

ボリュームデータの位相構造に基づく自動断面生成

森 悠紀[†] 高橋 成雄^{††} 五十嵐 健夫^{†,†††}
竹島 由里子^{††††} 藤代 一成^{††††}

[†] 東京大学大学院情報理工学系研究科

^{††} 東京大学大学院新領域創成科学研究科

^{†††} 科学技術振興機構さきがけ

^{††††} 東北大学流体科学研究所

あらまし ボリュームデータの複雑な内部構造を視覚的に解析する手法の一つに断面の表示がある。内部構造を理解するためには、対象の特徴をよくとらえた断面を抽出することが必要である。しかし、既存システムの断面生成機能では、ユーザが経験や知識をもとに試行錯誤を繰り返して断面を指定するため、必ずしも特徴的な断面が得られているとはいえなかった。そこで本論文では、複数の特徴的な断面を自動的に提示する手法を提案する。本提案手法は、ボリュームデータにおける等値面の位相的な振舞いに着目することで、その特徴をとらえる断面を自動抽出し、その断面をユーザに効果的に提示する。さらに、実データに適用することで、提案手法の有効性を示す。

キーワード：ボリュームビジュアライゼーション，ボリュームデータマイニング，位相解析

Summary Cross-sectioning is one of the most commonly used methods for visualizing the complicated inner structures of three-dimensional volume datasets. However, the method usually requires a tedious trial-and-error process by users and thus often fails in finding characteristic cross-sections that capture the underlying inner structures. This paper presents a method for automatically generating characteristic cross-sections from a given volume dataset. The application of a graph structure called volume skeleton tree (VST) allows us to automatically extract such characteristic cross-sections by delineating the topological structure of the given volume. The feasibility of the proposed method is demonstrated using simulated and measured volume datasets.

Key words: Volume Visualization, Volume Data Mining, Topology Analysis

1. はじめに

ボリュームビジュアライゼーション (volume visualization) は、さまざまな科学分野において重要な役割を演じており、その応用範囲は地球物理学から生物や医学に至るまで広大である。ボリュームビジュアライゼーションの手法は、アプローチの違いから大きく2つに分類でき

る。ボリュームデータ全体を半透明な画像として表示するダイレクトボリュームレンダリング (DVR) と、断面、等値面、区間型ボリューム¹⁾などを用いて内部構造を幾何学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) である。可視化したいデータの構造が未知の場合には DVR を用いて概要を把握する手法^{2),3)}が用いられることが多いが、詳細を理解するためには IVR^{4),5)}が用いられることが多い。特に断面は、その部位の明確なフィールド値分布が得られるため、複雑な内部構造をもつようなボリュームデータを可視化するのに有効であり、ユーザに好まれる。実際、生物学の教科書や科学雑誌などでは、細かい内部の特徴をよく表すために断面が用いられている。3次元物体の内部構造を見たいときに断面を

“Automatic Cross-Sectioning based on 3D Field Topology Analysis” by Yuki MORI, (Department of Information Science, The University of Tokyo), Shigeo TAKAHASHI, (Department of Complexity Science and Engineering, The University of Tokyo), Takeo IGARASHI, (Department of Information Science, The University of Tokyo,) (JST PRESTO), Yuriko TAKESHIMA, and Issei FUJISHIRO, (Institute of Fluid Science, Tohoku University).

生成するという事は人間の感覚とも一致するため、断面を用いた研究が再び注目されてきている。しかし、既存システムの断面生成機能では、理想の断面を得るために多くのパラメタを微調整する必要があるため、経験や知識をもとに試行錯誤を繰り返さなければならず、効率的ではない。また、経験の浅いユーザが断面を生成する場合には、必ずしもポリウムデータの特徴を表す断面が得られるわけではない。

そこで、我々はポリウムデータの位相的特徴をよく表す断面を自動的に提示する手法を提案する^{6),7)}。ポリウムデータの位相的特徴を抽出するために、ポリウム骨格木 (Volume Skeleton Tree: VST)⁸⁾を利用する。VSTとは、ポリウムフィールドの等値面が位相的に変化する臨界点とそれらの接続関係から構成されるグラフである。この VST を用いてポリウムデータの位相解析を行うことで、ポリウムの位相的特徴をよく表すような断面が提示できると考えられる。ポリウムデータから位相的特徴を取り出す手法は他にも存在する⁹⁾⁻¹¹⁾が、計測データなどの場合、データにノイズが含まれるため局所的な臨界点が多数発生してしまう。そのため、大局的な位相特徴を保ったまま単純化が可能な VST を用いた。

本論文は以下のように構成されている。まず、次章で関連研究を紹介する。3章でポリウムデータから VST を抽出するアルゴリズムを簡単に説明し、4章でポリウム骨格木を用いて自動的に断面を抽出する手法と、断面の表示手法を述べる。提案手法の実データへの適用例を5章に示し、最後に、6章で本論文をまとめ、今後の課題にふれる。

2. 関連研究

大和田らにより提案されたシステム¹²⁾では、ユーザによって描かれた手書きストロークによって3次元物体が切断される。その際、断面の画像はテクスチャ合成の技術を用いて自動的に生成される。Hinckleyらは、脳神経外科で利用するための、両手デバイスを用いた可視化インタフェースを提案した¹³⁾。このインタフェースは2つのデバイスを用いて、一方をターゲットとするポリウムデータに、もう一方を切断したい平面にみため、これら进行操作することで断面を生成する。Viegaらが提案した、3次元の magic lenses¹⁴⁾では、ユーザがレンズポリウムを移動させると、そのレンズポリウムに含まれる部分の物体の見え目がインタラクティブに変化する。しかし、これらのシステムでは切断面の設定はユーザの手作業に依存しており、対象データの内部構造をユーザが把握していなければ、特徴をよく表す断面を設定することは難しい。提案手法では、ユーザの前提知識の有無に関

わらず、対象データの内部構造をよく表した断面を自動で提示できる。

本論文は、ポリウムの特徴を反映して物理的根拠のある可視化結果を提示するデータ中心 (data-centric) のアプローチといえる。このような研究に、ポリウムデータの特徴を強調するような伝達関数によるポリウムレンダリング表示^{3),8),15)}や、位相構造を利用した等値面の抽出^{10),16)}がある。また、区間型ポリウムの入れ子構造を正確に解析することによって区間型ポリウム分解器¹⁷⁾も実現されている。さらに、データ解析した結果から抽出した特徴点が最もよく見えるような視点方向を決定する研究¹⁸⁾もある。

3. ポリウム骨格化

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、ポリウムデータは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。フィールド値が大きい方から小さい方へ、フィールド値に関する等値面の変化を追うと、あるフィールド値において、等値面が位相的な変化を起こす点がみられる。このような点を臨界点 (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。臨界点は、等値面の生成、併合、分岐、消滅に対応して、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 (図1)。その中で、特に併合 (C_2) と分岐 (C_1) における変化は、等値面の空間における埋め込みを考慮に入れ、さらにそれぞれ図1に示される4つに分類することができる。VSTは、臨界点の種類と臨界フィールド値前後における等値面の位相変化を表した要素を組み合わせで構成される (図1)。VSTのリンクは、リンクの2つの端点に相当する等値面にはさまれた領域 (区間型ポリウム) を表している¹⁷⁾。文献19)では、ポリウムデータ

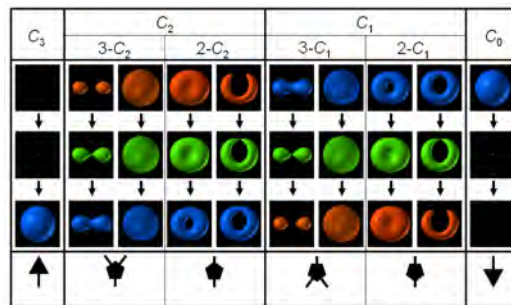


図1 臨界点における等値面の振舞いの分類と臨界点周りの VST の構成要素

Fig. 1 The connectivity of a critical point of each type in a volume skeleton tree.

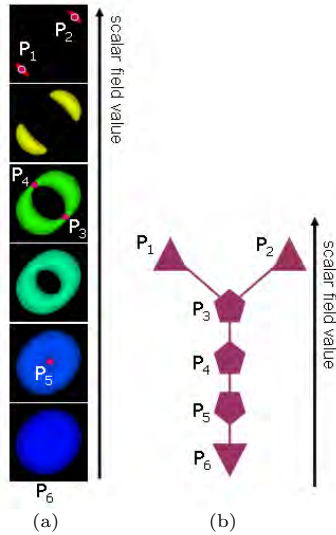


図2 解析的関数ポリウム (式 (1)) の位相解析: (a) 等値面の変化と臨界点; (b) 対応する VST

Fig. 2 Topological analysis of the analytic volume function in Eq. (1): (a) A change in isosurface and critical points; (b) The corresponding volume skeleton tree.

が満たすべき大域的な性質 (オイラーの公式) を保つように VST を抽出する頑健な手法が述べられており, 本研究でもこの手法を用いて VST を抽出していく。

説明のための例として, 次のような解析的データを考える:

$$\begin{aligned}
 f(x, y, z) = & 4c^2((x-R)^2 + (z-R)^2) \\
 & - ((x-R)^2 + y^2 + (z-R)^2 + c^2 - d^2)^2 \\
 & + 4c^2((x+R)^2 + (z+R)^2) \\
 & - ((x+R)^2 + y^2 + (z+R)^2 + c^2 - d^2)^2
 \end{aligned}$$

ただし, $0 < d < c, c^2 + d^2 \leq 6R^2$. (1)

この解析的データは中心を原点としたときに, y 軸に関して回転させたトーラスの陰関数表現を 2 つ重ね合わせて作成された関数であり, c, d, R の 3 つの定数はそれぞれトーラスの 2 つの半径とずらしたずれに対応する。たとえば, 式 (1) に $c = 0.6, d = 0.5, R = 0.2$ を代入して得られるポリウムデータは, 6 つの臨界点をもつ。ここで, 対応するフィールド値が大きいものほど, 臨界点 P_i の添え字が小さいとする。フィールド値にそってこのデータ内の等値面の位相変化を追うと (図 2(a)), P_1, P_2 で等値面が生じ, それらが P_3, P_4 で併合しトーラスになる。 P_5 でトーラスの穴が埋まり, P_6 で等値面が消滅する。 P_6 はオイラーの公式を満たすように導入された仮想極小点¹⁹⁾である。対応する VST は図 2(b) のように

表現される。計測データなどの場合, データにノイズが含まれるため局所的な臨界点が多数発生してしまい, ポリウムデータの重要な骨格をわかりにくくしてしまう。そこで, オイラーの公式を満たしながら局所的な臨界点を除去することで VST を単純化し, ポリウムデータの大域的な特徴を表す臨界点を求めていく¹⁹⁾。図 3 に, 単純化のプロセスで取り除く VST のパターンを示す。図中の黒丸は任意のタイプの臨界点とする。本論文では, 図 3 のパターンを満たす臨界点对のフィールド値の差があるしきい値以下になるものを削除した。単純化の手間は, 削除するフィールド値の差を指定するしきい値によって異なる。

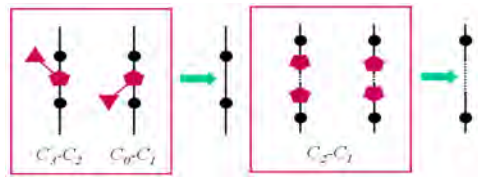


図3 単純化で削除される VST パターン

Fig. 3 VST patterns to be eliminated in the simplification process.

4. 断面生成

我々の基本的なアイデアは, VST を利用してポリウムデータの位相的な特徴をよく表す点群を抽出し, それらの点群に最も適合する平面でポリウムデータを切断しようというものである。例として, 図 2 に示した解析的データを考える。図 2(a) は, 解析的関数ポリウム (式 (1)) に対して複数の特徴的なフィールド値における等値面表示を適用することでその内部構造を可視化したものである。このデータの対応する VST が図 2(b) である。我々の目的は, 図 2(b) の VST から, 図 4 に示したようなこのデータの構造的な特徴をよく表す断面を生成

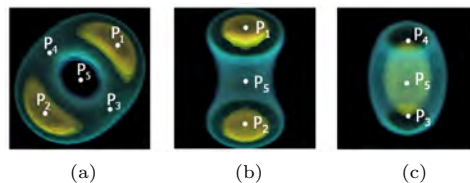


図4 解析的関数ポリウム (式 (1)) の断面例:(a) 多くの臨界点を通る断面; (b),(c) 対称軸を通るような断面

Fig. 4 Examples of cross-sections of the analytic function volume in Eq. (1): (a) A cross-section passing through many critical points; (b), (c) Cross-sections passing through axes of symmetry.

することである。このデータには対称軸が 3 本存在する。図 4 は、データの重心と 2 本の対称軸を通るような 3 通りの断面を示している。本章では、VST を用いてこのような断面を自動的に生成するアルゴリズムを説明する。

4.1 点群の抽出

VST に関連する点群として、我々は VST のノード (臨界点) に注目する手法と VST のリンク (区間型ボリューム) に注目する手法の 2 つを提案する⁷⁾。

- ノードに注目する手法

この手法では、臨界点群を点群として、主軸を求める。これにより、等値面の位相がまさに変化しようとしている断面を得ることができる。この断面を位相変化断面 (evolving cross-section) とよぶことにする。図 4 は式 (1) の解析的関数に対してこの手法で求めた断面である。図 4(a) は臨界点を一番多く含む断面であり、これをデフォルトの断面とする。図 4(b), (c) は次候補の断面である。この手法では、シミュレーションデータなどのように、位相が変化する点が特に重要であるデータに対して、有益な断面が生成できる。

- リンクに注目する手法

VST のリンクは臨界点を通る等値面によって囲まれた区間型ボリュームに対応する。そのためこの手法では、区間型ボリュームの重心に位置する点に対し、その体積に比例する重み付けを行い、その分布から主軸を求める。区間型ボリューム分解器 (Interval Volume Decomposer: IVD)¹⁷⁾ を用いて、ユーザが特に解析したい特徴に対応する区間型ボリュームだけを選択してから、主軸を計算することもできる。区間型ボリュームは、可視化したい特徴をとらえるための基本単位として有効である。従って、区間型ボリュームに注目することによって、歯のボリュームデータなどのように意味のある層ごとに分かれているデータに対して効果的な断面による解析を行うことができる。この手法で得られた断面を代表位相断面 (representative cross-section) とよぶことにする。

4.2 断面抽出

点群から平面を抽出する簡単な手法として、最小二乗法による平面抽出が利用できるが、この手法では平面は 1 つしか求まらない。3 次元空間で点群の分布に楕円体を適合させることを考えると、最小二乗法による平面は、楕円体の重心を通り、楕円体の主軸 3 本のうち、長い 2 本を含むような平面であると換言できる。そこで我々は、この楕円体の主軸 3 本のうちの 2 本を選択することで、

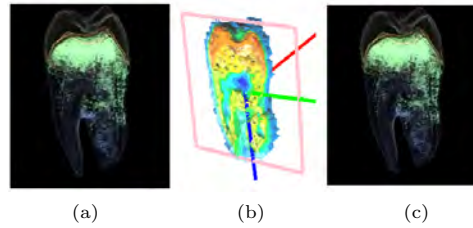


図 5 歯のボリュームデータにおける表示手法の比較: (a) 断面のレンダリング; (b) 等値面の切断表示; (c) 半空間のボリュームレンダリング

Fig. 5 Comparison of techniques for displaying the Tooth volume; (a) Volume-rendered image of cross-section; (b) Cutting off polygons; (c) Volume-rendered image of the dataset on the far side of the cutting plane.

3 通りの断面を生成する。

まず、 N 個の点 (x_i, y_i, z_i) の散らばりから主軸を求めるために、式 (2) のような共分散行列を考える。

$$\frac{1}{N} \sum_i \begin{pmatrix} (x_i - \bar{x})^2 & (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) & (x_i - \bar{x})(z_i - \bar{z}) \\ (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) & (y_i - \bar{y})^2 & (y_i - \bar{y})(z_i - \bar{z}) \\ (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) & (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) & (z_i - \bar{z})^2 \end{pmatrix} \quad (2)$$

ここで $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ は N 個の点の座標の平均とする。次にこの行列から、3 つの固有値と対応する固有ベクトルを計算する。この行列の固有ベクトルは楕円球の主軸ベクトルに、対応する固有値は楕円体の重心から外周までの主軸上での長さに対応する。求めた固有ベクトルのうち任意の 2 つの固有ベクトルを選択すると、点群の重心を通る平面が 3 つ作られる。デフォルトでは、対応する固有値が大きい 2 つの固有ベクトルを含むような平面を選択することで、点群になるべく多く適合する平面を採用する。さらに、ユーザは他の 2 つの平面も選択することができる。デフォルトの断面は、ユーザにとって必ずしも最良ではない場合もあるため、他の候補も選択できるということは重要である。

4.3 断面表示

自動的に抽出された断面を表示する手法としては、以下の 3 つを提案する。図 5 に歯の CT ボリュームデータ^{20), 21)} に対してそれぞれの表示手法を用いて位相変化断面のデフォルトの画像を表示した結果を示す。

- 断面のサンプリング表示

断面上のフィールド値を適当なカラー値に変換し、スクリーンに表示する手法である (図 5(a))。この表示手法では断面上の各点の厳密な値を見ることができ、断面の詳細な情報を得ることができる。

- 等値面の切断表示

各臨界点を通過する等値面をポリゴンで表現した後、

このポリゴンモデルを与えられた切断面で切断する手法である(図 5(b))。断面のサンプリング表示のような詳細な情報は得られないが、断面に対して視点と反対側にあるポリゴンを残しておくことにより、求まった断面がデータのどこに位置するかをユーザは容易に把握することができる。また、断面上に現れる等値面の輪郭線を選択することで、分解する区間型ポリウムを指定することもできる。これは VST の知識がないユーザが IVD を使用する際の支援にもつながると考えられる。たとえば、包含関係の内側にあるような区間型ポリウムを削除したいが VST とポリウムの対応関係がわからない、といった場合などに有効である。

● 半空間のポリウムレンダリング表示

求まった断面に対して視点と反対側の半空間をポリウムレンダリングによって積分投影させて表示する手法である(図 5(c))。この表示手法は厳密な断面表示ではないが、2次元の画像に2.5次元の情報を埋め込むことができるため、有意義な視覚効果が期待できる。図 5(a) と (c) を比較すると、図 5(c) では選択された断面よりも奥側も描くことで歯の根元の情報も得ることができている。

5. 実データへの適用

本断面抽出手法の有効性を検証するため、プロトタイプシステムを作成し、CT スキャンデータや、シミュレーションデータなどの実データを用いて実験を行った。それぞれのデータのフィールド値は、[0, 255] の 8bit に正規化されている。プロトタイプシステムは、PC(CPU: Pentium IV, 1.6GHz, RAM: 1GB) 上で動作させた。4.1 節で述べたように、断面を抽出するにあたり 2 つの手法を実験した。1 つは VST のノードに注目する手法であり、もう 1 つはリンクに注目する手法である。

5.1 歯の CT ポリウムデータ

最初に歯の CT ポリウムデータ(サイズ: 256 × 256 × 161, 16-bit)^{20),21)}に適用した。位相解析には間引きしたデータ(サイズ: 128 × 128 × 80 ボクセル, 8bit)を用いた。一般的に CT スキャンデータにはノイズが含まれているため、VST を適切なサイズになるまで単純化させる必要がある。単純化された VST から、臨界フィールド値とその区間の中央フィールド値に対応する代表等値面⁹⁾を求めると図 6(a) のようになる。単純化された VST は図 6(b) のようになる。歯は、医学的にエナメル質・象牙質・セメント質の 3 種類の硬組織と歯髄組織の 4 つの構成要素に分類できる。図 6 に示すように、VST では

このような歯の大局的な構造を正確にとらえていることがわかる。

このデータに本手法を適用した結果を図 7 に示す。図 7(a) は、位相構造を強調するような伝達関数⁸⁾でこのデータ全体をポリウムレンダリングした画像である。図 7(b) ~ (g) は提案手法で得られたデフォルトの断面を表示した結果である。位相変化断面を図 7(b) ~ (d) に、代表位相断面を図 7(e) ~ (g) に示す。断面をサンプリングしてポリウムレンダリングしたものを図 7(b),(e) に、得られた断面で等値面を切断する手法で表示した結果を図 7(c),(f) に、断面に対して奥側の半空間をポリウムレンダリングで積分投影したものを図 7(d),(g) に示す。ポリゴンの切断表示により、このデータがエナメル質・象牙質・セメント質・歯髄の 4 つの構成要素から成り立つことがわかる。また、位相変化断面に注目すると、断面のサンプリング表示では根元が描かれていないことがわかる。これは主要な臨界点が根元が存在する平面よりも手前に集まってしまうため、根元まで含んだ平面を得られないからである。それに対し、奥側半空間をポリウムレンダリング表示させた場合には根元まで描け表示することができている。さらに、このデータでは、区間型ポリウムを利用することで歯のセメント質の部分を考慮することができるので、代表位相断面では歯の根元まできちんと含んだ断面が得られている。自動生成された断面は、エナメル質・象牙質・セメント質・歯髄の 4 つの構成要素をもれなく含むような断面であることから提案手法の有効性がいえる。

計算時間を表 1 にまとめる。抽出された VST の単純化の時間には、手作業によるパラメタ調整の時間(74 秒)

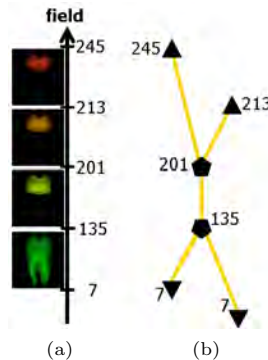


図 6 歯のポリウムデータの位相解析 (a) と対応する VST(b)

Fig. 6 National Library of Medicine (NLM) Tooth volume: (a) A change in isosurface and critical points; (b) The corresponding volume skeleton tree.

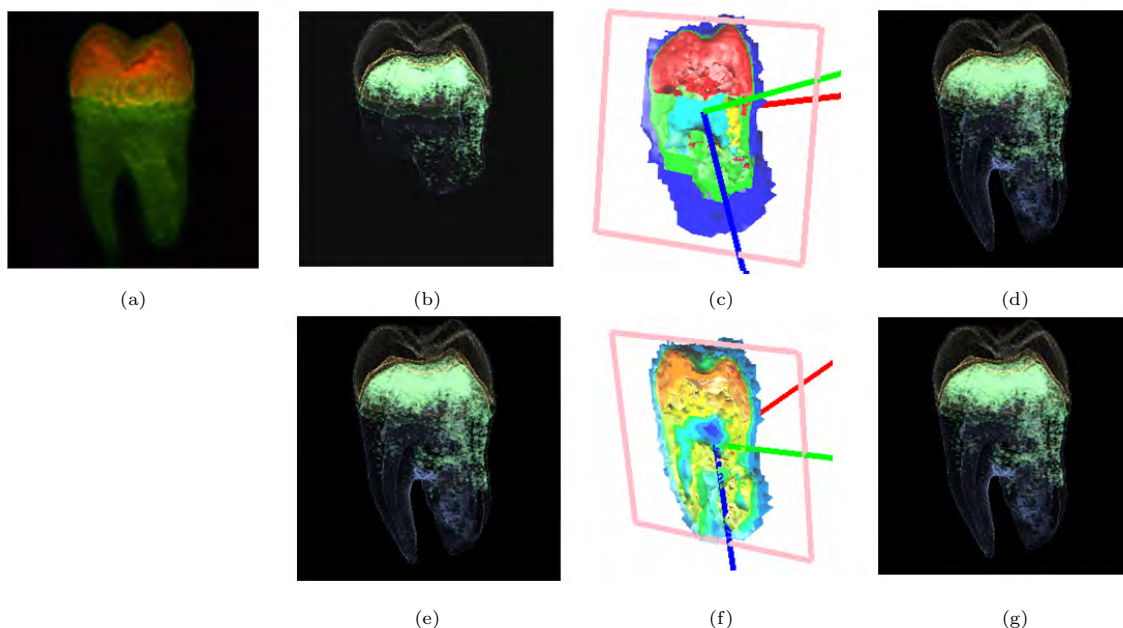


図 7 歯のポリウムデータによる可視化結果: (a) 位相強調伝達関数による全体のポリウムレンダリング; (b) 位相変化断面のサンプリング表示; (c) 位相変化断面による等値面の切断表示; (d) 位相変化断面から奥側半空間のポリウムレンダリング表示; (e) 代表位相断面のサンプリング表示; (f) 代表位相断面による等値面切断表示; (g) 代表位相断面から奥側半空間のポリウムレンダリング表示

Fig. 7 Visualization of the Tooth volume; (a)Volume-rendered image of a target dataset using a topologically-accentuated transfer function; (b)Volume-rendered image of the evolving cross-section; (c)Cutting off polygons by the evolving cross-section; (d)Volume-rendered image of the dataset on the far side of the evolving cross-section; (e)Volume-rendered image of the representative cross-section; (f)Cutting off polygons by the representative cross-section; (g)Volume-rendered image of the dataset on the far side of the representative cross-section.

を含む。位相解析 (臨界点抽出, VST の簡単化) は一度行えば同じデータに関しては再利用できるため、提案手法は実用的には問題はないといえる。

5.2 陽子と水素原子の衝突データ

次に、陽子と水素原子の衝突シミュレーションデータ²²⁾を用いて実験を行った。これは、陽子が水素原子に向かっ

て衝突する時系列データであり、衝突直後の時刻の 1 フレームのポリウムデータに対して断面を生成した。図 8 は、このデータに対して本手法を適用した結果である。このデータでは、臨界点と区間型ポリウムに着目したときの重心が同一平面上に現れるため、位相変化断面と代表位相断面はほぼ同一な結果が得られる。そのためここでは位相変化断面だけを示す。図 8(a) に位相構造を強調するような伝達関数でデータ全体をポリウムレンダリングした画像を示す。図 8(b) ~ (d) は提案手法で得られたデフォルトの位相変化断面である。断面のサンプリング表示を図 8(b) に、得られた断面による等値面の切断表示を図 8(c) に、半空間のポリウムレンダリング表示を図 8(d) に示す。VST により、陽子と水素原子が衝突した向きや、陽子の核の空間的な位置をとらえることができるため、本来のシミュレーションの際のセッティングに関する情報を使わずに、衝突している箇所を横切

表 1 歯のポリウムデータの計算時間

Table 1 Timings in Tooth volume dataset.

プロセス	時間 (単位: 秒)
臨界点抽出	32
抽出された VST の簡単化 (手作業によるパラメタ調整)	532 (74)
区間型ポリウムに分解したポリゴン表示	78
断面抽出の計算	0.7
断面のポリウムレンダリング (256 × 256 ピクセル)	7.3

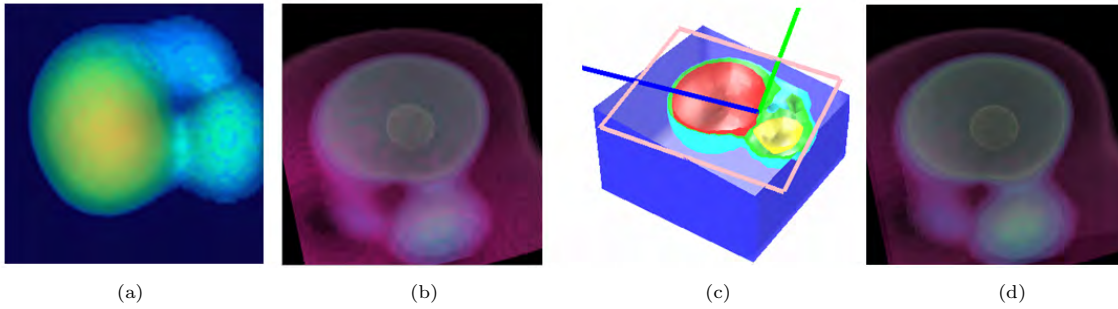


図 8 陽子と水素原子の衝突データによる可視化結果: (a) 位相強調伝達関数による全体のポリウムレンダリング; (b) 位相変化断面のサンプリング表示; (c) 位相変化断面による等値面切断表示; (d) 位相変化断面から奥側半空間のポリウムレンダリング表示

Fig. 8 Visualization of Hydrogen ion-atom collision: (a)Volume-rendered image of a target dataset using a topologically-accentuated transfer function; (b)Volume-rendered image of the evolving cross-section; (c)Cutting off polygons by the evolving cross-section; (d)Volume-rendered image of the dataset on the far side of the evolving cross-section.

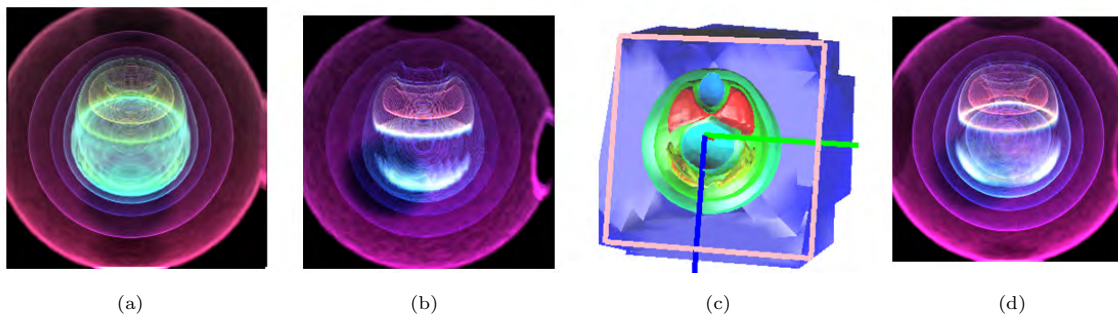


図 9 Nucleon データによる可視化結果: (a) 位相強調伝達関数による全体のポリウムレンダリング; (b) 位相変化断面のサンプリング表示; (c) 位相変化断面による等値面切断表示; (d) 位相変化断面から奥側半空間のポリウムレンダリング表示

Fig. 9 Visualization of the nucleon dataset: (a)Volume-rendered image of a target dataset using a topologically-accentuated transfer function; (b)Volume-rendered image of the evolving cross-section; (c)Cutting off polygons by the evolving cross-section; (d)Volume-rendered image of the dataset on the far side of the evolving cross-section.

る断面を抽出することが可能となっている。

5.3 Nucleon のデータ

最後に Nucleon のデータ²³⁾に本手法を適用した結果を図 9 に示す。これは、原子 ^{16}O 内の核子分布データで、サイズは $41 \times 41 \times 41$ である。このデータに関しても 5.2 節と同様に位相変化断面だけを示す。図 9(a) は、位相構造を強調するような伝達関数を用いて、このデータ全体をポリウムレンダリングした画像である。図 9(b) ~ (d) は提案手法で得られたデフォルトの断面であり、それぞれ、断面のサンプリング表示 (図 9(b))、得られた断面による等値面の切断表示 (図 9(c))、半空間のポリウムレンダリング表示 (図 9(d)) である。VST により、特徴的な等値面の包含関係を含めた入れ子構造を抽出する

ことができるため、包含関係の特徴を表すような断面が生成できている。

6. まとめと今後の課題

本論文では、位相構造に基づいてポリウムデータの特徴的な断面を自動的に複数生成する手法を提案した。さらに、その手法の有効性を検証するためにプロトタイプを実装し、さまざまなデータによる実験を行った。既存のシステムによる特徴的な断面の生成は、ユーザの知識や経験に基づいて完全に手動で行われていた。本提案手法を用いることにより、このプロセスを自動化することが可能となった。

今後は、ノードに注目する手法とリンクに注目する手

法の違いをさらに詳細に分析する予定である。また、曲面の抽出も検討しているほか、ボリュームデータの内部構造解析として、芯線抽出や対称性を用いた他の断面生成手法も検討している。サーフェスデータなどのデータにも対応可能となるような拡張も検討している。さらに、専門家によって抽出された断面と本システムでの自動抽出断面の比較・評価を行いたい。より使いやすくするために、ユーザインタフェースデザインを改良することも検討中である。

本研究の一部は、平成 18 年度科学研究費補助金基盤研究 (B)18300026 の援助によって実施されたものである。

参考文献

- 1) I. Fujishiro, Y. Maeda, H. Sato, and Y. Takeshima, "Volumetric Data Exploration Using Interval Volume," *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol.2, no.2, pp.144-155, 1996.
- 2) T. He, L. Hong, A. Kaufman, and H. Pfister, "Generation of Transfer Functions with Stochastic Search Techniques," *Proceedings of IEEE Visualization '96*, pp.227-234, 1996.
- 3) S. Castro, A. König, H. Löffelmann, and E. Gröller, "Transfer Function Specification for the Visualization of Medical Data," *Technical Report TR-186-2-98-12*, Vienna University of Technology, 1998.
- 4) W. Lorensen and H. Cline, "Marching Cubes: A High Resolution 3D Surface Construction Algorithm," *Computer Graphics Vol.21, No.4*, pp.163-169, 1987.
- 5) C. Lyness, and E. Blake, "Real Time Isosurface Browsing," *Proceedings of the 1st International Conference on Computer Graphics, Virtual Reality and Visualization*, pp.143-146, 2001.
- 6) Y. Mori, S. Takahashi, T. Igarashi, Y. Takeshima, and I. Fujishiro, "Automatic Cross-Sectioning based on Topological Volume Skeletonization," *Proceedings of Smart-Graphics 2005*, pp.175-184, 2005.
- 7) 森 悠紀, 高橋 成雄, 五十嵐 健夫, 竹島 由里子, 藤代 一成: 「位相構造に基づく自動断面生成」, *Visual Computing / グラフィクスと CAD 合同シンポジウム 2005 予稿集*, pp.45-50, 2005 年.
- 8) S. Takahashi, Y. Takeshima, and I. Fujishiro, "Topological Volume Skeletonization and its Application to Transfer Function Design," *Graphical Models*, vol.66, no.1, pp.22-49, 2004.
- 9) I. Itoh, Y. Yamaguchi, and K. Koyamada, "Fast Isosurface Generation Using the Volume Thinning Algorithm," *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol.7, no.1, pp.32-46, 2001.
- 10) C.L. Bajaj, V. Pascucci, and D.R. Schikore, "The Contour Spectrum," *Proceedings of IEEE Visualization '97*, pp.167-173, 1997.
- 11) H. Carr, J. Snoeyink, and U. Axen, "Computing Contour Trees in All Dimensions," *Computational Geometry*, vol.24, no.2, pp.75-94, 2003.
- 12) S. Owada, F. Nielsen, M. Okabe, and T. Igarashi, "Volumetric Illustration: Designing 3D Models with Internal Textures," *ACM Transactions on Graphics*, vol.23, no.3, (Proceedings of SIGGRAPH2004), pp.322-328, 2004.
- 13) K. Hinckley, R. Pausch, D. Proffitt, and N. Kassell, "Two-Handed Virtual Manipulation," *ACM Transactions on Computer-Human Interaction (TOCHI)*, vol.5, no.3, pp.260-302, 1998.
- 14) J. Viegas, M.J. Conway, G. Williams, and R. Pausch, "3D Magic Lenses," *Proceedings of the 9th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp.51-58, 1996.
- 15) S. Fang, T. Biddlecome, and M. Tuceryan, "Image-based transfer function design for data exploration," *Proceedings of IEEE Visualization'98*, ACM Press, pp.319-326, 1998.
- 16) 徳永 百重, 竹島 由里子, 高橋 成雄, 藤代 一成: 「位相解析に基づくボリュームビジュアライゼーションの高度化」, *画像電子学会誌*, Vol. 32, No. 4, pp.418-427. 2003 年.
- 17) S. Takahashi, I. Fujishiro, and Y. Takeshima, "Interval Volume Decomposer: A Topological Approach to Volume Traversal," *Proceedings of SPIE Conference on Visualization and Data Analysis 2005*, SPIE Vol. 5669, pp. 103-114, 2005.
- 18) S. Takahashi, I. Fujishiro, Y. Takeshima, and T. Nishita, "A Feature-Driven Approach to Locating Optimal Viewpoints for Volume Visualization," *Proceedings of IEEE Visualization 2005*, IEEE Computer Society Press, pp. 495-502, 2005.
- 19) S. Takahashi, G.M. Nielson, Y. Takeshima, and I. Fujishiro, "Topological Volume Skeletonization Using Adaptive Tetrahedralization," *Proceedings of Geometric Modeling and Processing 2004*, pp.227-236, 2004.
- 20) H. Pfister, B. Lorensen, C. Bajaj, G. Kindlmann, W. Schroeder, L.S. Avila, K. Martin, R. Machiraju, and J. Lee, "The Transfer Function Bake-off," *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol.21, no.3, pp.16-22, 2001.
- 21) T. Woo, The National Library of Medicine, the National Institutes of Health. Web Page [<http://www.nlm.nih.gov/>].
- 22) R. Suzuki, H. Sato, and M. Kimura, "Antiproton-Hydrogen Atom Collision at Intermediate Energy," *IEEE Computing in Science and Engineering*, vol.4, no.6, pp.24-33, 2002.
- 23) M. Meibner: Web Page [<http://www.volvis.org/>].

(2006 年 2 月 3 日受付)

森 悠 紀



平 17, お茶の水女子大学・理学部・情報科学科卒, 同年, 東京大学大学院情報理工学系研究科修士課程入学, 現在, 在学中. コンピュータグラフィックス, ユーザインタフェースに興味をもつ. ACM, 情報処理学会各学生会員.

高 橋 成 雄



平 9, 東京大学理学系研究科情報科学専攻博士課程修了. 理学博士. 同年群馬大学工学部助手. 同大学総合情報処理センター助教授, 東京大学大学院総合文化研究科助教授を経て, 平 17, 東京大学大学院新領域創成科学研究科複雑理工学専攻助教授. コンピュータグラフィックス, 幾何形状モデリング, ポリウムビジュアライゼーション, 地理情報システムに関する研究に従事. IEEE CS, ACM, Eurographics, 情報処理学会, 電子

情報通信学会, 可視化情報学会各会員.

五十嵐 健 夫



平成 12, 東京大学大学院工学系研究科博士課程終了. 博士 (工学). 東京大学大学院情報理工学系研究科コンピュータ科学専攻講師を経て, 平成 17 より助教授. ユーザインタフェース, インタラクティブコンピュータグラフィックスに関する研究に従事. ACM, 情報処理学会各会員.

竹 島 由 里 子



平 11, お茶の水女子大学大学院人間文化研究科博士課程修了. 博士 (理学). お茶の水女子大学大学院人間文化研究科助手, 東北大学流体科学研究所助手, 日本原子力研究所博士研究員を経て, 平成 17 年より東北大学流体科学研究所助手. ポリウムビジュアライゼーションに関する研究に従事. IEEE CS, ACM, 情報処理学会, 可視化情報学会各会員.

藤 代 一 成 (正会員)



昭 60, 筑波大学大学院・博士課程工学研究科・修士号取得退学. 同年, 東京大学助手, 昭 63, 筑波大学助手, 平元, 同講師, 平 3, お茶の水女子大学助教授, 平 10, 同教授を経て, 平 16 より東北大学流体科学研究所教, 平 18 より同大学院情報科学研究科兼任, 現在に至る. 可視化全般に関する研究に従事. 理学博士. 本学会副会長. 可視化情報学会社員. IEEE CS, ACM, Eurographics, 情報処理学会, 日本バーチャルリアリティ学会, 日本計算工学会, 日本機械学会各会員.