

微分位相特徴解析に基づく ボリュームグラフィックスの高度化

藤代一成[†] 高橋成雄^{††}

微分位相幾何学の知見を利用して、時系列ボリュームデータの視覚的特徴を捉え効果的な可視化を実現するボリュームグラフィックスの一連の研究成果を、豊富な適用事例を用いてわかりやすく講述する。具体的には、ボリューム位相骨格抽出、多次元伝達関数の自動設計、視点・照明位置の最適化、等値面埋込み検出、最適断面生成、区間型ボリューム分解とボリュームブラウジング、ボリューム整形化通信、臨界時刻検出、等の手法を採り上げる。

Advancing Volume Graphics with Differential Topology Feature Analysis

Issei Fujishiro[†] and Shigeo Takahashi^{††}

A series of volume graphics studies on advancing time-varying volume visualization with differential topology feature analysis are overviewed with illustrative application examples from various disciplines. Concrete topics include volume skeletonization; automatic design of multi-dimensional transfer function; optimization of viewpoint and illumination for comprehensible volume rendering; isosurface embedding detection; optimized cross-sectioning, interval volume decomposition and volume browsing; volume fairing and communication; and critical timing detection.

1. 協調的可視化

スーパーコンピュータ等を用いた高性能計算技術やセンサネットワークに代表される高度計測技術の発達により、対象データは多次元・多変量となり、そのサイズや複雑さも加速度的に増す一方である。2006年1月に刊行されたNIH/NSF Visualization Research Challenge (VRC)レポート[1]では、近年のこの状況をデータビッグバン (data big bang) と称している。同レポートによれば、その発刊時において既に2003年以降に生成されたデータだけを集計しても、それ以前に人類が生成した全文書のデータ量を凌駕し、しかもその90%以上がデジタルの形式をとるそうである。その絶対量も、たとえば2010年の1年間に新たに生成されるデータ量だけで0.988Zバイト ($Z=2^{70}$) に達すると、米国国立可視化分析論センター (NVAC) では試算している。

人間にとって桁外れに情報伝達効率の高い視覚的解釈の機会を提供するコンピュータ可視化 (computer visualization) 技術[1][2]は、このようなデジタル数値データの山から対象の構造や挙動を的確に掘り起こし、データビッグバンを回避するうえで重要な役割を果たすはずであった。実際、手元にある生データを自らの好きなやり方で絵に直して独自に解釈できる点、すなわち第一人称性[3]は、同技術が培ってきた最も優れた特質の一つである。しかしその一方で、個々のユーザが独自のやり方で可視化を実行するとき、対象データの特徴が十全に表現されるような表示形式へ常に適切にマッピングされることは確約できない。同一データからでも異なる情報量の可視化画像やアニメーションはいくらでも作成され得る。この多義性 (potential explanations) が、今日の可視化を本質的により困難なものにしている。これによってユーザによる作業はかえって多様性を増すことになり、データビッグバンを助長さえしかねない。

この問題に対処するために、我々はこれまで「協調的可視化 (cooperative visualization)」とよばれる枠組み[4][5]を提唱してきた。そこでは知的ソフトウェアが、ユーザに代わって事前に対象データを数理解析し、見せるべき価値がないと判断できる部分は潔く捨てる、あるいは可視化に関連するパラメタの自由度をむしろ制限して、無意味な結果画像の出現を抑制するとともに、適切なパラメタ値を用いたよい初期結果 (good initial guess) を与えて、ユーザの経験や勘を呼び覚まし、新しい知見獲得のセレンディピティを向上させることができる。

本講演では、時系列ボリュームデータに対して微分位相幾何学の知見を援用する協調的可視化に関する一連の取り組み[6][7]を概説する。

[†] 慶應義塾大学理工学部情報工学科
Keio University, Faculty of Science and Technology, Department of Information and Computer Science

^{††} 東京大学大学院新領域創成科学研究科
The University of Tokyo, Graduate School of Frontier Sciences

2. ボリュームデータマイニング

我々は、大量の時系列ボリュームデータから有用な特徴を探り出すために、ボリュームデータマイニング (VDM: Volume Data Mining) [8][9]のツール群を開発してきた。そこでは、ボリュームデータの汎用的な視覚探求環境を実現することを目的として、データの局所的な性質だけでなく、大局的な傾向も同時に把握することができる特長をもつ微分位相幾何学 (differential topology) [10]の知見に基づくという一貫した姿勢をとってきた。

2.1 VST

その基本となるデータ表現は、スナップショットボリュームの位相骨格を表現する VST (Volume Skeleton Tree, ボリューム骨格木) [11]である。VST は、等値面 (isosurface) の生成・消滅・併合・分岐を特徴づける臨界点 (critical point) 間の接続関係を表現したレベルセットグラフ [12][13]の一種である。

図 1(b)は、ある解析的ボリューム [11]に微分位相幾何学的解析を施して得られた VST である。このボリュームの場合、フィールド値を降順に辿ると、等値面の生成に対応する 2 個の極大点 (上向き三角形のノード)、等値面の併合を表す 2 個の鞍点 (上向き五角形のノード)、等値面の分離を表す 1 個の鞍点 (下向き五角形のノード)、有限矩形領域外で等値面の消失を表す 1 個の仮想極小点 (下向き三角形のノード) の計 4 種類 6 個の臨界点から VST が構成されていることがわかる。これは 3 次元位相球に対するオイラー=ポアンカレの公式 (Euler-Poincare's Formula) を満たしている。これらの臨界点を結ぶ各エッジは、等値面の連結成分がスカラ値にそって掃引する位相的に同値な部分ボリューム、すなわち区間型ボリューム (interval volume) [14] (の連結成分) を表している。この区間型ボリュームの中央フィールド値の等値面は位相特徴の代表的な形状を表現しており、代表等値面 (representative isosurface) [15]とよばれる。

我々は、独自の適応的四面体分割と位相骨格の単純化に基づいて、複雑な内部構造やノイズ成分をもつボリュームデータからでも、効率的かつ頑健に多重解像度の VST を抽出するアルゴリズムを開発している [16][17]。

2.2 位相強調型ボリュームレンダリング

図 1 は、前項で示したボリュームデータを例にとり、位相強調型ボリュームレンダリング (topologically-accentuated volume rendering) [18]を実行する手順を示している。まず、対象ボリュームの代表等値面を強調するように関連可視化パラメータ値を順に適正化する。スカラ値に対して色や不透明度を決める伝達関数 (transfer function; TF) の強調は投影前に無条件に考えることができる。色相変化の角速度が一定な色 TF と平坦な不透明度 TF を適用した図 2(a)では、ボリューム内部が不明瞭に投影されている。そこで、色相変化の角速度を代表等値面付近で相対的に高くするとともに、対応する不透明度にも山型の強調を加えると、同図(b)で解析されていた個々の代表等値面が浮

き出てくるのがわかる (同図(c))。なお、スカラ値にそった臨界点の個数分布から臨界点ヒストグラム (critical point histogram) [19]を導出し、それを参照することによって、臨界点を含む等値面、すなわち臨界等値面 (critical isosurface) [13]を強調することも可能である。

しかし、この位相特徴が互いに遮蔽する方向から投影していたのでは思うような観察はできない。そこで次に、ボリュームビューエントロピー (volumetric view entropy) とよばれる特徴量の極大化原理に基づいて、望ましい視点位置を自動決定する [20]。実際同図(d)では、同図(c)よりも各代表等値面が隠れることなく観察可能であることがわかる。そして最後に、投影された等値面に一定の奥行き感を与えるために、ボリューム照明エントロピー (volumetric illumination entropy) を極大化する位置に平行光源を配置し、高いコントラストの描画結果を得る [21][22] (同図(e))。

GPU がもつテクスチャマッピング機能を利用すれば、実時間ボリュームレンダリングが利用可能になった現在でも、これらの可視化パラメータのすべてを手動で決めるタスクはきわめて効率が悪い。VST を参照する位相強調型ボリュームレンダリングは、結果画像の情報量に一定の保証を与える半自動化技術であるといえる。

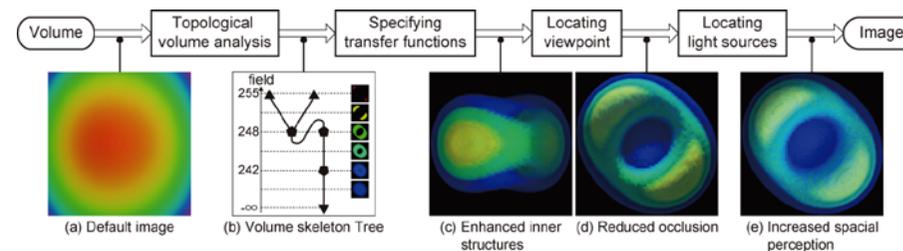


図 1 位相強調型ボリュームレンダリングの手順
 Figure 1 Procedure for topologically-accentuated volume rendering.

3. VDMツール

VST には、位相情報だけでなく解析途中で得られた幾何情報も豊富に保持されている。それらを効果的に参照することによって、より高度な視覚解析機能を実現した VDM ツールの例を以下に 6 点紹介する。

3.1 最適断面生成

断面は、古くから頻りに用いられてきた対話的なボリューム観察法であるが、中身の不明なボリュームから特徴を捉えた断面を切り出すのは決して易しい作業ではない。そこで、臨界点やリンクに対応する区間ボリュームの連結成分の重心をなるべく多く通過するように断面をとれば、重要な位相特徴が観察可能な断面を推奨できる [23][24]。

3.2 等値面の包含関係の抽出

VST に現れる特定のリンクパターンを解析することにより、同一のスカラ値をもつ等値面の連結成分同士が入れ子状をなす埋込み (embedding) を効果的に同定することができる。深い位置にある連結成分の不透明度を相対的に高く設定すれば、浅い位置の連結成分による隠蔽を防げる[25]。

3.3 区間型ボリューム分解 (interval volume decomposition)

VST を仮想極小点から組織的に走査することによって、対象ボリュームを外側から順に区間ボリューム単位で取り除いていくことができ、位相ベースのプレビューに利用できる[26]。さらに、プレビューの途中で除去された外側の区間型ボリュームの影響をキャンセルすれば、最適視点も同時に変更されるので、ちょうど果物を回しながら皮剥きするような直感的なブラウジングインタフェースを実現できる[27]。

3.4 多次元位相属性

VST に直接的に記述されている臨界点の分布に加え、VST から導出される等値面の包含レベル・軌道距離・種数変化等の位相属性を複数組み合わせた多次元伝達関数 (multi-dimensional transfer function) を用いることによって、対象ボリュームの局所的かつ大局的な特徴を効果的にレンダリングできる[28][29]。

3.5 渦領域の特定

ベクトル場のような高階データにも、縮小 (contraction) によるスカラ場への帰着、あるいは関連するスカラ場の参照によって、微分位相解析を適用することができる。

たとえば 2D 流体データに対しては、圧力の極小値が渦の中心候補、尾根環 (ridge cycle) が渦領域境界の候補をそれぞれ与えるという知見に基づいて、渦構造の頑健な追跡を可視化[30]や力覚化[31]を通じて実現する試みを報告している。

3.6 整形ボリューム通信

VST に記述されている複雑な入れ子状の微分位相特徴を再配列し、分布を均整化すれば、対応ボリュームを整形 (faring) することができる。これを通信すれば、受信者は自明な周期的 TF を用いても本来の特徴を効果的に可視化できる[32]。ボリューム整形化は、第一人称性を損なわない、効率的な特徴伝達を実現している。

4. VDMツールの応用例

ここでは、3.4 項に示した多次元伝達関数の効果を示す事例の一つ採り上げる。図 2 は、レーザー核融合の爆縮シミュレーションから得られた、ある特定時刻の質量密度データ[28][29]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一つの等値面成分がその他の等値面成分を包含す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に限られる。

図 2(a)にこの爆縮シミュレーションデータの VST を示す。リンク横の数字は対応するリンクの入れ子レベルを表す。この VST は既に単純化が施されており、爆縮データの大局的な構造を効果的に表現している。まず、上述した山型の 1 次元不透明度 TF を用いて代表等値面を強調したボリュームレンダリング画像を同図(b)に示す。ここからは、一定の内部構造が視認できても、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。これに対し、同図(c)のように従来のスカラ値に加え、VST の入れ子レベルを定義域とする 2 次元 TF を用いて、外側に存在する等値面成分の不透明度を相対的に低くとると、先の例では観察しにくかった内部構造を明瞭に可視化することができる。さらに同図(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 TF を制御すれば、入れ子構造の内部だけを視覚的に切り出すこともできる。

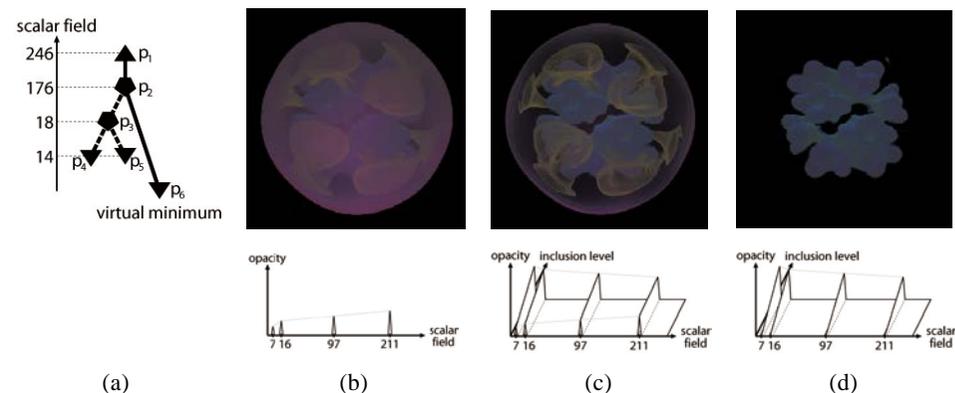


図 2 レーザー核融合爆縮データの位相強調型可視化。

- (a) VST, (b) 位相構造強調型 1 次元不透明度 TF を用いた結果,
(c) スカラ値および入れ子レベルを変数とする 2 次元不透明度 TF を用いた結果,
(d) 入れ子の内部構造だけを抽出する 2 次元不透明度 TF を用いた結果。

データ提供：坂上 仁志氏 (核融合科学研究所)

Figure 2 Topologically-accentuated visualization of laser implosion dataset.

- (a) VST, (b) result with 1D TF, (c) result with 2D TF, and
(d) inner structure extracted with another 2D TF.

Data courtesy of H. Sakagami (NIFS)

5. 多次元VDM

ここでは、これまで述べてきた微分位相幾何学の知見を、時系列ボリューム等の多次元データへ拡張する2種類の試みについて解説する。

5.1 T-Map

まず、図3にT-Mapとよばれる時系列VDMの枠組み[33][34]を示す。ここでは最初から対象の時空間をアニメーション化せず、その代わりに位相索引空間 (Topological Index Space; T-IS) とよばれる帯状の時系列データプロフィールをユーザに提供する。

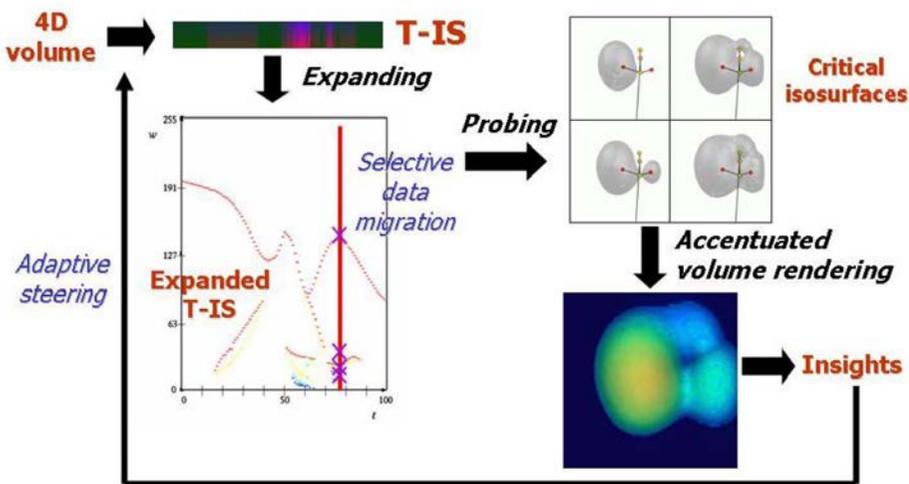


図3 T-Mapを中核に据えた時系列ボリュームデータマイニングの枠組み
Figure 3 T-Map-centered framework for time-varying volume data mining.

T-ISを構成するには、まず各時刻のスナップショットボリュームから抽出されたVSTに対応する隣接行列と距離行列を固有値解析し、位相索引とよばれる特徴量に変換した後、擬似カラー符号化された矩形グリフを一行に並べればよい。実際図3では、水素原子に陽子を衝突させる数値シミュレーション[14]における電子の電荷密度分布データ(1万ステップ)の時間変化を100分の1にダウンサイズしたT-ISが示されている。明るい箇所ほど位相的に複雑であることを示すT-ISから、位相的な意味で衝突に伴う複雑な現象が生じている時区間を視覚的にも特定することができる。

次にこのT-ISを、位相変化を起こしているスカラ値を臨界点の種別ごとにトレースできる拡大T-IS (expanded T-IS)に展開 (expanding) する。ユーザは特定された時区間

内で今度は標的とすべきスカラ値の範囲を特定することができる。さらに同型の数値データが複数あるならば、T-ISや拡大T-IS同士を比較することにより、実際の可視化を行わなくても、物理パラメタ間の因果関係を大まかに解析することが可能になる。

この時点で、高次記憶デバイスから仮想記憶領域に必要なデータフラグメントだけを選択的にロードする。このタスクを選択的データマイグレーション (selective data migration) とよぶ。その部分時空間に対して先鋭的にチューニングされた視覚パラメタを用いれば、情報量の豊富なアニメーションを効率的に制作することができる。

さらにユーザは、アニメーションを観察した結果から興味ある特定時刻を特定して、対応するスナップショットのボリュームを、3節で説明したVDMツールを利用してプロービング (probing) することもできる。図3では実際に、衝突直後に陽子から水素原子核に迂回して戻ろうとする、電荷の特徴的な歪みのパターンを伴う電子雲が得られていることがわかる。

こうした一連の流れから得られた情報をベースにすれば、詳細に解析すべき時区間を限定して、より細かいタイムステップで、しかも必要ならば関連物理パラメタ値を調整したうえで、再計算を実行することができる。これが適応的計算ステアリング (adaptive computational steering) であり、このフィードバックループは協調的可視化における情報ドリルダウン (information drill-down) の中核を構成する。

5.2 微分位相解析の時空間網羅性の保証

前項の例からも明らかのように、T-Mapはいわゆる可視化の可視化 (visualizing visualizations) に根ざした時系列VDM手法である。平行座標系 (parallel coordinates) や次元スタッキング (dimensional stacking) 等の既存の多次元情報可視化手法[35]を援用すれば、5次元以上の時空間を定義域とするケースへも位相索引空間を原理的に拡張することは可能である。しかし、多次元物理場は本質的にサイズがたいへん大きく、かつ複雑なコンテンツを有するため、そこから高次元VSTを抽出するソフトウェアの実装は複雑きわまりない。

そこで我々は、高次元空間の標本点集合を現在の標準的計算環境でも十分直感的な視覚解析が可能な3次元空間に近似的に射影し、それを有力な手掛かりとして元の高次元物理場の微分位相解析を可能にする手法を提案した[36]。その基本アイデアは、多様体学習 (manifold learning) 理論を用いて、高次元データを標本点の位相的距離を考慮しながら低次元空間に埋め込むことである。そのために、標本点の位相を考慮した新たな距離測度を導入することによって、次元圧縮の既存手法を再定式化した。また、効率的なデータサイズの削減とセグメンテーションの機能を組み合わせることにより、超大規模な高次元データに対してもスケーラブルなトップダウン解析を可能にしている。

図4に、時系列ボリュームから特徴的な微分位相構造をもつ部分時空間を悉く特定する多様体学習ユーザインタフェースを利用して、図3と同一の陽子-水素原子衝突に伴う電荷密度分布の時間変化を追跡している様子を示す[36]。同法は、T-Mapを含むあらゆる従来の時系列視覚解析が、いかなるプリミティブや測度を採用しようとも、所詮局所的な視覚解析を時空間方向に反復することによって見逃せない挙動を試行錯誤的に探求していたスタイルを一変させ、時空間網羅性を保証できる点で大きなインパクトを有していると位置づけることができる。

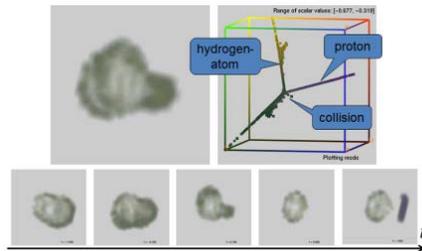


図 4 多次元近似位相骨格抽出に基づく陽子-水素原子衝突現象の網羅的解析

Figure 4 Exhaustive analysis of time-varying volume dataset for proton-hydrogen atom collision through approximate multi-dimensional topological skeletonization.

6. おわりに

本講演では、ソフトウェア側がユーザと協調して適切な可視化を設計することによって、無意味な可視化の生成を未然に防止しようとする「見せない可視化」[37][7]の実現に向けた取り組みのうち、パラメタ調整の試みを中心にこれまで得られた一連の成果を振り返ってきた。微分位相幾何学のような数理的原理をフィルタとして採用した可視化は、いわゆる“Synthesis by analysis”の典型を与え、CGとCVの連携の必要性を具体的に示す好例であるといえる。

紹介した手法群は確かに協調的可視化の汎用化を進めるための基礎を与えるが、その一方で同ツールがさまざまな現場で積極的に利用されるようになるには、個々の分野固有の知識や経験を知識ベース化し、それを照会することによって、問題固有の解析目的のセマンティックスを抽象的な枠組みに自動的に翻訳する仕組みを、並行して開発していく必要がある。

謝辞 本稿は、科学研究費補助金基盤研究(C)11680349, (C)13680401, (B)18300026, (B)22300037で実施された成果を含む。共同研究者である竹島由里子講師(東北大学流体科学研究所)に対し謝意を表する。

参考文献

- 1) Johnson, C., Moorhead, R., Munzner, T., Pfister, H., Rheingans, P., and Yoo, T. S.: *NIH/NSF Visualization Research Challenges*. IEEE Computer Society VGTC (2006). <http://vgtc.org/wpmu/techcom/national-initiatives/nihnsf-visualization-research-challenges-report-january-2006>
- 2) 中嶋正之, 藤代一成 編著: コンピュータビジュアライゼーション インターネット時代の数学4, 共立出版 (2000)
- 3) 藤代一成: 第一人称性の追求 — IA と AI の間で —, 可視化情報学会誌, Vol.22 Suppl., No.2, pp.48-49 (2003)
- 4) 藤代一成, 竹島由里子, 高橋成雄: 協調的可視化の役割 — 応用設計とパラメタ調整のソフトウェア支援 —, 画像電子学会誌, Vol.36, No.2, pp.146-155 (2007)
- 5) 藤代一成: 協調的可視化, フルードインフォマティクス〜「流体力学」と「情報科学」の融合〜, 日本機械学会編, 技報堂出版, 第4章 (pp.103-124) (2010)
- 6) Fujishiro, I., Takahashi, S., and Takeshima, Y.: Collaborative visualization: Topological approaches to parameter tweaking for informative volume rendering. *Systems Modeling and Simulation: Theory and Applications, Asia Simulation Conference 2006*, Springer-Verlag, pp.1-5 (2006).
- 7) 藤代一成: 見せない可視化: データビッグバンを抑止する微分位相幾何学的方法 (特別講演), 日本計算機統計学会第24回大会論文集, pp.121-130 (2010)
- 8) 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, Vol.20 Suppl., No.1, pp.161-162 (2000)
- 9) Fujishiro, I., Azuma, T., Takeshima, Y., and Takahashi, S.: Volume data mining using 3D field topology analysis. *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol.20, No.5, pp. 46-51 (2000).
- 10) Milnor, J.: *Morse Theory*. Princeton University Press (1963).
- 11) 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).
- 12) 藤代一成, 高橋成雄, 竹島由里子: 大規模データ可視化におけるレベルセットグラフの可能性, 計算工学, Vol.10, No.1, pp.11-14 (2005)
- 13) 高橋成雄: 微分位相を用いた形状表現手法, 計算工学, Vol.16, No.2, pp. 20-24 (2011)
- 14) Fujishiro, I., Maeda, Y., Sato, H., and Takeshima, Y.: Volumetric data exploration using interval volume. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol.2, No.2, pp.144-155 (1996).
- 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)
- 16) Takahashi, S., Nielson, G. M., Takeshima, Y., and Fujishiro, I.: Topological volume skeletonization using adaptive tetrahedralization, *Proc. Geometric Modeling and Processing 2004*, IEEE Computer Society Press, pp.227-236 (2004).
- 17) 竹島由里子, 高橋成雄, 藤代一成: 位相的ボリューム骨格化アルゴリズムの改良, 情報処理学会論文誌, Vol.47, No.1, pp.250-261 (2006)

- 18) 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., Kluwer Academic Publishers, pp.95-108 (2005).
- 19) Takeshima, Y., Terasaka, H., Takahashi, S., and Fujishiro, I.: Applying volume-topology-based control of visualization parameters to fluid data, *CD-ROM Proc. Fourth Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing* (2003).
- 20) Takahashi, S., Fujishiro, I., Takeshima, Y., and Nishita, T.: A feature-driven approach to locating optimal viewpoints for volume visualization. *Proc. IEEE Visualization 2005*, pp.495-502 (2005).
- 21) Naraoka, R., Fujishiro, I., Takahashi, S., and Takeshima, Y.: "Locating an optimal light source for volume rendering," *DVD Proc. IEEE IEVC2007* (2007).
- 22) 竹島由里子, 奈良岡亮太, 藤代一成, 高橋成雄: 微分位相強調型ボリュームレンダリングのための照明配置設計, *画像電子学会誌*, Vol.38, No.4, pp.459-470 (2009)
- 23) Mori, Y., Takahashi, S., Igarashi, T., Takeshima, Y., and Fujishiro, I.: Automatic cross-sectioning based on topological volume skeletonization. *Proc. Fifth Smart Graphics*, Springer LNCS, Vol.3638, pp.175-184 (2005).
- 24) 森悠紀, 高橋成雄, 竹島由里子, 五十嵐健夫, 藤代一成: ボリュームデータの位相構造に基づく自動断面生成, *画像電子学会誌*, Vol.35, No.4, pp.252-260 (2006)
- 25) Takahashi, S., Takeshima, Y., Fujishiro, I., and Nielson, G. M.: Emphasizing isosurface embeddings in direct volume rendering, *Scientific Visualization: The Visual Extraction of Knowledge from Data*, Bonneau, G.-P., Ertl, T., and Nielson, G. M., eds., Springer-Verlag, pp.185-206 (2005).
- 26) Takahashi, S., Fujishiro, I., and Takeshima, Y.: Interval Volume Decomposer: A topological approach to volume traversal, *Proc. Visualization and Data Analysis 2005*, SPIE, Vol.5669, pp.95-102 (2005).
- 27) Takahashi, S., Fujishiro, I., Takeshima, Y., and Bi, C.: Previewing volume decomposition through optimal viewpoints, *Scientific Visualization: Interactions, Features, Metaphors*, Hagen, H., ed., Electronic volume in the series Dagstuhl Follow-Ups, to appear (2011).
- 28) Takeshima, Y., Takahashi, S., Fujishiro, I., and Nielson, G. M.: Introducing topological attributes for objective-based visualization of simulated datasets. *Proc. Volume Graphics 2005*, IEEE Computer Society Press, pp.137-145, p.236 (2005).
- 29) 竹島由里子, 高橋成雄, 藤代一成: 位相属性を用いた多次元伝達関数設計, *情報処理学会論文誌*, Vol.46, No.10, pp.2566-2575 (2005)
- 30) Takeshima, Y., Fujishiro, I., Takahashi, S., and Hayase, T.: Measurement-integrated simulation and visualization of Karman vortex streets in Hybrid Wind Tunnel, *Proc. VRST ASIAGRAPH201*, pp.35-40 (2011).
- 31) Takeshima, Y., Fujishiro, I., Takahashi, S., and Obayashi, S.: Topologically-based haptization and visualization of wake turbulence datasets, *DVD Proc. IEEE IEVC2010*, (2010).
- 32) Takahashi, S., Kobayashi, J., and Fujishiro, I., Feature-driven volume fairing, *Proc. Smart Graphics 2009*, Springer LNCS, Vol.5531, pp.233-242 (2009).
- 33) 大塚理恵子, 藤代一成, 高橋成雄, 竹島由里子: T-Map: 位相的特徴解析に基づく時系列ボリュームデータマイニング手法, *画像電子学会誌*, Vol.31, No.4, pp.504-513 (2002)
- 34) Fujishiro, I., Otsuka, R., Takahashi, S., and Takeshima, Y.: T-Map: A topological approach to visual exploration of time-varying volume data. *Proc. ISHPC 2005*, Springer LNCS, Vol.4759, pp.176-190 (2008).
- 35) Card, S. K., Mackinlay, J. D., and Shneiderman, B., eds.: *Readings in Information Visualization Using vision to think*, Morgan Kaufmann (1999).
- 36) Takahashi, S., Fujishiro, I., and Okada, M.: Applying manifold learning to plotting approximate contour trees. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol.15, No.6, pp.1185-1192 (2009).
- 37) 藤代一成: 見せない可視化, *画像電子学会誌*, Vol.36, No.3, p.193 (2007)