

サーベイ：デジタル画像の距離変換とスケルトン

鳥 脇 純 一 郎
(豊橋技術科学大学)

横 井 茂 樹
(三重大学)

1. まえがき

デジタル画像処理において、距離変換，スケルトンは、基本的に重要なものであり，その理論面，応用面における意義は非常に多彩である。最近これらに関して色々な手法が提案されてきているが，これらの研究の起源は，連続画像に対する H. Blum の研究⁽¹⁾およびデジタル画像に対する A. Rosenfeld の研究⁽²⁾に遡ることができる。本文では，距離変換およびスケルトンに関する基本的な考え方を明らかにし，その発展や諸変形を，応用面や関連事項も含めて，系統的に整理する。なお，紙数の関係で本文では個々の事項の具体的な説明は割愛し，関連文献の指摘にとどめる。

2. 距離変換およびスケルトン

距離変換 (distance transformation-DT) およびスケルトン (skeleton-SKL) と考える場合には，まず，入力画像の濃度値は正または 0，また，図形 (figure- f) と地 (背景, background B) の区別があり，背景の濃度値は 0 であることを前提とする。

正值連続図形 $F = \{(x, y) \mid f(x, y) > 0, \forall (x, y)\}$ の DT $D = d(x, y)$ は，

$$d(x, y) = \min_{\alpha} \int_{\alpha} f(x, y) ds$$

で与えられる。但し，積分 \int_{α} は， (p, q) から (x, y) へ至る任意の経路 (path) で， $(p, q) \in B$ ，その他はすべて F 内にあるようなものによって濃度値の総和を意味し，最小化 (min) は，そのような path のすべてにあたって行われるとする。なお，通常，このよ

うな DT を求める操作も単に距離変換と呼ぶ。また，SKL は，DT の極大点の集合である。

デジタル画像に対しても同様であるが，path は適当な隣接関係にある画素の系列，積分は path 上の画素の濃度値の総和になる。

DT, SKL の次のような性質は，種々の応用の基本となる。

① 定義から明らかに，

$$d(x, y) = 0, \text{ for } \forall (x, y) \in B \\ > 0, \text{ for } \forall (x, y) \in F$$

② 2値画像 ($f(x, y) = 1$ or $0, \forall (x, y)$) においては， $d(x, y)$ は，点 (x, y) から (x, y) の属する図形の境界までの最短距離に等しい。

③ DT には狭義の極小点は存在しない。

④ 通常の素直な画像の場合，図形中央部ほど濃度値が高くなる。入力画像の中央部に既に尾根状の部分があれば，尾根線はより顕著になる。

⑤ 2値画像における SKL 上の距離値は，その近傍における入力画像の図形幅のほぼ半分に等しい。

⑥ 入力が2値デジタル画像の場合，SKL とその上の距離値，および，それと求めたときの DT の種類を知れば，原図形は正確に復元できる (復元定理)

⑦ 基本的 (4近傍型，8近傍型) DT の SKL は，その中に内部点を含まないという意味で，ほぼ線状，または点状図形になる。但し，原図形の位相幾何学的性質を保存するとは限らない。

図1に DT, SKL の一例を示す。

3. 連続画像上での距離変換, スケルトン

距離変換，スケルトンの概念は H. Blum (1963) の提案に始まる⁽¹⁾。彼は網膜上での刺激の伝播の生理的モデル

としてこれを提案した。すなわち、網膜上に、あるパターンが提示されたとき、その輪郭部分の細胞が興奮し、これが次の時刻にその周囲の細胞に興奮を伝え、次第に内部の細胞に伝わっていくというモデルである。Blum は距離変換よりもスケルトンに注目し(距離値のついたスケルトンを MAF (medial axis function*) と呼んでいる)、文献(1-2)で統一した解析を行なった。そこで次の2つの幾何学的モデルを示し、両者のモデルが等価であることを示した。(図1)

①. 波の伝播モデル及び草原に火が燃え広がる過程のモデル

②. 内接する円盤(disk)のモデル

なお、①のモデルでは、一たん波の通ったあと再び波が伝播しようが、Blum は一度通ったあとはもう伝播しないという仮定をおいている。(図2)

続いていくつかの研究がなされた。まず、Calabi はパターン外部にできるスケルトンについて数学的解析を行なった(1-4)。Moore らは Blum の距離変換に対し、これらの基本となる metric point pattern function (MPPF) を考え、それを用いて MAF の性質を解析した(1-6)。Philbrick は最初に MAF の具体的応用を試み、計算機での実行手順を考え、具体的にパターンの記述に有用であることを示した(1-3)。さらに、最近、画面内の複数個の図形に対して、各図形の勢力圏の境界という形で⁽²⁻¹⁾の SKL \rightarrow (外部 SKL - exo skeleton) を Lantuejoul が提案し、その詳しい解析を行なっている。⁽²⁻¹⁾
(注 Calabi らが図形外部にできるスケルトンを解析したがそのアプローチとは異なる) Montanari らは境界が凸角形で与えられる図形の連続スケルトン

の抽出(計算)方法を示し(1-5)、Bookstein はより広いクラスの図形でこれを行なった(1-7)。

以上のように種々の研究があるが、これらは原理的な考察に重点があり、実際の応用は、次に述べるデジタル画像の DT, SKL が圧倒的に多い。

4. デジタル画像の距離変換とスケルトン

(1) 基礎概念とモデル デジタル2値画像の DT, SKL の基本型(4凸傍型, 8近傍型)は、Rosenfeld らによる(2-1)原画像復元定理の証明もここで与えられ、デジタル平面上の距離関数自体の検討を経て、六角形(hexagonal), 八角形(octagonal)距離変換も導かれた。^{(2-2), (2-4)}

この後、Hilditch らがスケルトン間に与えうるグラフ構造を示し⁽³⁻³⁾、また Mott-Smith は上記距離変換、スケルトンの一般的扱いと、数学的に厳密な解析を行ない、諸性質を明らかにした。⁽³⁻⁶⁾

デジタル画像の場合の DT のモデルも、デジタル平面上での①波の伝播、および、②図形に内接する円盤(実際には正方形、または、菱形等)、が基本であるが、後に、③基本図形によるべき級数型の展開⁽⁵⁻⁴⁾④図形方程式の解と反復的求解手順⁽¹⁰⁻⁶⁾⑤局所最小値フィルタのべき級数型表現⁽¹⁰⁻⁶⁾、という定式化が、筆者らによって示された。

(2) 濃淡画像への拡張 Montanari's⁽⁴⁻¹⁾(1970)は、上記モデルにおける波の伝播速度と濃度値の増加と共に遅くするというモデルを提案し、重み付き距離変換、スケルトン(Grey weighted DT, SKL-GWDT, GWSKL)と呼んだ。鹿野ら(1972)⁽⁴⁻²⁾も独立に同様の提案を行い、これと波の伝播方向と組合せた細線化法(Wave Propagation 法)を導いた。著者らは、GWDT と画像の濃度値構造との関係と、GWDT とその逆変換の反復適用を通して明らかにし、逆変換の反復

* なお、距離変換、スケルトンに関する用語は J.C. Mott-Smith が文献(3-6)でその整理を行なっている。

による濃淡画像生成のメカニズムを解明した⁽⁴⁻³⁾。また、図形方程式の解としてのGWDTのモデル化は著者らにより⁽¹⁰⁻⁶⁾、一方、Ahujaらは、濃度値一定の領域の丹盤近似による記述 (SPAN) を提案した⁽⁴⁻⁴⁾。なお、原画像復元は、GWSKLのみからはできない。(図4)

(3) 2値画像の一般化距離変換 上記②の内接基本図形モデルと演算子表現における近傍の形状と結びつけた可変近傍DT, さらに近傍の包含関係に関して単調な近傍系列による一般化DTとそれらに対応するSKLが著者らによって提案され、原図形復元定理も示された⁽⁵⁻¹⁾⁽⁵⁻²⁾。これらは、波の伝播モデルで言えば時刻によって波の伝播特性(媒質の定数)が変化する場合、内接図形のモデルで言えば多種類の内接図形の併用に相当する。これより以前に提案されたOBT, 方向性DT(波の伝播が特定の一方方向のみの場合)もこの枠組の特殊なケースとして位置づけられる。八角形DTの性質は(3-9)で検討された。

(4) 擬似ユークリッド距離変換 Montanariらはユークリッド距離に近い距離として擬似ユークリッド距離(Quasi Euclidean Distance)を提案している。これは、図6のように、斜めの方向に $\sqrt{2}$, あるいは $\sqrt{5}$ の距離を考える, 等により, 近傍を大きくとればとるほどユークリッド距離に近づくという性質をもたせることができるものであり, スケルトンも定義され, 原画像復元性も証明されている⁽⁶⁻¹⁾。(図6)

(5) 線図形距離変換 上記(3), (4)は2値塊状図形の解析を目的とするのに対し, 線図形の解析用に, 線図形距離変換(DTLP)が提案されている⁽⁷⁻¹⁾。すなわち, 波は線図形の端点(それ以外の場合もありうる)を出発点とし, 線図形上のみを伝播するという考え方である。これには, 伝播方式により異なる型が存在する(図7)。また,

最近になって, 波の伝播の線図形上の情報の伝播を制御するという新しい考え方も提案されている⁽⁷⁻²⁾。

(6) 外部スケルトン デジタル外部スケルトンの厳密な定義と解析は間瀬らによる⁽²⁻³⁾。応用については5-③を参照。

(7) アルゴリズム DTを求めるアルゴリズムには, 逐次型と並列型がある。並列型は, 上記各種DTを定義した報告には必ず示されている。一方, 逐次型はやや工夫を要し, 基本形は(3-1), GWDTは(4-1), (4-2), 可変近傍DTは(5-3), 八角形DTは(3-9), DTLPは(7-5)にそれぞれ示されている。逐次型は, 基本型では非常に有利, 垂直な濃淡画像ではおおよそ有利, DTLPでもやや有利であるが, その他の場合には対象による。一般化DTの逐次型は未開発である。

5. 応用

(1) 画像圧縮 Pfaltz⁽⁹⁻¹⁾, Mott-Smith⁽⁹⁻²⁾はスケルトンのもつ画像再現性を利用して画像圧縮を試みたが, スケルトンの点の個数が多い, 輪郭線方式はランレングス方式の方がむしろ良い結果を与えるということである。これに対しては, 最近, 著者らの提案した一般化距離変換⁽⁶⁻¹⁾により, もっとスケルトン点の個数を減少させるものが存在することが知られ, その面の検討が期待される。また, 原画像の完全な再現をしないならば, Philbrickの応用⁽¹⁻³⁾は画像の近似として, 比較的良い結果を得たといえる。

(2) 2値画像の整形・特徴抽出 SKLの抽出, 一変形, 逆変換の過程で2値画像変形を行う。Rosenfeldらは画像の「細長い部分」, 「密集した部分」の抽出, 2値画像のスレーピング等を行なった^{(3-1), (3-2)}。

具体的な形での応用例には, 罫×線

像処理における骨軸の抽出，腸陰影の除去（擬似ユークリッド距離変換利用）⁽⁹⁻⁶⁾，胸部X線像に対する肋骨像の抽出（8角形距離変換を利用）⁽⁹⁻⁹⁾等の例もある。（図9）文字認識において文字の特徴抽出に利用したものいくつか報告されている^(9-8,9-9)。

細線化への応用としてはGWDTによるWPM，一般化DTによる方法，GWSKL自身の利用⁽⁹⁻¹⁸⁾などがある。また，DT，またはGWDTは細線化の前処理としてしばしば有効である。

(3) 粒子状画像の解析 粒子状画像に対して距離変換を施し，そのスケルトンを抽出すると，重なりのある粒子の中心が抽出でき，粒子の半径の推定が可能であるという原理に基づく⁽⁹⁻¹⁰⁾⁽⁹⁻¹¹⁾。

この方法で，ホルモン分泌顆粒像の処理⁽⁹⁻¹²⁾（図10），血球像の処理⁽⁹⁻¹³⁾，卵巣子宮腺ガン集塊像の処理⁽⁹⁻¹⁴⁾等が報告されている。一方，外部スケルトンの応用として肝臓微細像の処理への適用例もある^{(2-2),(2-4)}（図3）。

(4) 画像の構造解析 DTLPを用いて線図形の構造解析を行なった報告がある⁽⁹⁻⁴⁾。更に，棟上らは，並列処理機構を用いて，距離変換を利用した最短経路の合成について述べている⁽³⁻⁴⁾。

(5) その他の応用 方向性距離変換はある種の構造的Textureのエッジ検出に応用された⁽⁹⁻⁷⁾。スケルトンからの逆変換（原画像を得る）を利用して，習字画像形の発生に応用して良好な結果を得た報告がある⁽⁹⁻¹⁹⁾。また，3次元SKLによる3次元物体の球表現と，3次元物体表示に応用した例も興味深い⁽⁸⁻⁴⁾（図8）。

6. 関連事項

距離変換，スケルトンに関連したいくつかの事項について触れておく。

(1) 細線化 デジタル画像のSKLは原図形の連結性を保存するという保証がないため，そのままでは細線化には使い難い。いわゆる細線化法については文献⁽¹⁰⁻¹⁾にゆずる。

濃淡画像の細線化はまだ決め手がないため，GWSKLも一定の意義をもつ（之取⁽¹⁰⁻²⁾）。

(2) 収縮と膨張 距離変換，スケルトン抽出が画像演算の基本となる収縮（erosion）と膨張（dilatation）を用いて行なえることはRosenfeldによって示されている⁽³⁻¹⁾が，その他，Serraらは収縮と膨張に関するさらに詳しい解析を行い^{(10-3),(10-4)}，それらを実際に利用可能な解析システム（Leitz T.A.S.）に応用している⁽¹⁰⁻⁵⁾。

(3) その他 著者らは，距離変換，スケルトン抽出について，画像演算の代数学理論を用いて厳密な解析が行えることを明らかにした⁽¹⁰⁻⁶⁾。また，Persoonらは，一筆書き状の線図形について，輪郭線のFourier Descriptorと中心線（スケルトン）との関係を明らかにしている⁽¹⁰⁻⁷⁾。3次元デジタル画像の距離変換も考察されている^(8-1~8-4)。

7. まとめ

本文ではデジタル画像の距離変換，スケルトンに関する研究を整理し，概観した。ここで与えた整理が，さらに新しい手法の開発あるいは新しい応用の開発へのきっかけとなることを期待する。

謝辞

日頃適切な御助言，御討論を頂く，名古屋大学本多沼雄教授，福村晃夫教授，三重大学三宅康二教授並みに，名古屋大学，三重大学の研究室の諸氏に感謝します。

文献

1. 連続画像距離変換, スケルトン

- (1-1) H. Blum: "Biological shape and visual science (Part I)", J. Theory Biol. 38 pp.205-285 (1963)
- (1-2) H. Blum: "A transformation for extracting new descriptors of shape", in Models for the Perception of Speech and Visual Form (W. Wathern-Dunn, ed.), Cambridge. Mass. M.I.T. Press. pp.362-380 (1967)
- (1-3) O. Philbrick: "Shape description with the medial axis transformation", in Pictorial Pattern Recognition, (G. C. Cheng et. al. Eds.), Washington, DC: Thompson Book Co., pp.395-407 (1968)
- (1-4) L. Calabi and W. E. Hartnett: "Shape recognition, prairie fires, convex deficiency and skeletons", Am. Math. Month., 75, pp.335-342 (1968)
- (1-5) U. Montanari: "Continuous skeletons from digitized images", J. ACM, 16, 4, pp.534-549 (1969-10)
- (1-6) D. J. H. Moore and R. A. Seidel: "On the medial axis function for visual patterns", IEEE Trans. SMC, SMC-4 pp.396-399 (1974-07)
- (1-7) F. L. Bookstein: "The line-skeleton", Computer Graphics and Image Processing 11, pp.123-137 (1979)

2. 外部スケルトン

- (2-1) C. Lantuejoul: "La squelttisation et son application aux mesures topologiques des mosaïques polycristallines", ph. D. Thesis, Local Nationale Superieure des Mines de Paris (1978-06)
- (2-2) K. Preston Jr., M. J. B. Duff, S. Levialdi. N. Norgen and J. Toriwaki: "Basis of cellular logic with some applications in medical image processing", Proc. IEEE, 67, 5, pp.826-856 (1979-05)
- (2-3) 同: 類似: 信学会パターン認識と学習研究会 発表予定
- (2-4) K. Preston Jr. and A. Dekker "Differentiation of cells in abnormal human liver tissue by computer image processing: A preliminary investigation into its potential application to diagnostic microscopy", Analytical and quantitative cytology, (1980-05)

3. デジタル画像の4近傍型, 8近傍型, 8角形距離変換, 方向性距離変換

- (3-1) A. Rosenfeld and J. L. Pfaltz: "Sequential operations in digital picture processing", J. ACM, 13, 4, pp.471-494 (1967-04)
- (3-2) A. Rosenfeld and J. L. Pfaltz: "Distance function on digitized pictures", Pattern Recognition, 1, pp.33-61 (1968)
- (3-3) J. Hilditch: "An application of graph theory in pattern recognition", in (D. Michie ed.) Machine Intelligence, 3, Edinburgh: Edinburgh U. Press, pp.325-347 (1968)
- (3-4) 村上昭男: "高度並列演算装置による図形の記述 (V) - 距離関数と最短経路の合成 -", 電算機, 32, 9, pp.930-941 (1968)

- (3-6) J. C. Mott-Smith: "Medial axis transformation" in Picture Processing and Psychopictorics (B. S. Lipkin and A. Rosenfeld, eds.), Academic Press New York, pp.267-283 (1970)

- (3-7) 横井, 島脇, 福村: "二値図形における方向性 Distance 変換および Texture Edge の検出への応用", 昭48 電子通信学会全国大会, No.1268 (1973)

- (3-8) A. Rosenfeld and A. C. Kak: Digital Picture Processing, Academic Press, New York (1976)

- (3-9) 伴, 横井, 島脇, 福村: "8角形距離による距離変換の性質とその胸部X線写真処理への応用", 信学論(D), J63-D, 4, pp.311-318 (1980)

4. 濃淡画像距離変換

- (4-1) G. Levi and U. Montanari: A grey-weighted skeletons", Information and Control, 17, pp.62-91 (1970)

- (4-2) 鹿野, 島脇, 福村: "濃淡図形を線図形に変換する方法 - Wave Propagation Method について -", 信学論(D), J60-D, 2, pp.668-675 (1972-10)

- (4-3) 島脇, 成瀬, 福村: "濃淡画像の重みつき距離変換の基礎的性質", 信学論(D), J60-D, 2, pp.1101-1108 (1977-10)

- (4-4) N. Ahuja, L. S. Davis, D. L. Milgram and A. Rosenfeld; "Piecewise approximation of pictures using maximal neighborhoods" IEEE Trans. Comput. C-27, 4 pp.375-379 (1978-04)

5. 2値画像一般化距離変換

- (5-1) 横井, 島脇, 福村: "可変近傍系列を用いた2値図形距離変換と図形融合演算", 信学論(D), J63-5, pp.384-393 (1980-05)

- (5-2) 若山: "最大近傍形移動法による骨格線追跡", 信学会パターン認識と学習研資, PRL 78-87 (1979-03)

- (5-3) 間瀬, 島脇, 福村, 横井: "一般化距離変換の逐次型アルゴリズムとその性質", 信学会パターン認識と学習研資 PRL 79-40, (1979-10)

- (5-4) 横井, 島脇, 福村: "2値画像の一般化距離変換について", 信学会パターン認識と学習研資 PRL 79-97 (1980-03)

6. 擬似エウクリッド距離変換

- (6-1) U. Montanari: "A method for obtaining skeletons, using a quasi-Euclidian distance", J. ACM, 15, pp.600-624 (October 1968)

7. 線図形距離変換

- (7-1) J. Toriwaki, N. Kato and T. Fukumura: "Parallel local operations for a new distance transformation of a line pattern and their applications", IEEE Trans. syst., Man., Cybern., SMC-9, 10, pp.628-643 (1979-10)

- (7-2) 島脇, 田中, 福村: "一般化線図形距離変換について", 信学会昭54年部門別全国大会論文集 P.111 (1979-10)

- (7-3) 田中, 島脇, 福村: "距離変換に基づく線図形の構造解析", 信学会パターン認識と学習研資 PRL 79-9 (1979-05)

- (7-4) 田中, 島脇, 福村: "線図形の距離変換に於てく
ループ構造の解析", 信学会昭55年秋全国大会
論文集 P.5-281 (1980-03)
- (7-5) 阿部, 鈴木: "線図形距離変換と閉式化と拡張に
ついて", 信学会昭55年秋全国大会論文集 P.5-280 (1980-03)

8. 3次元画像距離変換

- (8-1) H. Blum: (1-1)と同じ
- (8-2) J. C. Mott-Smith: (3-6)と同じ
- (8-3) 横井, 島脇, 福村: "3次元デジタル画像データの距離
変換", 信学会パ7-認識と学習研資, PRL79-10 (1979-05)
- (8-4) J. O'Rourke and N. Badler: "Decompo-
sition of three-dimensional objects
into spheres", IEEE Trans. Pattern
Analysis and Machine Intelligence,
PAMI-1, 3, pp.295-305 (1979-07)

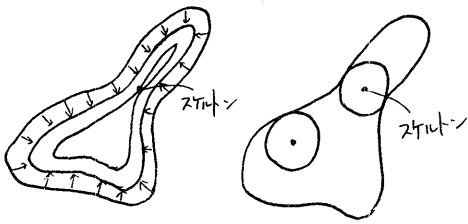
9. 応用

- (9-1) J. L. Pfaltz and A. Rosenfeld: "Computer
representation of planar
regions by their skeletons", C. ACM,
10, pp.119-125 (1967)
- (9-2) J. C. Mott-Smith and T. C. Baer:
"Area and volume coding of pictures",
in (T. S. Huang and O. J. Tretiak
eds.) Picture Bandwidth Compression,
pp.451-486 (1972)
- (9-3) O. Philbrick: (1-3)
- (9-4) A. Rosenfeld (3-1)
- (9-5) A. Rosenfeld (3-2)
- (9-6) 福島, 宇都宮, 相馬: "X線像の辺抽出", 医用
電子と生体工学, 10, 3 pp.40-47 (1978)
- (9-7) 伴他: (3-9)と同じ
- (9-8) 岡部, 吉村, 三宅, 市川: "拡張距離関数と線形
フィルタによる点画と文字の特徴抽出", 信学論(D), 131-D
12, pp.858-865 (1976-12)
- (9-9) 石井, 岩崎: "回路図に書かれた文字の認識の検討",
信学会パ7-認識と学習研資, PRL79-83 (1980-01)
- (9-10) 杉本, 上原: "パターン認識(写真認識)の研究状
況", Fujitsu, 24, 9, pp.191-208 (1973)
- (9-11) K. Baba and T. Okayama: "A study on the
computerization of quantitative electron
microscopy-application of the distance
function to ribosome count", in E.
Yamada et al. (eds.) Recent Progress
in Electron Microscopy of Cells and
Tissues, p.305, Igakushoin Tokyo
(1976)
- (9-12) 大槻, 島脇, 福村: "Texture識別と生体組織
顕微鏡画像の自動分析", 信学論(D), 161-D, 2
pp.135-142 (1979-02)
- (9-13) 鈴木, 橋詰, 横内, 堀内, 山本: "血液像自動分析装置の
開発(Ⅱ)赤血球形態の自動分析", 昭54年信学会
総合全国大会, 1370 (1979-03)
- (9-14) 天神, 尾上, 久野: "細胞診自動化に於ける子宮腺
癌細胞形態の特徴抽出法", 医用電子と生体工学
17, 6, pp.440-447 (1979-10)
- (9-15) 田中他: (7-1)と同じ
- (9-16) 横上: (3-4)と同じ
- (9-17) 横井他: (3-7)と同じ
- (9-18) 東保, 今垣, 田中, 栗原: "冠動脈造影像の画像処理と
血管内径の測定", 第9回日本信学会 2-D-14 (1980-05)

- (9-19) 木田, 保坂, 富永: "漢字図形の発生方式",
昭知53信学会総合全国大会論文集, P.5-139 (1978-03)
- (9-20) J. O'Rourke他: (8-4)と同じ

10. 関連事項

- (10-1) 田村有行: "図形の細線化についての比較研究",
情報処理学会イメージロベッシング研資, 1-1, (1975-06)
- (10-2) 成瀬, 島脇, 福村: "濃淡画像の細線化法の比較
研究", 信学論(D), 160-D, 12, pp.1093-1100 (1977-12)
- (10-3) J. Serra: Theoretical basis of the LEITZ
Texture Analysis System", Scientific and
Technical Information, Suppl. I, 4, pp.125-
136 Wetzlar (1974-4)
- (10-4) G. Matheron: "Random sets and integral
geometry", John Wiley & Sons, New York,
Chapter 1 (1975)
- (10-5) M. Muller: "The Leitz Texture Analyser
System (LEITZ-T. A. S.), Scientific and
Technical Information, Suppl. I, 4, pp.
101-116 Wetzlar (1974-04)
- (10-6) 横井, 島脇, 福村: "濃淡図形処理における図形
融合, 距離変換およびスケルトンの諸性質",
信学論(D), 161-D, 9, pp.613-620 (1978-09)
- (10-7) E. Person and K. S. Fu: "Shape
discrimination using fourier descriptors",
IEEE Trans. Systems, Man, Cybern. SMC-7,
3 pp.170-179, (1977-03)



(a) 波の伝播モデル
外から波が伝播し
内部に伝わる。
波面がぶつかる点
がスケルトン

(b) 内接円盤のモデル
各点で図形に内接
する円盤 (disk) を考
える。その半径が距離
値になる。とくに、円盤
が2点以上で境界と接す
る場合、その点のスケルトン
である。

図1. Blum による波の伝播モデルと
内接円盤のモデル (1-1, 1-2)

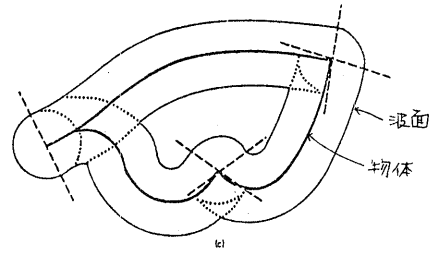
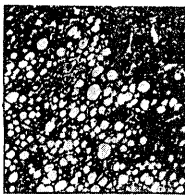
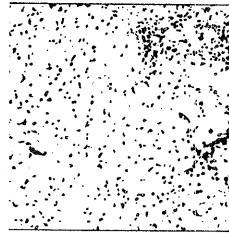


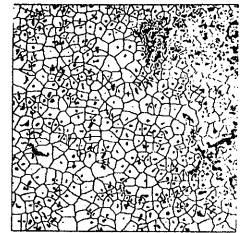
図2. Blum による波の伝播モデルの図解
通常の波の伝播モデルでは、破線も
含めたものが波面になるが、一度波
が通った後は波がもう一度伝播するこ
とはないというモデルでは実線のみが
波面になる。(1-1)



(a) 入力画像 (human fatty liver tissue)



(b) 入力画像に区切り値処理
したビット列の図形に
したもの



(c) (b) の外部スケルトン

図3. 外部スケルトンの抽出 (2-2)



(a) 入力画像
(深色体写真)

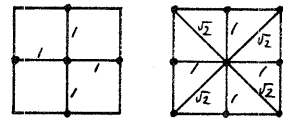


(b) (a) の Grey
Weighted skeleton
(4-1)

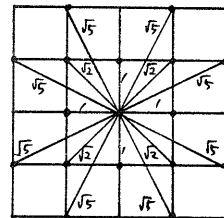


(c) WPM(4,2) により
抽出した
線図形

図4. 深色体写真からの濃淡画像距離変換
を利用した線抽出方法の比較

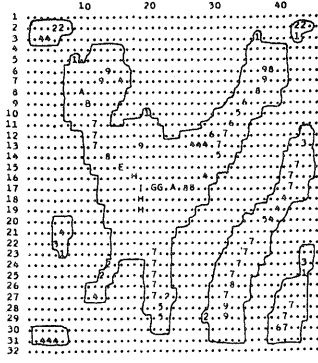
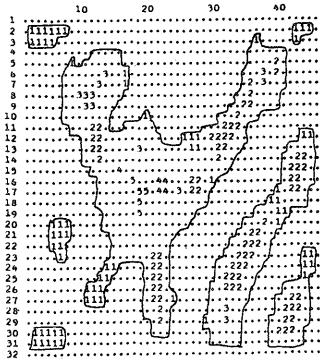


(a) 方法0の近傍 (b) 方法1の近傍



(c) 方法2の近傍

図6. Quasi-Euclid (擬似ユークリッド) 距離変換
に用いられた近傍とバリエーション (6-1)
($\sqrt{2}$, $\sqrt{5}$ 等) が用いられた近傍を本稿で検討する



(a) 8丘傍型距離変換に53
スケルトン画像 (スケルトン=169点)

(b) 一般化DTの一種の4サイクルDT
に53スケルトン画像 (スケルトン
=85点)

図5 一般化距離変換によるスケルトン抽出例 (太線が原図形) (5-3)
スケルトン点の数は (b)が少い (画面 32x45, 1像素531点)

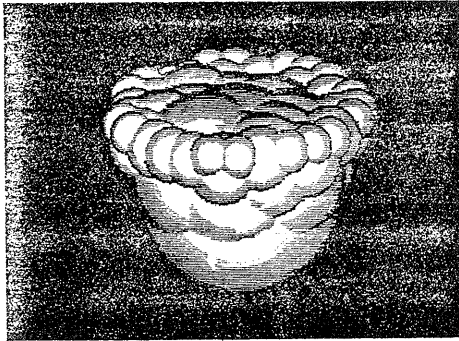
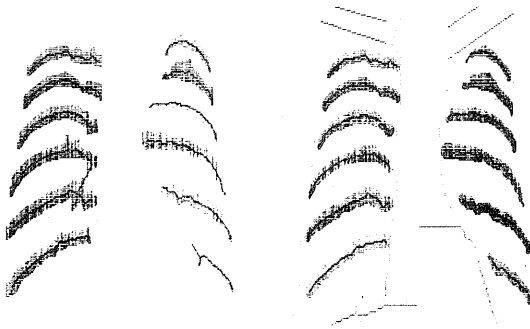


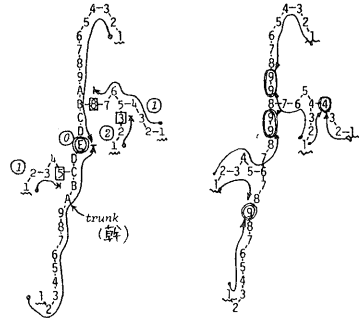
図8. 3次元スケルトンを利用したCupの球
による分解のラスタディスプレイの例
(O'Rourke 他 (8-4))



(a) 胸部X線像から抽出
された肋骨像の推定
のための粗パターンと
細線化の結果

(b) (a)の心線図形にエッジ
連結した肋骨像の分離、
枝の除去操作を施し、残
り点のみから逆変換操作 (逆DT)
により得られた肋骨像

図9. ODTを利用した肋骨像修正 (併ら (3-9))



(a) タイプI DTLP (b) タイプII DTLP

図7. 線図形距離変換を用いた
特徴点と構造要素抽出例
(Toriwaki 他 (9-1))

ゴシック文字: 幹とループ群

□ : 不連続点

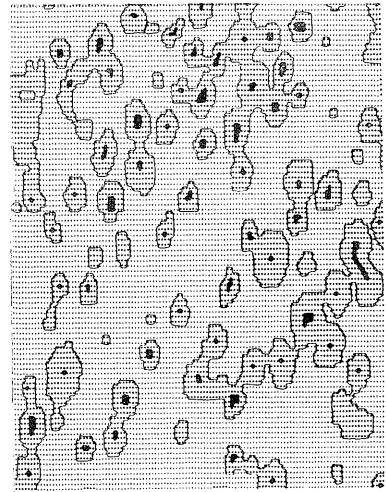
◎ : 粗大点

→ : パス

~ : 端点

○ : ループ

① : 枝のVベリ



鮮明顆粒; 中心部に黒い印が入った
不鮮明顆粒; 単に曲線ごうんごにのり

図10 距離変換, スケルトンを利用した
粒状画像解析例
トレン分粒顆粒画像を2値化し、
そのスケルトンを抽出。スケルトンから
粒子の中心部分を表現している。

(大槻ら (9-11))