

Region-based Contour Tree に基づく 3次元デジタル画像の簡単化と可視化

中村 陽一[†] 水田 忍[†] 松田 哲也[†]

[†] 京都大学大学院情報学研究科システム科学専攻
〒606-8501 京都府京都市左京区吉田本町

あらまし 本研究の目的は、3次元デジタル画像の等値面集合により表現される形状の可視化である。形状の把握を容易にするために、本研究では複雑な並立・包含関係をもつ等値面集合の簡単化を図る。本報告では、Region-based Contour Treeによりデジタル画像の等値面構造を記述し、重要な等値面集合のみを選択し他を除去する手続きについて述べる。本研究における等値面集合の選択は、等値面間の位相関係と、等値面が囲む体積に注目して行なっている。3次元デジタル画像の簡単化の効果をボリュームレンダリングにより視覚的に検証した。

Simplification and Visualization of 3D Digital Images Using Region-based Contour Trees

Yoichi NAKAMURA[†] Shinobu MIZUTA[†] and Tetsuya MATSUDA[†]

[†] Department of Systems Science, Graduate School of Informatics, Kyoto University
Yoshida Honmachi, Sakyo-ku, Kyoto, 606-8501 Japan

Abstract The goal of our research is to visualize shapes described by isosurfaces of 3D digital images. For this purpose, we propose a simplification procedure of the set of isosurfaces that have the complicated relationship of inclusion and exclusion. The topological relationships among isosurfaces can be described by Region-based Contour Tree (RBCT). In the proposed procedure, important isosurfaces to observe shapes are selected and others are removed using RBCT. In this procedure, isosurfaces are selected in consideration of the volume of regions surrounded by the isosurfaces and the topological relationship among them. We have visually evaluated the effectiveness of the proposed procedure of simplification by applying to the volume rendering of 3D images.

1. はじめに

近年、計算機性能の向上と画像化技術の発展に伴い、医療分野でのデジタル画像の利用機会が増加している。医用画像ではX線投影像などの2次元画像のほか、MRI（核磁気共鳴画像）などの断層像を積み重ねた3次元画像、3次元画像の時系列により構成される4次元画像など、種々の次元の画像が用いられる。

本報告では、3次元デジタル画像について検討する。3次元デジタル画像で表現される対象の形状情報は、画像の等値面がその多くを担っている。3次元画像の理解が困難になる1つの要

因に、画像中に多数の等値面が現れ得ることが挙げられる。従って、このような等値面集合の簡単化により、より容易な理解が期待される。

等値面集合を簡単化するには、形状把握に重要な等値面の選択が必要になり、選択の指標となる等値面の重要度を設定することが求められる。この際、等値面間の並立・包含関係は重要な意味を持つと考えられ、重要度に反映させることが望まれる。

本研究の目的は、3次元デジタル画像を対象とし、等値面間の並立・包含関係を考慮した等値面集合の簡単化と可視化である。ここでは、

デジタル画像の等値面構造を記述する Region-based Contour Tree (RBCT) を用いて処理の実現を図る。

2. 多次元連続スカラ場の単純化に関する従来研究

連続多次元スカラ場において、場の値の増減による等値面間の並立・包含関係の変化は、特異点（極大点・極小点および鞍点）の周囲で生じる等値面構造の位相変化（生成・合併・分岐・消失）と対応する。これより、特異点を通過する等値面を重要と考えてスカラ場の可視化を行なう試みがこれまでに行なわれており、スカラ場中に多数現れるこのような等値面集合を単純化する手続きについても検討されている [4] [6]。

本章では文献 [6] で提案される、Contour Tree (CT) に基づく多次元連続スカラ場の等値面集合の単純化について説明する。

2.1. Contour Tree

CT は連続多次元スカラ場における等値面位相構造を記述する、木構造のグラフである。文献 [7] による CT の定義を以下に述べる。

定義 1 :

1. CTは節と枝を持つ木構造グラフである。
2. CTの節は特異点およびこれを通過する等値面を示す。
3. CTの枝は節を結ぶ線分として表現され、2つの節により定義される等値面によって囲まれる領域を示す。

CTの節と枝はそれぞれsupernode, superarcと呼ぶものとする。superarc上の1点は、superarcが示す領域内の1つの等値面を示すものとし、この点に相当する節をregular nodeと呼ぶ。

2.2. Contour Tree に基づく多次元連続スカラ場の単純化

等値面集合の単純化は、regular nodeを持たないCTの節により記述された等値面集合に対し、適切な基準の下での節の除去と、対応する等値面の除去を行なうことで実現している。単純化は極大点・極小点に対応する葉節に注目して行い、この節 n に対応する等値面の場の値 In 、枝を介してこの節と接続する節 n' に対応する等値面の場の値 In' 、及びこの等値面が囲む領域の体積 Vn' を用いて、重要度の評価値 $E = Vn' \times |In - In'|$ を

求め、 E が基準を下回る場合は節 n を除去する。処理の結果 n' が regular node になる場合は、 n' も除去する。

2.3. 手法の課題

本手法は多次元連続スカラ場の等値面集合を単純化する手続きであり、デジタル画像への適用は考慮していない。また、regular nodeを持たないCTに記述される等値面集合を対象としているため、特異点を通過しない等値面が特徴的な形状を持つ場合も、これを可視化の対象と出来ない。前節で述べた単純化の手続きでは、 Vn' が小さく $|In - In'|$ が大きい領域も可視化の対象として取り出され得るが、スパイクノイズなどもこのような特性を持つため、この評価基準が適切か否かは処理対象の性質に依存する。

3. 3次元デジタル画像の単純化

本章では、デジタル画像の等値面構造を記述する Region-based Contour Tree (RBCT) [1][2][5] に基づいて、等値面集合を単純化する手法について述べる。

3.1. Region-based Contour Tree

CT は連続多次元スカラ場の等値面位相構造を記述する手法である。しかし、スカラ場の離散的表現であるデジタル画像では等値面の値は離散的に変化しており、特異点が存在しない。RBCT は従来の定義を変更し、デジタル画像に適用可能としたものである。

3.1.1. デジタル画像における等値面の定義

デジタル画像は通常、多次元直交格子の格子点位置に配置された画素の集合として定義される。画素値は非負の有限整数値をとるものとする。デジタル画像の等値面を、ここではある閾値 T に対し画素値 p が $p \geq T$ または $p \leq T$ となる画素の連結成分を求めた際の、領域間の境界として定義する。前者の連結成分を $R_i(T)$ 、後者を $S_j(T)$ ($i, j = 1, 2, \dots$) とおくと、 T を閾値とする二値化により得られる等値面は連結成分のセット $[R_i(T), S_j(T-1)]$ で表現できる。

3.1.2. Region-based Contour Tree

上記等値面の定義の下では、デジタル画像では特異点やそれを通過する等値面は存在しない。このため、画像からCTを得る場合、そのCTの節を特異点に対応付けることは出来ない。そこで、デジタル画像からCTを抽出する場合、

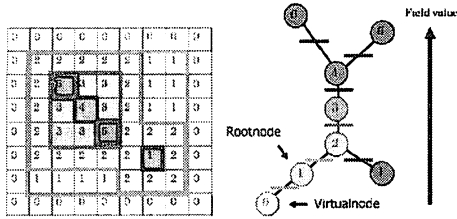


図1 Region-based Contour Tree の概念

CTの定義を以下のように変更する[1][2][5].

定義2:

1. CTは節と枝を持つ木構造グラフである.
2. CTの節は位相変化を伴う等値面の変化と変化前後の等値面のセットを示す.
3. CTの枝は節を結ぶ線分として表現され、2つの節により定義される等値面によって囲まれる領域を示す.

定義1と同様に、CTの節と枝をそれぞれ supernode, superarcと呼ぶものとする。superarc上の1点は、その領域内の位相変化を伴わない等値面変化と、変化前後の等値面のセットを表すものとし、この点に相当する節を regular nodeと呼ぶ。以後の説明において、CTの構造は regular nodeと supernodeを節としそれらを結ぶ枝を持つものとする。図1に概念を示す。

デジタル等値面の画素値が有限整数値をとる場合、画像中のすべての等値面変化は有限個の節により表すことができる。このとき、節は同一画素値の画素集合に対応し、枝は単一の等値面に対応する。このようにして得られるCTを Region-based Contour Treeと呼ぶ[1][2][5].

RBCTは画像全体を囲む等値面を次のように表現できる。まず、画像全体を囲むように画像の外側に仮想的に画素を配置し、この画素集合に対応する節を virtual nodeとする。次に画像の外周に配置される画素集合が対応する節を root nodeとする。この virtual nodeと root nodeを連結する枝を root arcとし、画像全体を囲む等値面を root arcにより表現する。

この際、RBCTは virtual nodeを根とする根付木と考えることが出来、等値面はすべて閉曲面となる。このときRBCTにより記述される等値面集合は、木構造の親子関係と等値面の包含関係が対応する。

3.2. RBCTに基づく3次元デジタル画像の単純化

virtual nodeを導入した根付木表現によるRBCTに基づき、3次元デジタル画像の等値面集合を単純化する手法として、本報告では2つの手法を提案する。ここではこれら2つを、葉節単純化と中間節単純化と呼ぶ。以下の説明で、子節を持たない節を葉節とし、子節を複数持つ節を分岐節とする。子節を1つ持つ節は中間節とし、これは regular nodeを示す。virtual node、分岐節、葉節のいずれかを両端とし、その間が中間節の系列からなる部分木を、ここでは直鎖と呼ぶことにする。

3.2.1. 葉節単純化

3次元デジタル画像には、ノイズとして多くの小領域が表れる場合がある。このような小領域は、可視化の際の妨げとなる。葉節単純化は、こうした小領域を除去することを目的とした処理である。本手法は文献[6]の手続きと類似しており、また2次元画像を対象とした文献[8]の手続きを3次元に拡張したものとも考えることも出来る。

葉節単純化は、処理対象をRBCTの葉節に相当する節のみとしている。ここで節 n の体積 $V(n)$ を、節 n と親節 n' を結ぶ枝に対応する等値面が囲む領域の体積と定義する。 $V(n)$ は等値面に囲まれる画素数として求めることが出来る。葉節の体積を葉節単純化の指標とし、閾値 T_l により単純化の程度を決定する。手順は以下の通りである。

- (1) RBCTの全ての葉節を調べ、 $T_l > V(n_i)$ となる節 n_i をRBCTから除く。
- (2) n_i に対応する画素の画素値を、 n_i の親節の画素値と置き換える。
- (3) 全ての葉節で $V \geq T_l$ となるまで(1)(2)を繰り返す。

これにより、その囲む領域が T_l より小さな体積を持つ全ての等値面が除去される(図2(b))。

3.2.2. 中間節単純化

直鎖を構成する枝に対応する等値面系列は単調な入れ子構造を持ち、隣接する枝は類似した形状の等値面に対応すると考えられる。この時、等値面形状は系列に従って徐々に変化し、全体を観察した場合に形状が理解困難になることが懸念される。また、類似した等値面集合の

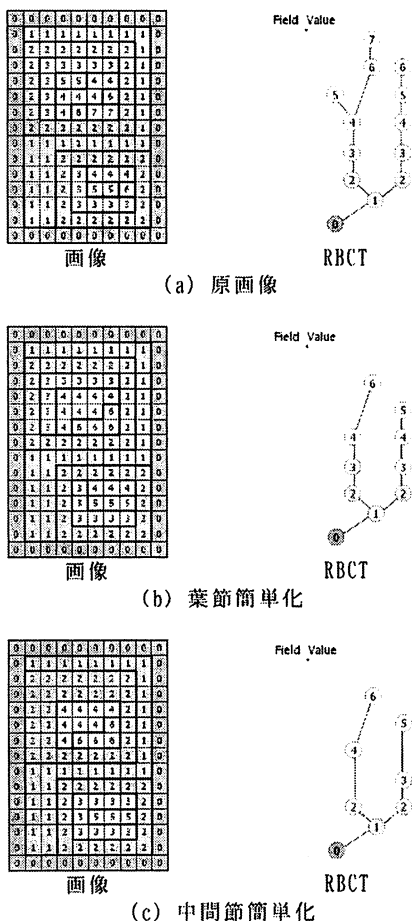


図2 デジタル画像の簡単化

持つ形状特徴は冗長であり、それらを全て観察する意義は小さいと考えられる。中間節簡単化は、直鎖が記述する等値面集合を簡単化することを目的とした処理である。

枝 ε の長さ $len(\varepsilon)$ は、前述した節の体積 V を使い、両端の節のうち根に近い節 $n_p(\varepsilon)$ ともう一方 $n_c(\varepsilon)$ の体積をそれぞれ $V(n_p(\varepsilon))$ 、 $V(n_c(\varepsilon))$ として、体積差の $V(n_c(\varepsilon))$ に対する比から $len(\varepsilon) = (V(n_p(\varepsilon)) - V(n_c(\varepsilon))) / V(n_c(\varepsilon))$ と定義する。 $len(\varepsilon)$ を、2つの等値面の類似性を表す中間節簡単化の指標とし、閾値 T_m により簡単化の程度を決定する。

中間節簡単化は、直鎖ごとに行なう。手順は以下の通りである。

- (1) $len(C)$ が最小の枝 C を探索する。

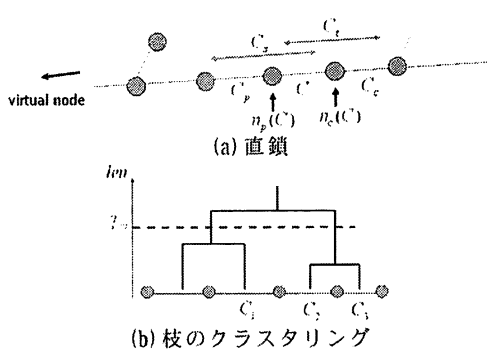


図3 中間節簡単化

- (2) $T_m \leq len(C)$ なら終了する。
- (3) C と隣接する2つの枝のうち、根に近い枝を C_p 、もう一方を C_c とする。
- (4) $n_p(C_p)$ と $n_c(C_c)$ を連結する枝 C_s 、 $n_p(C)$ と $n_c(C_c)$ を連結する枝 C_l について、 C_c が存在しないか $len(C_s) \leq len(C_l)$ のときは節 $n_r = n_p(C)$ を RBCT から除き、 $C_a = C_s$ を新たな枝とする。それ以外は節 $n_r = n_c(C)$ を RBCT から除き、 $C_a = C_l$ を新たな枝とする。
- (5) n_r に対応する画素の画素値を、 $n_p(C_a)$ の画素値と置き換える。
- (6) 直鎖を構成する枝の数が1つになっていれば終了する。それ以外は(1)へ進む。

図3に概念を示す。処理は、直鎖を構成する枝に対する階層的クラスタリングに相当する。この手続きにより、類似性の指標 len が T_m より小さな等値面対が生じないように、等値面が除去される(図2(c))。

4. Region-based Contour Tree を用いた3次元デジタル画像の可視化

本章では、提案手法による簡単化の効果を視覚的に検証するための、3次元デジタル画像の可視化手続きについて述べる。ここではボリュームレンダリングによる可視化を行なうものとし、RBCTを用いて等値面の位相構造を反映した伝達関数を設定する。同様の手続きには、例えば文献[3]等がある。

ここで用いる伝達関数は、3次元デジタル画像の各画素(ボクセル)に設定する。RBCTの木構造に沿ってvirtualnodeから葉節の方へ辿り、この順に親節との画素値の差の絶対値と、親節の

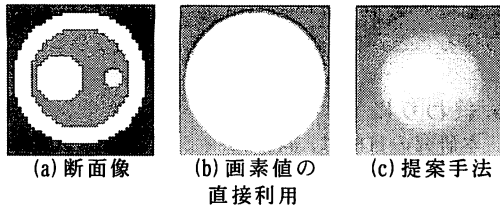


図4 位相構造を考慮した可視化

画素値の和をその節の伝達関数とるように変更する(式(3)).

$$K(n) = K(n^p) + |I(n^p) - I(n)| \quad (3)$$

ここで、 n^p は節 n の親節、 $I(n)$ は節 n の画素値、 $K(n)$ は節 n と対応する画素の伝達関数であり、 $K(n)$ を適切な比率でスケールし、この画素の不透明度とする。全ての節に対してこの処理を行い、伝達関数の設定を行なう。

RBCTを用いて等値面の位相構造を考慮することにより、等値面の入れ子構造の内側に存在する領域は必ず外部よりも不透明度が高くなるので、画素値を直接伝達関数として用いるのとは比べ、観察による包含関係の把握は容易になると考えられる。また、 $K(n)$ の算出に画素値差を考慮することにより、等値面間のコントラストを表現することが出来る。

図4にボリュームレンダリングによる可視化の例を示す。図(a)を断面とする3次元画像に対し、画素値を直接利用し $K(n) = I(n)$ とした場合(図(b))と提案手法(図(c))を比較すると、提案手法では等値面の包含関係が輝度の差異として容易に確認できる。

5. 処理例

5.1. モデル画像を用いた処理例

単純な形状モデルを表現する3次元デジタル画像に対して、提案手法による簡単化と可視化を行なった。画像のサイズは $64 \times 64 \times 64$ 画素であり、モデルは複数の球状の等値面からなる。

前章の手続きを用いた処理結果を図5に示す。原画像(図5(a))に対して、葉節簡単化の閾値を $T_l = 40$ と設定し簡単化を行なうと、結果は図5(b)のようになる。図より、原画像中に存在していた小領域の除去が確認される。

次に、葉節簡単化後の画像(b)に対して、中間節簡単化の閾値を $T_m = 2$ と設定し簡単化を行なった結果を図5(c)に示す。中間節簡単化により、

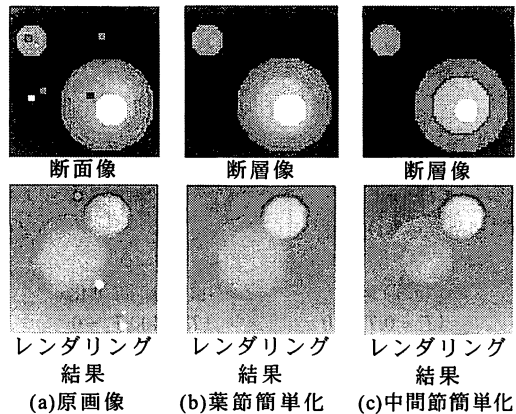


図5 モデル画像に対する処理例

入れ子状の等値面集合の一部が、間引かれる形で除去されているのが確認される。

5.2. 医用画像を用いた処理例

医用画像を用いたRBCTによる簡単化の処理例を示す。処理の対象は、ヒト胚子標本の核磁気共鳴顕微鏡画像である。胚子の発生段階を示す指標であるCarnegie stage (CS) について、CS23に該当するもの1体を用いた。画像のサイズは $128 \times 128 \times 256$ 画素である。前章の手続きで原画像をレンダリングした結果を図6(a)に示す。Virtual nodeを除くRBCTの節数は枝数と同一であり、画像中の等値面数と対応することから、ここでは節数を同時に示す。

原画像に対して葉節簡単化を行なった結果を図6(b), (c)に示す。閾値 T_l はそれぞれ400, 4000とした。(a)と(b)を比較した場合、観察した範囲で両者に違いはほとんど見られない。しかし、節数は(b)で(a)の約1%まで減少しており、大幅な等値面数の低減が確認される。これは、葉節簡単化により、レンダリング結果から観察困難な微小なノイズ領域が除去されたためと考えられる。(b)と(c)を比較すると、(c)では右上肢付近のノイズ領域が除かれており、葉節簡単化の効果を確認される。

次に、図6(c)に対応する画像に対し中間節簡単化を行なった結果を図6(d), (e), (f)に示す。中間節簡単化の閾値 T_m はそれぞれ0.1, 1.0, 15とした。(c)と(d)を比較した場合、観察範囲で両者に大きな違いは見られない。しかし、中間節数は(d)で(c)の約2%まで減少しており、大幅な等値面数の低減が確認される。これは、中間節簡単化により、冗長な等値面が除去されたため

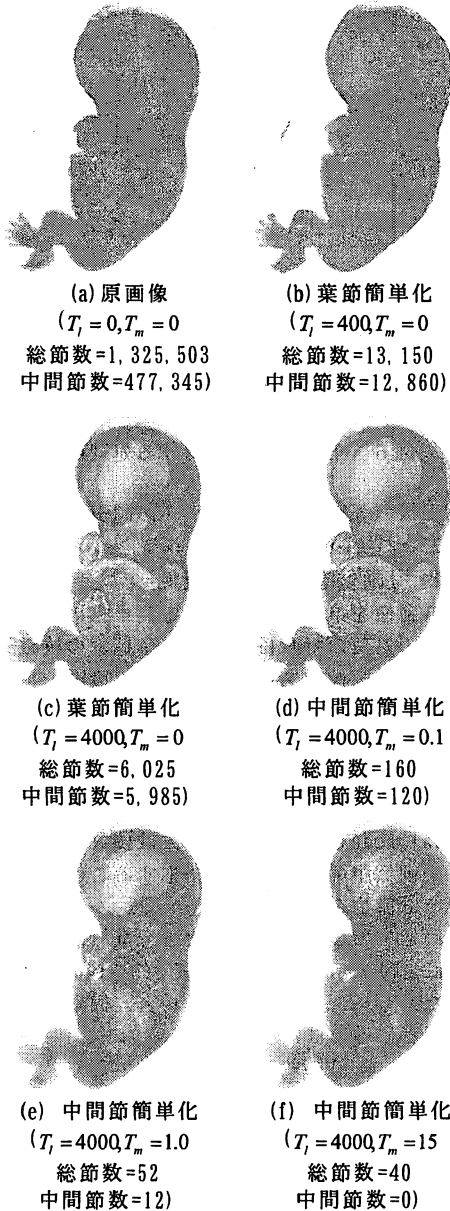


図6 医用画像に対する簡単化の処理例

めと考えられる。(d)と(e)を比較すると、(d)では不明瞭であった胚子の内部構造が、(e)では明瞭に示されている。

また、(f)では中間節簡単化閾値に大きな値を設定し、中間節に対応する全ての等値面を除いている。この時、胚子の目に相当する領域が除去されていることが観察される。これより、中

間節に対応する等値面も、重要な形状特徴を持ち得ることが確認された。

6. 終わりに

本研究の目的は、3次元デジタル画像を対象とし、等値面間の並立・包含関係を考慮した等値面集合の簡単化と可視化である。ここでは簡単化の手法として、RBCTを用いた葉節簡単化と中間節簡単化を提案し、3次元デジタル画像のボリュームレンダリングによる可視化に基づいて、手法の有効性を検証した。

謝辞

ヒト胚子標本画像の利用をご了承頂いた、京都大学大学院医学研究科附属先天異常標本解析センターの塩田浩平教授に深謝致します。本研究の一部は、文部科学省科学研究費(特定領域研究(2) 課題番号 15070206)による。

文献

- [1] 水田, 諏訪, 小野, 松田, “Contour Tree によるデジタル画像の位相構造記述と2次元表示,” 電子情報通信学会技術研究報告, PRMU2004-22, pp.59-64, May 2004.
- [2] 水田, 松田, “Region-based Contour Tree によるデジタル画像の位相構造記述とその応用,” 電子情報通信学会技術研究報告, PRMU2004-74, pp.157-164, 2004.
- [3] 竹島, 高橋, 藤代, “位相属性を用いた多次元伝達関数の設計” Visual Computing グラフィクスとCAD 合同シンポジウム'04-7, pp.37-42, 2004.
- [4] Gyulassy A, Natarajan V, Pascucci V, “A Topological Approach to Simplification of Three-Dimensional Scalar Functions,” IEEE Transactions on Visualization and computer graphics, Vol.12 No.4, pp.474-484, 2006.
- [5] Mizuta M, Matsuda T, “Description of Digital Images by Region-based Contour Tree,” Lecture Notes in Computer Science, 3656, pp.549-558, 2005.
- [6] Carr H, Snoeyink J, and van de Panne M, “Simplifying Flexible Isosurfaces Using Local Geometric Measures,” Proc. IEEE Conf. Visualization, pp.497-504, 2004.
- [7] Carr H, Snoeyink J, Axen U, “Computing contour trees in all dimensions,” Computation Geometry, Vol.24, pp.73-94, 2003.
- [8] Monasse P, Guichard F, “Scale-space from a level lines tree,” Journal of Visual Communication and Image Representation, Vol.11, 224-236, 2000.