藤代 一成^o (お茶の水女子大学), 高橋 成雄 (東京大学)
竹島 由里子, 大塚 理恵子 (お茶の水女子大学)

Volume Skeletonization and Fleshing

Issei FUJISHIRO, Shigeo TAKAHASHI, Yuriko TAKESHIMA, Rieko OTSUKA

ABSTRACT

This article presents the concept of *volume skeletonization and fleshing* as a generalized process of the traditional field value-dependent transfer function (TF) design. Volume skeletonization delineates the topological structure of a given volume dataset by means of a graph called *volume skeleton tree (VST)*, which consists of volumetric critical points and their connectivity. Both locations of critical points and their critical field values in the VST are then passed to the phase of volume fleshing to accentuate color and opacity more adaptively in the design of TFs for comprehensible volume rendering. Visually pleasing visualization results show the feasibility of the present approach as a *volume data mining* tool.

Keywords: Visual data mining, Volume visualization, Volume rendering, Transfer function

1 ボリ्यूムデータマイニング

種々の理工学問題に現れるボリ्यूムデータの構造を数学的手法に基づいて調査し、特徴的な変化をもつ部分を(半)自動的に特定することにより、ユーザをより高度な価値判断に専念させられるようなメカニズムを提供することを目的として、藤代は文献[1]で、ボリ्यूムデータマイニング (Volume Data Mining: VDM) の概念を提唱した。実際文献[2]では、ボリ्यूムフィールドの大局的な解析に微分位相幾何学的知見を利用したVDM方式を提案している。そこではまず、フィールド値の変化に伴い等値面がもつ位相の同値性が崩れるような臨界フィールド値 (Critical Field Value: CFV) がノードとして抽出され、同値な等値面をもつフィールド区間の位相を表現するレーブグラフをエッジの重みとするハイパーレーブグラフ (Hyper Reeb Graph: HRG) が構成される。そして、各CFVに対応する不透明度を相対的に僅かに上昇させるとともに、色相にも不連続性をもたせるように伝達関数 (transfer function: TF) を設計することにより、わかりやすいボリ्यूムレンダリング結果が生成される。

続いて文献[3]では、ボリ्यूムデータの新たな骨格抽出表現に基づくVDM方式を提案した。そこではHRGの代わりに、ボリ्यूムフィールドに関する等値面の位相変化をダイレクトにグラフ構造として表すボリ्यूム骨格木 (Volume Skeleton Tree: VST) が利用されている。VSTは、ボリ्यूムフィールド (4次

元曲面) が位相的に変化する4種類の臨界点 (critical point) とそれらの接続関係から構成される。VSTはHRGではとらえきれなかったボリ्यूムデータの大局的な特徴を効果的に表現できる利点をもっている。また位相的に正しいVSTを抽出する高速アルゴリズムが存在する。さらに、VSTによって記述された臨界等値面の包含関係を考慮し、内側のCFVほど不透明度を相対的に高く設定することで、ボリ्यूムレンダリングによる視線方向の遮蔽作用に対しても、強調効果が保持できるなど、HRGに基づく方式に較べてVDMツールとしての利用価値が一層高められている。

本稿では、与えられたボリ्यूムからVSTを抽出するボリ्यूム骨格化 (**volume skeletonization**) に続いて、CFVだけでなく、等値面の位相変化が生じている特異点周囲の構造も同時に強調するために、同一の等値面上でも、特異点からの距離に応じてTF値を制御するボリ्यूム肉付け (**volume fleshing**) とよばれる手法を提案する。フィールド値だけに依存して色や半透明度を決定していたTFを、ボリ्यूムの位相構造に関連した位置情報にも依存するように拡張的に定義することで、ボリ्यूムの骨格化と肉付けは、従来のTF設計の過程を汎化したことになる。フィールドだけでなく、フィールド導関数との組合せによって隣接マテリアル境界を強調したり、セグメンテーション効果を伴うようなTFの設計方式は、Kindlmannら[4]によって提案されているが、ボリ्यूム内の空間位置にも依存するようなTF設計法はまだ報告されていない。

2 実 例

次のような解析的ボリュームを例題として考える:

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

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

Fig. 1は, この例題ボリュームを $c = 0.6, d = 0.5, R = 0.2$ として作成し, 32^3 ボクセルを用いて離散化したものから, 文献 [3] で開発されたツールを利用して抽出された VST と, CFV 付近の等値面を描画したものである. 臨界点 $p_1, p_2 (w = 8c^2d^2 = 0.72)$ で 2つの等値面が現れ, $p_3, p_4 (w = 8c^2d^2 - 16R^2(c^2 + d^2 - 4R^2) = 0.432)$ でそれらが併合し, トーラスを形成していく. その後, $p_5 (w = -2(c^2 - d^2)^2 + 8R^2(c^2 + d^2 - R^2) = 0.1582)$ でトーラスの穴が塞がる様子がわかる.

Fig. 1 例題ボリュームの VST と臨界等値面

AVS ver. 5.1 を用いた可視化実験結果を Fig. 2 に示す. 同図 (a) は, 標準 TF (色: 色相に関して線形; 不透明度: 一定) を用いた結果である. 同図 (b) は, VST に記述された CFV を前節の方針に従って強調した TF であり, 同図 (c) がそれを用いて可視化した結果である. 同図 (a) と比較すれば, 対象内部の位相構造が強調されて格段にわかりやすく描画されていることがわかる. 特に, 外側のサブボリュームによって隠されている, 内部の 2つのクロワッサン状の等値面が, 階段状に不透明度 TF を定義したことによって, 視覚的に捕らえられている. 図 2(d) はさらに特異点の位置からの距離にも TF を依存させたボリューム肉付けの結果である. 対象ボリュームの内部構造の鮮明さが増している.

Fig. 2 例題ボリュームの可視化結果

3 今後の課題

前節で示した例題ボリュームの肉付けでは, AVS のボリュームレンダラが, TF としてフィールド値との対応表しか受理しないため, 与えられたボリュームの臨界等値面上のフィールド値を強制的に変更していることに注意されたい. この事実は単なるソフトウェアの整合処理にとどまらず, ボリューム肉付けを, 位相骨格に基づいたボリュームの平滑化 (fairing) に拡張可能なことを示唆している.

強調された TF を設計する際, CFV の特定だけでなく TF の形状を完全に自動設定するために, VST の構造にボリューム相関性等の統計情報も加味して, 各種パラメタ値を算出するという重要な課題が残されている.

参考文献

- [1] 藤代 一成:「ボリュームデータマイニング」, 可視化情報学会誌, **20 Suppl.**(1) (第 28 回可視化情報シンポジウム講演論文集), pp.161-162 (2000)
- [2] I. Fujishiro, T. Azuma, Y. Takeshima, and S. Takahashi: "Volume data mining using 3D field topology analysis," *IEEE CG&A*, **20**(5):46-51 (2000).
- [3] 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 合同シンポジウム 2001 予稿集 (2001)
- [4] G. Kindlmann and J. W. Durkin: "Semi-automatic generation of transfer functions for direct volume rendering," In *Proc. Symposium on Volume Visualization*, ACM SIGGRAPH, pp. 79-86, p. 170 (1998).