

## 3次元デジタル図形分割と その心室自動分離への応用

岡田 稔      横井 茂樹      鳥脇 純一郎

名古屋大学 工学部 情報工学科

あらまし      情報を豊富に持つ濃淡デジタル画像を対象とする領域分割に対して、1-画素の連結性が画像特徴の手がかりとなるような2値デジタル画像を対象とする領域分割(図形分割)では、利用できる情報が少ないため良い図形分割手法の構成はむしろ難しい。本文では図形の距離特徴に注目した図形分割の一手法としてd-図形分割を考案した。本方法は、図形を脆性を有する剛体と見なしたときに「割れやすいところで割る」という物理的イメージに対応した分割を実現するものである。本稿では、d-図形分割の定義を示すとともに、デジタル空間でそれを実現するアルゴリズムを与える。本方法の応用例として、3次元空間で実現したd-図形分割を胸部MRI画像から抽出された心臓内腔図形に適用して左心系、右心系の分離が良好に行われることを示す。

Three-Dimensional Digital Figure  
Decomposition and Its Application to  
Cardiac Chambers Segmentation.

Minoru Okada , Shigeki Yokoi , Jun-ichiro Toriwaki

Dept. of Information Engineering, School of Engineering, Nagoya University.

Furo-cho, Chigusa-ku, Nagoya, 464-01 JAPAN

**Abstract** In this paper we propose a procedure to decompose a figure into significant part-figures in a natural way. The proposed procedure called d-figure decomposition is based on the idea that a figure is naturally separated at the portion of its bottleneck. We present an algorithm to perform the decomposition, which consists of iterative shrinking and labeling procedures. We applied this method to segmentation of a 3-dimensional chest MRI image. The endocardium figure extracted from chest MRI image was processed by this algorithm to separate the left cardiac chambers from right cardiac chambers.

## 1. はじめに

デジタル画像処理の基本技法として、領域分割手法<sup>(1)(2)</sup>がある。一般に領域分割とは、濃淡デジタル画像を、ある特徴量に注目して特徴量の似ている近傍を連結することにより画像全体を複数の互いに背反な領域に分割することをいう。その注目する特徴量によって、濃度値の絶対値に注目した単純しきい値処理をはじめ、連結画素の濃度値との差や小領域の濃度値ヒストグラムの類似性を用いるもの、テクスチャ特徴に注目するものなど、多くの方法が提案されている。濃淡デジタル画像での領域分割では、このように個々の画素の濃度値そのものに情報が多く含まれており、利用される特徴量も低次のものから高次のものまで様々な情報が幅広く使用されうるものである。

一方、2値のデジタル画像に対する領域分割(対象が画像全領域ではなく、注目図形であることから、本稿では図形分割という)は、連結成分処理の一手法として重要である。2値デジタル画像では、無論、濃度値に関する情報は皆無である。それゆえ、画像に含まれる1画素の連結状態あるいは全体的な形のみが特徴量となりうるため、図形形状特徴を良く反映した図形分割手法の開発を必要としている。

我々はすでに、3次元2値図形の図形分割を行う場合に、図形の持つ距離情報<sup>(3)</sup>を用いることによって有用な分割<sup>(4)</sup>を行うことができることを示している。この方法によると、対象図形を脆性(ぜいせい)を有する剛体とみなしたときに、「割れやすいところで割る」という物理イメージに基づいた図形分割を実現することが可能である。

本稿では、このような性質を持つ、任意次元デジタル空間における距離特徴を利用した図形分割(以下、デジタルd-図形分割)の定義を与える。また、デジタルd-図形分割を行うアルゴリズムを示し、計算機による実験の結果を示す。最後に応用例として胸部MRI画像から抽出された3次元心内腔を表す2値図形に対してデジタル図形分割を適用することにより、良好な心室の自動分離が実現されることを示す。

これまで2値図形の図形分割を行う手法と

して、T.Pavlidis<sup>(5)</sup>、H.F.Fengら<sup>(6)</sup>、D.Avisら<sup>(7)</sup>による多角形分割法、L.Ferarri<sup>(8)</sup>による最小長方形分割が報告されているが、これらは分割した結果がある制約条件を満たすようにつくられているが、原図形の形状が分割図形に対して積極的に反映された図形分割とは必ずしもなっていない。さらに、下島ら<sup>(9)</sup>による外接長方形を用いた長方形分割、C.Arcelliら<sup>(10)</sup>による骨格を用いた図形分割、C.Guerraら<sup>(11)</sup>によるグラフ理論的アプローチを用いた多角形分割、L.Vanderheydtら<sup>(12)</sup>によるファジィ理論を応用した図形分割が報告されている。いずれも意味のある部分図形に分割されるところが興味深い。筆者らの距離特徴に基づくd-図形分割は、図形形状特徴を積極的に反映させる2値画像分割の一手法として有用なものであると考えられる。

## 2. d-図形分割

### 2-1 d-図形分割の概念

d-図形分割の必要性は、筆者らのグループの研究における以下のような応用例から生じてきたものである。

(1) 3次元胸部MRI-C T画像から、心内膜輪郭を画像処理手法を用いて抽出すると、心臓の4室が接合した状態となり、それらを分離する必要があった。<sup>(4)</sup>

(2) X線C Tに基づく股関節手術計画支援システム<sup>(13)</sup>において、接合した状態で抽出された骨盤と大腿骨を分離する必要があった。

これらは、いずれも本来複数の図形成分として抽出されることを期待されていたにも関わらず、前処理の能力の不備のため接合してしまっただけのものである。特に、トポロジカルな特徴を無視して濃淡画像から図形を抽出する場合に起こりやすいものであるが、処理コストなどの問題から、濃淡画像の処理の段階ではトポロジカルな特徴まで考慮はしないことが多い。こうした背景から、良い図形分割手法が要求された。

そこで、d-図形分割を考えるに際して次の事柄を前提とした。

(1) 濃度値情報を失った図形に対して、その図形が持つ形状特徴のみから分割を行う。

(2) デジタル図形に直接適用できる。対象

図形の形状には特に制限をつけない。

(3) 2次元および3次元のいずれにも適用できる。

(4) 可能ならば、普通のデジタル画像処理でよく用いられる局所処理を余り逸脱しない範囲の処理で実現する。

さて、図形を分割する際に、図形を脆性を持つ一様な剛体(以下、単に剛体という)とみなすのは、良い対応を持つアナロジーの一例であると考えられる。このような剛体を割れやすいところで割る(図1)、というイメージで図形分割を考えるとき、対象図形のくびれた部分で分割するという方針は一つの自然な基準となるであろう。そこで、図形の距離変換<sup>(3)</sup>した画像において距離値画像の谷線および鞍部を考えると、このようなくびれた部分に対応すると考えられる。本稿ではこのような考え方に基づく分割を与える具体的な手順(d-図形分割と呼ぶ)を与えることにする。

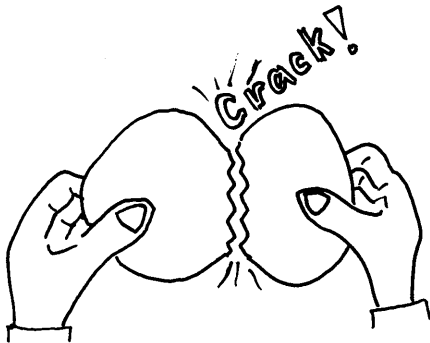


図1 d-図形分割の概念  
Fig.1 An idea of d-figure decomposition.

## 2-2 デジタルd-図形分割の定義

ここでは、デジタル空間におけるd-図形分割のための基礎となる諸定義を与える。

d-図形分割では距離が重要な意味を持つもの、画素間の距離を与える距離関数の選択はd-図形分割の本質に影響を与えるものではない。ここではデジタル画像処理において一般的に使用されている2種の距離関数-シティブロック距離、チェスボード距離を用いる。

(1)シティブロック距離( $L_1$ -norm):

$$d_d(P, Q) = \sum_{i=1}^n |p_i - q_i| \quad (1)$$

(2)チェスボード距離( $L_\infty$ -norm):

$$d_s(P, Q) = \max\{|p_i - q_i| : i=1, 2, \dots, n\} \quad (2)$$

但し、 $P, Q$ はn次元空間の点、

$$P = (p_1, p_2, \dots, p_n)$$

$$Q = (q_1, q_2, \dots, q_n)$$

である。

言うまでもなく、シティブロック距離は2次元においては4近傍距離、3次元においては6近傍距離に相当し、チェスボード距離は2次元においては8近傍距離、3次元においては26近傍距離に相当する。また、3次元では必要に応じて18近傍距離も扱う<sup>(3)</sup>。

【定義1】デジタル画像

N次元デジタル画像は、N次元空間をN次元超立方体に分割、または超立方格子で標本化したもので、各標本点、または超立方体を画素(pixel, voxel)、または単に点と呼び、N次元座標中、第i軸の座標値が $x_i$ である画素 $x$ を $x = (x_1, x_2, \dots, x_N)$ と書く。画素 $x = (x_1, x_2, \dots, x_N)$ の濃度が $f_x$ で与えられる画像を $F = \{f_x\}$ で表す。■

【定義2】デジタル図形

全画面を通じて濃度値が2種類の値(a, b)のみであるようなデジタル画像を2値デジタル画像という。2値デジタル画像 $F = \{f_x\}$ において濃度値が同じ画素集合 $F_a, F_b$ のうち、注目する集合をデジタル図形または単に図形と呼び、他方を背景と呼ぶ。■

便宜上、図形の濃度値を1、背景の濃度値を0で代表させる。

【定義3】画素と図形の最短パスの長さ

デジタル画像上の画素 $P$ と、m個の画素からなる図形 $A = \{x_i : i=1, \dots, m\}$ において、

$$d(P, A) = \min\{L(P, x_i) : i=1, 2, \dots, m\} \quad (3)$$

ただし、 $L(P, x)$ は2点 $P, x$ の最短パスの長さ<sup>(3)</sup>

で定義される $d(P, A)$ を画素 $P$ と図形Aの最短パスの長さという。■

【定義4】デジタル超円板

N次元デジタル画像上で、画素 $P$ から距離 $r$ 以下の画素の集合を $P$ を中心とする半径 $r$  ( $r \geq 0$ )のN次元デジタル超円板または単に

円板と呼び、 $C(r, P)$  で表す。すなわち、

$$C(r, P) = \{x; d(P, x) \leq r\}$$

但し、 $d(P, x)$  はデジタル画像上で定義された距離関数である (図2)。■

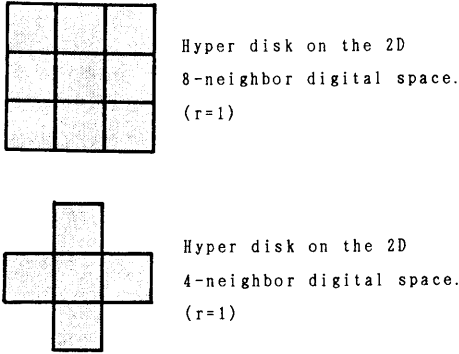


図2 デジタル超円板の例  
Fig. 2 Examples of the digital hyper disk.

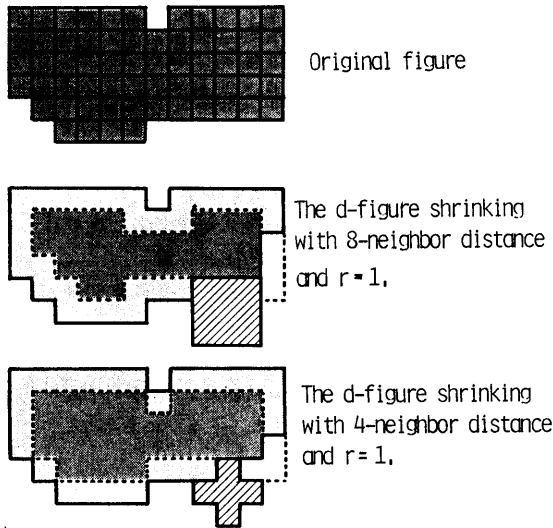


図3 2次元デジタルd-図形収縮  
Fig. 3 The digital d-figure shrinking in 2D space.

【定義5】d-図形収縮

図形Aにおいて、 $r \geq 0$  のデジタル超円板  $C(r, P)$  の中心画素Pを、背景の境界画素

の全てに合わせて移動させる。このとき、円板の軌跡となったAの画素全てを背景に変更する処理を、距離rのd-図形収縮 (図3) という。この結果、N個の連結成分からなる図形A'が生成されるものとする。■

明らかにd-図形収縮はトポロジーを考慮しない古典的図形収縮<sup>(9)</sup>に等しい。ただし、連結成分数が減少しないよう、全消去される可能性のある連結成分のうち適当な代表画素は消去しないこととする。

【性質1】 図形Aにおいて、

$$A^r = (A^1)^{r-1} \quad (r > 0)$$

である。また、 $A^r$  はAに対して距離1のd-図形収縮をr回適用させた図形に等しい。■

【定義6】最小収縮距離

図形Aにおいて、 $A^r$  がN個の連結成分となるような最も小さいrを分割数Nの最小収縮距離 (図4) という。■

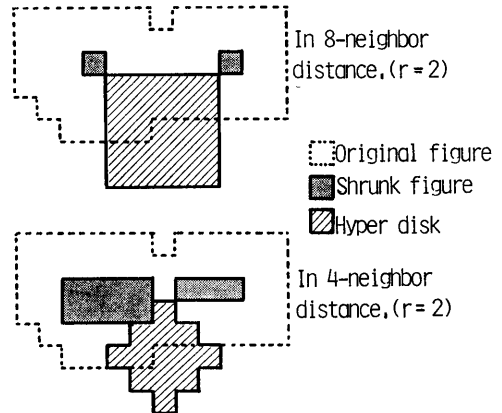


図4 最小収縮距離 (分割数2)  
Fig. 4 Minimum shrinking distance with the divisor N=2.

【定義7】単純d-図形分割

一つの連結成分からなる図形Aを、分割数Nの最小収縮距離rでd-図形収縮させA'を得る。原図形Aに含まれる全ての画素xとA'の連結成分図形のうちで背景を通ることのない最短パスの長さが最も小さい成分図形に属させた結果を分割数Nのd-図形分割という。■

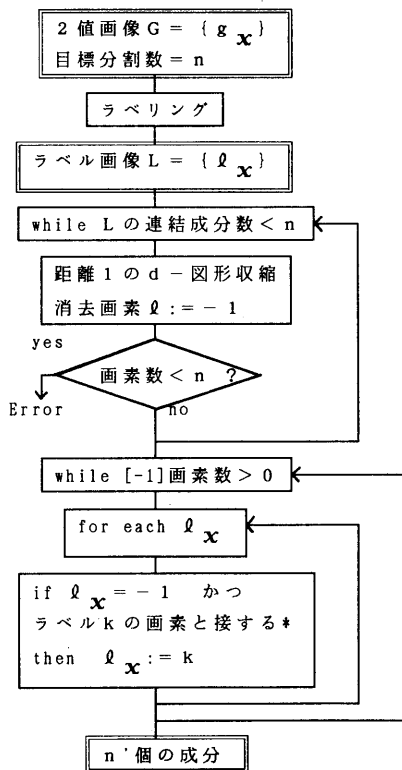
【定義8】複合d-図形分割

M個の連結成分  $A_i (i=1, \dots, M)$  からなる図形  $A (A = \cup A_i)$  を、分割数  $N$  の最小収縮距離  $r$  で  $d$ -図形収縮させ  $A^r (A^r = \cup A_i^r)$  を得る。原図形  $A_i$  に含まれる全ての画素  $x$  を  $A_i^r$  の連結成分のうちで背景を通ることのない最短パスの長さが最も小さい成分に属させた結果を分割数  $N$  の複合  $d$ -図形分割という。■

以後、単純  $d$ -図形分割と複合  $d$ -図形分割を合わせて、単に  $d$ -図形分割という。

一般に、 $d$ -図形分割において任意の整数  $N$  を分割数とする最小収縮距離  $r$  が常に存在するとは限らない。

### 3. $d$ -図形分割のアルゴリズム例



\*本文参照

図5 デジタル  $d$ -図形分割のアルゴリズム  
Fig.5 Algorithm for digital  $d$ -figure decomposition.

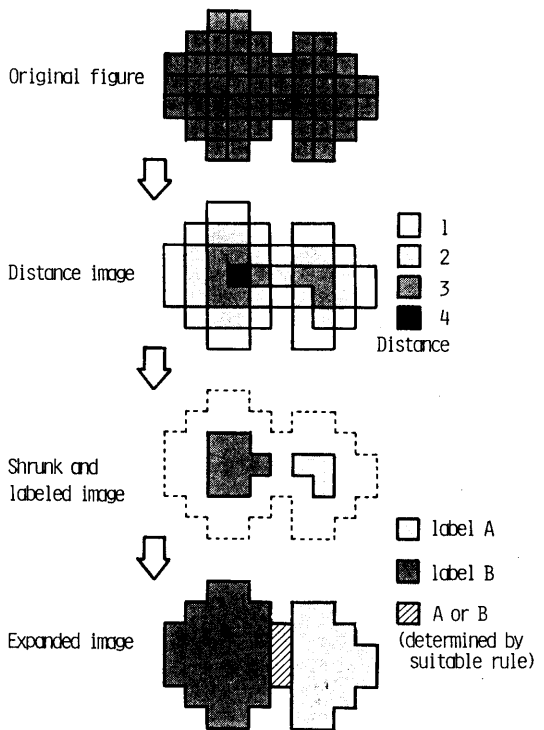


図6 デジタル  $d$ -図形分割の説明図  
Fig.6 Digital  $d$ -figure decomposition  
(4-neighbor digital 2D space).

デジタル空間における  $d$ -図形分割を実現するアルゴリズムはいくつか考えられる。【定義8】によって直ちに次に示すアルゴリズム(図5)が導かれる。実際の分割数を任意に設定することはできないため、このアルゴリズムでは目標最低分割数  $n$  を設定する。実際の分割数は  $n \leq n'$  を満たし、分割数  $n'$  の最小収縮距離が存在するような最小の  $n'$  である。

【アルゴリズム1】デジタル  $d$ -図形分割画像  $G = \{g_x\}$  を次のようにおく。

$$G = \{g_x\}, \quad g_x = \begin{cases} 1 & (g_x \text{ が図形の内部}) \\ 0 & (g_x \text{ が背景のとき}) \end{cases}$$

また、目標分割数を  $n$  とする。

(1) 画像  $G$  に対して、使用する距離関数、連結性に応じてラベル付けを行い、ラベル画像  $L = \{l_x\}$  を得る。ただし、 $l_x$  は正整数を用い、背景はラベル0とする。

(2) 画像 L の連結成分が n 未満のとき、処理 (3), (4) を行う。それ以外の場合は処理 (5) へ。

(3) 画像 L に対して距離 1 の d-図形収縮を行い、収縮画素  $l_x$  に -1 を代入する。

(4) 次の条件が成立するときは分割不可能とし、処理を終わる。それ以外は処理 (2) へ。

収縮図形の画素数 < n

(5) 手順 (2) による収縮回数を r とする。

(6) 次の処理を r 回繰り返す。画像 L において、 $l_x = -1$  である画素について、画素 x に連結する画素  $x'$  のラベルを付与する。すなわち、

$$l_{x'} := l_x$$

ここで、 $l_x$  は最大で連結画素数に等しい数の種類があるが、 $l_x$  の選択に関しては例えばラベルの順序付け、画素の方向による順序付け等によって一義に決定するものとする。後述する実験例では、最も小さいラベルとした。■

以上のアルゴリズムにより、 $n' \geq n$  なる、分割数  $n'$  の d-図形分割が行われる。また、本アルゴリズムによる 4 近傍デジタル d-図形分割のようすを図 6 に模式的に示す。

#### 4. d-図形分割の計算機実験

ここでは【アルゴリズム 1】に基づいて、いくつかの d-図形分割の計算機実験の例を示す。

図 7~9 は、2 次元 8 近傍距離に基づくデジタル d-図形分割例である。それぞれの図では、同一対象図形において分割可能な全ての種類を示している。図中、数字またはアルファベットはラベルを示し、r は最小収縮距離、N は実際の分割数である。いずれも、対象図形の形状特徴を良く反映した分割を与えている。

ところで、一部に直感的予想に反する例があった。d-図形収縮の途中結果として図 10 のように線幅 1 と線幅 2 の部分がある図形となった場合、一見分割されるように予想されるが、これらは距離値が等しいので同時に収縮、消去されるために分割がされない例となる。



図 10 分割できない例  
Fig. 10 A troubled case.

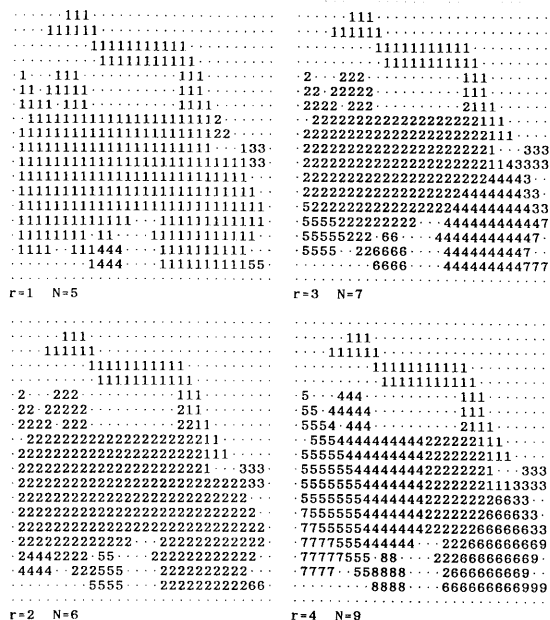


図 7 実験例 1

Fig. 7 An experimental result 1.

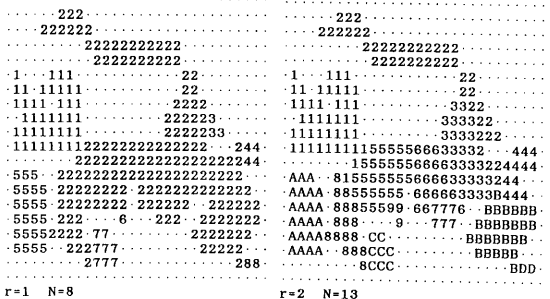


図 8 実験例 2

Fig. 8 An experimental result 2.

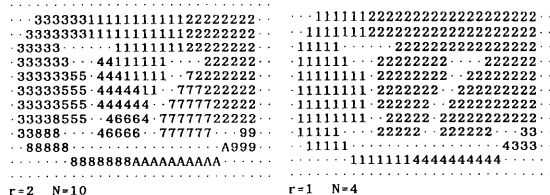


図 9 実験例 3

Fig. 9 An experimental result 3.

## 5. 心室自動分離への応用

ここでは、デジタルd-図形分割の3次元での応用例として、あらかじめ胸部MRI画像から自動抽出された心輪郭図形に本方法を適用し、心室が有意に分離されることを示す。

今回、実験に用いた原画像はグラディエントエコー法によって撮影された時系列の3次元胸部MRI-CT画像である。原画像系列の諸元を以下に示す。(図11)

### [画像系列]

撮影装置 : Philips Gyroscan S5 (0.5T)  
 被検者 : 成人男子正常健康人  
 画像サイズ : (縦) (横) (スライス)  
 256 × 256 × 17  
 時相数 : 14 / 1心拍  
 量子化レベル数 : 12ビット  
 画素サイズ : 1.4 mm平方  
 スライス間隔 : 7 mm

実験に用いた胸部MRI画像に関する詳細、また、心内膜輪郭の自動抽出手順の詳細については文献(4)を参照されたい。

血液クラスとして抽出された領域は、アーチファクト等の影響から、各心室および心房が連結してしまう可能性が大きい。そこで本稿で定義したd-図形分割を用いてこれらを分離する。本稿では便宜上、左心室と左心房を合わせて左心系、右心室と右心房を合わせて右心系と表現することにする。ここでの図形分割では、左心系と右心系の分離を目標としている。

図12は、d-図形分割の対象図形となる第1時相の輪郭抽出結果をボクセル表示によって示したものである。ボクセルの濃淡は深度符号化(depth-coding)に基づく輝度によっている。

図13には、図12に示す心輪郭を対象図形とした、3次元、6近傍による連結性に基づくデジタルd-図形分割の結果を示す。目標分割数nは100とした。分割後の後処理として、最も大きな成分を左室系/右室系成分とし、その他の小成分は、その成分が接する左室系成分または右室系成分と同レベルを付与した。図13において、(a)は左心系成分、(b)は右心系の成分を示す。左心系/右心系の分離が良好に行われた。

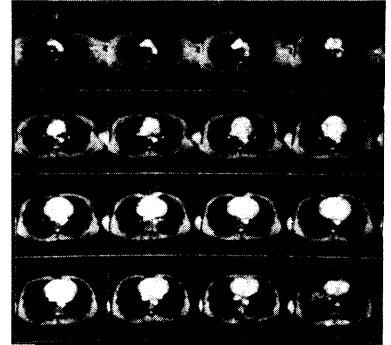


図11 原画像  
Fig.11 Original  
3D image.

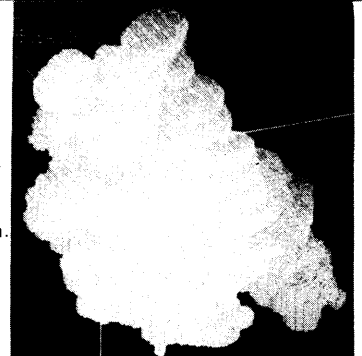


図12 自動抽出  
された心内膜  
Fig.12 Extracted  
endocardium.

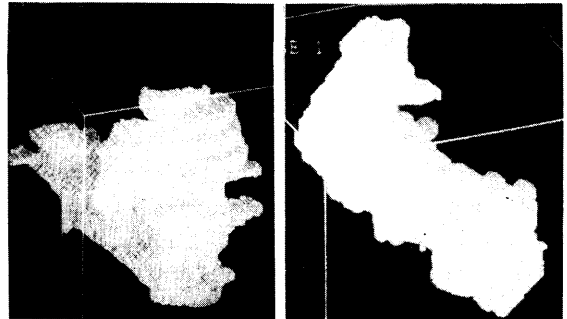


図13 d-図形分割・分類結果  
Fig.13 Results of d-figure decomposition  
and classification.

## 6. まとめ

濃淡デジタル画像を対象とする画像分割では、濃度値そのものに注目するような低次の画像特徴を用いるものから、テクスチャ特徴のような高次の画像特徴を用いるものまで多くの可能性を有している。一方、2値デジタル画像を対象とする領域分割(図形分割)は、形状のみが画像特徴の手がかりとなっているために利用できる情報が非常に少なく、従って自然な分割を導く手順の必要性はむしろ大きい。

本稿では図形の形状特徴を反映する図形分割を与える一手法としてデジタルd-図形分割の定義を与えた。また、デジタルd-図形分割の実現のためのアルゴリズムを示し、2次元における計算機実験の結果を示した。以下にデジタルd-図形分割の性質をまとめる。

(1) 原図形の形状特徴を良く反映する互いに背反な部分図形への分割を与える。(原図形を脆性を有する剛体とみなしたときに、「割れやすいところで割る」という物理的イメージに基づく分割を与える。)

(2) 2, 3次元のみならず、任意次元で定義可能である。

(3) 分割数ある程度制御することができる。

(4) 図形の収縮、及びラベル付けという画像処理でよく用いられる局所処理の組合せで実現できる。

さらに本方法の応用例として、胸部MRI画像から抽出された心内膜輪郭3次元図形に対し

てd-図形分割を適用することにより左心系と右心系の自動分離に有効であることを示した。

図形分割手法は、文字認識、図面処理、文書処理での前処理などの応用に期待されるものである。これらの処理の一手法としてもd-図形分割は有用なものであると考えられる。

以下の事項が問題点、及び検討課題として残されている。

(1) ボロノイ分割との関連性

(2) d-図形分割への距離画像の利用

(3) アルゴリズムの改良

**謝辞** 本研究にあたって、活発な討論を頂いた研究室諸氏に感謝する。実験には、名古屋大学大型計算機センターFACOM M-780/20を用いた。なお、本研究の一部は文部省科学研究費(奨励研究(A)No.63790294, 重点領域研究No.01633008)による。

#### 参考文献

- (1) A. Rosenfeld and A. C. Kak: Digital Picture Processing, Academic Press, N. Y. (1982).
- (2) 富田, 白井, 辻: "テクスチャーの解析", 情報処理, vol. 19, No. 2, pp. 173-182, (1978).
- (3) 鳥脇純一郎: 画像理解のためのデジタル画像処理 [I] [II], 昭晃堂, (1988).
- (4) 岡田, 横井, 鳥脇, 松尾: 「胸部MRI画像からの心内膜自動抽出」, 信学技報, MEとハイテクシンポジウムMBE89-83, pp. 15-22 (1989).
- (5) T. Pavlidis: "A review of algorithms for shape analysis", CVGIP, vol. 7, No. 2, pp. 243-258 (1978).
- (6) H. F. Feng and T. Pavlidis: "Decomposition of polygons into simpler components: Feature generation for syntactic pattern recognition", IEEE Trans., vol. C-24, No. 6, pp. 636-650 (1975).
- (7) D. Avis and G. T. Toussaint: "An efficient algorithm for decomposing a polygon into star-shaped polygons", Pattern Recognition, vol. 13, No. 6, pp. 395-398 (1981).
- (8) L. Ferrari: "Minimal rectangular

partitions of digitized blobs", Proc. 5th ICPR, p. 1040 (1980).

(9) 下島, 竹内, 富永: "外接四角形による図形の符号化とその応用", 信学論D, J66-D, No. 1, pp. 9-16 (1983).

(10) C. Arcelli and G. Sanniti di Baja: "An approach to figure decomposition using width information", CVGIP, vol. 26, No. 1, pp. 61-72 (1984).

(11) C. Guerra and G. G. Pieroni: "A graph-theoretic method for decomposing two-dimensional polygonal shapes into meaningful parts", IEEE Trans., vol. PAMI-3, No. 2, pp. 144-155 (1981).

(12) L. vanderheydt, F. Dom, A. Oosterlinck and H. V. D. Berghe: "Two-dimensional shape decomposition using fuzzy subset theory applied to automated chromosome analysis", Pattern Recognition, vol. 13, No. 2, pp. 147-157 (1981).

(13) 曾山, 安田, 横井, 鳥脇, 泉田, 藤岡: 「3次元画像を利用した股関節手術計画支援システム」, 医用電子と生体工学, vol. 27, No. 2, pp. 10-18 (1989).