

多重解像度スケルトンを用いた輪郭線図形の分割手法

本谷 秀 堅[†] 中 尾 学^{†,☆} 出口 光 一 郎^{†,☆☆}

輪郭線図形を分割し、分割結果を構造の大きさを基に階層化する手法を提案する。従来の図形分割手法の多くは、輪郭線上の曲率極小点2点を結ぶ線分により、輪郭線を分割していた。このため2つ以上の構造要素からなると見なせる図形でも、曲率極小点を2点持たない凸状構造を分割することができなかった。また、曲率極小点のみを手がかりに分割することが、必ずしも適当でない図形も多くある。本稿では与えられた図形のスケルトンを抽出し、図形を分割することを提案する。さらに、分割結果を階層化するために、分割と同時に多重解像度スケルトン解析を行う。多重解像度スケルトン解析においては、対象図形を様々な解像度で観測し、各解像度においてスケルトンを抽出する。解像度を次第に低くしていくと、スケルトンの本数が減っていく。提案手法により求められる図形の分割線はすべて、スケルトンに対応している。そこで、元図形を分割する線のうち、より低い解像度まで消えなかったスケルトンに対応しているものを、より大きな構造を分割するものであると見なす。スケルトンが消滅する解像度を求めるためには、ある解像度におけるスケルトンと元図形におけるスケルトンとの対応づけを行う必要がある。本稿では、スケールスペースと呼ばれる空間を利用したスケルトンの対応づけを行う手法を提案する。様々な輪郭線図形に対して実験を行い、本手法が形状解析に有用であることを確認した。

Contour Figure Segmentation Using Multi-resolution Skeletons

HIDEKATA HONTANI,[†] MANABU NAKAO^{†,☆}
and KOICHIRO DEGUCHI^{†,☆☆}

We propose a contour figure splitting method. The purpose is to split the given figure into shape components, and to represent the split components hierarchically. Most of conventional methods fail to split off some protrude components which have not two contour curvature negative minimal points at their necks. In this paper, we propose to split the given figure at the ligature and the semi-ligature parts of skeletons. At the same time of the splitting, in order to represent the split components hierarchically, a technique of the multi-resolution analysis is introduced. The given figure is observed at various resolutions. At every resolution the given figure is split by lines into components. As the resolution becomes lower, the number of the components decreases. The splitting lines which exist at the lower resolutions are considered stronger. We make a hierarchical representation of split components based on the strength of the splitting lines. To measure the strength, we must make correspondences between splitting lines obtained at different resolutions. We developed a method to make these correspondences by the scale-space analysis. Some experimental results show that the proposed method is applicable for many types of figure analyses.

1. はじめに

輪郭線図形の形状を表現する手法の1つとして、スケルトンを用いる手法がこれまでに数多く研究されてきた。スケルトンとは、円の中心点や長方形の中心線

など対象図形の「骨格」となるものを陽に記述するものである。スケルトンは対象図形の凸状の構造の対称軸であり、本文でも述べるとおり明示的な定義が与えられている。この定義によると図形より抽出されるスケルトンは元図形から一意に定まり、逆にスケルトン上の各点を適切な大きさの円で置換することにより元図形を復元できる。抽出されるスケルトン1本1本は元図形の凸状の構造にそれぞれ対応しており、形状特徴の把握がしやすくなる。

しかし抽出されるスケルトンは、形状の微小な変化によって大きく変化する。たとえば、図1にみられるように、微小な突出部の追加により新たなスケル

[†] 東京大学工学部計数工学科

Faculty of Mathematical Engineering and Information Physics, University of Tokyo

[☆] 現在、富士通研究所

Presently with Fujitsu Corporation

^{☆☆} 現在、東北大学大学院情報科学研究科

Presently with Graduate School of Information Science, Tohoku University

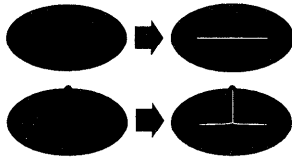


図1 図形のスケルトン。微小な凸構造により、長いスケルトンが生じることがある。

Fig. 1 A skeleton of a contour figure. A small protrude component generates a long skeleton branch.

トンが生じることがある。このときスケルトンの長さなどからは、対応する構造の大きさは判断できない。また元図形の大局的な形状を定めるスケルトンが、微小な構造に対応したスケルトンにより分断される。たとえば、図1に示した例では、横長の楕円を表していた横向きのスケルトンの枝が、微小な凸構造の追加により生じたスケルトンの枝によって2本に分断されている。

一般に図形は、大局的な構造から局所的な構造に至る階層構造を持っている。この構造の階層性は図形の形状を表現するうえで重要である。スケルトンの枝の各々をなんらかの構造に対応していると見なすことはできるが、図1の例のように、微小な凸構造が長いスケルトンを生じることがあるので、スケルトンから各構造の大きさを判断することはできない。

このような問題に対して、スケルトンの重要度を測るためPizerらは多重解像度スケルトンを提案した¹⁾。多重解像度スケルトンとは、対象図形を様々な解像度で観測したときの、各解像度におけるスケルトンのことである。図形を様々な解像度で観測するために、元図形になんらかのぼけ変換をほどこす。ぼかしの程度を次第に大きくしていくと解像度が低くなり、細かな構造から次第に消滅していく。様々なぼかしの程度に対応する図形を求め、それぞれについてスケルトン抽出を行う。より大きくぼかすまで存在し続けるスケルトンは、より大きな構造に対応していると判断する。これらの操作によって、各スケルトンが対応する構造の大きさを求める。

ただし、このようにして各スケルトンに対応する構造の大きさを測るためには、ぼかしの操作前と後とで抽出されたスケルトン同士の対応づけを行う必要がある。Pizerらはこの対応づけを自動的に行う手法については言及していない。本稿ではまず、この対応づけを自動的に行う手法について述べる。対応づけを行うために、スケールスペースと呼ばれる空間における曲率極大点の軌跡を利用する。

本稿ではスケルトンの枝の各々が輪郭線上の各構造

に対応していると見なす。ここでスケルトンの枝を1本ずつ切り離せば、元図形を各構造に分割することができる。そこで多重解像度スケルトンを利用して各スケルトンに対応する構造の大きさを求め、この結果を利用して輪郭線図形を各構造の大きさの違いを考慮して階層的に分割する手法を提案する。分割にスケルトン上の連絡橋と呼ばれている部分を用いることにより、自然な分割を行うことができた。

以下、まず2章においてスケルトンの抽出方法について述べる。ついで3章において、多重解像度スケルトンの生成方法を説明する。4章でスケルトンを用いた図形の分割手法を説明し、実験結果を5章に示す。6章にまとめを述べる。

2. スケルトンの抽出

本稿では輪郭線図形の形状特徴を記述するために、対象図形のスケルトンを用いる。スケルトンは文字どおり図形の骨格線である。輪郭線図形のスケルトンは、次のように定義される²⁾。

定義1

輪郭線図形のスケルトンとはその図形の極大円の中心点の集合である。

ただし輪郭線図形の極大円とは次のようなものである。またこの極大円と輪郭線との接点を、スケルトン生成点と定義する(図2参照)。

定義2

輪郭線図形の極大円とは、その図形内部に含まれる円であり、かつその図形内部に含まれる他の円には含まれないような円である。

定義3

スケルトン上の各点における極大円と輪郭線との接点を、スケルトン生成点という。

スケルトン上の各点に対応するスケルトン生成点は2点以上存在する。また輪郭線上のどの1点も、必ずスケルトン上のいずれかの点に対応するスケルトン生成点である。スケルトン生成点と輪郭線の形状との間に、次の定理1が成り立つ。

定理1

スケルトン上の1点に対応するスケルトン生成点の2点間を結ぶ輪郭線上には少なくとも1点、曲率が正の極大となる点が存在する。

証明はKimmelらの論文²⁾参照。この定理1から次の系1を導出できる。

系1

輪郭線を、曲率が正の極大点によって部分領域に分割する。スケルトンの各点に対応するスケルトン生成

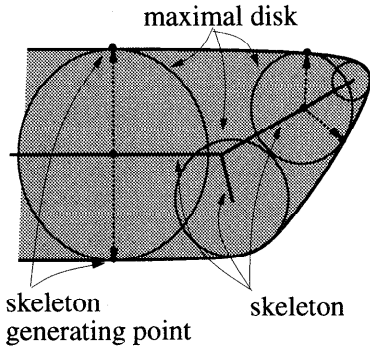


図2 輪郭線図形の極大円およびスケルトン生成点。スケルトンは極大円の中心点の集合である。

Fig. 2 The maximal disk and the skeleton generating point. The skeleton is a set of center points of the maximal disks.

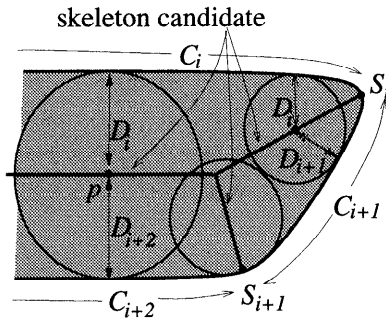


図3 スケルトンの候補点 $\hat{\phi}$ の抽出。

Fig. 3 Extraction of the skeleton candidate $\hat{\phi}$.

点は2点以上存在するが、それらは各々別々の部分領域に存在する。

系1に基づき、対象図形のスケルトンを求めるアルゴリズムを下に示す。

- (1) 輪郭線上で曲率が正である曲率極大点 $(s_1, s_2, \dots, s_N)$ を求める。そして輪郭線を s_i, s_{i+1} ($i = 1, 2, \dots, N; s_{N+1} = s_1$) を端点とする部分領域 C_i に分割する (図3)。
- (2) 図形内部の点 p と輪郭線上の各部分領域 $C_1, C_2, \dots, C_N$ との最小距離 $D_1(p), D_2(p), \dots, D_N(p)$ を、図形内部のすべての点に対して求める。
- (3) 図形内部に、下に示すようなスケルトンの候補点 $\hat{\phi}$ を求める。

$$\hat{\phi} = \{p : \forall i, j; i \neq j, (D_i(p) = D_j(p)) \cap (\cap_{k \neq i, j} D_i < D_k)\},$$

ただし $i, j, k \in \{1, 2, \dots, N\}$ 。このとき $\hat{\phi}$ の各点を中心とする半径 $D_i = D_j$ ($i \neq j$) の円が極大円である。1組の部分領域 C_i, C_j から

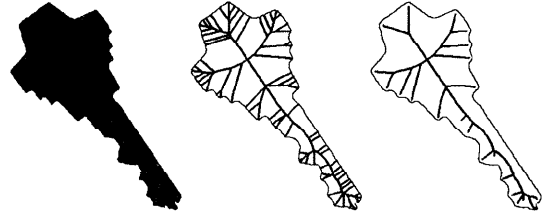


図4 スケルトンの抽出例。左：元図形，中：スケルトンの候補点 $\hat{\phi}$ ，右：スケルトン。輪郭線の凸部に対応してスケルトンが抽出されている。

Fig. 4 An example of extracted skeleton. Left: Original contour figure. Middle: Extracted skeleton candidate. Right: Extracted skeleton.

1本のスケルトン候補が得られる。

- (4) 輪郭線上で曲率正の極大点 s_i の各点における曲率を κ_i とする。 $\hat{\phi}$ の各点のうち s_i よりの距離が曲率半径 $\frac{1}{\kappa_i}$ 以下の点は、点 s_i と1点で接するため極大円の中心とはならない。そこで $\hat{\phi}$ の各点のうち s_i よりの距離が曲率半径 $\frac{1}{\kappa_i}$ より近い点を取り除き、残ったものをスケルトンとして抽出する。

スケルトンの抽出例を図4に示す。輪郭線の凸の部分に対応してスケルトンが抽出されていることが分かる。上記(4)により、スケルトンの候補点 $\hat{\phi}$ の一部が取り除かれる。このため曲率正の極大点のすべてにスケルトンが対応するわけではなくなる。対応するスケルトンを持つ曲率正の極大点を、以下輪郭分割点と呼ぶ。

各スケルトンの枝は、対象図形の凸状の構造の骨格線となっている。各凸状の構造には、図形の大局的な形状に影響を与える重要な構造から、局所的な形状を変化させるのみの些細な構造まで様々なものがある。スケルトンを用いて対象図形の局所-大局の階層性を表現するために、Pizerらによって提案された多重解像度スケルトンと呼ばれる解析手法を導入する¹⁾。本章においてこの解析手法について説明する。

3. 多重解像度スケルトン

多重解像度スケルトン解析においては、図形の構造をスケルトンによりとらえる。対象図形を観測する解像度を変化させ、各解像度においてスケルトンを求める。解像度を次第に低く変化させると平滑化により局所的な構造が消去され、スケルトンの本数が次第に減っていく。スケルトンの枝が消滅する解像度を、そのスケルトンに対応する構造の大きさで見なす。

各解像度に対応した図形を得るために、Pizerらは curvature flow と呼ばれている輪郭線図形の平滑化を

用いた¹⁾。curvature flow による平滑化は輪郭線の曲率極大点の数を増やさないことが保証されている^{3),4)}。このため、曲率正の極大点に対応しているケルトンを解析するのに適している。

スケルトンが消滅する解像度を求めるためには、各解像度で求められたスケルトンを対応づける必要があるが、Pizer らは対応づけの手法については言及していない。本稿ではこの異なる解像度におけるスケルトン同士の対応づけを行うために、スケールスペースと呼ばれる空間を利用した。スケールスペースとは、横軸が輪郭線上の位置を、縦軸が解像度を表す空間である。

以下、まず curvature flow による輪郭線の平滑化手法について説明し、ついでスケルトンを対応づける提案手法を説明する。

3.1 輪郭線図形の平滑化

輪郭線図形上の各点の座標を、弧に沿ったパラメータ s を用いて $\mathbf{R}_0(s) = (x(s), y(s))^T$ と表す。式 (1) に示す偏微分方程式の解 $\mathbf{R}(s; t)$ を求める。

$$\begin{cases} \frac{\partial \mathbf{R}(s; t)}{\partial t} = -\kappa(s; t)\mathbf{n}(s; t) \\ \mathbf{R}(s; 0) = \mathbf{R}_0(s) \end{cases} \quad (1)$$

ただしパラメータ t (≥ 0) は解像度に対応し、 t が増大するにつれて $\mathbf{R}(s; t)$ の形状は滑らかになる。本稿ではこのパラメータ t をスケールパラメータと呼ぶ。また $\kappa(s; t)$ は各位置における曲率、 $\mathbf{n}(s; t)$ は輪郭線外向きの単位法線ベクトルである。 t の増加にともなう $\mathbf{R}(s; t)$ の変形は curvature flow と呼ばれており、任意の輪郭線図形に対して、変形の過程で新たな曲率極大点を生じないことが保証されている。

与えられた図形 $\mathbf{R}_0(s)$ より式 (1) の解 $\mathbf{R}(s; t)$ を求める手法には level set を用いる手法⁵⁾やガウス関数による平滑化を用いる手法⁶⁾などが知られている。本手法では後に述べるとおりスケールスペースと呼ばれる空間を用いるため、元図形上の各点を追跡する必要がある。そこで Mokhtarian らの提案したガウス関数による平滑化を用いる手法を採用した⁶⁾。Mokhtarian らの手法によれば、元図形上の任意の点 $\mathbf{R}_0(s_0)$ を t の変化に対して追跡し $\mathbf{R}(s_0; t)$ を求めることができる。図 5 に、図 4 に示した図形より求めた各スケールにおける形状を示す。

3.2 解像度の変化とスケルトンの変化

スケールパラメータ t を 0 より次第に大きくし、各スケールにおける図形 $\mathbf{R}(s; t)$ に対してスケルトン抽出を行う。このとき t の増加につれてスケルトンは減少する¹⁾。

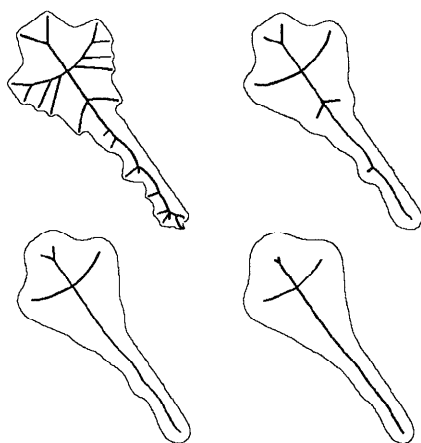


図 5 解像度の変化に対する図形とスケルトンの変化。元図形の周長 188 に対して、左より $t = 0, 100, 200, 400$

Fig. 5 The change of the figure and skeleton. The contour length of the original figure is 188, and the scale $t = 0, 100, 200$, and 400, from left to right.

横軸が輪郭線上の位置を、縦軸がスケールを表す空間はスケールスペースと呼ばれている。各スケールの図形において曲率が正の極大点を求めスケールスペースにプロットすると、各極大点は $t = 0$ を起点とする軌跡を描く。

図 5 に示した例に対するスケールスペース上の曲率正の極大点の軌跡を図 6 に示す。横軸は輪郭線上の位置で、輪郭線上にとった原点から輪郭線に沿って測った距離を全周の長さで $[0, 1]$ に正規化したもの、縦軸は $\log t$ である。 t の増加とともにスケルトンに対応した曲率正の極大点が減っていることが分かる。

スケールの増加にともない曲率極大の点が消滅する際、必ず曲率の極小点と融合する³⁾。極大点 1 つと極小点 1 つが融合する場合には、スケールスペース上の極大点の軌跡は単独で消滅しているように観測される。また 2 つの極大点と 1 つの極小点が融合した場合には、スケールスペースにおいて 2 つの極大点の軌跡が融合して 1 つの極大点が残る様子が観測される。

3.3 スケルトンの対応づけ

スケルトンが消去されるスケールを求めるためには、元図形のスケルトンとほかした図形より求めたスケルトンとの対応づけを行う必要がある。この対応づけを行うための手法について説明する。

曲率が正の極大点のうち対応するスケルトンを持つものを、輪郭分割点と呼んだ。輪郭分割点により分割された輪郭線の領域をセグメントと呼ぶ。

図 6 と同様に、横軸に輪郭線上の位置、縦軸にスケール (の対数) をとった空間に、各スケールにおける輪郭分割点の位置をプロットする。この空間はスケー

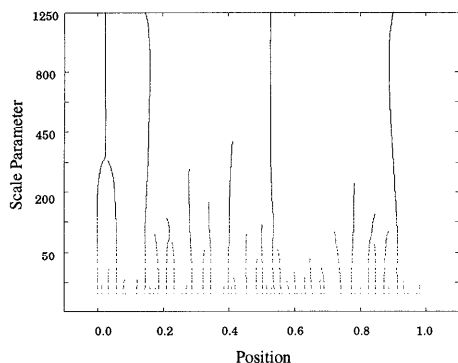


図6 スケールスペースにおける，曲率極大点の軌跡．横軸：輪郭線上の位置．縦軸： $\log t$

Fig. 6 The curvature positive maximal points plotted in the scale-space.

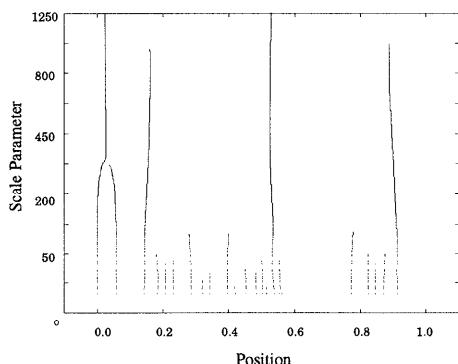


図7 スケールスペースにおける，輪郭分割点の軌跡

Fig. 7 The contour splitting points plotted in the scale-space.

ルスペースと呼ばれる．図6に対応する，輪郭分割点の位置をプロットした結果を図7に示す．スケールの増加にともなう輪郭分割点の変化が，軌跡となって表現されている．そして輪郭分割点の軌跡がスケールの増加とともに減少していることが分かる．

1本のスケルトンには2つのセグメントが対応する．スケール t_0 のときのセグメントは，スケールスペース内では，直線 $t = t_0$ 上で，隣りあう輪郭分割点を端点に持つ線分により表現される（図8）．元図形すなわち $t = 0$ のときのセグメントと $t = t_0$ のときのセグメントとの対応づけを行うには，スケールスペース内で元図形のセグメントを表現するする $t = 0$ 上の各線分から，輪郭分割点の軌跡を横切らないようにスケールが大きくなる方向へとたどっていく．たどり着いたスケール $t = t_0$ 上のセグメントが対応するセグメントである（図9）．スケールを増加させたときに新たに輪郭分割点が生じることがないため，元図形の

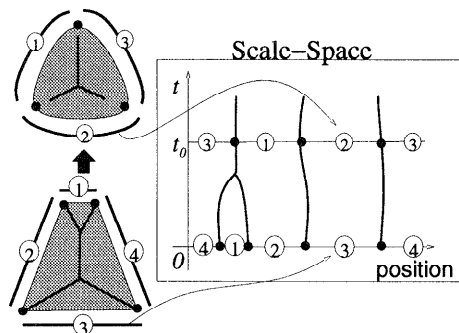


図8 輪郭分割点およびセグメント．左： $t = 0$ および t_0 における図形．丸中の数字はセグメントの番号を表す．右：スケールスペースにおける曲率極大点の軌跡，および各スケールにおいてセグメントを表す線分

Fig. 8 The contour splitting points, and segments. Left: The figures at $t = 0$ and t_0 . Every segment number is shown in a circle. Right: The scale-space with the trails of the contour splitting points, and with line segments corresponding to the segments of figures at each scales.

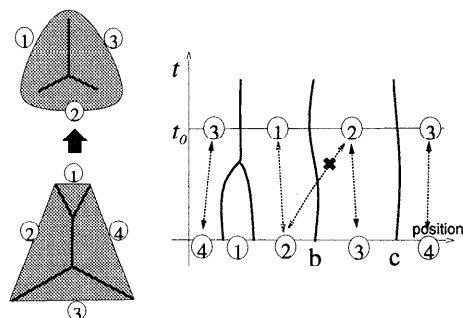


図9 スケールスペース上でのセグメントの対応づけ．左： $t = 0$, t_0 における図形．右：スケールスペース上での輪郭分割点の位置の軌跡と，セグメントの対応づけ

Fig. 9 Matching of skeletons between $t = 0$ and t_0 in scale-space. Left: The change of the figure. Right: The plotted contour splitting points and the correspondence of skeletons at each scale in scale-space.

セグメント1つに対して複数のセグメントが対応づけられることはない．

上に述べた手法により，あるスケールにおけるセグメントと元図形におけるセグメントとの対応づけを行うことができる．またほかすることにより，どのセグメントが消滅し，どのセグメントとどのセグメントが融合したかを判断することができる．このことを利用し，元図形のスケルトンのどれが消滅し，どれとどれが融合したのかを判断する．

まず輪郭分割点が単独で消滅する場合を図10を用いて説明し，次に複数の輪郭分割点が融合して消滅する場合を図11を用いて説明する．

輪郭分割点が単独で消滅するとき，元図形における

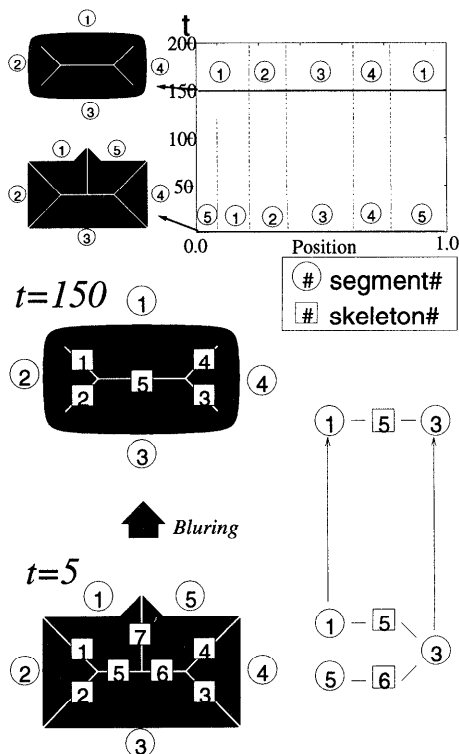


図 10 輪郭分割点が単独で消滅する場合のスケルトンの対応づけ。上：スケール空間における輪郭分割点の軌跡。輪郭分割点の消滅にともない、セグメント 1 と 5 が融合している。下：輪郭分割点の消滅によるスケルトンの融合。スケルトン 7 が消滅し、スケルトン 5 と 6 が融合している。

Fig. 10 Matching of skeletons in case that a contour splitting point disappears. Upper: The plotted contour splitting point in scale-space. When a contour splitting point disappears, two segments (#1 and #5) are merged. Bottom: When the skeleton #7 disappears, skeleton #5 and #6 are merged.

隣りあう 2 つのセグメントが 1 つに融合する。輪郭分割点の単独の消滅は、曲率極大の点と極小の点が 1 点ずつで融合する場合、もしくは曲率半径より近くにあるスケルトンを除去することにより対応するスケルトンがまったくなくなる場合に起こる。

1 本のスケルトンに対応している 2 つのセグメントが融合するとき、そのスケルトンは消滅する。たとえば、図 10 上において、元図形におけるセグメントの 1 と 5 は、 $t = 150$ におけるセグメントの 1 へと融合する。これにともない、図 10 下に示す元図形中のスケルトン 7 が消滅する。

あるスケルトンに対応するセグメントの一方と、別のスケルトンに対応するスケルトンの一方とが融合し、なおかつ、それら 2 本のスケルトンが共通するセグメントに対応している場合、それら 2 本のスケルトンは融合して 1 本になる。図 10 下を用いて説明する。

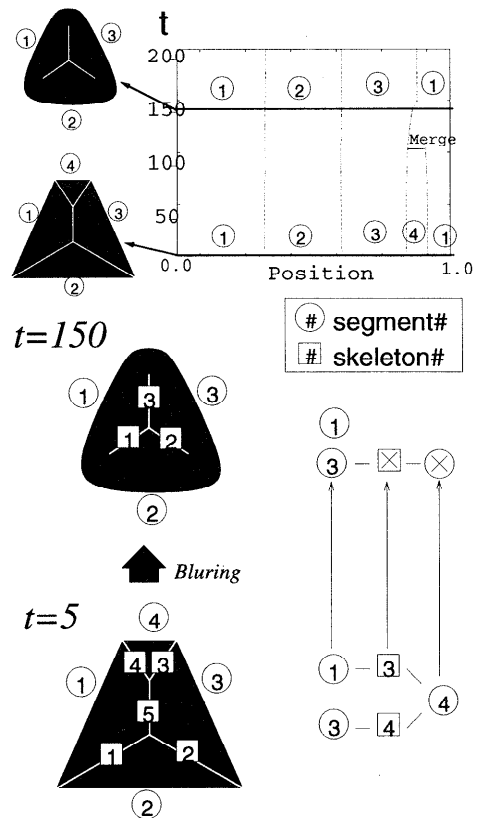


図 11 複数の輪郭分割点が融合して消滅する場合。上：スケール空間における輪郭分割点の軌跡。輪郭分割点の融合にともない、セグメント 4 が消滅している。下：輪郭分割点の融合によるスケルトンの消滅。スケルトン 3 と 4 が消滅している。

Fig. 11 Matching of skeletons in case that contour splitting points are merged and disappear. Upper: The plotted contour splitting point in scale-space. When two contour splitting points are merged and disappear, a segments (#4) disappears. Bottom: Skeletons #3 and #4 disappear.

$t = 5$ においてスケルトン 5 と 6 はともにセグメント 3 に対応している。さらにスケルトンの 5 と 6 とはそれぞれセグメント 1 と 5 に対応しており、それらセグメントは $t = 150$ においてはセグメント 1 に融合している。セグメントの融合の結果、スケルトン 5 と 6 がスケルトン 5 へと融合したことが判断できる。

元図形においては、大局的な形状を表すスケルトンが局所的構造を表すスケルトンにより分断されている。ぼけ変換により局所的な構造を消去することにより、元図形において複数に分断されていたスケルトンが 1 本に融合される。上記スケルトンの対応づけを行うことにより、元図形におけるスケルトンのうち、いずれのスケルトンが大局的な構造に対応しているかを判断することができる。

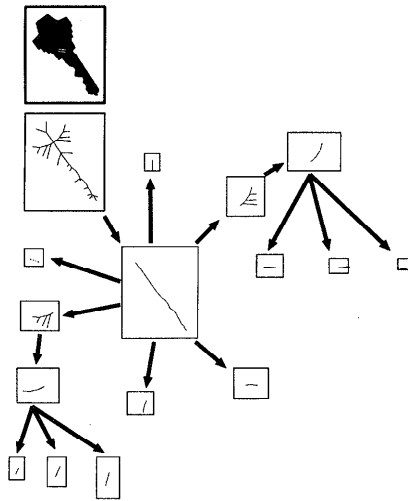


図 12 スケルトンの階層構造の表現例

Fig. 12 The hierarchical structure of skeletons.

複数の輪郭分割点が融合して消滅するときには、それら輪郭分割点を端点に持つセグメントは消滅する。たとえば、図 11 上に示したスケール空間上では、 $t=5$ におけるセグメント 4 の両端点の軌跡が融合している。この結果、 $t=5$ におけるセグメント 4 は消滅し、セグメント 4 に対応していたスケルトン 3 および 4 (図 11 下) が消滅したと判断できる。単独で輪郭分割点融合する場合と異なり、スケルトンの融合は起こらない。

3.4 構造の大きさとスケルトンの階層化

本稿では元図形より求めた各スケルトンに対応する構造の大きさを、それらスケルトンが消滅するスケールにより測る。元図形の複数のスケルトンが 1 本のスケルトンへと融合してから消滅した場合には、融合してできたスケルトンが消滅したスケールをもってそれらスケルトンに対応する構造の大きさと見なす。

元図形より抽出されたスケルトンを、対応する構造の大きさとスケルトン同士の接続関係を基にして木構造表現することを考える。ほかのスケールを次第に大きくしていくと、得られるスケルトンの本数が次第に減っていき、最終的には 1 本になる。この最後の 1 本のスケルトンに対応する元図形中のスケルトンを、木構造の根 (root) とする。そして互いに接しているスケルトン同士で対応する構造の大きさを比較し、最も大きなものを親、それ以外のスケルトンを子として木構造を作る。

図 12 に図 5 に示したスケルトンの木構造表現を示す。多重解像度スケルトン解析の結果、鍵の形の中央に沿った複数のスケルトンが 1 つの root として抽出

され、その下に細かな構造が配置されたことが分かる。

4. 分割

前章までで輪郭線図形のスケルトンを、それぞれのスケルトンに対応する構造の大きさを基に階層的に表現した。スケルトンの 1 本 1 本は、それぞれ図形中の凸状の構造に対応していた。スケルトンを 1 本ずつ切り離して考えることは、元図形を、それぞれのスケルトンが対応する構造ごとに分割して考えていることに相当する。

元図形を構造ごとに分割しやすくなることは、スケルトンによる形状表現の長所の 1 つである。本章において、スケルトンを用いた輪郭線図形の分割手法について述べる。さらに、多重解像度スケルトンの考え方を利用することにより、図形の分割結果を階層化する手法について説明する。

図形の分割手法は、これまでもいくつか提案されている^{7)~9)}。それら手法の多くは輪郭線の曲率が負の部分 2 カ所を探して組を作り、分割している。Kimia らは、そのような曲率が負の部分の組と、shock と呼ばれるスケルトン上における極大円の半径の分布の仕方との間の関係を示した¹⁰⁾。

本稿では分割されて得られる元図形の部分構造を、その大きさによって階層化する。そのために、前の章で述べた多重解像度スケルトンの考え方を利用する。多重解像度スケルトンを利用するためには、図形の分割がスケルトンに基づく分割である必要がある。そこで shock による分割も含め、スケルトンに直接基づく分割手法を用いる。以下、まず Kimia らが提案した shock による分割手法¹⁰⁾を説明する。この shock を用いると図形のくびれの部分を分割することができるが、図形の突出部を分割することができない。そこで次に、本稿により提案するスケルトンの連絡橋・半連絡橋を用いた分割手法を説明する。

4.1 スケルトンの二次の shock による分割

図形の二次の shock と呼ばれているスケルトン上の点に着目することにより、大きくくびれている部分により対象図形を分割することができる。

定義 4

二次の shock とは、スケルトンに沿って対応する極大円の半径を比較したときに、半径の大きさが極小となっているスケルトン上の点である (図 13)。

二次の shock を求め、その点に対応するスケルトン生成点 2 点を結ぶ線分により図形を分割することによりくびれの部分による分割ができる。しかし図形の突出部のような、図形にとって特徴的な部分を分割する

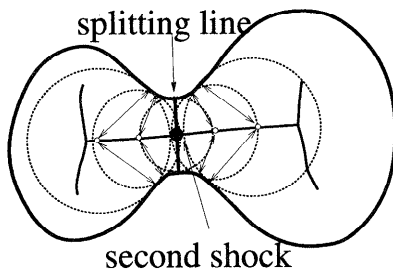


図 13 二次の shock

Fig. 13 The second shock.

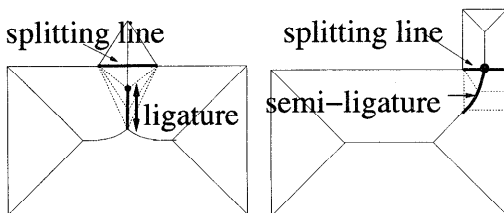


図 14 連絡橋と半連絡橋

Fig. 14 The ligature and the semi-ligature.

ことができない。そこで、本稿ではスケルトンの連絡橋・半連絡橋と呼ばれている部分でも分割することにする。

4.2 スケルトンの連絡橋・半連絡橋による分割

突出部を持つ図形のスケルトンには、突出部に対応して連絡橋もしくは半連絡橋と呼ばれる領域が存在する。

定義 5

連絡橋とは、スケルトン上の点のうち、スケルトン生成点が2点とも互いに同じであるような点の集合である（図 14 左）。

定義 6

半連絡橋とは、スケルトン上の点のうち、スケルトン生成点2点のうちの1点が互いに同じであるような点の集合である（図 14 右）。

ここで連絡橋・半連絡橋において、対応する極大円の半径が最小のスケルトン点を選択し、その点に対応するスケルトン生成点同士を結ぶ線分により図形を分割する。連絡橋、半連絡橋における分割線は図 14 のようになり、突出部が分割される。特に半連絡橋による分割は、輪郭線上で2つの凹状の点の組を探す必要のあった従来手法では実現できなかった分割である。

本章で述べた手法による図形の分割結果を図 15 に示す。突出部やくびれにより図形が分割されている。たとえば、象のシルエットの鼻や尻尾の部分は、半連絡橋による分割の例である。次に多重解像度に基づく図形分割の階層化手法について説明する。

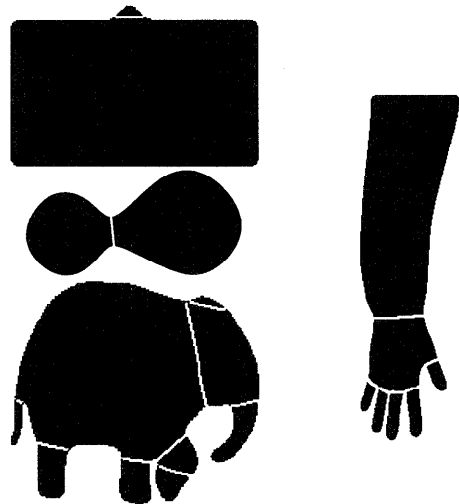


図 15 図形の分割結果

Fig. 15 Examples of the split figures.

4.3 分割線の階層化

3.1 節で述べた変換により、図形を様々なスケールで平滑化する。スケールパラメータ t を 0 から大きくするに従い、細かな構造から消えていく。各スケールにおいて図形の分割線を求めると、細かな構造への分割線は小さなスケールにおいて消滅し、大きな構造への分割線は大きなスケールまで存在し続ける。そこで分割線が消滅するスケールの大きさを各分割線の強度と見なす。

スケールが 0 より大きくなると、輪郭線の凹凸部がすべて滑らかな形状になるため厳密な意味での連絡橋は存在しなくなる。そこで実験では輪郭線に沿って測った距離に関する閾値 L_{th} を定め、 L_{th} より近くにあるスケルトン生成点を同一であると見なした。スケールの増大にともない曲率極大点が増えないことは保証されているが、分割線の挙動についてはなにも保証されていない。しかし実験では、ほとんどの図形においてスケールの増加にともない新たな分割線が生じることにはなかった。

分割線が消滅するスケールを求めるためには、異なるスケールにより求められた分割線同士の対応づけを行う必要がある。前節までに述べたとおり、各分割線はスケルトン上の点に対応している。ところで 3.3 節で述べた手法により、異なるスケールにおけるスケルトン同士の対応づけが行われる。分割線に対応するスケルトンをスケールの変化に対して追跡できるため、異なるスケールにおける分割線同士の対応づけも可能となる。

次に示す手順により、元図形の階層的な分割を行う。

- (1) 元図形をばかし、各スケールにおける分割線を求める。
- (2) 異なるスケールより求めた分割線同士の対応づけを行う。
- (3) 元図形より得られる分割線を、分割の強度が強い順に見ていく。
- (4) 前章において作ったスケルトンの木構造表現を参照し、
 - (a) 分割線に対応するスケルトンが、分割される図形中最上位のものであれば、分割を行う。親は分割される図形自身、子は分割した後の図形である。
 - (b) 分割線に対応するスケルトンが、分割される図形中の最上位のものではない場合、その分割線の次に強度の強い分割線が最上位にあるとき、もしくはその分割線が分割される図形中で最強のものである場合、その図形中にある分割線すべてで同時に分割する。この条件にあわないときには、図形は分割しない。

5. 実験結果

図 16 に 3 章で述べた手法による、多重解像度スケルトンの木構造表現を示す。腕に対応するスケルトンを root として、構造の大きさに関する階層表現となっていることが分かる。

図 16 に対応する図形の、スケールを変化させたときの分割線の変化を図 17 に示す。また図 18 に、上記手順により得られた分割結果の階層表現を示す。手首による分割と、手-指の分割との間に強度差を反映

した階層構造が得られている。

図 19 に別の例を示す。飛行機の前後を最も強い分割とし、それぞれがさらにいくつか分割されている。構造の大きさを反映して階層化されていることが分かる。

6. ま と め

多重解像度スケルトンにより、スケルトンを構造の大きさを基にして自動的に階層化する手法を提案した。さらに、階層化されたスケルトンを利用して、元図形



図 17 解像度を変化させたときの分割線の変化

Fig. 17 The change of the splitting line corresponding to the resolution change.

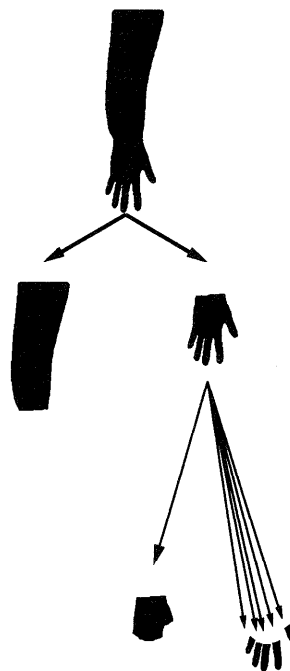


図 18 多重解像度スケルトンに基づく分割結果

Fig. 18 An example of experimental results. The hierarchical representation of the split figures.

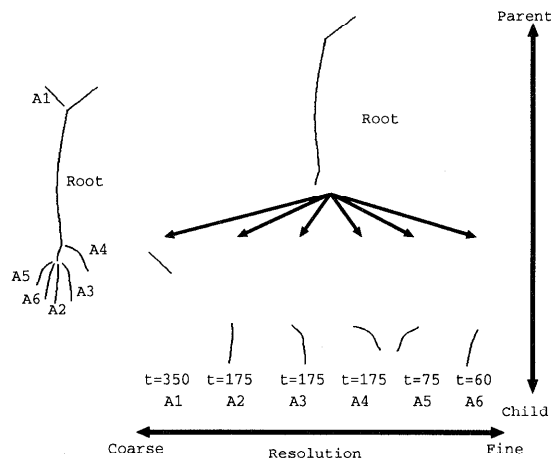


図 16 多重解像度スケルトンの木構造表現

Fig. 16 The hierarchical representation of the multi-resolution skeletons.

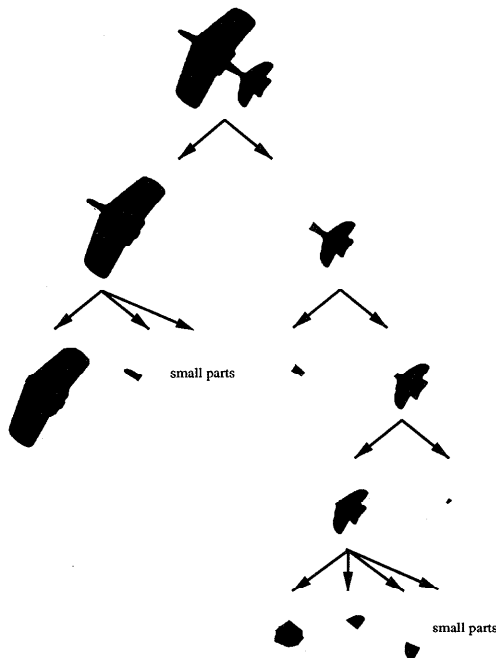


図 19 多重解像度スケルトンによる分割結果

Fig. 19 Another example of experimental results. The hierarchical representation of the split figures.

を階層的に分割する手法についても述べた。

自動的にスケルトンの多重解像度解析を行うためには、異なる解像度において抽出されたスケルトン同士の対応づけを行う必要がある。スケールスペースにおける輪郭線上の曲率極大点の軌跡を利用して、この対応づけを自動的に行う手法を提案し、実際に実験した。実験の結果、自動的にスケルトンの階層表現を得ることができた。また多重解像度スケルトンを利用して、図形を階層的に分割することができた。

スケールを増大させたときに本稿で用いた図形の分割線が新たに生じないことの保証はされていないが、多くの図形に対して実験したところ、新たに分割線が生じることはほとんどなかった。スケールに対する分割線の振舞いについては、さらに理論的に検証する必要がある。

参 考 文 献

- 1) Pizer, S., Oliver, W.R. and Bloomberg, S.H.: Hierarchical Shape Description Via the Multiresolution Symmetric Axis Transform, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.9, No.4, pp.505-511 (1987).
- 2) Kimmel, R., Shaked, D. and Kiryati, N.: Skeltonization via distance maps and level sets,

Computer Vision and Image Understanding, Vol.62, No.3, pp.382-391 (1995).

- 3) Gage, M. and Hamilton, R.S.: The Heat Equation Shrinking Convex Plane Curves, *J. Differential Geometry*, Vol.23, pp.69-96 (1986).
- 4) Grayson, M.A.: The Heat Equation Shrinks Embedded Plane Curves To Round Points, *J. Differential Geometry*, Vol.26, pp.285-314 (1987).
- 5) Sethian, J.A.: *Level Set Methods*, Cambridge (1996).
- 6) Mokhtarian, F. and Mackworth, A.K.: A Theory of Multiscale, Curvature-Based Shape Representation for Planar Curves, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.14, No.8, pp.789-805 (1992).
- 7) Hoffman, D.D. and Richards, W.A.: Parts of Recognition, *Cognition*, Vol.18, pp.65-96 (1985).
- 8) Hoffman, D.D.: Codon constraints on closed 2D shapes, *CVGIP*, Vol.31, pp.156-177 (1985).
- 9) Siddiqi, K. and Kimia, B.B.: Parts of Visual Form: Computational Aspects, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.17, No.3, pp.239-251 (1995).
- 10) Kimia, B.B., Tannenbaum, A.R. and Zucker, S.W.: Shapes, Shocks, and Deformations I: The Components of Two-Dimensional Shape and the Reaction-Diffusion Space, *International Journal of Computer Vision*, Vol.15, pp.189-224 (1995).

(平成 10 年 10 月 14 日受付)

(平成 11 年 4 月 1 日採録)

本谷 秀堅 (正会員)



1993 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。1996 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。

中尾 学 (正会員)



1997 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。同年富士通 (株) 入社、現在に至る。同社テクノロジ本部にてプロセッサの研究・開発に従事。



出口光一郎（正会員）

1976 年東京大学大学院計数工学専攻修士課程修了。同年より東京大学工学部助手。同大学講師を経て、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。1998 年東北大学大学院情報科学研究科教授，東京大学工学系研究科教授併任，現在に至る。この間，1991～1992 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）。
