

位相属性を用いた多次元伝達関数設計

竹島 由里子[†] 高橋 成雄^{††} 藤代 一成[†]

近年の多次元伝達関数設計手法の発展により、微分や曲率など、スカラー値以外の種々の局所特徴を考慮に入れたポリウム可視化画像を効果的に生成できるようになった。しかし実際の可視化においては、データに関する既知の大局的な構造を手がかりに、特定の目的を持ってポリウムデータの可視化を行うことがしばしばである。そこで本論文では、新たに位相属性を導入して、このような観察者の目的に応じたポリウム可視化を行うための枠組みを提案する。これらの位相属性は、ポリウムデータのレベルセットグラフから計算されるものであり、多次元伝達関数の変数として今までに用いられてきた局所特徴と異なり、ポリウムの大局的な構造をもとらえることが可能である。導入された位相属性を用いることで、ポリウムデータに内在する等値面の入れ子構造、位相変化の構造、位相の型変化などを強調することができる。さらに、位相属性と対応する伝達関数設計例を示し、シミュレーションデータに適用することにより、本手法の有効性を検証する。

Design of Multi-dimensional Transfer Functions with Topological Attributes

YURIKO TAKESHIMA,[†] SHIGEO TAKAHASHI^{††} and ISSEI FUJISHIRO[†]

Recent developments in the design of multi-dimensional transfer functions allow us to generate comprehensible visualization images of given volumes by taking into account the local features such as differentials and curvatures. In actual situations, however, observers usually exploit their knowledge about the global structures as the clues to the effective control of visualization parameters for their own specific purposes. This paper therefore presents an objective-based framework for visualizing volume datasets by introducing a new set of topological attributes. These topological attributes are calculated from the level-set graph of a given volume dataset, and thus differ from the conventional local attributes in that they also illuminates the global structure of the volume. The present framework provides a systematic means of emphasizing the underlying volume features such as nested structures of isosurfaces, configuration of the isosurface trajectories, and transitions of isosurface topological type. Topological attributes together with the associated transfer function designs are devised and applied to real simulated datasets in order to demonstrate the feasibility of the present framework.

1. 背景と目的

シミュレーションや医用画像などから生成されるポリウムデータは、近年の計算機や計測機器の発達により、ますます大規模化してきている。このようなデータを効果的に解析する手段として、可視化が広く用いられている。なかでもポリウムデータ全体を半透明な画像として表示するポリウムレンダリングは代表的な可視化技法の1つである。ポリウムレンダリングで得られる可視化画像が持つ情報量は、各ボクセルに与えられたスカラー値を色や不透明度に変換する

伝達関数に大きく依存することが知られている。そこで、より多くの情報量を持つ画像を作成するために、与えられたポリウムデータの特徴を考慮して伝達関数を設計する研究が広く行われてきた¹⁾。

従来はスカラーフィールド値(以下、スカラー値とよぶ)だけに依存した1次元伝達関数が主流であったが、近年では新たな属性を導入した多次元伝達関数を利用する方法も提案されている。このように、スカラー値以外の特徴を表す属性を多次元伝達関数に導入することによって、同一スカラー値を持ちながら異なる特徴を持つ領域を区別して強調した可視化結果を得ることが可能となった。これまでに、多次元伝達関数の新たな属性として、勾配²⁾、方向微分³⁾、曲率^{4),5)}などの形状特徴を用いる研究がなされてきたが、これらの属性はいずれも局所的な特徴を表現しているにすぎない。その

[†] 東北大学
Tohoku University

^{††} 東京大学
The University of Tokyo

ため、これらを用いてポリウムデータ内部に潜む大域的な構造をとらえることは困難である。しかし実際には、与えられたデータに関する既知の大域的特徴を手がかりに、ポリウムデータの内部構造を解析していくことも少なくない。たとえば、シミュレーションの制約条件から得られるデータの大域的な振舞いを利用して、データに内在する構造を解析する場合などがあげられる。このようなデータの解析を可視化を用いて効果的に実現するためには、データの局所的な特徴と同時に大域的な構造を表す属性を多次元伝達関数に導入する必要がある。

本論文では、ポリウムデータの局所的な特徴および大域的な構造を表す位相属性 (topological attributes) に着目し、それらを変数とする多次元伝達関数の設計法を提案する^{6),7)}。具体的には、等値面の入れ子の深さを表す入れ子レベル、スカラ値に関する等値面の位相変化の軌道距離を表す等値面軌道距離、等値面の穴の数を表す種数の3つの位相属性を多次元伝達関数に導入していく。入れ子レベルは、同一スカラ値を持ち、入れ子構造になっている等値面成分を効果的に区別し、外側の等値面成分に覆われている内側の等値面成分を明確に強調することを可能にする。また、等値面軌道距離は、その積分値をとることで、エネルギー分布を求めるシミュレーションデータなどで生じるポリウムデータ全体を覆う等値面成分を取り除くことができる。さらに種数は、複雑な現象が生じている場所を特定するのに役立つ。なぜならば、一般に複数の原因で複雑な相互作用が起きている領域の等値面成分では、トラス状の穴が生じることが多いことからである。これらの現象は従来の1次元伝達関数では効果的に強調することができないが、さまざまなデータで頻繁に生じるため、本論文ではこの3つの位相属性に着目する。各ボクセルにおける位相属性値は、スカラ値に関する等値面の位相変化を抽象化したポリウム骨格木 (Volume Skeleton Tree: VST)⁸⁾ から計算される。VSTは、ポリウムデータのレベルセットグラフの1つであり、局所的な特徴である臨界点 (critical points) をノードとして持ち、その大域的な接続関係をリンクとして表現する。そのため、VSTは局所の特徴と大域的構造の両方の情報をあわせ持っており、そこから得られる位相属性値もまた、ポリウムデータの局所の特徴だけでなく、大域的構造をも効果的に表現できる。

本論文は、以下のように構成される。次章で、伝達関数設計の関連研究を示す。3章で、位相属性値を計算するための基礎となるVSTについて説明し、4章で、

VSTから位相属性値を計算する方法を述べる。5章で、具体的なシミュレーションデータを用い、位相属性を変数とする多次元伝達関数の設計例を示し、本手法の有効性を検証する。最後に、6章で結論を述べ、今後の課題に言及する。

2. 関連研究

与えられたポリウムデータの内部構造をポリウムレンダリングを用いて可視化するには、適切な伝達関数の設計が重要になってくる。近年、ポリウムデータの特徴を利用して伝達関数を設計するさまざまな方法が提案されてきている。

Castroら⁹⁾は、骨や皮膚、筋肉のような異なった部位ごとに基底関数を割り当て、その線形和を用いることで、医用に特化した伝達関数を定式化した。Kindlmannら¹⁰⁾は、スカラ値とその1次方向微分、2次方向微分の関係を表したヒストグラムポリウムを用いて、異なる材質間の境界を強調して表示する方法を提案した。

近年では、Levoy²⁾が1988年に提案した多次元伝達関数が改めて注目されてきている。多次元伝達関数は、スカラ値以外の属性も伝達関数の変数とすることができるため、同一スカラ値を持ちながら、異なる特徴に対応する領域が区別することができる。Knissら³⁾は、Kindlmannら¹⁰⁾の方法をもとに方向微分を変数とする3次元伝達関数を設計した。さらに、Hladůvkaら⁴⁾は、多次元伝達関数の新たな属性としてポリウム曲率を用いた。Kindlmannら⁵⁾は、曲率を属性とする多次元伝達関数を用いたポリウムレンダリングと、ノンフォトリアリスティックレンダリングなどの異なるレンダリング手法を組み合わせることで、曲率の変化をより強調した可視化結果を生成する手法を提案している。

これらの方法は、医用データのように材質によって勾配や曲率が変化するデータでは、材質境界が強調されるため効果的であるが、シミュレーションデータのようにスカラ値の勾配がなだらかなときは、勾配や曲率などの局所特徴を強調しても、分かりやすい可視化結果を得ることができない場合がある。これは、勾配や曲率などの局所的な情報だけでは、入力データの大域的な構造を把握できないからである。Fujishiroら¹¹⁾⁻¹³⁾やWeberら¹⁴⁾は、等値面位相変化の位置を示す方法を提案しているが、位相変化周辺の局所的な特徴だけを用いており、その等値面に付随する大域的な接続性を考慮していない。

Takahashiらの伝達関数設計アプローチ⁸⁾は、入力

ボリュームデータから等値面の位相変化を取り出すことにより、局所的な特徴を保持しながら、効率的に大局的構造を強調することが可能である。これまでに、徳永らは、大局的構造の1つである入れ子構造を強調する手法を提案した¹⁵⁾。この手法では、個別に強調したい特徴を異なるスカラ値区間に割り当てて作成した、重要度マップとよばれる参照ボリュームを利用するレンダリング方式を採用している。しかし、重要度マップは、対象ボリュームデータと同じメモリ容量を必要とし、さらに強調する特徴部分を解像度の低いスカラ値区間に変換するため、レンダリング時のエイリアシングを避けることができない。提案手法では、多次元伝達関数を用いることで、参照ボリュームである重要度マップの作成を不要にし、入力データのスカラ値に関する解像度を直接利用することにより、エイリアシングを回避することができる。また、本論文では、入れ子構造以外の位相属性も新たに多次元伝達関数に導入する。

3. Volume Skeleton Tree (VST)

本論文では、多次元伝達関数に導入する位相属性を得るために、ボリュームデータの位相構造を位相的ボリューム骨格化 (topological volume skeletonization) を用いて抽出する。位相的ボリューム骨格化により、局所的な特徴および大局的な構造を表す位相属性の抽出が可能である。なお、具体的な位相的ボリューム骨格化アルゴリズムについては、文献 16) を参照されたい。

位相的ボリューム骨格化では、スカラ場に関する等値面の位相変化を、ボリューム骨格木 (Volume Skeleton Tree: VST) とよばれるレベルセットグラフを用いて表現する。図 1 に VST の例を示す。VST のノードは臨界点に対応し、等値面が結合や分裂などの位相変化を起こす位置を表す。等値面が複数の連結成分を持つとき、個々の連結成分を等値面成分とよぶことにすると、臨界点の接続性を表すリンクは、対応するスカラ値区間に属する等値面成分がトレースするサブボリュームを表している。ここで、ボリュームデータのすべてのボクセルは、VST 上の点と必ず対応しており、その対応関係は VST の内部情報として保持されている¹⁶⁾。以下、本論文では、等値面の位相変化をスカラ値が減少する方向に追うものとする。

VST では、各臨界点はすべて単純 (非退化) な臨界点として求まる。そのため、臨界点は、新たな等値面が生じる極大点 (C_3)、等値面が結合する鞍点 (C_2)、等値面が分裂する鞍点 (C_1)、存在する等値面が消滅

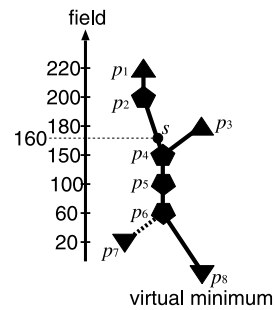


図 1 VST の例

Fig. 1 An example of the VST.

する極小点 (C_0) の 4 つに分類することができる。 C_2 の鞍点はさらに、2 つの等値面成分が結合して 1 つの等値面になるもの ($3-C_2$) と、1 つの等値面成分内部で局所的な結合が生じ、ドーナツ状の穴が開くもの ($2-C_2$) に分類される。同様に、 C_1 の鞍点も、1 つの等値面成分が分裂して 2 つの等値面成分になるもの ($3-C_1$) と、1 つの等値面成分のドーナツ状の穴が閉じるもの ($2-C_1$) に分類される。

等値面成分は、内部のボクセルが外部よりも大きなスカラ値を持つ中実 (solid) 等値面と、内部のボクセルが外部よりも小さなスカラ値を持つ中空 (hollow) 等値面の 2 種類に分類できる。ここで、スカラ値に関して中実 (中空) 等値面が中空 (中実) 等値面に変化するのは、そのスカラ値において等値面が結合または分裂するとき、すなわち、位相が変化しているときに限られるため、必ず臨界点が存在する。よって、VST の各リンクは、対応するスカラ値区間における等値面成分が中実等値面からなる中実なリンクと、中空等値面からなる中空なリンクの 2 タイプに分類できる。

図 2 に、各臨界点における等値面の位相変化を示す。以後、本論文では、各タイプの臨界点を最下段の記号を用いて表し、中実なリンクを実線、中空なリンクを破線で表す。臨界点のタイプおよびリンクのタイプの組合せのうち、実際に等値面の変化として存在する組合せは、図 2 に示すものに限定される。ただし、文献 8) にならい、ボリューム境界のすべてのボクセルは仮想極小点 (virtual minimum) に接続しているものと仮定すると、仮想極小点に接続するリンクはほかの C_0 のリンクと異なり中実等値面となる。

一般的に、VST を含めレベルセットグラフは、データのノイズなどの影響を受けやすく、高周波成分に対応する重要度の低い多数の臨界点を拾ってしまうことがある。そこで、得られた VST の各リンクに重みを割り当て、その重み値の小さいリンクを削除することで VST を簡単化していき、ボリュームデータの大局

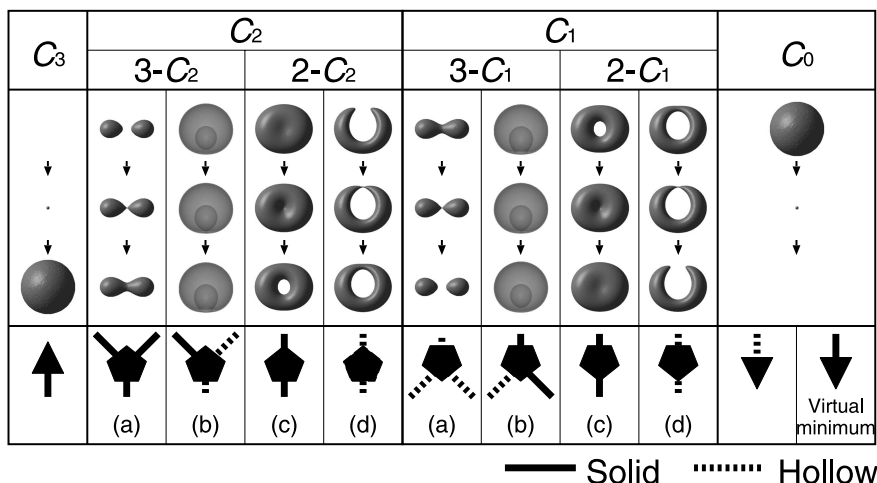


図 2 VST における臨界点のタイプとその接続性
 Fig. 2 The types of critical points and their connectivities in the VST.

的な構造を反映した VST を抽出していく。詳細は、文献 16) を参照されたい。

なお、本論文では、一般性を失うことなく、スカラ値が小さくなるにつれ、一番外側の等値面が拡大していくものと仮定する。

4. 位相属性の導出

本論文では、ボリュームデータの局所的な特徴だけでなく、大局的な構造をも反映した可視化結果を生成するために、3つの位相属性を多次元伝達関数に導入する。ここでは、位相的特徴を表す位相属性として、等値面の入れ子構造を強調するための入れ子レベル、等値面変化の構造を考慮するための等値面軌道距離、等値面の穴の数を表す等値面種数に着目する。これらの位相属性はそれぞれ、同一スカラ値を持ちながら入れ子構造になっている内側の等値面成分の振舞いを明確にし、データ全体を覆う等値面成分を効果的に取り除き、複数の原因からなる複雑な現象を特定することができる。これらの位相属性は、さまざまなデータで特に頻繁に生じると考えられるこれらの現象を効果的に強調することができる。本章では、前章で抽出した VST から各ボクセルにおける位相属性値を計算する方法を示す。以下、具体例として図 1 に示す VST を用いて説明する。

4.1 入れ子レベル

ボリュームデータの中には、個別に強調したい等値面成分が同一スカラ値を持ち、さらにそれらが入れ子になっている場合がある。このとき、このような入れ子構造は局所的な属性から判別することは困難であり、ボリュームデータにおける代表的な大局的構造の 1 つ

であるといえる。しかしながら、一般的に用いられている伝達関数はスカラ値だけに依存するために、内側と外側の等値面成分に同一の色および不透明度を割り当ててしまい、結果としてこれらを個別に強調することができない。そこで本論文では、位相属性の 1 つとして、あるスカラ値における各等値面成分の入れ子の深さを入れ子レベル (inclusion level) として定義する。この入れ子レベルを多次元伝達関数の変数とすることで、内側の等値面成分の不透明度を外部の等値面成分とは独立に設定でき、内側の等値面成分だけを効果的に強調することが可能となる。

実際、入れ子レベルは、VST を走査することで計算可能である。図 2 から明らかとなっており、等値面の入れ子構造は、必ず $C_2(b)$, $C_1(b)$ で示した等値面変化において生じており、それ以外のタイプで生じることはない。このことから、VST において $C_2(b)$, $C_1(b)$ のタイプの臨界点が特定できれば、入れ子構造を検出できることが分かる。また、図 2 から、各臨界点のタイプは、接続するリンクが中実または中空のいずれであるかが分かれば、一意に決定することができる。リンクのタイプは、仮想極小点に接続するリンクのタイプが中実であることが明らかであるので、このリンクから順に VST を走査することで、すべて特定することが可能である¹⁷⁾。

図 1 の VST を走査すると、臨界点 p_6 が $C_1(b)$ のタイプとなり、スカラ値区間 $[20, 60]$ においてリンク $\overline{p_6 p_8}$ に対応する等値面成分がリンク $\overline{p_6 p_7}$ に対応する等値面成分を包含していることが分かる。一番外側の等値面成分の入れ子レベルを 0 とすると、リンク $\overline{p_6 p_8}$ に属するボクセルの入れ子レベルは 0 となり、リンク

$\overline{p_6 p_7}$ では 1 となる。

4.2 等値面軌道距離と積分

スカラ場に関して等値面成分が変化していくとき、任意の 2 つの等値面成分の距離を、等値面成分が遷移するときに描く軌道の長さとして表すものとする。本論文では、軌道の長さの尺度として対象データのスカラ値を用い、VST における最短経路の長さを等値面軌道距離 (isosurface-trajectory distance) とよぶ。ここで、ある等値面成分に対応する VST 上の点を s 、もう一方の点を q としたとき、 s から q までの等値面軌道距離を $D(s, q)$ として定義する。

たとえば、図 1 の VST においてリンク $\overline{p_2 p_4}$ 上のスカラ値 160 の等値面成分に対応する点 s が選択されている場合、等値面成分 s と臨界点 p_2 の等値面軌道距離 $D(s, p_2)$ は、 p_2 と s のスカラ値の差 ($200 - 160 = 40$) となる。等値面成分 s から臨界点 p_3 の等値面軌道距離 $D(s, p_3)$ は、VST 上の最短経路が $s - p_4 - p_3$ となることから、 s と p_4 のスカラ値の差 ($160 - 150 = 10$) と p_4 と p_3 のスカラ値の差 ($180 - 150 = 30$) の和 ($10 + 30 = 40$) となる。同様に、等値面成分 s から各臨界点までの等値面軌道距離を求めると、 $D(s, p_1) = 60$ 、 $D(s, p_5) = 50$ 、 $D(s, p_6) = 100$ 、 $D(s, p_7) = 140$ となる。

等値面軌道距離は、その積分をとることで、スカラ値に関して等値面が位相変化するときの、その変化軌道のバランスに関する情報をも提供することができる。等値面成分における VST のバランスは、対応する VST 上の点を s とし、VST 上の任意の点 t をくまなくサンプリングしたときの等値面軌道距離 $D(s, t)$ の積分として計算される。これを新たな位相属性とし、等値面軌道積分 (integral of isosurface-trajectory distance) とよぶことにする。この値が最小であるとき、その等値面成分は任意の等値面成分までの距離の和が最小になるため、与えられたデータの位相変化の中心であると考えられる。この位相属性は、たとえば波動関数データのように、ある特定の等値面がデータ全体を覆う場合に有効に利用することができる。これは、この値の最小値として求められる等値面軌道の中心が、上記の現象におけるすべての構造を覆い隠す膨張した等値面にほぼ対応することが経験的に分かっているためである。このことから、データ全体を覆う等値面成分に対応するスカラ値がある場合には、等値面軌道積分の値が小さいものほど不透明度を低く設定すればよい。

VST 上の任意の点 p における等値面軌道積分 $I(p)$

は、 G を VST 上の任意の点を表す変数の定義域とすると、

$$I(p) = \int_{q \in G} D(p, q) dG \quad (1)$$

となる。実際には、VST 上のサンプリング点の集合 Q を用いて、

$$I(p) = \sum_{q \in Q} D(p, q) \quad (2)$$

と近似して計算していく。ここで、サンプリングはスカラ値に関して等間隔に行うものとする。

この位相属性の考え方は、Osada ら¹⁸⁾ が提案している曲面上の任意の 2 点間の距離のヒストグラム、さらには Hilaga ら¹⁹⁾ が提案している曲面上の測地線距離の積分を拡張した概念である。

仮に、仮想極小点のスカラ値を 0 として、図 1 の VST 上にスカラ値 10 ごとにサンプル点をとることにすると、各臨界点における等値面軌道積分は、 $I(p_1) = 3540$ 、 $I(p_2) = 3000$ 、 $I(p_3) = 2780$ 、 $I(p_4) = 2000$ 、 $I(p_5) = 1800$ 、 $I(p_6) = 2000$ 、 $I(p_7) = 3000$ 、 $I(p_8) = 3080$ となる。

なお、等値面軌道距離および等値面軌道積分の値は、その等値面成分に対応するボクセルにそれぞれ割り当てられる。ただし、等値面軌道距離では、あらかじめ始点となる等値面成分を選択しておく必要がある。

4.3 等値面の種数

等値面成分の位相特徴の 1 つとして、曲面上のトラスの穴の数である種数があげられる。等値面におけるこの種数の変化は、あるボリューム特徴に対応することがある。たとえば、複数の原因からなる複雑な相互作用が起きている領域では、トラスの穴が多数生じる場合が多く、種数を用いてそれらの領域を強調することも可能である。そこで、位相属性として等値面の種数 (isosurface genus) を導入する。等値面の種数は、実際には VST を構築する際に一緒に求められるため¹⁶⁾、特別に新たな計算を必要としない。ここで、VST の各臨界点はすべて単純 (非退化) な臨界点として求められていることから、各臨界点における等値面成分の種数変化は、大きくても 1 となる。実際には、等値面の種数が変化するケースは、図 2 から明らかのように $2-C_2$ 、 $2-C_1$ の場合だけであり、図 1 の例では、リンク $\overline{p_2 p_4}$ 、 $\overline{p_4 p_5}$ で種数が 1 となる。

5. 多次元伝達関数設計

本章では、ボリュームデータが持つ局所的および大局的な構造を効果的に強調するために、前章で定義した位相属性を多次元伝達関数に導入し、その設計方針

を示す．まずはじめに，スカラ値だけを変数とする 1 次元伝達関数をどのように設計するかを述べた後，位相属性を変数とする多次元伝達関数の設計法を実際のデータに適用することで，本手法の有効性を検証する．

5.1 スカラ値に関する伝達関数設計の基本方針

まず基本方針として，ボリュームデータ内の等値面の位相変化を強調するように，スカラ値だけに依存する 1 次元伝達関数を設計する^{8),11),12)}．実際には，等値面の位相構造の大局的な変化は，VST のノードに対応する臨界点で生じるため，その臨界点に対応するスカラ値である臨界スカラ値 (critical field value) を用いて，位相構造を強調するように伝達関数を設計すればよい．

我々の実装では，スカラ場を 8 ビット整数値 $[0, 255]$ に量子化し，仮想極小点のスカラ値を 0 とする．以下，与えられたボリュームデータが $m + 1$ 個の臨界スカラ値を持つ場合，それぞれの臨界スカラ値を降順に c_0, c_1, \dots, c_m とおく．

まず，色相伝達関数は，図 3 (a) に示すように，HSV 六角錐の $[0, 2\pi]$ を用い，各臨界スカラ値に挟まれるスカラ値区間 $[c_{i+1}, c_i]$ ($i = 0, \dots, m - 1$) が同じ色相幅を持ち，色相の値が各スカラ値区間ごとに線形に減少していくものとする．これにより，スカラ場に対して位相が急激に変化している領域では色相も急激に変化し，位相が緩やかに変化している領域では色相も緩やかに変化するように，色を割り当てることができる．

次に，不透明度伝達関数では，臨界スカラ値で挟まれるスカラ値区間 $[c_{i+1}, c_i]$ ($i = 0, \dots, m - 1$) の中央値を，代表スカラ値 (representative field value) $r_i = (c_{i+1} + c_i)/2$ ($i = 0, \dots, m - 1$) として定義し，この代表スカラ値群 r_0, \dots, r_{m-1} に対応する代表等値面 (representative isosurface) を強調する．具体的には，代表等値面を個別に強調するために，代表スカラ値 r_0, \dots, r_{m-1} 付近ではハット関数とし，そのほかでは不透明度を 0 とする．我々の設定では，スカラ値が小さくなるにつれ一番外側の中実な等値面が膨張するため， r_0 から r_{m-1} におけるハットの高さを一定量ずつ減少させて，内側にある等値面が，外側にある等値面を通して見えるように工夫をしている．

以下，スカラ値に加えて位相属性を用いることで，ここで説明した不透明度伝達関数がどのように拡張できるかについて，個々の実データを用いて説明していく．なお，いずれも色相伝達関数には先に述べた基本方針に基づいた 1 次元色相伝達関数を用いている．

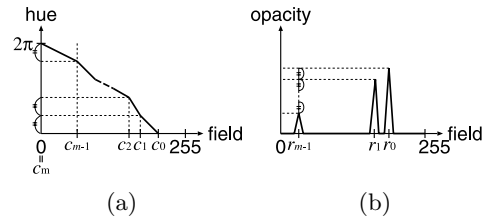


図 3 1 次元伝達関数の基本設計方針：(a) 色伝達関数；(b) 不透明度伝達関数

Fig. 3 Basic design principle for 1D transfer functions (TFs): (a) Color and (b) opacity TFs.

5.2 入れ子レベル：レーザ核融合における爆縮シミュレーション

同一スカラ値から抽出される等値面成分が入れ子構造を持つとき，外側に存在する等値面成分が内側の等値面成分を覆ってしまうため，スカラ値だけに依存する 1 次元伝達関数では，入れ子構造の内部を明確に可視化することはたいへん困難であった．しかし，ボリュームデータによっては，入れ子構造の内部が重要な意味を持つ場合がある．

図 4 は，レーザ核融合の爆縮シミュレーションによって得られた，ある特定時刻の質量密度データ²⁰⁾の可視化結果である．この質量密度データの等値面は，燃料とプッシャーの接触面を表しており，あるスカラ値区間では，複数の等値面成分のうち 1 つの等値面成分がそのほかの等値面成分を包含していることが知られている．このとき外側の等値面成分は燃料とプッシャーの作用・反作用によって生じる不要な面であり，観察者の主たる興味の対象は内側の等値面成分だけである．

図 4 (a) に，爆縮シミュレーションデータの VST を示す．リンクの横の数字は対応するリンクの入れ子レベルを表している．この VST は，簡単化が施されており，爆縮データの大局的な構造を効果的に表現している．VST を走査すると， p_2 が C_1 (b) のタイプの臨界点となり，スカラ値区間 $[14, 176]$ において，入れ子構造が生じていることが分かる．まず，1 次元不透明度伝達関数を用いて位相構造を強調してボリュームレンダリングした結果を図 4 (b) に示す．図から，位相構造の変化を強調してボリュームレンダリングを行っても，外側の球状の等値面成分が全体を覆っているため，実際に観察したい入れ子構造の内部が見えにくいという問題が生じている．これに対し，図 4 (c) のようにスカラ値に加え，入れ子レベルを変数とする 2 次元伝達関数を用いて，外側に存在する等値面成分の不透明度を低くしながら内側を高くすると，先の例では観察できなかった内部構造を明瞭に可視化することが

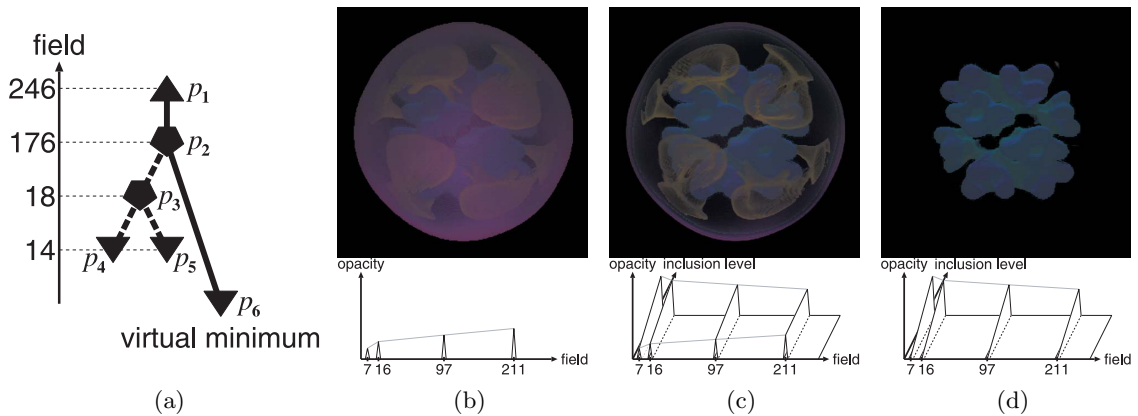


図4 レーザ核融合爆縮データの VST および可視化結果とその伝達関数：(a) VST；(b) 1 次元不透明度伝達関数を用いて位相構造を強調；(c) 2 次元不透明度伝達関数を用いて入れ子構造を強調；(d) 2 次元不透明度伝達関数を用いて入れ子の内部構造だけを描写

Fig. 4 Visualizing simulated dataset for implosion in laser fusion: (a) The corresponding VST, (b) accentuating topological structures with 1D opacity TF, (c) emphasizing nested structure with 2D opacity TF and (d) rendering only inner structures with 2D opacity TF.

できる．ここで，中実等値面はスカラ値が小さくなるにつれ膨張し，中空等値面は縮小することから，中実なリンクに対してはスカラ値が小さくなるにつれて不透明度を小さくし，中空なリンクに対してはスカラ値が小さくなるにつれて不透明度を大きく設定している．

さらに，図 4(d) のように，入れ子レベルが 0 のとき不透明度が 0 になるように不透明度伝達関数を制御すれば，入れ子構造の内部だけを取り出すことができる．このように，入れ子レベルを利用することで，主たる興味の対象であった入れ子構造の内側の部分だけを強調して可視化することが可能となる．

5.3 等値面軌道積分：HIPIP

ボリュームデータの中には，等値面の生成と消滅が，スカラ値に関して対称に近い構造を持つものが存在する．このようなデータでは，スカラ値が変化することによって小さな等値面群が順次結合して 1 つになり，ある値を境にその等値面が膨張して内側に小さな等値面群を内包し，内包された等値面が徐々に分裂・消滅するという現象が起きている．この現象は，エネルギー分布を求めるシミュレーションデータなどでよく見られるが，膨張した等値面に対して高い不透明度を与えてしまうと，興味の対象となる等値面成分の生成・消滅に関する振舞いが膨張した等値面成分に覆い隠されてしまい，うまく可視化できないことが多い．しかし，等値面軌道積分によって，この問題を効果的に解決することができる．なぜなら，この値の最小値として求められる等値面軌道の中心が，上記の現象におけるす

べての構造を覆い隠す膨張した等値面にほぼ対応するからである．言い換えると，等値面軌道積分の中心付近の不透明度を低く抑えれば，ボリュームデータ全体を覆うボクセルを取り除いて，等値面の生成や消滅を明瞭に可視化できる．

たとえば，図 5 に示す High Potential Iron Protein (HIPIP) の波動関数データは，正と負の領域で対称な構造を持ち，正規化後のスカラ値 127 の等値面がボリュームデータ全体を覆っている．HIPIP データの VST を図 5(a) に示す．この VST をもとに，スカラ値を変数とする 1 次元不透明度伝達関数を用いて，位相構造を強調した結果を図 5(b) に示す．VST から，スカラ値 127 付近では位相変化が激しく起こっているが，先に述べたように，これらのボクセルがデータ全体を覆っているため，これらの等値面を強調してしまうと，ボリュームデータ内部がまったく見えない状態になってしまう．そこで，5.1 節の基本方針に基づきながら，等値面軌道積分が最小となる領域の不透明度をほぼ 0 として可視化した結果が図 5(c) である．実際，等値面軌道の中心はスカラ値 127 付近として求められることになり，結果としてボリュームデータ全体を覆う領域の不透明度が低く設定され，ボリュームデータの内部まで明瞭に可視化されることが分かる．

5.4 等値面種数：二体確率分布

可視化において，スカラ値に関する等値面成分の種数の変化が，データに内在するボリューム構造の複雑さを理解する際に，重要な手がかりを提示する場合も

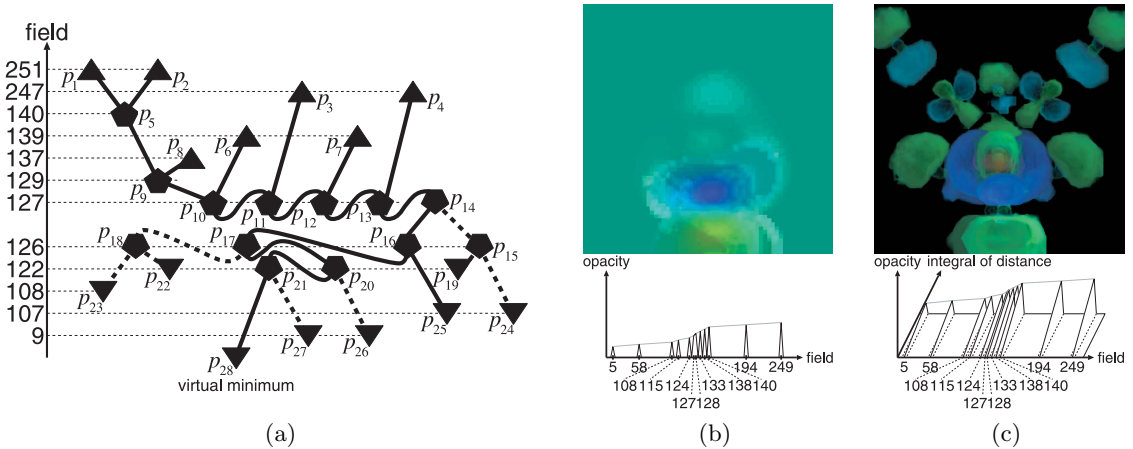


図 5 HIPIP データの VST および可視化結果とその伝達関数 : (a) VST ; (b) 1 次元不透明度伝達関数を用いて位相構造を強調 ; (c) 2 次元不透明度伝達関数を用いてボリューム全体を覆う等値面を削除

Fig. 5 Visualizing the HIPIP dataset: (a) The corresponding VST, (b) accentuating topological structures with 1D opacity TF and (c) eliminating occluding isosurface with 2D opacity TF.

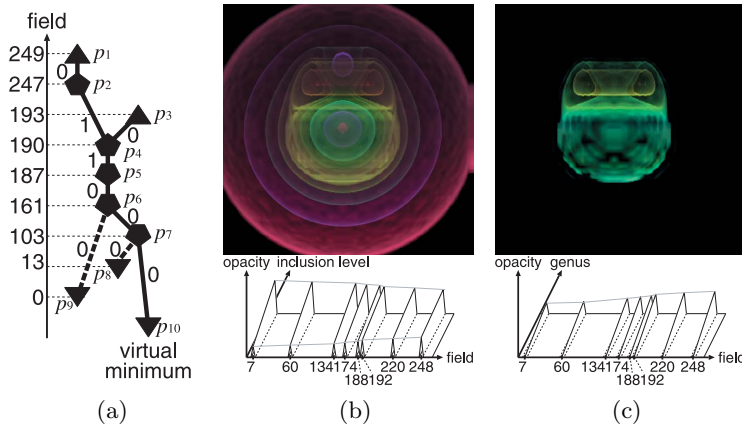


図 6 ^{16}O の核子データの VST および可視化結果とその伝達関数 : (a) VST ; (b) 2 次元不透明度伝達関数を用いて入れ子構造構造を強調 ; (c) 2 次元不透明度伝達関数を用いて特徴あるサブボリュームを特定

Fig. 6 Visualizing the ^{16}O nucleon dataset: (a) The corresponding VST, (b) emphasizing nested structure with 2D opacity TF and (c) identifying feature subvolume with 2D opacity TF.

ある .

たとえば, 図 6 は, 酸素 ^{16}O 内の 2 つの核子により生じる正の電荷密度分布をシミュレーションで求め, 片方の核子を中心とした範囲の電荷密度を可視化したものである²¹⁾. 図 6 (a) に VST を示す. リンクの横の数字は対応するリンクの種数を示している .

まず, 先に述べた入れ子レベルを適用して, 等値面 の入れ子構造を可視化すると, 図 6 (b) のような結果が得られる . ただし, もう 1 つの核子は図の上の方

に配置されていることに注意されたい . 図 6 (a) より, リンク $\overline{p_6 p_9}$ と $\overline{p_7 p_8}$ に対応する等値面は, 外側の等値面に覆われていることが分かる . これより, これらの内包される等値面が通るボクセルに, 大きな不透明度を割り当てることによって, データに内在する等値面 の入れ子構造を浮き立たせることができる .

確かに図 6 (b) の可視化結果は, ボリュームデータ の入れ子構造を理解するには有益であるが, 2 つの核子の相互作用の複雑さを理解するにはものたりない .

これは、相互作用の複雑さを表す種数の大きなボクセルを強調することで、改善することができる。そこで、入れ子レベルの代わりに位相属性として等値面の種数を使って、位相的にトラスに等しい等値面成分を強調すると、図 6(c) の可視化結果を得ることができる。ここで、図 6(a) において、リンク $\overline{p_2p_4}$ と $\overline{p_4p_5}$ に対応する等値面成分が種数 1 を持ち、それに付随するボクセルが強調されることに注意されたい。図 6(c) は、図 6(b) で表示されている等値面成分のうち、種数が変化するリンクに対応する等値面成分だけを表示している。実際、等値面がトラスに位相的に等しくなる部分は、2 つの核子の相互作用が複雑な部分を表しており、観察者の重要な興味の対象となる。この可視化結果は、等値面の種数変化を起こす位置を明確に示しており、核子に含まれる陽子と中性子の空間内の配置に関する重要な知見を、観察者に与えることができる。さらに、不要な外側の等値面成分を取り除いたことによって、観察者の興味の対象領域を拡大し、より解析しやすくするようなユーザのオペレーションを喚起する効果をもあげている。この効果は、いずれの位相属性を用いて強調した場合も同様に成り立つ。

6. 結論と今後の課題

本論文では、ポリウムレンダリングによってより多くの情報量を持つ可視化画像を得るために、多次元伝達関数に局所および大局的な特徴を表す位相属性を導入し、その設計法を具体例を用いて示した。多次元伝達関数を用いるため、同一スカラ値で異なる特徴を持つようなデータでも、それらを区別して可視化することが可能である。また、導入した位相属性は、データ全体の大局的な構造をも反映しているため、従来の局所の特徴だけに依存した伝達関数よりも、より分かりやすくデータの内部構造を可視化できる。本論文では、2 次元伝達関数の例を示したが、位相属性を組合せ、より高次の伝達関数を設計することで、さまざまな特徴を考慮した可視化画像を生成することが可能である。

今後の課題としては、今回提案した以外の新たな位相属性の考案があげられる。また、従来多次元伝達関数に用いられていたポリウム勾配や曲率などの局所的な特徴と、今回提案した位相属性との関係性を求め、それに基づいた、より高度な可視化操作の実現も必要となる。また、このような複数の属性をもとに多次元伝達関数を設計するには、観察者の意図を汲むような直感的な伝達関数設計支援ツールが必要となり、これも我々の将来課題の 1 つと考えられる。

謝辞 5.2 節で用いたレーザ核融合の爆縮シミュレーションデータを提供していただいた兵庫県立大学の坂上仁志助教授に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) Pfister, H., Lorenzen, W.E., Schroeder, W., Bajaj, C. and Kindlmann, G.: Panel: The Transfer Function Bake-Off, *Proc. IEEE Visualization 2000*, pp.523–526 (2000).
- 2) Levoy, M.: Display of Surfaces from Volume Data, *IEEE Computer Graphics & Applications*, Vol.8, No.5, pp.29–27 (1988).
- 3) Kniss, J., Kindlmann, G. and Hansen, C.: Multidimensional Transfer Functions for Interactive Volume Rendering, *IEEE Trans. Visualization and Computer Graphics*, Vol.8, No.3, pp.270–285 (2002).
- 4) Hladůvka, J., König, A. and Gröller, E.: Curvature-Based Transfer Functions for Direct Volume Rendering, *Proc. Spring Conference on Computer Graphics 2000*, pp.58–65 (2000).
- 5) Kindlmann, G., Whitaker, R., Tasdizen, T. and Möller, T.: Curvature-Based Transfer Function for Direct Volume Rendering: Methods and Applications, *Proc. IEEE Visualization 2003*, pp.513–520 (2003).
- 6) Takeshima, Y., Takahashi, S., Fujishiro, I. and Nielson, G.M.: Introducing Topological Attributes for Objective-Based Visualization, *DVD Proc. IEEE Visualization 2004 (Poster)*, pp.85–86 (2004).
- 7) Takeshima, Y., Takahashi, S., Fujishiro, I. and Nielson, G.M.: Introducing Topological Attributes for Objective-Based Visualization of Simulated Datasets, *Proc. Volume Graphics 2005*, pp.137–145, 236 (2005).
- 8) Takahashi, S., Takeshima, Y. and Fujishiro, I.: Topological Volume Skeletonization and Its Application to Transfer Function Design, *Graphical Models*, Vol.66, No.1, pp.24–49 (2004).
- 9) 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). <http://www.cg.tuwien.ac.at/research/TR/98/TR-186-2-98-12Abstract.html>
- 10) Kindlmann, G. and Durkin, J.W.: Semi-Automatic Generation of Transfer Functions for Direct Volume Rendering, *Proc. IEEE Symposium on Volume Visualization '98*, pp.79–86 (1998).

- 11) Fujishiro, I., Azuma, T. and Takeshima, Y.: Automating Transfer Function Design for Comprehensive Rendering Based on 3D Field Topology Analysis, *Proc. IEEE Visualization '99*, pp.467-470, 563 (1999).
- 12) Fujishiro, I., Azuma, T., Takeshima, Y. and Takahashi, S.: Volume Data Mining Using 3D Field Topology Analysis, *IEEE Computer Graphics & Applications*, Vol.20, No.5, pp.46-51 (2000).
- 13) Fujishiro, I., Takeshima, Y., Takahashi, S. and Yamaguchi, Y.: Topologically-Accentuated Volume Rendering, *Data Visualization: The State of the Art*, Post, F.H., Nielson, G.M. and Bonneau, G.-P. (Eds.), pp.95-108, Kluwer Academic Publishes (2002).
- 14) Weber, G.H., Scheuermann, G., Hagen, H. and Hamann, B.: Exploring Scalar Fields Using Critical Isovalues, *Proc. IEEE Visualization 2002*, pp.171-178 (2002).
- 15) 徳永百重, 竹島由里子, 高橋成雄, 藤代一成: 位相解析に基づくポリウ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).
- 16) Takahashi, S., Nielson, G.M., Takeshima, Y. and Fujishiro, I.: Topological Volume Skeletonization Using Adaptive Tetrahedralization, *Proc. Geometric Modeling and Processing 2004*, pp.227-236 (2004).
- 17) Takahashi, S., Takeshima, Y., Fujishiro, I. and Nielson, G.M.: Emphasizing Isosurface Embeddings in Direct Volume Rendering, to appear in *Scientific Visualization: The Visual Extraction of Knowledge from Data*, Springer-Verlag (2005).
- 18) Osada, R., Funkhouser, T., Chazelle, B. and Dobkin, D.: Matching 3D Models with Shape Distribution, *Proc. Shape Modeling International 2001*, pp.154-166 (2001).
- 19) Hilaga, M., Shinagawa, Y., Kohmura, T. and Kunii, T.L.: Topology Matching for Fully Automatic Similarity Estimation of 3D Shapes, *ACM SIGGRAPH2001*, pp.203-212 (2001).
- 20) Sakagami, H., Murai, H., Seo, Y. and Yokokawa, M.: 14.9 TFLOPS Three-Dimensional Fluid Simulation for Fusion Science with HPF on the Earth Simulator, *Proc. IEEE/ACM SC2002 Conference* (2002).
- 21) Meißner, M.: Web Page.
<http://www.volvis.org/>

(平成 16 年 11 月 11 日受付)

(平成 17 年 9 月 2 日採録)



竹島由里子 (正会員)

平成 11 年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, 可視化情報学会各会員。



高橋成雄 (正会員)

平成 9 年東京大学大学院理学系研究科情報科学専攻博士課程修了。博士 (理学)。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, 平成 17 年より同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, 地理情報システム等に興味を持つ。IEEE CS, ACM, Eurographics, 電子情報通信学会各会員。



藤代一成 (正会員)

昭和 60 年筑波大学大学院博士課程工学研究科修士号取得退学。理学博士 (東京大学)。東京大学助手, 筑波大学助手・講師, お茶の水女子大学理学部情報科学科助教授・教授を経て, 平成 16 年より東北大学流体科学研究所教授。ポリウムビジュアライゼーションとグラフィックスを中心にビジュアルコンピューティング全般に関する研究に従事。主な著書に『CAD/CAM』(編著, 丸善), 『コンピュータビジュアライゼーション』(共編著, 共立出版), 『情報の可視化』(共著, 岩波書店)等。Computers & Graphics エディタ。画像電子学会副会長, 可視化情報学会社員, ビジュアルデータマイニング研究会委員長。IEEE CS, ACM, Eurographics, 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。