

特徴駆動型ボリューム整形化 Feature-Driven Volume Fairing

小林 潤¹
Jun Kobayashi¹

吉田 謙一²
Kenichi Yoshida²

高橋 成雄²
Shigeo Takahashi²

藤代 一成³
Issei Fujishiro³

1 東京大学 大学院情報理工学系研究科
Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo

2 東京大学 大学院新領域創成科学研究科
Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo

3 東北大学 流体科学研究所
Institute of Fluid Science, Tohoku University

1 はじめに

ボリュームデータは、今や科学技術計算データの一般的な表現として利用されており、等値面を直接抽出するマーチングキューブ法や、伝達関数を用いてゼリー状物体に変換し光の透過度を積分することで投影像を計算するボリュームレンダリングなど、いくつかの可視化手法が考案されてきた。しかしながら、どの可視化手法を用いる場合でも、データに内在する特徴を明瞭にとらえるためには、可視化パラメータの注意深い調整が必要となってくる。実際、伝達関数の半自動設計問題はそのひとつであり、1990年代後半以降可視化における重要な問題として多くの研究がなされてきた [1]。

このような状況を踏まえ、本論文では多種多様なボリュームデータを、その特徴を基に整形化する、特徴駆動型ボリューム整形化 (Feature-Driven Volume Fairing) という枠組みを提案する。これは、ボリュームデータをコミュニケーションメディアとして用いるための標準化の一手法であり、データの受け手が図 2, 図 3, 図 4 のように、可視化パラメータの情報なしにその内容を容易に閲覧できる仕組みを提供するものである。この整形化処理は、ボリュームデータの各ボクセルのスカラ値に適切な変調を加えることで、特徴に対応するボリューム部分がより広いスカラ値区域を占めるようなデータ変換を施すと同時に、重要でない特徴部分を目立たなくすることができる。また、ボリューム特徴に基づく整形化操作により、スカラ値全体の区域にバランスよくボクセルのスカラ値を再配分できるため、量子化ビット数を下位ビットから単純に少なくすることでデータ圧縮が可能であり、ネットワーク通信量を配慮したデータの送受信も実現できる (図 5, 図 6 参照)。

我々の手法は、ボリュームレンダリングに用いられる伝達関数を整形化のインターフェースとして用いる。ここで用いる伝達関数は、手動で設計したものはもちろん、ボリューム特徴解析に基づく半自動設

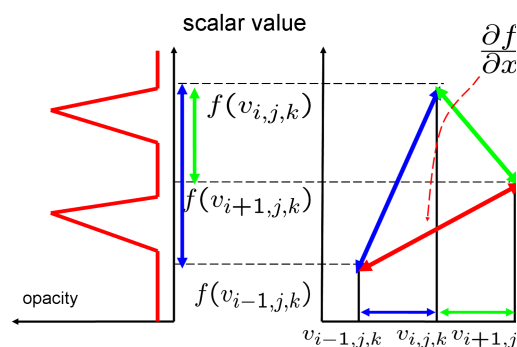


図 1: ボクセルとスカラ値 (右), 伝達関数 (左) の関係 (y, z 軸方向省略)。

計手法を利用して得られたものでも構わない。そして、伝達関数に基づきその各ボクセルのスカラ値勾配に変調を加えたのち、ボリュームのスカラ場をポアソン方程式を解くことにより積分していく。

本手法は、ハイダイナミックレンジ (HDR) 画像を通常のカラールレンジに圧縮する手法 [2] や、さらに奥行き情報圧縮手法 [3, 4] を基礎として用いる。これらの圧縮手法では、視覚的に重要な色や奥行き局所的な変化を保持しながら、全体の値の範囲に圧縮を施す。それに対し本論文では、ボリュームの特徴構造を反映した伝達関数を利用することで、局所変化だけでなく大局的な特徴を考慮にいたしたボリュームデータの変換手法を提案していく。

2 ボリューム整形化

ここでは、本論文で提案するボリューム整形化手法の詳細について述べる。

2.1 ボリューム特徴解析と伝達関数設計

まず本手法では、ボリュームデータにおける各ボクセルごとに強調と省略の度合いを表す指標を入力

とすることで、入力ボリュームデータの特徴に即したボリューム整形化を行うことを考える。そこで、伝達関数を半自動設計するための特徴解析手法を利用し、その伝達関数そのものを個々のボクセルの重要性の指標として用いることで、ボリューム整形化を実行していく。たとえば、Kindlmannら [5] が提案した不透明度伝達関数設計手法は、ボリュームの微分特徴を利用している点で、先に掲げたHDR画像のカラーレンジ圧縮や、3Dシーンの奥行き情報圧縮に用いられている重み付けに近い。また他にも、文献 [6] などでも位相骨格木からの伝達関数の設計法が提案されている。本論文では、任意の伝達関数に加え、位相変化部分の特徴とする伝達関数を用いている。

2.2 各ボクセルにおけるスカラ勾配の計算

本手法では、まず各ボクセルにおけるスカラ勾配を計算する。いま、ボリュームデータが $a \times b \times c$ の3次元規則格子を成すボクセル $\mathbf{v}_{i,j,k}$ ($1 \leq i \leq a, 1 \leq j \leq b, 1 \leq k \leq c$) により構成されるとする。ボクセル $\mathbf{v}_{i,j,k}$ に対応する3次元座標を (x_i, y_j, z_k) 、対応するスカラ値を $s = f(\mathbf{v}_{i,j,k}) = f(x_i, y_j, z_k)$ とする。このとき、対応するスカラ勾配 \mathbf{g} は、 $\mathbf{g} = \nabla f = (\frac{\partial f}{\partial x}, \frac{\partial f}{\partial y}, \frac{\partial f}{\partial z})$ と計算される。ここで、各偏微分 $\frac{\partial f}{\partial x}, \frac{\partial f}{\partial y}, \frac{\partial f}{\partial z}$ は、例えば、

$$\frac{\partial f}{\partial x}(\mathbf{v}_{i,j,k}) = \frac{f(\mathbf{v}_{i+1,j,k}) - f(\mathbf{v}_{i-1,j,k})}{x_{i+1} - x_{i-1}} \quad (1)$$

のように中心差分を用いて計算していく (図1参照)。なお、2.4項で示すようにポアソン方程式を用いて積分を行うために、境界条件が必要となってくる。この境界条件を設けるために、与えられたボリュームデータの外側に仮想的にスカラ値0のボクセルがあるものとする (ノイマン境界条件)。つまり与えられたボクセルデータに対して、 $(a+2) \times (b+2) \times (c+2)$ のボリュームデータを作り出し、3次元格子を成すボクセルは、 $\mathbf{v}_{i,j,k}$ ($0 \leq i \leq a+1, 0 \leq j \leq b+1, 0 \leq k \leq c+1$) となる。

2.3 伝達関数によるスカラ勾配の更新

本論文では、ボリューム特徴を強調するような不透明度値の伝達関数を利用し、特徴部分に対応するボリューム領域のスカラ勾配を拡大することで整形化処理を実現していく。いま、ボクセル $\mathbf{v}_{i,j,k}$ の x 軸方向のスカラ勾配は、先に述べた通り隣接するボクセル $\mathbf{v}_{i-1,j,k}$ と $\mathbf{v}_{i+1,j,k}$ のスカラ値の差分を用いて計算している。つまり、ここではスカラ値 $f(\mathbf{v}_{i-1,j,k}) - f(\mathbf{v}_{i,j,k})$ と $f(\mathbf{v}_{i,j,k}) - f(\mathbf{v}_{i+1,j,k})$ の範囲 (それぞれ図1の青と緑に対応する部分) の伝達関数を参照して、スカラ勾配を調整する必要がある。スカラ値 s に対応する不透明度伝達関数の値を $T(s)$

とすると、先のスカラ値範囲の不透明度値の平均値 $T(\mathbf{v}_{i,j,k})$ は、

$$T(\mathbf{v}_{i,j,k}) = \left| \frac{\int_{f(\mathbf{v}_{i-1,j,k})}^{f(\mathbf{v}_{i,j,k})} T(s) ds}{f(\mathbf{v}_{i,j,k}) - f(\mathbf{v}_{i-1,j,k})} \right| + \left| \frac{\int_{f(\mathbf{v}_{i,j,k})}^{f(\mathbf{v}_{i+1,j,k})} T(s) ds}{f(\mathbf{v}_{i+1,j,k}) - f(\mathbf{v}_{i,j,k})} \right| \quad (2)$$

となる。そこで、 $\mathbf{v}_{i,j,k}$ の x 方向の新しいスカラ勾配を、伝達関数を参照して $\frac{\partial f'}{\partial x} = T(\mathbf{v}_{i,j,k}) \cdot \frac{\partial f}{\partial x}$ のように重み付けする。これを y, z 軸方向に関しても同様に計算し、最終的に新しいスカラ勾配 \mathbf{g}' を求める。

2.4 ポアソン方程式によるボリューム再構成

最終的なボリュームデータは、新しい勾配 \mathbf{g}' を積分することにより再構成する。ここで、 \mathbf{g}' は必ずしも実在するスカラ場の勾配を表すわけではなく、そのまま歪みなく積分することができない、そこで、次のポアソン方程式を解くことでデータ全体における積分の誤差を最小化しながら、重要な特徴部分を強調したボリュームデータ $f'(x, y, z)$ を求めることにする。

$$\nabla^2 f' = \text{div } \mathbf{g}' \quad (3)$$

なお、このポアソン方程式の境界条件は2.2項で述べたように、ノイマン境界条件として与えられている。このようにして得られたボリュームデータは、一般的にそのスカラ値の範囲がオリジナルのものとは異なってしまふ。そこで、スカラ値に関し線形に拡大・縮小を施し、元のボリュームデータの同じ範囲となるように変換し最終的な整形化の結果を得る。ポアソン方程式の求解にはSOR法を用いており、Intel Core2 Duo 2.66GHz CPU 3.25GBメモリのPCで65³のサイズのボリュームを15秒程度で処理できる。

3 結果と応用

以下例として用いられたボリュームデータのスカラ値は、すべて8bitによる量子化 (256階調) 表現となっていることに注意する。ただし、ボリュームデータのサイズは各々異なる。

3.1 整形化の適用結果

以下に3つのボリュームデータを整形化前後でそれぞれ可視化し、比較した結果を示す。可視化は、各データに対しマーチングキューブ法とボリュームレンダリングのためのレイキャスティング法を用いて行っている。マーチングキューブ法では、4つの等値面を抽出し、レイキャスティング法では、4つのスカラ値を均等な間隔で強調するような伝達関

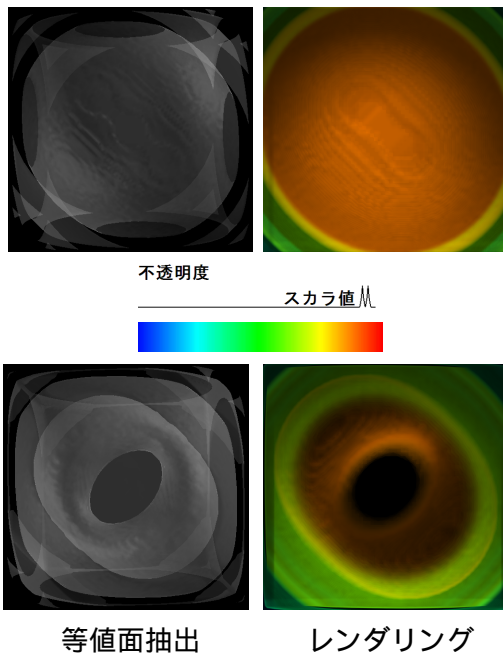


図 2: 解析関数の等値面抽出とレイキャスティング法によるレンダリング結果: ポリウム整形化前の可視化例 (上行) と整形化後の可視化例 (下行) と整形化に用いた不透明度伝達関数とその値による色の割り当て (中行).

数を用いる. なお図 2, 図 3, 図 4 の中行に示す伝達関数は, 整形化のみに使用しており, 可視化の際には別の伝達関数を使っていることに注意する. また, 本論文におけるレイキャスティング法のような通常の線形に変化する色の伝達関数を用いて可視化するレンダリングの結果には, 整形化後のデータにおいてをそのまま色の伝達関数を用いても, 個々の特徴に適切に違う色を割り当てて表示することが可能となる点は本手法の特徴である.

3.1.1 解析関数データへの適用

このポリウムデータは文献 [6] で用いられているものと同じ解析関数データである. 図 2 は, 整形化の前後を可視化し比較したものと整形化に用いた伝達関数である. このポリウムデータのサイズは $65 \times 65 \times 65$ であり, 可視化パラメータを変化させると中心部で位相変化を起こし, 可視化結果がトーラスとなるものである.

左側がマーチングキューブ法を用いて等値面を抽出したもので, 右側がレイキャスティング法を用いてレンダリングを行った結果である. この整形化に用いる不透明度値の伝達関数は, 文献 [6] の手法を用いて微分位相幾何学に基づいて, 位相変化の特徴点を抽出し作られた骨格木から設計されている. つまり, 位相変化が生じる部分を重要な特徴とみなし分布が広がるように伝達関数として設計されてい

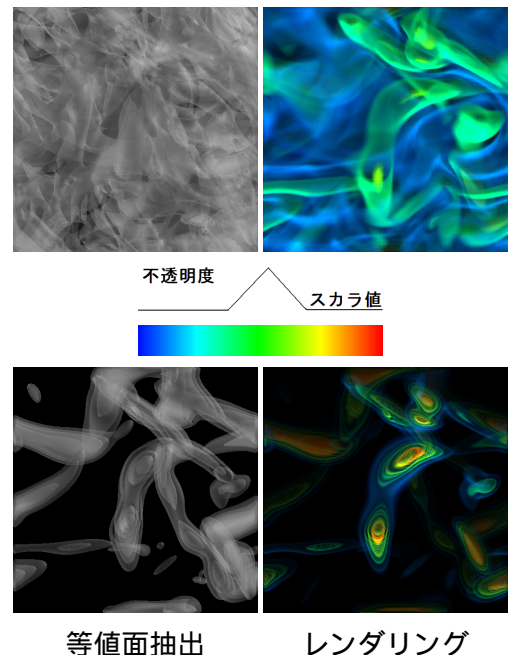


図 3: 渦データの等値面抽出とレイキャスティング法によるレンダリング結果: ポリウム整形化前の可視化例 (上行) と整形化後の可視化例 (下行) と整形化に用いた不透明度伝達関数とその値による色の割り当て (中行).

る. 図 2 上の整形化前の可視化結果を見ると, 中心部が赤くなっている. つまりスカラ値が非常に大きい範囲に特徴的な部分が偏っている. これに図 2 の中行のような伝達関数から整形化を施すと, このポリウムデータの中心部分のスカラ値の分布を縮小することとなる. 図 2 の整形前と整形後の図を比べると, 等値面が位相変化を起こしてトーラスとなっている部分がはっきりと認識できるようになっている.

不透明度値の高いスカラ値は分布は広げ, その他の部分は縮小されたため, 整形化前と比べるとトーラスが生じる部分の変化を可視化パラメータでより細やかに変化をみることができるようになっていることを示している.

3.1.2 渦データへの適用

渦データは, 文献 [7] でつかわれているものと同じであり, 整形化を施す前後をそれぞれ可視化したのが図 3 である. データサイズは, $129 \times 129 \times 129$ である. 整形化前のデータを単純なパラメータで可視化をすると非常に煩雑に渦が表示されている. これに対し, 図 3 の中段のような伝達関数を用いて整形化を行うと, 整形化前にレイキャスティング法により緑色で表示されている渦は, 不透明度値が高いため整形化時のスカラ勾配に割り当てる重みは相対的に大きく, 特徴として広い分布のスカラ値を

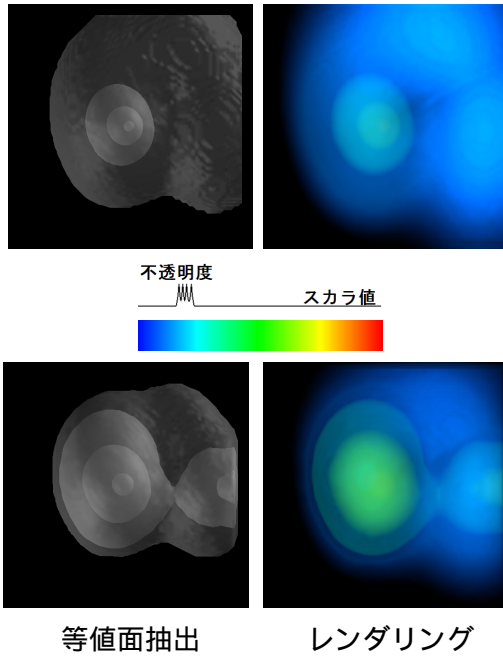


図 4: 陽子・水素原子の衝突データの等値面抽出とレイキャスティング法によるレンダリング結果: ボリューム整形化前の可視化例 (上行) と整形化後の可視化例 (下行) と整形化に用いた不透明度伝達関数とその値による色の割り当て (中行).

もつようになる。逆に青く表示される渦は、不透明度値が低いため、スカラ勾配に作用させる重みが相対的に小さいのでスカラ値の分布が狭まる。実際に整形化後のデータの可視化結果を見ると、整形化前にレイキャスティング法により緑色に表示されていた渦がはっきりと残っていることがわかる。特に整形化後のデータのレイキャスティング法による表示を見ると、各々の渦の内部で黄色や赤で表示され、整形化前よりも高いスカラ値をとるようになり、分布が広がっていることがわかる。これにより、整形化により広い分布域を持った渦は、整形化前より可視化パラメータで細やかな渦の変化を見ることが可能となる。また、煩雑であった周りの渦が目立たなくなり、特徴的な渦を容易に認識できることがわかる。

3.1.3 陽子・水素原子衝突データへの適用

図 4 は、陽子と水素原子の衝突する瞬間のエネルギー分布のデータ [8] である。データのサイズは $65 \times 65 \times 65$ である。整形化前の結果を見ると、どちらの可視化手法とも右側の陽子付近の電化分布の様子がよく見えない。そこで、陽子・水素原子部分の衝突する様子を表すスカラ値領域を広げるようにその部分で不透明度値を高くもつ図 4 の中行のような不透明度値の伝達関数を用いて整形化を行っ

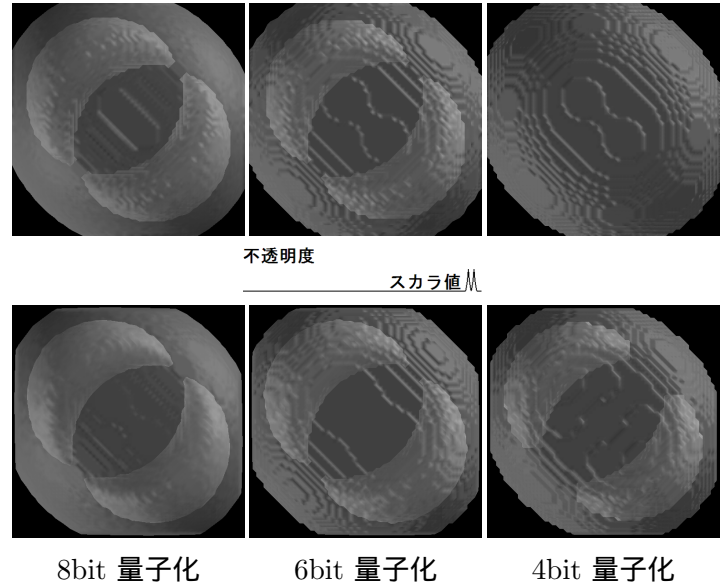


図 5: 解析関数データのボリューム整形化前 (上行) と整形化後 (下行) の、マーチングキューブ法による等値面抽出例. 左から、スカラ値を表現するビット数が 8 (オリジナル), 6, 4 となる.

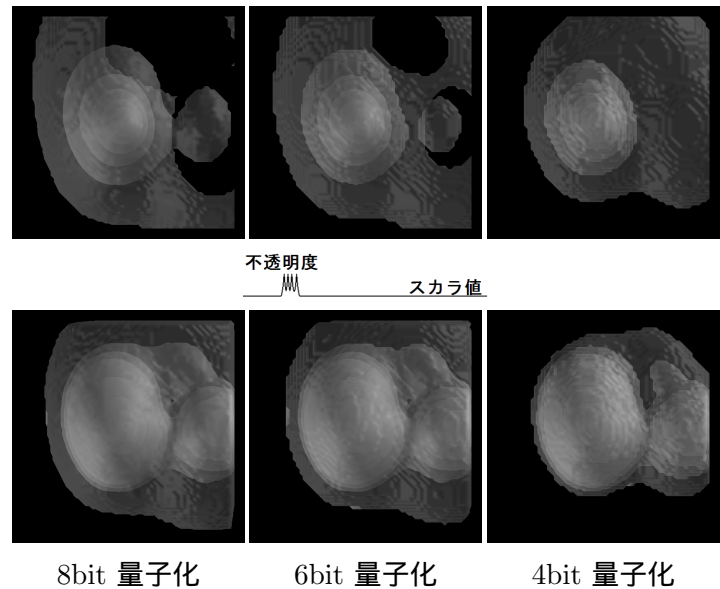


図 6: 陽子・水素原子衝突データのボリューム整形化前 (上行) と整形化後 (下行) の、マーチングキューブ法による等値面抽出例. 左から、スカラ値を表現するビット数が 8 (オリジナル), 6, 4 となる.

た。整形化後の結果を見ると左側の水素原子周りの電化分布が広がったのはもちろんのこと、右側の陽子周りの電化分布がはっきりと認識できるようになったことがわかる。

3.2 ボリュームデータの圧縮

ボリューム整形化を用いると、ボリュームデータに内在していた特徴部分がスカラー値範囲に比較的均等に配置することができる。そのため、スカラー値を表す量子化のためのビット数を下位からある程度削減してデータ自体を圧縮しても、特徴部分を損なうことが少ないということを以下に示す。

図 5 は、3.1.1 項で用いた解析関数を整形化の前後で等値面抽出を行った結果である。なお、図 2 における、等値面とは別の面を抽出している。整形化前後を比べると、上側の整形化を行う前では、4 bit に圧縮したときに内部にある 2 つのクロワッサン状の等値面が失われてしまっているのがわかる。このため、オリジナル (8bit) とは完全に異なる画像となってしまう。一方、整形化後の 4bit に圧縮したときとオリジナル (8bit) を比較するとクロワッサン状の等値面は保持されていることがわかる。

図 6 は、3.1.3 項で用いた陽子と水素原子衝突のデータを処理した結果である。この図からわかるように、整形化前のデータは圧縮すると陽子部分に対応する等値面情報は失われてしまうのに対し、整形化後のデータは圧縮後も比較的その特徴部分を保持することができていることがわかる。

4 定量的評価

シャノンエントロピーとボリュームコヒーレンス [9] を測定することで整形化の前後での違いを定量的に比較した。例として、3.1.1 項で利用した解析関数と 3.1.3 項で用いた陽子・水素原子の衝突データを測定した。図 7 が解析関数データと陽子・水素原子衝突データをそれぞれ整形化の前後において度数分布をグラフにしたものである。図 8 は、ボリュームデータの圧縮を行い、量子化した際のエントロピーとコヒーレンスの測定結果をグラフにしたものである。解析関数データについて図 8 の上行を見てみると整形化の後、どの階調に量子化したときであってもエントロピーが大きく上昇していることがわかる。これは、スカラー値の散らばりがスカラー値の定義域全体に均等化されたため、結果としてデータが持つ情報量 (エントロピー) が増えたことを意味する。また、陽子・水素原子の衝突データにおいて図 8 の上行を見てみると各階調においては、整形化の前後において値の変化ほとんど変化はないものの、コヒーレンスについては、各階調において大きく増大していることがわかる。このように、定量的にも提案手法が、形状を保ちつつ、データの偏りを解消し、有効であることが証明できた。

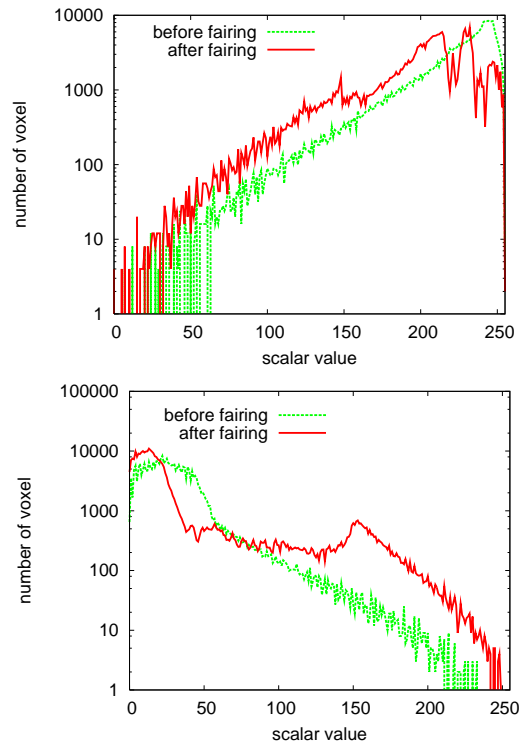


図 7: 解析関数データ (上) と陽子・水素原子衝突データ (下) の整形化前後における度数分布

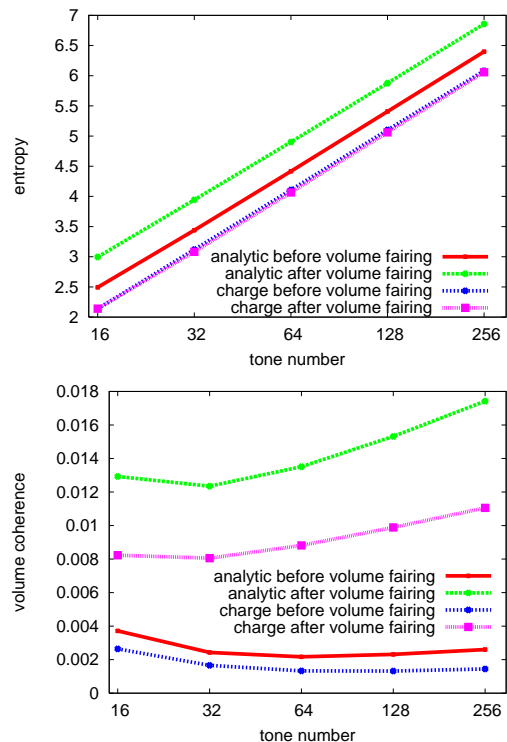


図 8: 各階調におけるエントロピーまたはコヒーレンスのグラフ: 上行が各階調 (横軸) におけるエントロピー (縦軸). 下行が各階調 (横軸) におけるエントロピー (縦軸). analytic が解析関数データで, charge が陽子・水素原子衝突データである。

5 まとめと今後の課題

本論文では、ボリュームデータに内在する特徴を、伝達関数を利用して最適なスカラ値に変換するボリューム整形化の枠組みを示した。伝達関数から不透明度値の高いスカラ値をもつ部分ほど重要な特徴であるという考えに基づき、ボリュームデータの整形化により、特徴部分のスカラ値の分布を可視化時の形状を保ちつつ広げることが可能にした。また、図3が示すように特徴的でない部分は分布を狭め可視化時に除去できるようになった。提案手法によるボリュームデータの整形化の効果はマーチングキューブ法やレイキャスティング法によって可視化した結果を見ても一目瞭然であるが、シャノンエントロピーとボリュームコヒーレンスを測定することで、定量的にもデータの偏りが解消されていることがわかる。整形化によりスカラ値は変化してしまうので、スカラ値を参照したい場合には、必ず整形化前のデータを保持していなければならないが、整形化後のデータは、可視化パラメータの設計を行わなくても、すぐ特徴をあぶりだして可視化することができるようになるため非常に有効であるといえる。

今後はこの枠組みを、スカラ値以外の特性値をとる多次元伝達関数や、ボクセルが複数の値をもつ多変量ボリュームデータへと拡張することが考えられる。加えて今回は、3次元規則格子により構成されたボリュームデータを扱っていたが、どのような非構造格子によるボリュームデータまで適用可能であるかどうかを検証していき、整形化対象となるボリュームデータの制約をさらに緩めていくことが考えられる。また、本論文で提案した手法では、ボリュームデータを整形化するのに伝達関数を必要としている。ボリュームデータ整形化のための伝達関数の設計は、主に文献[6]の手法のようにボリュームデータの位相解析を行い、位相的特徴部分の分布を広げるように設計していた。そこで今後の課題として、与えられたボリュームデータに対して位相解析を行い、そこから抽出したContour Treeと呼ばれる位相骨格木自体に変調を加え、その変調を逆にボリュームデータに反映させることにより、骨格木そのものを、変調を制御するためのインタフェースとして用いる手法を開発することを考えている。

謝辞 本稿の執筆にあたり、渦データを提供して頂いたCalifornia大学Davis校のKwan-Liu Ma氏に深く感謝致します。本研究の一部は、文部科学省科学研究費補助金若手研究(B)(1770092)、日本学術振興会科学研究科費補助金基盤研究(B)(20300033)、科学研究費補助金基盤研究(B)(18300026)による。

参考文献

- [1] Pfister, H., Lorenzen, B., Bajaj, C., Kindlmann, G., Schroeder, W., Avila, L. S., Martin, K., Machiraju, R., and Lee, J.: The Transfer Function Bake-off, *IEEE Computer Graphics & Applications*, Vol. 21, No. 3, pp. 16–22 (2001).
- [2] Fattal, R., Lischinski, D., and Werman, M.: Gradient Domain High Dynamic Range Compression, *Proc. SIGGRAPH 2002*, Vol. 21, No. 3, pp. 249–256 (2002).
- [3] Weyrich, T., Deng, J., Barnes, C., Rusinkiewicz, S., and Finkelstein, A.: Digital Bas-Relief From 3D Scenes, *ACM Transactions on Graphics (Proc. SIGGRAPH)*, Vol. 26, No. 3, pp. 32:1–32:7 (2007).
- [4] Kerber, J., Belyaev, A., and Seidel, H.-P.: Feature Preserving Depth Compress of Range Images, *Proc. 23rd Spring Conference on Computer Graphics*, pp. 110–114 (2007).
- [5] Kindlmann, G. and Durkin, J. W.: Semi-Automatic Generation of Transfer Functions for Direct Volume Rendering, *Proc. of IEEE Symposium on Volume Visualization*, pp. 79–86 (1998).
- [6] Takahashi, S., Takeshima, Y., and Fujishiro, I.: Topological Volume Skeletonization and Its Application to Transfer Function Design, *Graphical Models*, Vol. 66, No. 1, pp. 22–49 (2004).
- [7] Silver, D. and Wang, X.: Tracking and Visualizing Turbulent 3D Features, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 3, No. 2, pp. 129–141 (1997).
- [8] 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).
- [9] Fujishiro, I. and Takeshima, Y.: Coherence-Sensitive Solid Fitting, *Computers & Graphics*, Vol. 26, No. 3, pp. 417–427 (2002).