各特徴点上に重ねて図 13 に示す。結果を分かりやすく表示するために、各特徴点のスケールが図中右下の円により示したスケールより大きいか否かによって分けて図示した。局所的な線分構造と大局的な円環構造とを、それぞれの大きさとともに抽出できていることが分かる。

最後に実画像を用いた実験例を図 14 に示す。用いた画像中には、各々大きさの異なる文字図形が見られる。特徴点の α_{norm} の値によって尾根状と臍状・鞍状とに分けて図示した。臍・鞍状の点では、スケールを示す円もあわせて表示してある。文字の部分ではス

トロークに沿って局所的な尾根状の特徴点が検出された。また曲線の接している部分や文字全体の塊の中央に臍点が抽出されている。臍点のスケールは、それぞれの文字全体の大きさを示していることが分かる。各文字図形が、局所的には線図形であり大局的には塊状の図形であることを、あらかじめ線幅や文字の大きさを与えることなくとらえることができている。

7. おわりに

本稿では、濃淡曲面のスケールの変化に対する主曲率の変化を観測することにより、適切なスケールを求めつつ図形形状をとらえる手法を提案した。スケールの変化に対する濃淡を表す曲面形状の変化をとらえるために、 x 軸、 y 軸それぞれが主曲率を表す主曲率平面を導入した。

画像をぼかすスケールを変化させ、各スケールにおいて、濃淡曲面の主曲率を画像中の各位置において求める。求めた主曲率に対応する点を主曲率平面にプロットするとき、原点からその点までの距離が濃淡曲面の曲がり具合を、原点からのその点への方向が形状を表している。スケールを変化させたときの濃淡曲面の変化を、その主曲率平面内における軌跡でとらえ、原点からの距離が極大となるスケールを選択する。選択されるスケールは対応する構造の大きさを、そのときの主曲率の比が形状を表している。

ところで選択されるスケールより求められる図形の大きさは、3 章でも述べたとおり濃淡曲面の形状に依存して変化する。図形形状が同じでも濃淡曲面の形状が異なれば、求められる「大きさ」も異なる。濃淡曲面の形状によらず図形形状の大きさを求めるためには、濃淡曲面の形状を考慮して図形の大きさを見積もる必要がある。これは今後の課題である。

人工的なパターンや実画像などを用いた実験により、本手法が小さな構造は小さなスケールによりとらえ、大きな構造は大きなスケールによりとらえることを確認した。このことにより、画像の構造の階層性をとらえることができた。

濃淡画像中の構造の形状が、その大きさとともに抽出される本手法の特徴は、画像を記述する際に有用であると考えられる。

参考文献

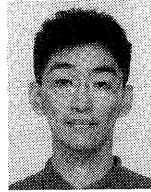
- 1) Florack, L.M.J., ter Haar Romeny, B.M. and Koenderink, J.J.: Scale and the differential structure of images, *Image and Vision Computing*, Vol.10, No.6, pp.376-388 (1992).

- 2) Haralick, R.M., Watson, L.T. and Laffey, T.J.: The Topographic Primal Sketch, *Int. J. of Robotics Research*, Vol.2, No.1, pp.50-72 (1983).
- 3) Koenderink, J.: *Solid Shape*, MIT Press (1990).
- 4) Lindeberg, T.: *Scale-Space Theory in Computer Vision*, Kluwer Academic Publishers (1994).
- 5) Lindeberg, T.: Edge Detection and Ridge Detection with Automatic Scale Selection, *Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition '96 (San Francisco)*, pp.465-470 (1996).
- 6) Lorenz, C., Carlsen, I.-C., Buzug, T., Fassnacht, C. and Weese, J.: A Multi-scale Line Filter with Automatic Scale Selection Based on the Hessian Matrix for Medical Image Segmentation, *Scale-Space Theory in Computer Vision*, Lecture Notes in Computer Science, pp.152-163, Springer (1997).
- 7) Maintz, J.A., van den Elsen, P.A. and Viergever, M.A.: Evaluation of Ridge Seeking Operators for Multimodality Medical Image Matching, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.18, No.4, pp.353-365 (1996).
- 8) Witkin, A.P.: Scale Space Filtering: A

New Approach to Multi-Scale Descriptions, *IJCAI83*, pp.1019-1022 (1983).

(平成 10 年 1 月 12 日受付)

(平成 10 年 9 月 7 日採録)



本谷 秀堅 (正会員)

平成 5 年東京大学大学院工学系研究科計数工学専攻修士課程修了。同年 (株) 東芝入社。同社研究開発センターにて画像処理・認識システムの研究開発に従事。平成 8 年より東京大学工学部助手。画像認識、形状解析の研究に従事。



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 等会員。工学博士。