

ボリューム位相解析に基づく等値面フィッティング

徳永 百重¹ 竹島 由里子¹ 高橋 成雄² 藤代 一成³

1 お茶の水女子大学 大学院人間文化研究科

2 東京大学 大学院総合文化研究科

3 お茶の水女子大学 理学部 情報科学科

〒112-8610 東京都文京区大塚 2-1-1

momoe@imv.is.ocha.ac.jp

マーチングキューブス法などに代表されるインダイレクトボリュームレンダリング (IVR) は、ボリュームビジュアライゼーションの代表的な方法であり、現存のグラフィックスハードウェアを利用することによって、ダイレクトボリュームレンダリング (DVR) よりも、効果的にデータの特徴をとらえた画像を生成することができる。しかし、複雑なボリュームデータから、特徴的な等値面の構造を抽出するために適した閾値を決定することは困難である。本稿では、ボリューム位相構造を解析し、その結果を用いて等値面の閾値を決定する新しい手法を提案する。さらに、提案手法を実データへ適用し、その有効性を示す。

キーワード: ボリュームビジュアライゼーション, 等値面, ボリューム骨格木

Isosurface Fitting Based on Analysis of Volumetric Field Topology

Momoe Tokunaga¹ Yuriko Takeshima¹

Shigeo Takahashi² Issei Fujishiro³

1 Graduate School of Humanities and Sciences, Ochanomizu University

2 Graduate School of Arts and Sciences, University of Tokyo

3 Department of Information Sciences, Ochanomizu University

2-1-1 Otsuka, Bunkyo-Ku, Tokyo 112-8610, Japan

momoe@imv.is.ocha.ac.jp

Indirect volume rendering (IVR) such as the Marching Cubes algorithm deserves a major technical category for volume visualization. Due to the advantage of available graphics hardware, the IVR successfully generates informative image efficiently in comparison with conventional direct volume rendering (DVR). One of the problems in such IVR is to specify good thresholds so that we can extract characteristic isosurface structures from complicated volume datasets. In this article, we propose a novel approach for extracting reasonable isosurfaces from a given volume dataset by analyzing its volumetric field topology. A real dataset is used to demonstrate the feasibility of the present method.

Keywords: Volume visualization, isosurface, Volume Skeleton Tree (VST).

1 はじめに

3次元ボリュームデータの内部構造を可視化する技術であるボリュームビジュアライゼーションは、アプローチの違いから大きく二つの方法に分類できる[1]。ボリュームデータの定義域や値域に制限を加えることでボリュームデータを間接的に表示するインダイレクトボリュームレンダリング (IVR) とボリュームデータ全体を半透明表示するダイレクトボリュームレンダリング (DVR) である。ボリュームデータ全体の内部構造を把握するには DVRの方が有効であるが、DVRは特別なハードウェアアクセラレータや並列環境を利用しない限り、多くの計算時間を要するという欠点がある。一方 IVRは、ボリュームデータの定義域や値域に制限を加え、サーフェイス状の部分領域しか表示しないため、相関の高いボリュームに対しては効率的な可視化が可能である。しかし部分領域を特定するための閾値の設定の仕方によっては、全く意味のない可視化結果が得られる可能性がある。

そこで本稿では、IVRの閾値を効果的に設定するために、ボリュームデータの骨格抽出に基づく手法を提案する。ここで、ボリューム骨格として、ボリュームフィールドに関する等値面の位相変化をグラフ構造として表すボリューム骨格木 (Volume Skeleton Tree: VST) [2]を採用する。VSTは、等値面の生成、併合、分岐、消滅において現れる臨界点 (critical point) とそれらの接続関係によって構成される。

本稿では、この VST に基づくボリューム位相構造を反映するように、等値面を複数重ねて半透明表示する二つの手法を提案する。

2 ボリュームにおける臨界点

3次元座標を (x, y, z) とし、そのフィールド値を w とすると、ボリュームデータは3次元一価関数 $w = f(x, y, z)$ の離散表現と考えることができる。ここで、フィールド値が小さくなるにつれ、ボリュームデータから抽出される一番外側の等値面が必ず膨らむように、フィールド値の正負の向きが調整されていると仮定する。

フィールド値に関する等値面の変化を追うと、あるフィールド値で等値面が併合、分岐する点が見られる。このように等値面の位相が変化する点を臨界点 (critical point)、そのフィールド値を臨界フィールド値 (critical field value) とよぶ [2]。ボリュームデータの臨界点は、極大点 (C_3)、鞍点 (C_2)、鞍点 (C_1)、極小点 (C_0) の4つに分類することができる。それぞれの点で等値面は生成、併合、分岐、消滅する (図1)。また、ボリュームフィールドに仮想極小点を導入することで、ボリュームデータは3次元球面と同相になり、微分位相幾何学の理論から、臨界

点の個数は次のオイラーの公式を満たす：

$$\#\{C_3\} - \#\{C_2\} + \#\{C_1\} - \#\{C_0\} = 0 \quad (1)$$

ここで、 $\#\{C_i\}$ は臨界点 C_i の個数を示す。

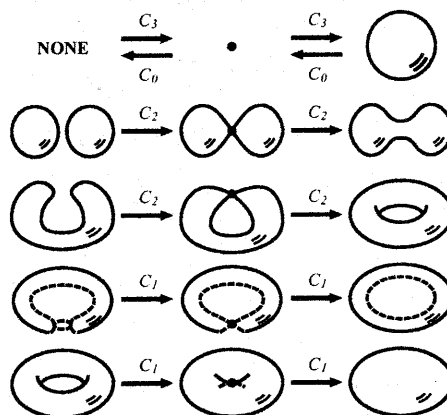


図 1: 臨界点における等値面の振舞いの分類

3 ボリューム骨格抽出法

ボリューム骨格抽出は、サンプリングされたデータから臨界点を抽出することから始まる [2]。ここで、後述の解析のために、臨界点はオイラーの公式を満たすように抽出されなければならない。臨界点を抽出する前にサンプル点を補間する必要がある。このため、漸近線判定法 [4] を模倣するように3次元サンプル格子を四面体に分割する。

四面体分割が終了後、サンプル点とその近傍点のフィールド値の差の符号を調べ、臨界点のタイプを決定する。

臨界点を抽出後、ボリューム骨格木構築の中間データ構造となるボクセルフローネットワーク (Voxel Flow Network: VFN) を構築し、次にボリュームデータの骨格を表すグラフであるボリューム骨格木 (Volume Skeleton Tree: VST) を生成する。ボリュームデータは3次元一価関数のサンプル点集合であるため、VSTは閉路をもたず、また臨界点はオイラーの公式を満たすことから、手続的に VFN から VST への変換を行うことができる。

ここで、先行研究 [2] で用いられた解析的データを再掲する：

$$w = f(x, y, z) = 4c^2((x-R)^2 + (z-R)^2) - ((x-R)^2 + y^2 + (z-R)^2 + c^2 - d^2)^2 + 4c^2((x+R)^2 + (z+R)^2) - ((x+R)^2 + y^2 + (z+R)^2 + c^2 - d^2)^2 \quad (2)$$

ただし、 $0 < d < c, c^2 + d^2 \geq 6R^2$ 。

臨界点は C_3 として p_1, p_2 ($w = 8c^2d^2 = 0.72$), C_2 として p_3, p_4 ($w = 8c^2d^2 - 16R^2(c^2 + d^2 - 4R^2) = 0.432$), C_1 として p_5 ($w = -2(c^2 - d^2)^2 + 8R^2(c^2 + d^2 - R^2) = 0.1582$), 仮想極小点 C_0 として p_6 の 6 つが抽出される (図 2(a)). このとき, 臨界フィールド値は 4 個求まる. 抽出された臨界点の個数が, オイラーの公式 (式 (1)) を満たしていることに注意されたい. 図 2(a) に抽出された臨界点から VFN を構築した例を, 図 2(b) に VFN から VST へ変換した例を示す.

実際, 計測データなどに対してボリューム位相解析を行う場合, データにノイズが含まれているため, 局所的な臨界点が多数発生してしまう. そこで, 臨界フィールド値間のフィールド値の差がある閾値以下になる臨界点のペアを, オイラーの公式を満たすように削除する. これにより, ボリュームデータの大局的な特徴を表す臨界点を求め, VST の簡単化を行う.

VST は先行研究である Hyper Reeb Graph (HRG) [3] を包含するものであり, HRG より高速に抽出することができる. さらに HRG ではとらえられなかったボリュームデータ全体の大局的な特徴を効果的に表現する利点をあわせもつ. 同様の手法に Bajaj らによる, 等値面が変化する骨格を計算する手法 [5] があるが, 抽出される骨格の数学的一貫性が考慮されていないため, ノイズを含むような大規模データでの簡単化処理が困難である. 一方, 本手法では, オイラーの公式を満たすように臨界点を抽出するため, 数学的一貫性を保ちながら VST を簡単化することが可能である.

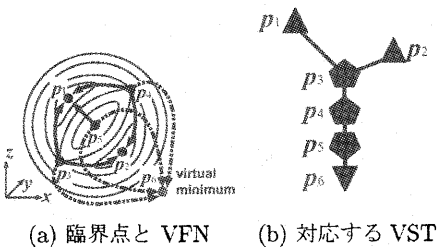


図 2: VST の生成過程

4 IVR における閾値の設定

IVR は, ボリュームデータの定義域や値域に制限を加えてボリュームデータを間接的に可視化する方法であるが, 閾値の設定の仕方によって情報量の全く異なった可視化結果が得られる. そのため IVR では, 閾値の設定が最も重要な問題となる.

そこで本節では, 前節までに示したボリューム位相解析の結果を利用し, IVR の方法の一つである等値面フィッティングの際の閾値の設定を効果的にを行う手法を提案する.

4.1 等値面フィッティング

VST の結果を利用して, 等値面を複数重ねて半透明表示する以下の二つの手法を提案する.

a. 臨界等値面群

VST 抽出の結果, 臨界フィールド値が n 個得られた場合, そのフィールド値の等値面 (臨界等値面) を n 枚重ねて表示する.

b. 同相区間の代表等値面群

フィールド値の最小値, 最大値と n 個の臨界フィールド値によって, フィールド値分布は $n+1$ 個の同相区間に分列される. その同相区間の平均値を目的値として, 代表等値面を $n+1$ 枚重ねて表示する.

4.2 解析的データへの適用

提案手法を解析的データ (式 (2); $c = 0.6, d = 0.5, R = 0.2$) へ適用した. ボリューム位相解析は, SGI 社製 O2 (CPU:R12000, Clock:300MHz, RAM:1GB) 上で行い, 等値面フィッティングには同様の環境で, 商用可視化ソフトウェア AVS/Express 5.1 を用いた.

限られた計算資源で複雑なボリュームデータの解析を行うために, $32 \times 32 \times 32$ にダウンサイジングしたボリュームデータで VST を生成した. その結果, 前節で示したように, 6 つの臨界点と 4 つの臨界フィールド値が抽出された. 可視化には $128 \times 128 \times 128$ のボリュームデータを使用した.

比較のため, フィールド値を等間隔にとった等値面を, 臨界等値面と同じ枚数重ねて表示したものを用意した (図 3(a)). それぞれを比較した結果, 解析的データの臨界点がフィールド値の大きい部分に集まっているため, 等間隔に等値面フィッティングを行った場合 (図 3(a)), まったく意味のない結果が得られてしまった. 一方, VST を利用して等値面フィッティングを行った場合 (図 3(b)・(c)), 臨界点が正しく抽出されたため, ボリュームの内部構造をはっきりととらえることができた.

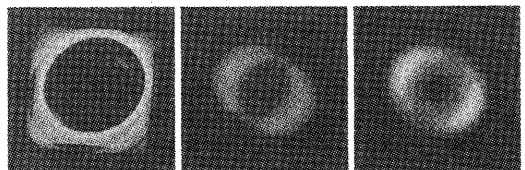


図 3: 解析的データの可視化結果

5 実データへの適用

本手法の効果を検証するために、実データへ適用した。対象データは HIPIP (High Potential Iron Protein) の電荷密度分布 ($64 \times 64 \times 64$) である。位相骨格解析には、 $32 \times 32 \times 32$ にダウンサイジングしたボリュームデータを用いた。VST の生成過程では、2,752 個の臨界点が抽出されたが、VST の単純化によって、20 個にまで減少させた。このとき、臨界フィールド値は 11 個求めた。

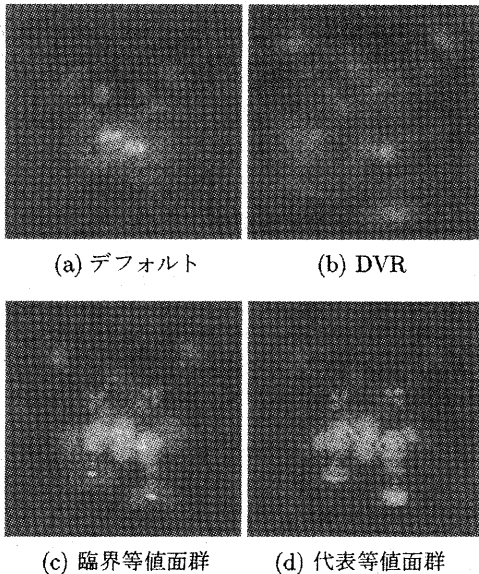


図 4: HIPIP データの可視化結果

図 4 に、フィールド値を等間隔にとって 11 枚の等値面をフィッティングした結果 (図 4(a)) と臨界等値面 (図 4(c))、代表等値面フィッティングを行った結果 (図 4(d)) を示す。同図からわかるように、等間隔に等値面フィッティングを行った場合ではとらえられなかった細かな特徴を、臨界等値面フィッティングでははっきりととらえられていることがわかる。

また本手法の有効性を示すために、ボリュームデータ全体を半透明表示する可視化法である DVR の結果 (図 4(b)) と比較した。ここで用いた伝達関数は一般的に用いられているものである。DVR はボリュームデータ全体の内部構造を把握するのに有効な可視化法であるが、ボリューム位相構造を利用して、等値面の目的値を効果的に設定した本手法の方がはるかにわかりやすい結果を得ることができた。

6 まとめと今後の課題

本稿では、ボリュームフィールドの位相構造を表す VST を利用した効果的な等値面フィッティング法を提案した。また実データへ適用することにより、その効果を検証した。

今回、VST を抽出するためにダウンサイジングしたデータを利用したため、可視化するデータとボリュームフィールド位相のフィールド値がわずかにずれるという問題が生じた。今後、この種の臨界フィールド値の誤差を補正する必要がある。

VST を単純化する方法として、今回は臨界フィールド値がある近傍に入る臨界点のペアを削除する方法をとっていたが、臨界点の特徴量に応じて単純化する方法なども考えられる。

現在は、等値面を複数重ねて表示する際に、試行錯誤的に不透明度を決定したが、VST から得られる臨界等値面間のフィールド値の幅や包含関係を利用して、自動的に決定できると考えている。

さらに、データに応じて臨界等値面フィッティング、代表等値面フィッティングを切り替えることで、最良の可視化結果が得られると考えられる。

将来的には、臨界フィールド値を境界にもつ区間型ボリュームの表示 [3] や、臨界点を最も多く含む断面抽出など、よりボリュームデータの内部構造をはっきりととらえられるような可視化方法に VST を利用することを検討している。

謝辞: 本研究の一部は、日本学術振興会平成 13 年度科学研究費補助金基盤研究 (C)(2)13680401 によって実施されたものである。

参考文献

- [1] 中嶋 正之, 藤代 一成 (編著): コンピュータビジュアルプレゼンテーション, 共立出版, 2000 年 11 月, 第 3 章
- [2] 竹島 由里子, 高橋 成雄, 藤代 一成: 「ボリューム骨格抽出とその伝達関数設計への応用」, 画像電子学会 Visual Computing 情報処理学会グラフィクスと CAD の合同シンポジウム 2001 予稿集, 2001 年 6 月, pp. 79-84
- [3] I. Fujishiro, T. Azuma and Y. Takeshima and S. Takahashi: "Volume Data Mining Using 3D Field Topology Analysis," *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol. 20, no. 5, pp. 46-51, Sep./Oct. 2000.
- [4] G. M. Nielson and B. Hamann: "The Asymptotic Decider: Resolving the Ambiguity in Marching Cubes," *In Proc. IEEE Visualization '91*, Oct. 1991, pp. 83-91.
- [5] C. L. Bajaj, V. Pascucci and D. R. Schikore: "The Contour Spectrum," *In Proc. IEEE Visualization '97*, Oct. 1997, pp. 167-173.