

フィールド勾配を考慮した四面体ボリュームの詳細度制御

中村 浩子[†] 藤代 一成[†] 竹島 由里子[‡]

[†] お茶の水女子大学 大学院人間文化研究科

〒 112-8610 東京都文京区大塚 2 - 1 - 1

[‡] 東北大学 流体科学研究所

〒 980-8577 宮城県仙台市青葉区片平 2 - 1 - 1

hiroko@imv.is.ocha.ac.jp, fuji@is.ocha.ac.jp, takesima@ifs.tohoku.ac.jp

大規模なボリュームデータを可視化する際には計算機に多大な負荷がかかる。この問題を解決するために、データの特徴を保持しながらボリュームデータの基本構成要素である四面体数を削減するプログレッシブテトラヘドラルリゼーション法が 1998 年に Staadt らによって提案された。ここでは、詳細度制御されたマルチフィールド四面体ブロックボリュームデータから色付き等値面を抽出する場合について考える。等値面抽出に用いるフィールドデータと色付けに用いるフィールドデータがあらかじめ決められているときには、詳細度を制御する際にその条件を組み込むことが望ましい。そこで、等値面抽出に用いるフィールドデータの勾配と色付けに用いるフィールドデータ値の関係を考慮した詳細度制御法を提案する。これによって、四面体ブロックから抽出された色付き等値面上で、色分布誤差の発生をさらに抑えることが実現できる。

LoD Control of Tetrahedral Volumes Taking Field Gradients into Account

Hiroko Nakamura[†] Issei Fujishiro[†] Yuriko Takeshima[‡]

[†] Graduate School of Humanities and Sciences, Ochanomizu University

2-1-1 Otsuka, Bunkyo-Ku, Tokyo 112-8610, Japan

[‡] Institute of Fluid Science, Tohoku University

2-1-1 Katahira, Aoba-Ku, Sendai 980-8577, Japan

The progressive tetrahedralizations algorithm was presented by Staadt, et al. in 1998, to make efficient the process for visualizing tetrahedral block datasets. In this article, we attempt to extend the algorithm for extracting simplified colored isosurfaces from multifield tetrahedral volumes. In a case where it is predetermined which fields are used to extract isosurfaces and to be mapped onto their colors, the extended algorithm takes fully into account the relationship between gradients of the field for isosurfacing and the field for color mapping to select best edges to be collapsed so that the deterioration of color distribution on the resulting colored isosurface can be minimized.

1 背景と目的

四面体ブロック要素のボリュームデータは、有限要素解析の分野だけでなく、3次元スキャナなどを用いて取得された点群データから3次元ボリュームデータを復元する場合にも用いられ、広く一般に扱われるようになった。それに伴い、不規則格子のボリュームデータに対する可視化要求はますます高まってきている。

ボリュームデータの可視化には、ある基準を満たす領域をサーフェイスとして抽出/表示するサーフェイスフィッティング (Surface Fitting) アプローチがある。ここで、大規模なボリュームデータから生成されるサーフェイスデータは、三角形パッチに代表されるポリゴンパッチを膨大な枚数必要とし、描画や転送時に計算機に負荷がかかる。この問題を解決するために、サーフェイスの特徴を保持しながら三角形パッチ数を制御する詳細度制御 (LoD Control) 法であるデシメーション (Decimation) アルゴリズム [?] やプログレッシブメッシュ (Progressive Mesh: PM) 法 [?] が提案された。しかし、サーフェイスフィッティングで抽出される領域が変わるたびに新たに生成されるポリゴンパッチの詳細度を制御する必要が生じる。そこで、サーフェイスフィッティング前の四面体ブロックボリュームデータそのものの詳細度を制御するプログレッシブテトラヘドラリゼーション (Progressive Tetrahedralizations: PT) 法が提案された [?]。ユーザは、サーフェイスフィッティングで抽出される領域が特定されているか否かで、三角形パッチの詳細度制御と四面体ブロックの詳細度制御を使い分けることができる。

しかし、サーフェイスフィッティングで抽出される領域が特定されていない場合でも、抽出される領域をある程度限定できることがある。複数のフィールド値が頂点に与えられたマルチフィールドボリュームデータの情報を同時に可視化する手法のひとつに、あるフィールドデータの等値面上に、別のフィールドデータの対応する値を色にマッピングして色付き等値面を表示するというものがある。ここで、抽出される等値面領域が特定されて

いなくても、等値面抽出に用いるフィールドデータと色にマッピングされるフィールドデータが決められていれば、抽出される等値面領域を限定できる。このとき、等値面が抽出されるフィールドの勾配情報を用いて、色にマッピングされるフィールドデータが、限定された等値面領域内で効果的に保存されるような PT 法を提案する。

2 可視化手順と詳細度制御

可視化のデータフローパラダイムを図??に示す。入力されたデータが大規模である場合は、マッピングとレンダリングそれぞれの処理段階前にデータの詳細度を制御できる。それぞれの段階で行われる詳細度制御法について説明する。

2.1 可視化手順とデータ形式

ボリュームデータの可視化手順には、入力データを別のボリュームデータへ変換するフィルタリング、ある基準を満たす領域を表示可能なオブジェクトに変換するマッピング、そしてボリュームデータやマッピングされたオブジェクトを描画するレンダリングがある (図??)。ここでは、四面体ブロックボリュームデータから色付き等値面を抽出する場合について考える。四面体ブロックボリュームデータからマッピング処理で抽出された色付き等値面は、三角形ポリゴンで表現される。ユーザ

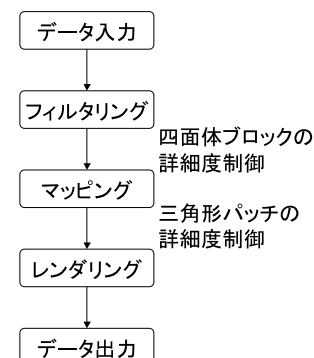


図 1: 可視化手順と適用される詳細度制御

は、効率的な可視化処理を実現させるために、データ形式に応じて四面体ブロックの詳細度制御と三角形ポリゴンの詳細度制御を選択的に利用できる(図??)。

2.2 三角形ポリゴンの詳細度制御

三角形ポリゴンデータの各頂点近傍での幾何学的特徴と位相的特徴を考慮しながらポリゴン数を削減する詳細度制御法が Schroeder らによって提案された[?]。さらに、Hoppe によって形状だけでなくサーフェイスにマッピングされたテクスチャなどの属性も併せて考慮する詳細度制御法である PM 法[?]が提案された。PM 法では、各頂点の特徴を測定するコスト関数に、テクスチャなどの属性誤差を反映させる項を加えることで属性の特徴を保持することを実現している。

われわれは先行研究で、デシメーションアルゴリズムを拡張して、形状/色分布の双方を考慮する詳細度制御法を提案した[?]。そこでは、ポリゴン数を削減するために稜線縮退化操作(図??)[?]を用いている。縮退させる稜線を選択する際のコスト関数に、PM 法と同様に色に反映されるフィールド値誤差の項を加えることで、色分布特徴を保持することを実現した。さらに、データの形状特徴と色分布特徴を測定し、色を考慮する割合に適した値に設定することを提案した。四面体ブロックボリュームデータから抽出された色付き等値面に対しては、この適した色考慮率で形状/色分布特徴を保持する三角形ポリゴンデータの詳細度制御を適用する。

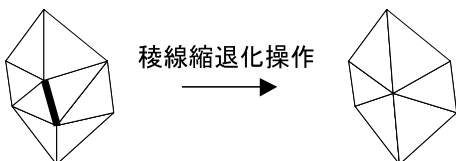


図 2: 三角形パッチの稜線縮退化操作

2.3 四面体ブロックの詳細度制御

1998 年 Stadt らによって提案された PT 法[?]は、PM 法を四面体ブロック向けに拡張したもので、頂点の特徴量をコスト関数を用いて求める。ここでのコスト関数は以下のように定義される：

$$E(M) = E_{volume}(M) + E_{field}(M) + E_{equi}(M),$$

ただし、 $E_{volume}(M)$ は、稜線縮退化操作によって変形した四面体ブロック要素の変形体積量を表し、 $E_{field}(M)$ は稜線縮退化操作によって生じるフィールドデータの誤差量を表す。また、ボリュームデータを構成する四面体ブロックの稜線を均等化するために、 $E_{equi}(M)$ の項は稜線の長さのバランスを表している。ここで求められたコスト関数が小さいとき、四面体ブロックの稜線縮退化操作(図??)によって要素数が削減される。

四面体ブロックボリュームデータそのものの詳細度が制御されるので、色付き等値面抽出などのマッピング処理も効率的に実現できる。色付き等値面抽出前の四面体ブロックボリュームデータの詳細度を制御する際には、この PT 法を適用する。

3 フィールド勾配を考慮した詳細度制御

四面体ブロックボリュームデータから色付き等値面を抽出する際に、等値面抽出、色マッピングに用いるフィールドデータを、ボリュームコヒーレンスから特定する。そして、色にマッピングされるフィールドデータを色付き等値面上で効果的に保存するように四面体ブロックボリュームデータの詳細度を制御する。

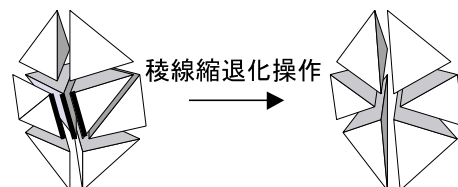


図 3: 四面体ブロックの稜線縮退化操作

3.1 ボリュームコヒーレンス

2次元テクスチャの特徴量を計算するために、画像濃度 i の点から一定変位だけ離れた点が濃度 j である確率 $P(i, j)$ を要素とする同時生起行列 (Co-occurrence Matrix) を求める [?] . ここで i, j は濃度レベルであり、濃度レベルの個数が N であれば、同時生起行列は $N \times N$ 行列になる . 藤代らは、この同時生起行列を用いた特徴量抽出法を3次元に拡張し、規則格子ボリュームデータのボリュームコヒーレンスを定量化する尺度 (Volumetric Coherence Measure: VCM) を提案した [?]

$$VCM = - \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} \frac{(i-j)^2}{N^2} P(i, j) \log \{ P(i, j) \} .$$

さらに、マルチフィールドデータを可視化するには VCM の大きいデータを形状抽出に、小さいデータを色付けに用いると視覚的理解を高めることを示した [?] .

本稿では四面体ブロックボリュームデータの隣接ボクセル間の同時生起行列を生成し、その VCM から等値面抽出、色マッピングに用いる特定フィールドデータをそれぞれ特定する .

3.2 フィールド勾配重み付き稜線縮退

ボリュームコヒーレンスの解析結果から、等値面抽出、色付けそれぞれに用いる特定フィールドデータが特定されたとき、その情報をもとに、抽出される色付き等値面上で色分布が効果的に保存されるように四面体ブロックボリュームデータの詳細度を制御する . 具体的には縮退させる稜線を選択する際に以下に示すコスト関数を用いる :

$$E(M) = E_{volume}(M) + E'_{field}(M) + E_{equi}(M) .$$

フィールド値誤差を示す項である $E'_{field}(M)$ の定義を以下に示す :

$$E'_{field}(M) = \sum_i (E_{f_{shape}}(e_i) + wE_{f_{color}}(e_i)) .$$

ここで、 e_i は削除される頂点 v に接続する稜線を表す . また、 $E_{f_{shape}}(e_i)$ は削除対象の頂点 v に接続

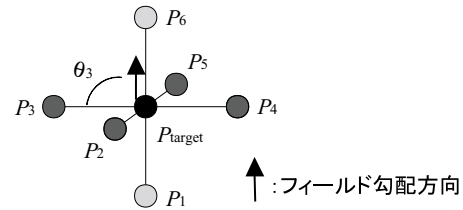


図 4: フィールド勾配を考慮した重み付け例

する稜線の端点間での等値面抽出に用いるフィールド値の誤差を表し、 $E_{f_{color}}(e_i)$ は色にマッピングされるフィールド値の誤差を表す . w は、等値面抽出に用いるフィールドの勾配と、稜線方向の成す角 θ が垂直に近いほど重みを与えるように、 $(1 - \cos(\theta))$ で計算される . 図??中でのフィールド勾配と、稜線 (P_{target}, P_3) の成す角は、 θ_3 になる . 具体的に図??中の P_{target} に接続される稜線の色付けされるフィールド誤差が考慮される割合を頂点の色の濃さで示す . 考慮される割合が大きい稜線ほど接続している頂点を濃い色で表している .

4 実験

実験環境には、Gateway Solo5300 (CPU : Intel Pentium III[§] 750MHz , RAM : 256MB) を使用し、実験には、頂点数 4,913、四面体数 24,576 の透水係数データを用いた [?] . 透水係数データには、ポテンシャルデータと流速データが各頂点に与えられている .

それぞれのフィールドデータの VCM を測定した結果を表??に示す . この結果から VCM の値が大きなポテンシャルデータを形状抽出に用い、流速データを色付けに用いる . ポテンシャルデータの値を変えて抽出した色付き等値面結果と、詳細度が制御された四面体ブロックボリュームデータから色付き等値面を抽出した結果を示す (図??) . 詳細度制御には、PT 法と提案手法のそれぞれを用いた . 詳細度を制御するために、PT 法では 205 秒、提案手法では 198 秒を要した . PT 法、提案

[§] Pentium III は Intel 社の商標である .

表 1: 透水係数データの VCM 比較	
ポテンシャルデータ	流速データ
4.62×10^{-1}	8.94×10^{-2}

手法で詳細度制御された四面体ブロックから等値面を抽出するのにかかった時間は，元の四面体ブロックから抽出したときと比べ，平均約 50%短縮された．

5 まとめ

色付き等値面を抽出する前の四面体ブロック要素で構成されたマルチフィールドデータに対して有効な詳細度制御法を提案した．まず，マルチフィールドデータの VCM 測定結果から，等値面抽出，色付けに用いるフィールドをあらかじめ特定する．そして，抽出される色付き等値面上で効果的に色分布を保存するため，等値面抽出に用いるフィールドの勾配と直交する方向の色誤差にコスト関数内で重みを与える．これによって，色付き等値面上での色分布を効果的に保持しながら詳細度を制御することを実現した．

本提案手法を用いることで，ユーザが指定した可視化領域の限度度に応じて可視化対象データの詳細度を制御するガイドラインが構成できる．色付き等値面の抽出領域が特定される場合，つまり，等値面抽出に用いるフィールドの抽出フィールド値が決められている場合には，適した色考慮率で形状／色分布特徴を保持する三角形ポリゴンデータの詳細度制御 [?] を適用する．色付き等値面の領域抽出，色付けに用いられるフィールドデータが決められている場合には提案手法であるフィールド勾配を考慮した四面体ボリュームデータの詳細度制御を用いる．色付き等値面を抽出することに関して，何も情報が与えられていない場合には PT 法で四面体ボリュームデータの詳細度を制御する．

また，今回は色付き等値面抽出の場合に限定したが，提案手法は断面抽出やボリュームレンダリ

ングの際にも利用できる．断面抽出では，抽出される断面の法線方向があらかじめ決められている場合，この法線と直交方向の色誤差にコスト関数内で重みを与える．ボリュームレンダリングでは，視線方向があらかじめ決められている場合に，断面抽出同様，視線方向と直交方向の色誤差に重みを与える．

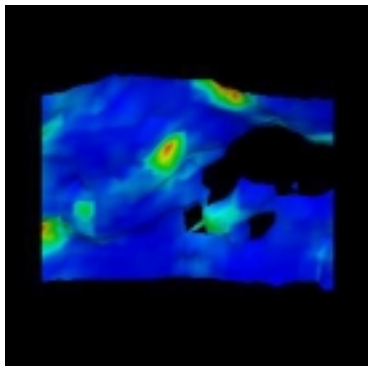
今後は提案手法の定量的な評価方法について検討する予定である．

謝辞

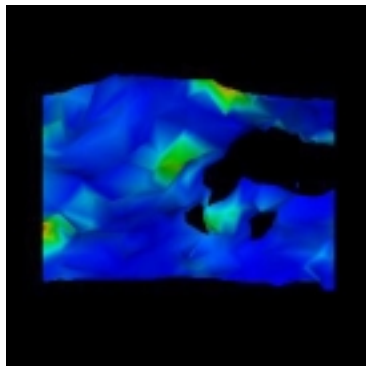
解析データや，貴重なコメントを頂戴している RIST の旧 GeoFEM メンバの方々に感謝いたします．

参考文献

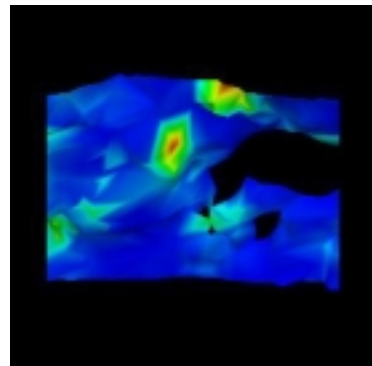
- [1] Schroeder, W. J., Zarge, J. A. and Lorensen, W. E.: Decimation of Triangle Meshes, In *Proc. SIGGRAPH '92*, pp. 65–70 (1992).
- [2] Hoppe, H.: Progressive Meshes, In *Proc. ACM SIGGRAPH 96*, pp. 99–108 (1996).
- [3] Oliver G. Staadt and Markus H. Gross: Progressive Tetrahedralizations, In *Proc. IEEE Visualization '98*, pp. 99–108 (1998).
- [4] 中村 浩子, 竹島 由里子, 藤代 一成, 奥田 洋司: 形状/色分布特徴を考慮した区間型ボリュームの半自動詳細度制御, *情報処理学会論文誌*, Vol. 42, No. 5, pp. 1115–1123 (2001)
- [5] 富田 文明, 白井 良明, 辻 三朗: テクスチャの解析, *情報処理学会論文誌*, Vol. 19, No. 2, pp. 173–182 (1978)
- [6] Fujishiro, I. and Takeshima, Y: Coherence-sensitive Solid Fitting, *Computers & Graphics*, Vol. 26, No. 3, pp. 417–427 (2002).
- [7] GeoFEM:
<http://geofem.tokyo.rist.or.jp/>



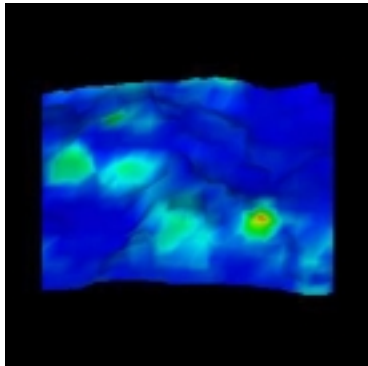
(a) 元データ
パッチ数：2,100



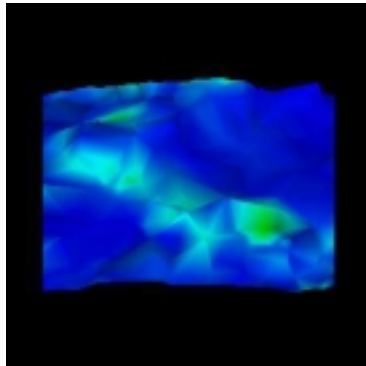
(b) PT 法
パッチ数：1,220
ポテンシャル値 0.25 での色付き等値面



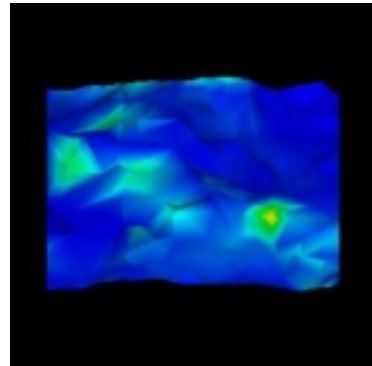
(c) 提案手法
パッチ数：1,221



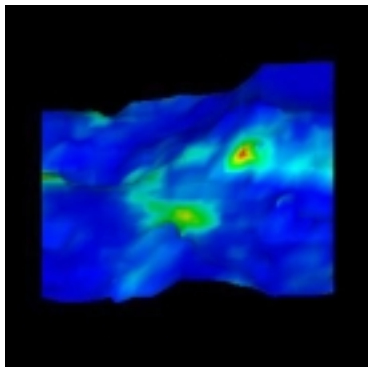
(d) 元データ
パッチ数：2,434



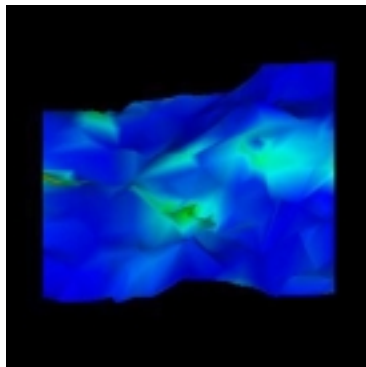
(e) PT 法
パッチ数：1,029
ポテンシャル値 0.5 での色付き等値面



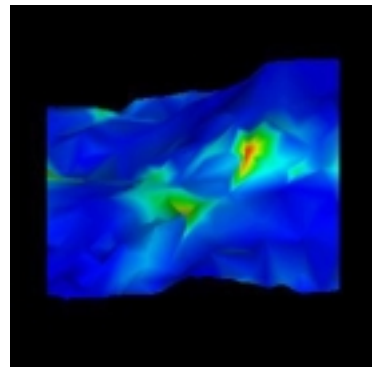
(f) 提案手法
パッチ数：1,119



(g) 元データ
パッチ数：2,424



(h) PT 法
パッチ数：1,053
ポテンシャル値 0.75 での色付き等値面



(i) 提案手法
パッチ数：1,039

図 5: 詳細度制御された透水係数データ (RIST 中島 研吾氏提供) から色付き等値面を抽出した結果 (四面体数 60% 削減)