223 色属性をもつ区間型ボリューム抽出および詳細度制御

中村浩子[○], 竹島由里子, 藤代一成 (お茶の水女子大学)

Extraction and LOD Control of Colored Interval Volume

Hiroko Nakamura, Yuriko Takeshima, Issei Fujirshiro

ABSTRACT

Interval volumes allow the user to represent a three-dimensional subvolume for which associated scalar field values lie within a specified closed interval. Interval volume fitting can be viewed as a more effective tool for exploring volumetric ROIs, compared with isosurface fitting. In order to extract interval volumes from which geometrical features can be effectively mined, the coherence structure between adjacent voxels is globally examined. In addition, a simplification scheme to decimate resultant triangle patches is extended to efficiently transmit and render polygonal patch datasets for large-scale interval volumes.

Keywords: Scientific visualization, interval volume, simplification, level of detail control.

1 背景と目的

インダイレクトボリュームビジュアライゼーションの技法のひとつに、関心領域 (ROI) であるフィールド区間を多角形パッチを用いて抽出する区間型ボリューム (interval volume) がある [1]. この技法は、特定のフィールド値だけを抽出する等値面化 (isosurfacing) と比べ、データの全体像をとらえることができる。しかし、フィールド区間の指定はユーザの経験に依存するので、経験の浅いユーザが関心領域に対応するフィールド区間を指定するのは困難である。そこで、ボリュームデータを構成するボクセルの接続関係に着目し、隣接ボクセル間でのフィールド値差分の解析結果から抽出区間を自動的に設定する手法を提案する。

このようにして、大規模な／複雑なボリュームデータから抽出された区間型ボリュームも、膨大な枚数の多角形パッチから構成され、描画や転送に多大な負荷がかかる。この問題を緩和するために、抽出されたパッチを効果的に削減する必要がある。われわれは、データの形状特徴を保ちながら三角形パッチを削減するデシメーションアルゴリズム (decimation algorithm) [2] を拡張し、区間型ボリュームの形状と色分布の双方を考慮しながら詳細度 (level of detail) を制御する手法を提案する。従来の研究で、形状特徴を考慮する詳細度制御法は数多く報告されているが、色などの属性を考慮した手法は比較的少ない [3]. これらの手法は、形状特徴に対して属性を考慮する割合を一律に設定しているが、実際のデータは、複雑さなどの特徴がさまざまであり、与えられたデータに対して適した色考慮率を一律に定めることはできない。そこで、データごとに適した色考慮率を設定する手法を提案する [4]. さらに、抽出された区間型ボリュームの稜線や角のような特徴点を強調するようにパッチを削除する。削減後のデータを必要に応じて復元する機能も併せて提案する。

2 区間型ボリューム抽出

区間型ボリュームは、指定する区間によってボリューム全体を表現することも、等値面を表現することもできる。しかし、抽出前のボリュームデータについて予め知見をもたないユーザが、効果的な区間を指定することは困難である。ボリュームレンダリングの伝達関数設定では、ボリュームデータの数学的解析結果に基づいて、特定領域を強調する手法が数種類提案されてきた [5][6]. ここでも、ボリュームデータの数学的解析結果を利用して区間型ボリュームの抽出区間を指定する。

2.1 区間型ボリュームの定義

区間型ボリュームは、フィールド値がある有限閉区間に属するような3次元サブボリュームを、向きをもった多角形のパッチを用いてソリッドとして表現したものである [1]. ボリューム $V = (S, f)$ が与えられたと仮定する。ここで、 S は3次元ユークリッド空間内の矩形領域、 f は有限閉区間 $[f_{min}, f_{max}] (\subset R)$ を S へ写像するフィールド関数である。このとき、区間型ボリューム $IV(\alpha, \beta)$ は、次式で表される：

$$IV(\alpha, \beta) = \{(p, f(p)) | p \in S, \alpha \leq f(p) \leq \beta\}$$

ただし、 α, β は、 $f_{min} \leq \alpha \leq \beta \leq f_{max}$ の条件を満たす値をとる。

この区間型ボリュームは、指定される区間によってさまざまな意味をもつ。 $IV(f_{min}, f_{max})$ はボリューム全体を表現し、 $IV(\alpha, \alpha)$ は目的値 α の等値面に縮退する。また、 $IV(\alpha - \varepsilon, \alpha + \varepsilon)$ (ただし $\alpha \gg \varepsilon > 0$) は、誤差 2ε を許容した目的値 α の等値面を表現する。これらから、区間型ボリュームは等値面の一般形を与えていることがわかる。

2.2 区間型ボリュームのフィールド区間設定

数値解析データの場合, 一般的に解析対象の現象が集中する領域付近では, 隣接ボクセル間のフィールド値に変化が生じる. このような領域は, 解析者にとって関心領域であると考えられるので, 他の領域によって隠されないように区間型ボリュームの抽出フィールド区間を指定するべきである. この変化率は隣接ボクセル間のフィールド値から求められるので, 対象データは構造格子に限定されない. また, 医療画像などの計測データでは, 複数のマテリアル境界でフィールド値が変化するので, 隣接ボクセル間のフィールド値の変化率を用いてフィールド区間を指定する方式は一般性をもつと考えられる [6].

フィールド値の変化率測定には, 2次元テクスチャの特徴量を計算するために, 画像の濃度 i の点と隣接する点が濃度 j である確率 $P(i, j)$ を要素とする同時生起行列 (co-occurrence matrix) [7] を拡張的に利用する. 区間型ボリュームの抽出領域はフィールド区間で指定するため, 変化率は各フィールド値ごとに求める必要がある. そこで, 各々のフィールド値を与えられたボクセルとそれらに隣接するボクセルを選択し, 同時生起行列を作成する. 濃度レベル数が N_c であれば, N_c 個の $N_c \times N_c$ 同時生起行列が作られる. そして, フィールド値分布の変化率の大きさを求めるために竹島らのコントラストを測定するボリューム特徴量測定 [8] を利用し, フィールド値が i であるボクセル周辺の変化率値 C_i を定義する:

$$C_i = \sum_{j=0}^{N_c-1} \frac{(i-j)^2}{N_c^2} P(i, j)^2$$

以上より求められた変化率値から, フィールド値分布の変化率が大きい領域を特定し, 区間型ボリューム抽出範囲とする.

3 詳細度制御

ボリュームデータが大規模であるとき, 抽出された区間型ボリュームは, 膨大な枚数の多角形パッチから構成され, 描画や転送に負荷がかかる. そこで, デシメーションアルゴリズムを拡張し, 効果的に詳細度を制御する手法を提案する. 区間型ボリュームは, ボリュームデータのフィールド値分布を, 形状と色分布を用いて表現している. そこで, 形状と色分布双方の特徴を保ちながら詳細度を制御する [4]. 詳細度制御されたデータは, 元データである区間型ボリュームの稜線や角のような形状特徴を, さらに強調するようにする.

3.1 デシメーションアルゴリズム

簡単化には, デシメーションアルゴリズム [2] を拡張し区間型ボリュームに適用した. デシメーションアルゴリズムは, 三角形パッチで構成されたデータセットに対して, まず, すべての頂点を近傍の位相特徴から5つに分類する (Fig. 1). 区間型ボリュームは閉じた面であるため, boundary は存在

Fig. 1 頂点の分類

Fig. 2 稜線縮退化操作と頂点分割化操作

しない. feature edge は, ここでは隣り合う三角形パッチの法線のなす角が 60 度以上であると仮定している. 頂点分類の次に, 分類ごとに頂点近傍の形状特徴を評価する. 形状特徴が小さい頂点は削除し, 削除によって生じた穴に再度三角形パッチを張り直す. これを減少割合などによって定められた限界に達するまで繰り返す.

3.2 色を考慮した簡単化操作

色などの属性を考慮した詳細度制御法は, 先行研究で既にいくつか報告されている [3]. われわれは, 詳細度制御の手法としてもっとも広く知られているデシメーションアルゴリズムに対して色分布を考慮する機能を加えた. オリジナルのデシメーションアルゴリズムでは形状特徴しか評価しないが, ここでは再三角形化によって失われる色情報量も予測し制御基準に組み込む. 再三角形化には, 稜線縮退化 (edge collapse) 操作を用いる (Fig. 2) [3]. この方法は, 色分布の保持に有効だけでなく, 既に存在するパッチを変形することにより新しいパッチを生成するので, オリジナルのデシメーションで採用されていた頂点の削除, 再三角形化操作に比べ高速である. 稜線縮退化操作で縮退させる稜線を選ぶ基準は, Fig. 1 で示す頂点分類ごとに, 削除点と周りを囲む各頂点との距離, および色の相違から決定する. 具体的には, 稜線の両端点 V_1, V_2 を用いて距離 $dist(V_1, V_2)$, および色の相違 $col(V_1, V_2)$ から求まる特徴量 $d(V_1, V_2)$ が小さい稜線を選択する. この値は以下の式で表される:

$$d(V_1, V_2) = \gamma \frac{col(V_1, V_2)}{col(all)} + (1 - \gamma) \frac{dist(V_1, V_2)}{dist(all)}$$

ただし, γ は色考慮率を表し, $0 \leq \gamma \leq 1$ の条件を満たす値をとる. $col(all)$ は色に反映されるフィールド値の最大値と最小値の差, $dist(all)$ はオブジェクトを矩形領域で囲んだときの最長辺の長さをそれぞれ表す. これらを用いることで2点間の距離やフィールド値の差を正規化する.

3.3 色考慮率の設定

色考慮率 γ は、データの性質によって適した値が異なる。そこで、効果的な γ の値を設定する手法を提案する。具体的には、区間型ボリュームがもつ形状特徴量と表面に分布する色分布特徴量を測定し、それらの値から色の考慮率を自動的に設定する。形状特徴量は頂点分類 (Fig. 1) で得られた結果を利用する。具体的には、全頂点数 N_v に対する simple 以外に分類された頂点数の比を形状特徴量 F_s と定義する：

$$F_s = \frac{N_v - N_{simple}}{N_v}$$

ただし、 N_{simple} は simple に分類された頂点数を表す。色分布については、変化率やばらつきが大きいほど特徴量も大きいと考え、パッチの接続関係から求めた同時正規行列 P のコントラストとエントロピーを組み合わせた 2 次元テクスチャ特徴量から色分布特徴量 F_c を測る：

$$F_c = - \sum_{i=0}^{N_c-1} \sum_{j=0}^{N_c-1} \frac{(i-j)^2}{N_c^2} P(i, j) \log\{P(i, j)\}$$

そして、得られた特徴量を、経験的に求めたパラメタ a, b によって調節し、削減率 r を加味して色考慮率 γ を設定する：

$$\gamma = \frac{F_c}{F_c + F_s a \{\log_{10}(N_v)\}^b} (1.5 - r)$$

3.4 輪郭線強調

詳細度制御では、凹凸の小さい頂点を削除するため、表面に細かな凹凸のある面は平坦化される。しかし、曲率の大きな頂点は残されるので大局的な形状特徴は保持される。しかし、削減率を高く設定すると、低周波成分も徐々に平坦化される場合がある。そこで、稜線や角の特徴が平坦化されないように簡単化する。

文献 [2] で示された頂点分類 (Fig. 1) で、interior edge や corner に分類された頂点を特定し、それらの頂点と隣接する頂点が削除される時は、凹凸の向きが同じであるという条件を加える。具体的には、凸であるような interior edge と隣り合う頂点は、その頂点周辺で局所的に凸でなければ削除候補としない (Fig. 3)。これによって、区間型ボリュームの稜線や角の特徴が平坦化されるのを防ぐ。

3.5 復元操作

頂点、および三角形パッチを削除する稜線縮退化操作の逆操作によって、簡単化されたデータを元の状態に戻す [3]。そのために、削除される頂点とその縮退先の頂点、さらに縮退

Fig. 3 輪郭線を強調した頂点削除 (2 次元)

Fig. 4 詳細度制御の親子関係

先の両脇の頂点 ID を削除履歴情報として保存する。復元は、保存された情報を用いて頂点分割化 (vertex split) 操作を施し、三角形パッチを再構成することで実現する (Fig. 2)。局所的に復元する場合は、稜線縮退化操作によって生じた頂点削除の親子関係を参照することで実現する。Fig. 4 のような過程で、7つの頂点 (V_1 – V_7) が3つの頂点 (V_2, V_4, V_6) に縮退されたとする。このデータで、 V_2 近傍の詳細度を上げるときは、破線内の履歴を参照すればよい。

4 実験

実装・実験環境には、SGI 社製 OCTANE システム (CPU: R10000×2, Clock: 195MHz, RAM: 2GB) を用いた。実験データである断層データは、科学技術庁振興調整費研究「地球シミュレータ: GeoFEM」[9] の構造解析サブシステムで計算されたものである。

4.1 区間型ボリューム抽出結果

区間型ボリューム抽出前の断層データは、6 面体の非構造格子データであり、頂点数 7,220, 6 面体要素数 5,832 で構成されている (Fig. 6 (a))。このデータはフィールド値としてミーゼス応力を各ボクセルに与えており、それらを 8bit 符号なし整数に正規化して変化率を測定した。その結果を Fig. 5 に示す。この結果から、フィールド値の最大値、最小値であるような両端から、変化率値がきわめて 0 に近い領域を排除するように狭めていく。ここでは、変化率値が 0.001 以下の領域を抽出外とした。抽出されるフィールド値区間は [24, 255] となり、この区間指定で区間型ボリュームを抽出すると、Fig. 6 (b) に示す結果が得られた。

Fig. 5 断層データのフィールド値ごとの変化率値 (横軸: フィールド値, 縦軸: 変化率値)

Fig. 6 断層データの区間型ボリューム抽出結果

Fig. 7 断層データの詳細度制御結果

4.2 詳細度制御結果

ボクセルに与えられたフィールド値の変化率値から指定されたフィールド区間を用いて抽出された区間型ボリュームデータに対して, パッチ数を 75%削減した. このときの色考慮率は 0.224 と設定され, この色考慮率で単純化を行った結果を Fig. 7(a) に示す. 単純化されたデータを, 局所的に復元した結果も Fig. 7(b) に示す. 復元される領域には下表面付近の領域を指定し, その領域内で削除されたパッチを再構成した. 計算時間は, 単純化処理に 5.5CPU 秒, 復元処理に 0.1CPU 秒を要した.

5 まとめと今後の課題

ボリュームデータから区間型ボリュームを抽出する際, ボクセルに与えられたフィールド値の変化率を測定し, その値の解析結果から, 関心領域区間を指定する一手法を提案した. これによって, 抽出前のボリュームデータを十分観察しなくても, 意味ある領域を抽出することができた. さらに, 抽出されたデータを効果的に描画, 転送するために詳細度を制御する手法も併せて提案した. パッチ数を削減するとき, 形状特徴だけでなく, 表面にマッピングされた色分布特徴も適した色考慮率で考慮される. 色考慮率は自動的に決定されるので, 単純化される前のデータを視覚的に観察する必要がなくなり, パッチ処理にも利用できる. 単純化されたデータから関心領域を復元する機能も併せて開発した.

今後は, 大規模なデータに適用し提案手法精度を検証する予定である.

謝辞

解析データの提供だけでなく, 貴重なコメントを頂戴した(財)高度情報科学技術研究機構の GeoFEM メンバの方々に感謝致します. 有益な意見を頂いた日本アイ・ビー・エム(株)東京基礎研究所 伊藤 貴之 氏に感謝致します.

参考文献

- [1] Fujishiro, I., Maeda, Y., Sato, H. and Takeshima, Y.: "Volumetric Data Exploration Using Interval Volume," *IEEE TVCG*, 2(2):144-155, 1996.
- [2] Schroeder, W. J., Zarge, J. A. and Lorensen, W. E.: "Decimation of Triangle Meshes," *Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH '92)*, pp. 65-70, 1992.
- [3] Hoppe, H.: "Progressive Meshes," *Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH 96)*, pp. 99-108, 1996.
- [4] 中村 浩子, 竹島 由里子, 藤代 一成, 奥田 洋司: 形状/色分布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*, 42(5):1115-1123, 2001 年
- [5] Kindlmann, G. and Durkin, J. W.: "Semi-Automatic Generation of Transfer Functions for Direct Volume Rendering," *Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH 98)*, pp. 79-86, 1998.
- [6] Fujishiro, I., Azuma, T., Takeshima, Y. and Takahashi, S.: "Volume Data Mining Using 3D Field Topology Analysis," *IEEE CG & A*, 20(5):46-51, 2000.
- [7] 富田 文明, 白井 良明, 辻 三朗: テクスチャの解析, *情報処理*, 19(2):173-182, 1978 年
- [8] Takeshima, Y. and Fujishiro, I.: "Measuring Volumetric Coherence," In *ACM SIGGRAPH98 Conference Abstracts and Applications*, p. 260, 1998.
- [9] GeoFEM: <http://geofem.tokyo.rist.or.jp/>