

位相構造に基づくボリュームの自動断面生成

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

^{††}東京大学 / JST PRESTO

[‡]東北大学

概要

ボリュームデータの複雑な内部構造を解析する技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、既存の断面生成システムでは、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。ボリュームデータにおける等値面の位相的な振る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、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

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。代表的なボリュームビジュアライゼーションの技法としては、ボリュームの等値面表示、ボリュームレンダリング、断面表示がある。

等値面表示は、よく利用される可視化技法である。1枚の等値面からは選択された部位の情報しか確認できないが、複数の等値面を見ることで、ボリュームデータ全体を把握できるようになることを利用した研究が多くなされている。Lyness らは、リアルタイムでスカラー値を変化させて等値面をブラウジングできる手法を提案した[1]。伊藤らは、極値グラフを用いて、等値面を効率的に伝播する手法を提案した[2]。

また、与えられたデータ全体を半透明に表示するボリュームレンダリングも、可視化技法として広く利用されている。特にデータを色や不透明度などの光学的データに変換する伝達関数の設計は注目されている研

究分野である。これらはアプローチの違いから、結果画像の視覚的評価に基づいて伝達関数を選択する画像中心 (image-centric) のアプローチ[3,4]と、ボリュームの特徴を反映して物理的根拠のある伝達関数を決定するデータ中心 (data-centric) のアプローチ[5,6,7]に分類でき、これまでに多くの半自動的な設計法が提案されている。ところが、ボリュームの特徴を強調するような伝達関数でボリュームレンダリングをした結果画像であっても、ボリューム全体を直感的に見せることはできるが、データの各点の厳密な値を見せることができない。

それに対して断面は、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生成するということ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。

大和田らにより提案されたシステム[8]は、ボリュームイラストレーションのデザインとブラウジングのためのツールである。ユーザはこのシステムで3次元モデルを切断し、内部構造を断面のテクスチャとしてブラウジングできる。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[9]。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ボリュームデータに、もう一方を切断したい平面にみため、これらを実行することで断面を生成する。Viega らは、3次元の magic lenses を提案した[10]。ユーザがレンズボリュームを移動させると、交わる物体の見え目がインタラクティブに変化する。また、Diepstraten らは、地図の断面図を描く手法を提案しており、この手法ではフレームレートを一定にするために最新のグラフィックスハードウェアが用いられている[11]。しかし、これらの既存システムでは、理想の断面を得るために多くのパラメー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、必ずしも断面上にボリュームデータの特徴が得られるわけではない。そこで、我々はボリュー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。ボリュームデータの位相的特徴を抽出するために、ボリューム骨格木

Topologically-Based Automatic Cross-Sectioning of Volume Data

Yuki Mori[†], Shigeo Takahashi[†], Takeo Igarashi^{††}, Yuriko Takeshima[‡], Issei Fujishiro[‡]

[†]The University of Tokyo, ^{††}The University of Tokyo / JST PRESTO, [‡]Tohoku University

(Volume Skeleton Tree: VST)[12]を利用する．VSTとはボリュー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を用いてボリュームデータの位相解析を行うことで，ボリュームの位相的特徴をよく表すような断面が自動で提示できる．

本論文は以下のように構成されている．まず，次節でボリュームデータからVSTを抽出するアルゴリズムを簡単に説明し，3節でボリューム骨格木を用いて自動で断面を生成する手法と，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4節に示し，最後に，5節で本論文をまとめ，今後の課題にふれる．

2 ボリューム骨格化

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，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．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見られる．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)の四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に示される四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て構成される(図1)．VSTのリンクは区間型ボリューム[13]を表している．文献[14]では，ボリュームデータが満たすべき大局的な性質(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．

ここで，次のような解析的データを考える：

$$\begin{aligned}
 f(x, y, z) = & 4c^2((x-R)^2 + (z-R)^2) \\
 & -((x-R)^2 + y^2 + (z-R)^2 + c^2 - d^2)^2 \quad (1) \\
 & + 4c^2((x+R)^2 + (x+R)^2) \\
 & -((x+R)^2 + y^2 + (z+R)^2 + c^2 - d^2)^2
 \end{aligned}$$

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

このデータは，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

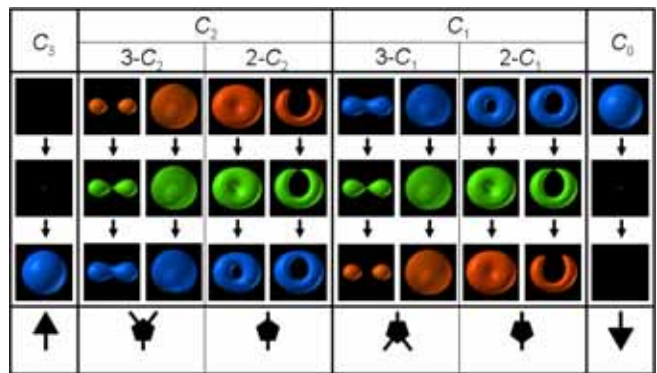


図1: 臨界点における等値面の振舞いの分類と臨界点周りのVSTの構成要素

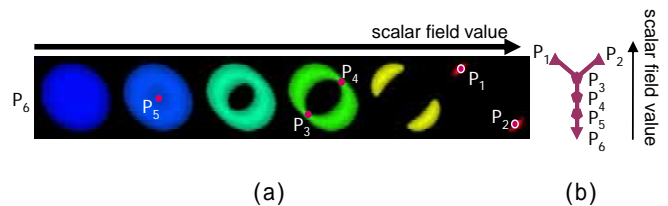


図2: 解析的関数ボリューム(式(1))の位相解析: (a) 等値面の変化と臨界点; (b) 対応するVST

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．

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，ボリュームデータの重要な骨格をわかりにくくしてしまう．そこで局所的な臨界点を除去することでVSTを単純化し，ボリュームデータの大局的な特徴を表す臨界点を求めていく[14]．

3 断面生成

我々の基本的なアイデアは，VSTを利用してボリュー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ボリュームデータを切断しようというものである．例えば，前節の図2に示した解析的データを考える．我々の目的は，図3に

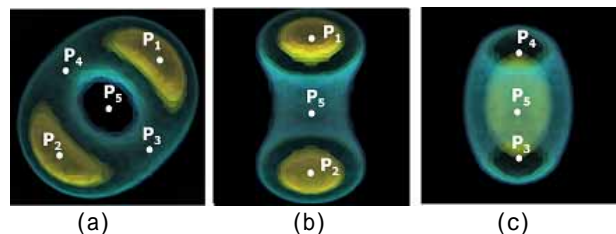


図3: 解析的関数ボリューム(式(1))の断面例

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3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。本節では、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。

3.1 断面抽出手法

点群から平面を生成する簡単な手法としては、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、任意の2本を選択することで断面の候補を複数提示する。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。

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

$\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ は N 個の点の座標の平均。

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。

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つを考える。

● ノードに注目する手法

この手法では、臨界点群を先にあげた点群として、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(evolutionary cross-section)とよぶ。図3は式(2)の解析的関数に対してこの手法で求めた断面である。図3(a)はデフォルトの断面

であり、図3(b), (c)は次候補の断面である。また、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のリンクは等値面の連結成分をスカラー値に関して掃引し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)[13]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り、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っ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。

3.2 断面表示手法

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つを実験した。図4に歯のCTボリュームデータ[15, 16]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4(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。

● ポリゴン切断表示

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

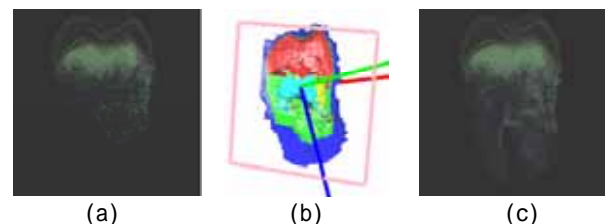


図4: 歯のボリュームデータにおける表示手法の比較:
(a) 断面のレンダリング; (b) ポリゴン切断表示;
(c) 半空間のボリュームレンダリング

手法である(図4(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，求め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，分解する区間型ボリュー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ボリュームを削除するために選択したいが，VSTとボリュームの対応関係がわからない場合などに有効である．

● 半空間のボリュームレンダリング表示

求めた断面に対して視点と反対側の半空間をボリュー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4(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4(a)と(c)を比較すると，図4(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．

4 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，通常のPC(CPU: Pentium IV, 1.6GHz, RAM: 1GB)上で動作させた．

3.1項で述べたように，断面を計算するにあたり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．

4.1 歯のCTボリュームデータ

最初に歯のCTボリュームデータ(サイズ: 256×256×161, 16-bit)[15,16]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，2節で述べた手法を用いて，VSTを適切な数のノードとリンク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[12]を求めると図5(a)のようになる．単純化されたVSTは図5(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5に示すように，VSTではこのような歯の大局的な構造を精確にとらえていることがわかる．

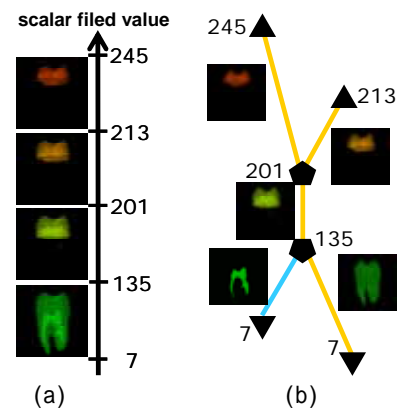


図5: 歯のデータの位相解析(a)と対応するVST(b)

このデータに本手法を適用した結果を図6に示す．図6(a)は，位相構造を強調するような伝達関数[12]でこのデータ全体をボリュームレンダリングした画像である．図6(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6(b)～(d)に，代表位相断面を図6(e)～(f)に示す．ポリゴンモデルを切断する手法で表示した結果を図6(b),(e)に，断面をサンプリングしてボリュームレンダリングしたものを図6(c),(f)に，断面に対して奥側の半空間をボリュームレンダリングで積分投影したものを図6(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が，奥側半空間をボリュームレンダリング表示させることで根元まで描け，より多くの情報を得ることができている．さらに，このデータでは区間型ボリュームに注目することで歯のセメント質の部分に着目できるので代表位相断面では歯の根元まできちんと描ける断面が得られていることがわかる．

4.2 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[17]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，衝突する瞬間の時刻の1フレームのボリュームデータに対して断面を生成した．

図7は，このデータを用いて本手法を実験した結果である．このデータのようにシミュレーションデータに関しては，臨界点と区間型ボリュームに着目したときの重心が一致する場所に現れるため，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7(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ボリュームレンダリングした画像を示す．図7(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。ポリゴン切断表示を図 7(b)に、断面のサンプリング表示を図 7(c)に、半空間のポリウムレンダリング表示を図 7(d) に示す。VST により、陽子と水素原子が衝突する点や、陽子の核の空間的な位置をとらえることができるため、特徴をとらえた断面が生成できている。

4.3 Nucleon のデータ

最後にNucleonのデータ[18] を用いて実験した結果を図 8 に示す。これは、原子¹⁶O内の核子分布データで、サイズは 41×41×41 である。このデータに関して 4.2 項と同様に位相変化断面だけを示す。

図 8(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 8(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、ポリゴン切断表示(図 8(b))、断面のサンプリング表示(図 8(c))、半空間のポリウムレンダリング表示(図 8(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、いずれの手法もそれらをよく表すような断面が生成できている。

5 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で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。本研究の手法を用いることにより、自動化することが可能となり、ユーザが必要とする断面を効率的に生成することができた。

今後は、ノードに注目する手法とリンクに着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、曲面での抽出も検討しているほか、ポリウ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、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を行う。さらに、ユーザインタフェースデザインも改良することを検討中である。

参考文献

1. Lyness, C. and Blake, E.: Real Time Isosurface Browsing. *Proceedings of the 1st International Conference on Computer Graphics, Virtual Reality and Visualization*, (2001), 143-146.
2. Itoh, T. and Koyamada, K.: Automatic Isosurface Propagation Using an Extrema Graph and Sorted Boundary Cell Lists. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, **1**(4), (1995), 319-327.
3. He, T., Hong, L., Kaufman, A. and Pfister, H.: Generation of Transfer Functions with Stochastic Search Techniques. *Proceedings of IEEE Visualization '96*, (1996), 227-234.
4. Marks, J. et al.: Design Galleries: A General Approach to Setting Parameters for Computer Graphics and Animation. *Computer Graphics (Proceedings of Siggraph 97)*, (1997), 389-400.
5. Castro, S., König, A., Löffelmann, H. and Gröller, E.: Transfer Function Specification for the Visualization of Medical Data. Technical Report TR-186-2-98-12, Vienna University of Technology, (1998).
6. Fang, S., Biddlecome, T. and Tuceryan, M.: Image-Based Transfer Function Design for Data Exploration. *Proceedings of IEEE Visualization '98*, (1998), 319-326.
7. G. Kindlman and J.W. Durkin. Semi-Automatic Generation of Transfer Functions for Direct Volume Rendering. *Proceedings of 1998 IEEE Symposium on Volume Visualization*, (1998), 79-86.
8. Owada, S., Nielsen, F., Okabe, M. and Igarashi, T.: Volumetric Illustration: Designing 3D Models with Internal Textures. *ACM Transactions on Graphics*, **23**(3), (Proceedings of SIGGRAPH2004), (2004), 322-328.
9. Hinckley, K., Pausch, R., Proffitt, D. and Kassell, N.: Two-Handed Virtual Manipulation. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction (TOCHI)*, **5**(3), (1998), 260-302.
10. Viega, J., Conway, M. J., Williams, G. and Pausch, R.: 3D Magic Lenses. *Proceedings of the 9th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, (1996), 51-58.
11. Diepstraten, J., Weiskopf, D. and Ertl, T.: Interactive cutaway illustrations. *Computer Graphics Forum*, **25**(4), (Proceedings of Eurographics 2003), (2003), 523-532.
12. Takahashi, S., Takeshima, Y. and Fujishiro, I.: Topological Volume Skeletonization and its Application to Transfer Function Design. *Graphical Models*, **66**(1), (2004), 22-49.
13. Takahashi, S., Fujishiro, I. and Takeshima, Y.: Interval Volume Decomposer: A Topological Approach to Volume Traversal. to Appear in *Proceedings of SPIE Conference on Visualization and Data Analysis 2005*, (2005).
14. Takahashi, S., Nielson, G. M., Takeshima, Y. And Fujishiro, I.: Topological Volume Skeletonization Using Adaptive Tetrahedralization. *Proceedings of Geometric Modeling and Processing 2004*, (2004), 227-236.
15. Pfister, H., Lorensen, B., Bajaj, C., Kindlmann, G., Schroeder, W., Avila, L. S., Martin, K., Machiraju, R. and Lee, J.: The Transfer Function Bake-off. *Computer Graphics and Applications*, **21**(3), (2001), 16-22.
16. Woo, T.: The National Library of Medicine, the National Institutes of Health.
17. Fujishiro, I., Maeda, Y., Sato, H. And Takeshima, Y.: Volumetric Data Exploration Using Interval Volume. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, **2**(2), (1996), 144-155.
18. MEIBNER, M.

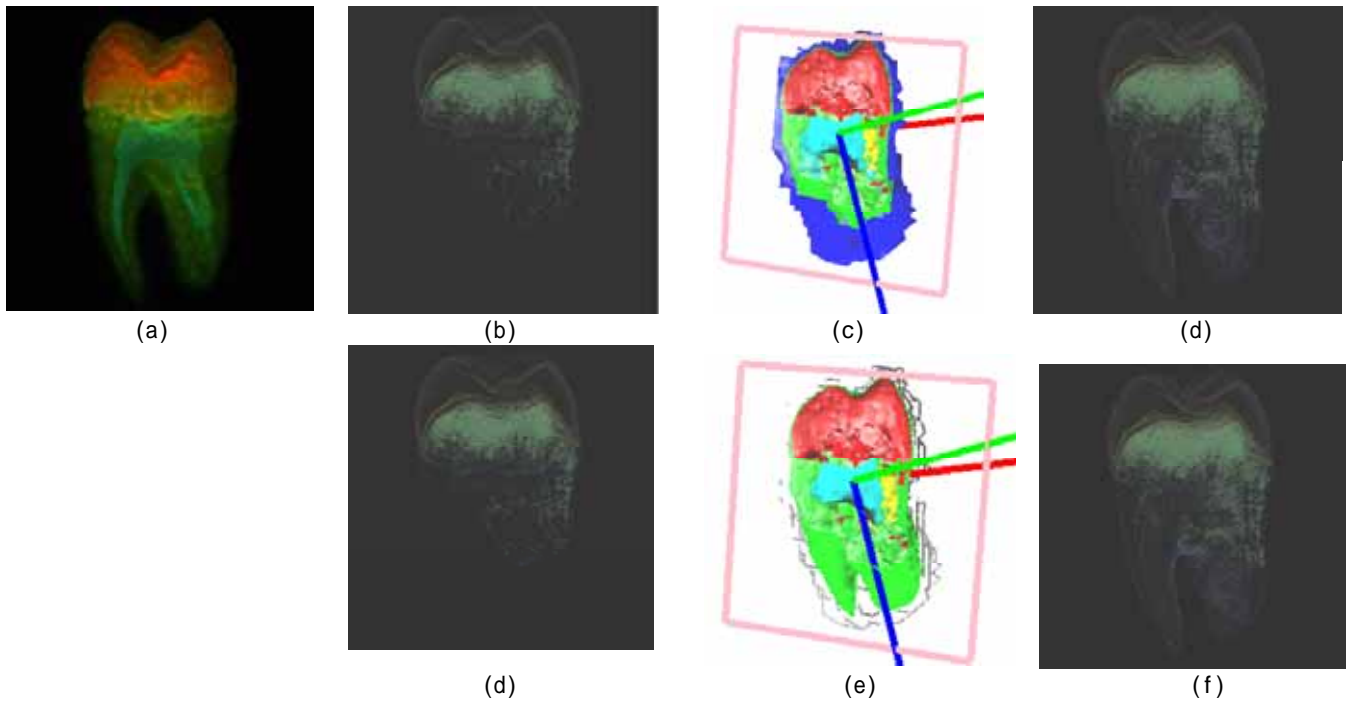


図 6: National Library of Medicine の tooth データによる可視化結果: (a) 位相強調伝達関数による全体のボリュームレンダリング; (b) 位相変化断面のサンプリング表示; (c) 位相変化断面のポリゴン切断表示; (d) 位相変化断面から奥側半空間のボリュームレンダリング表示; (e) 代表位相断面のサンプリング表示; (f) 代表位相断面のポリゴン切断表示; (g) 代表位相断面から奥側半空間のボリュームレンダリング表示

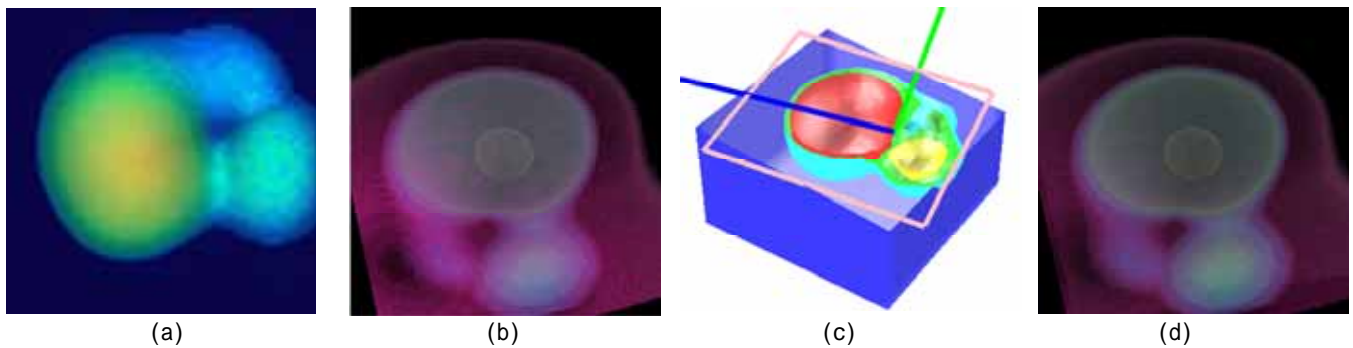


図 7: 陽子と水素原子の衝突シミュレーションデータによる可視化結果: (a) 位相強調伝達関数による全体のボリュームレンダリング; (b) 位相変化断面のポリゴン切断表示; (c) 位相変化断面のサンプリング表示; (d) 位相変化断面から奥側半空間のボリュームレンダリング表示

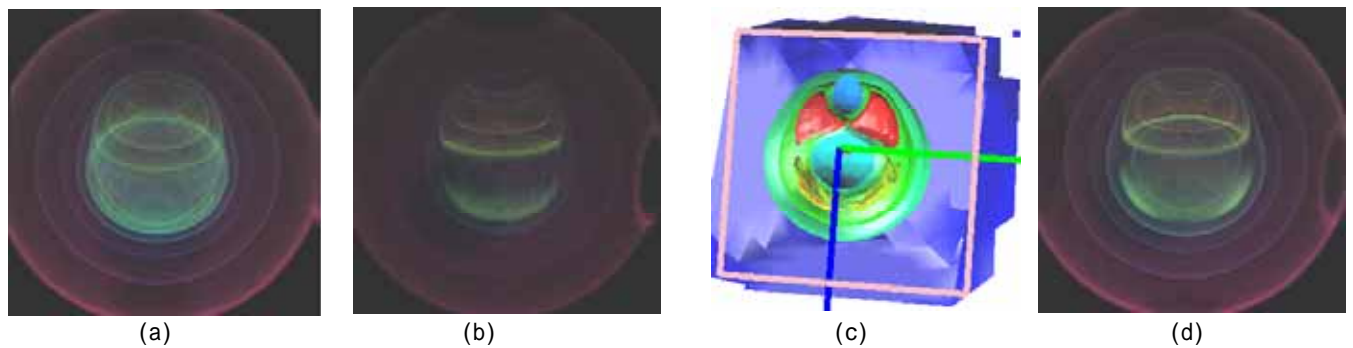


図 8: nucleon データによる可視化結果: (a) 位相強調伝達関数による全体のボリュームレンダリング; (b) 位相変化断面のポリゴン切断表示; (c) 位相変化断面のサンプリング表示; (d) 位相変化断面から奥側半空間のボリュームレンダリング表示