

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

中村 浩子^{†1} 竹島 由里子^{†1,†2}
藤代 一成^{†2,†3} 奥田 洋司^{†2,†4}

大規模ボリュームデータから抽出される等値面や区間型ボリュームを表現するポリゴンデータセットは大容量となり、描画・転送する際に大きな負荷がかかる。そこで、三角形パッチのデータセットに対する詳細度制御法の1つであるデシメーションアルゴリズムを拡張し、形状だけでなく、その色分布特徴も保ちながらパッチの枚数を削減する。このとき、対象データの相関特性に基づいて色分布を考慮する割合を半自動的に決定する手法を提案する。さらに、削減されたデータを元データに効率良く復元する機能も開発する。復元されたデータは、その削減率から設定される色考慮率で簡単化されたときと同等の精度を持つことが保証される。

Semi-automatic Simplification of Interval Volumes Taking into Account Shape and Color Distribution Features

HIROKO NAKAMURA,^{†1} YURIKO TAKESHIMA,^{†1,†2} ISSEI FUJISHIRO^{†2,†3}
and HIROSHI OKUDA^{†2,†4}

In this paper, we extend the triangle decimation algorithm presented by Schroeder, et al. in 1992 to make efficient the transmission and rendition of triangle patch datasets for large-scale colored isosurfaces and interval volumes. The extended algorithm accounts for color distribution as well as geometric features to select best edges to be collapsed. Although analogous concepts can be found in the literature, what distinguishes the algorithm from the others lies in its auxiliary mechanism to optimize the combination ratio of the color/geometry components in an error metric semi-automatically by reflecting the coherence structure of a given two-vector volumetric dataset. In this paper, an efficient restoring functionality is also developed to be accompanied with the extended simplification scheme. The accuracy of restored data with arbitrary reduction ratio is guaranteed to coincide with that of data reduced to the same extent from the original with the optimized combination ratio of the color/geometry components.

1. 背景と目的

インダイレクトボリュームビジュアリゼーションの代表的な技法の1つに、ある特定のフィールド値を持つサーフェスを多角形パッチを用いて抽出する等値面化 (isosurfacing) がある。藤代らは、この考え方を一般化し、区間型ボリューム (interval volume) を

用いたソリッドフィッティング (solid fitting) を提案した^{1),2)}。等値面では、ある特定のフィールド値分布しか表示できないためデータの全体像をとらえることが困難であったが、区間型ボリュームは、フィールド区間を指定することで、関心領域 (ROI) をより柔軟に抽出できる。さらに、その形状と色付けによって、2種類のフィールド値からなるマルチスカラーボリュームの可視化に利用される。しかし等値面化の場合と同様に、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を構成するためには、膨大な枚数の多角形パッチが必要になり、描画やネットワークを介したデータ転送に多大な負荷がかかる。この問題を緩和するには、抽出されたパッチを効果的に削減しなければならない。

我々は、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

†1 お茶の水女子大学大学院人間文化研究科
Graduate School of Humanities and Sciences, Ochanomizu University

†2 財団法人高度情報科学技術研究機構 (RIST)
Research Organization for Information Science & Technology

†3 お茶の水女子大学理学部
Faculty of Science, Ochanomizu University

†4 東京大学大学院工学系研究科
School of Engineering, University of Tokyo

algorithm³⁾を拡張し、区間型ポリウ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^{4)~8)}。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。そこで本論文では、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^{9),10)}。これは、対話的に色考慮率を変えて実験できないような大規模データを可視化する場合に有効である。また、簡単化される前のデータを視覚的に観察する必要がないので一括処理にも利用できる。さらに、選択的に元の精度で表示、解析する必要が生じた場合に対処するため、簡単化されたデータを必要に応じて元の精度に復元させる。これは、保存した削除履歴情報を参照して、簡単化と逆の操作を行うことで実現する。復元されるデータは、適した色考慮率で簡単化されたときと同等の精度を持つことが保証される。

2. 色を考慮した区間型ポリウームの簡単化と評価

区間型ポリウームは、指定する区間によってポリウ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。区間型ポリウームに対して有効な簡単化手法は、区間型ポリウームの特別な場合である等値面に対しても有効であるといえる。そこで、本論文ではインダイレクトポリウームビジュアライゼーション技法の代表として区間型ポリウームをとりあげ、効果的に簡単化する手法を提案する。区間型ポリウームは、ポリウームデータの境界に相当する面が抽出されることがあり、元のポリウームデータが規則格子であるとき、この面は平らになる。形状抽出と色のマッピングに同一フィールド値を用いると、色分布の変化はこの面だけで生じるため、形状だけを考慮して簡単化すると色の情報が大きく失われてしまう。そこで色分布を考慮した簡単化手法を提案する。なお、この手法は区間型ポリウームだけでなく、テクスチャマッピングされたサーフェスパッチからなるポリゴンデータ一般にも適用可能である。

2.1 区間型ポリウームの定義

区間型ポリウームは、フィールド値がある有限閉区間に属するような3次元サブポリウームを、向きを持った多角形のパッチを用いてソリッドとして表現し

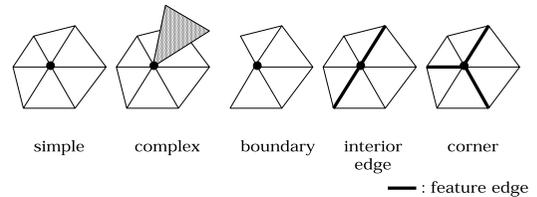


図1 頂点の分類

Fig. 1 Classification of vertices.

たものである^{1),2)}。ポリウーム $V = (S, f)$ 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 $[f_{\min}, f_{\max}] (C R)$ を S へ写像するフィールド関数である。このとき、区間型ポリウーム $IV(\alpha, \beta)$ は、次式で表される：

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

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。

この区間型ポリウームは、指定される区間によってさまざまな意味を持つ。 $IV(f_{\min}, f_{\max})$ はポリウーム全体を表現し、 $IV(\alpha, \alpha)$ 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、区間型ポリウームは等値面の一般形を与えていることが分かる。

2.2 区間型ポリウームの簡単化

詳細度制御法の1つであるデシメーションアルゴリズム³⁾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幾何学的特徴と位相的特徴から5つに分類する(図1)。区間型ポリウームは閉じた面であるため、boundaryに分類される頂点は存在しない。interior edgeやcornerを特定するときの基準となるfeature edgeは、隣り合う三角形パッチの法線のなす角が60度以上としている。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。形状特徴が小さいと判断されたときは、頂点を削除し、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。

区間型ポリウーム $IV(\alpha, \beta)$ は、フィールド値が α の等値面と β の等値面、さらに元のポリウームデータの境界に相当する境界面のいずれかに属するパッチから構成される。境界面に属するパッチは多角形であるので、三角形化によって三角形パッチに変換する。さらに、すべての面の中で特徴の小さい頂点から順に削除するために、 α の等値面、 β の等値面、境界面の3つに分割されているデータを1つにまとめる。以上の処理によって得られた、三角形パッチで構成された

面にデシメーションアルゴリズムを適用する。

区間型ポリウームでは区間幅が小さいデータを簡単化すると、新たに張られたパッチが交差を起こす場合がある。デシメーションアルゴリズムでは、再三角形化をするときに新しく生成されるパッチどうしが交差しないように調節するが、すでに存在するパッチに新しく生成されたパッチが交差するかどうかの判定は行っていない。文献4)では、交差が起こった場合に位相を操作して対応している。区間型ポリウームは体積を持つソリッドであるため、交差が起こらないように逐一判定を行い、交差が起きたときには位相を操作するべきである。しかし、すべてのパッチとの交差を判定すると、データの規模が大きくなるにつれ、計算時間が膨大になる。今回は計算時間の面から、交差による位相の操作は行わずに、描画するときに裏向のパッチを描画しないことで対応した。

2.3 色分布の考慮

区間型ポリウームに限らず、ポリゴンデータ一般で、簡単化操作をする際に色などの属性を持つ特徴が失われることが問題視されている。たとえば可視化の分野では、色はある物理量を反映しており、場合によっては形状よりも重要な情報を持つことがある。インターネット上で配信される3次元オブジェクトに対しても、色やテクスチャの持つ情報は無視できないものとなっている。そこで、形状の持つ特徴だけでなく、表面に分布する色の変化率やばらつき具合も簡単化操作の基準に組み込むべきである。

色や法線、テクスチャなどの属性を考慮した詳細度制御法はすでにいくつか発表されている^{4)~8)}。これらは、3次元空間で元の三角形パッチデータセットまでの距離などを用いて表される頂点の特徴量に、属性を引数とする項を加えることで属性の持つ特徴量を保持することを実現している。我々は、同様の方法を用いて、デシメーションアルゴリズムに色分布を考慮する機能を加える。オリジナルのデシメーションでは形状特徴しか評価していないが、本手法では頂点の削除、再三角形化によって失われる色情報量も予測して制御基準に組み込む。頂点の削除、再三角形化には、稜線縮退化 (edge collapse) 操作を用いる (図2)¹⁾。この方法は、色分布の特徴保持に有効だけでなく、すでに存在するパッチを変形することで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。縮退させる稜線を選ぶ基準は、文献3)で示された頂点分類ごとに、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

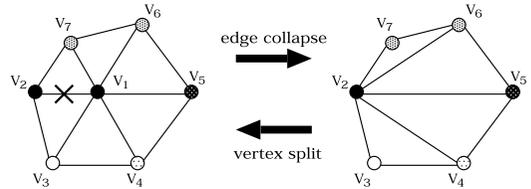


図2 稜線縮退化操作と頂点分割化操作
Fig.2 Edge collapse and vertex split.

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、 $0 \leq \gamma < 1$ 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。

2.4 簡単化による特徴損失量の評価

色を考慮したデシメーションアルゴリズムで簡単化されたときの形状特徴と色分布特徴損失量を評価する。形状特徴損失量では、まず元データから削除された頂点座標を求める。それらの頂点から、簡単化されたデータセットまでの最近点を検出し、2点間の距離を測定する。この距離を元データが含まれる矩形領域の最長辺の長さ $dist(all)$ で割ることにより正規化し、その平均値を形状特徴損失量とする。一方、色分布特徴損失量は、頂点が削除されたことによって失われた色の情報量を数値化する。削除された頂点と、形状特徴の損失量を測るときに検出した最近点での色に反映されるフィールド値の差を求める。これをフィールド値の最大値と最小値の差 $col(all)$ で割って正規化する。この値の平均値を色分布特徴損失量とする。最近点のフィールド値は、最近点が簡単化されたデータの頂点上であるなら、その頂点に与えられたフィールド値とし、そうでない場合は、最近点が属する三角形パッチを構成する頂点の情報をもとに、三重線形補間によって求める。

3. 色考慮率の半自動設定

前章で色を考慮する簡単化操作について述べた。属性を考慮する詳細度制御法として提案されている他の手法は、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。しかし、実際のデータは複雑さなどの特徴がさまざまであり、データに対して適した色考

慮率は一律に定められない．ユーザが形状および色の誤差許容範囲を指定する手法が提案されているが⁽⁴⁾，簡単化される前のデータを視覚的に観察できることが前提となる．本論文では半自動的に適した色考慮率を設定する手法を提案する．これは，詳細度制御される前のデータを視覚的に観察する必要がないので一括処理に利用できる．また，対話的に色考慮率を変えて実験できないような大規模データを可視化する際に有効である．本章では，色考慮率を決定する要素となるデータの形状特徴，色分布特徴の測定方法についてそれぞれ説明した後，色考慮率の決定法を示す．

3.1 形状特徴量の測定

詳細度制御法として用いたデシメーションアルゴリズムは，すべての頂点を三角形パッチの接続状態から5つに分類する(図1)．形状特徴量はこの分類結果を用いて計算する．これら5種類の中で，simpleに分類された頂点は比較的平坦な面内部に存在する事実を利用し，形状特徴量の測度を定めた．具体的には，全頂点数に対する simple 以外に分類された頂点数の割合を形状特徴量 F_s と定義する：

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

ただし， N_v は簡単化処理の対象となるデータの全頂点数を表し， N_{simple} は頂点分類によって simple に分類された頂点数を表す．形状特徴量は，与えられたデータの形状が複雑になるにつれて高くなる．

3.2 色分布特徴量の測定

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 を要素とする同時生起行列 (co-occurrence matrix) を求める⁽²⁾． i, j は濃度レベルであり，濃度レベル数が N_c であれば，同時生起行列は $N_c \times N_c$ 行列となる．この同時生起行列を用いて，抽出されたオブジェクトの色分布特徴量を測定する．色分布の変化率やばらつき具合が大きいほど特徴量も大きいと考え，Takeshimaらのコントラストとエントロピーを組み合わせたテクスチャ特徴量測定⁽¹³⁾から色分布特徴量 F_c を測る：

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

色分布特徴量の値が小さいものほど表面に分布する色のコヒーレンスは高くなる．本来，同時正規行列の要素は，一定の変位だけ離れた範囲に規則的に存在する頂点間での確率を求めるべきであるが，ここでは計算効率を考え，接続情報だけから求める．

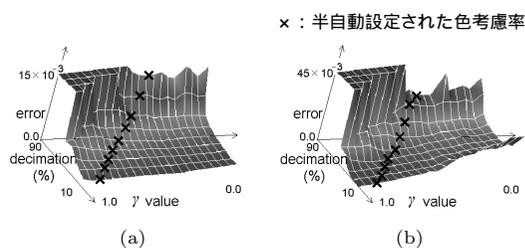


図3 図4の機械部品データの簡単化精度評価；(a) 形状特徴損失量，(b) 色分布特徴損失量

Fig. 3 Errors in simplifying mechanical part in Fig. 4; (a) Geometric error, (b) Color distribution error.

3.3 色考慮率の半自動設定

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，本章で定義した形状特徴量と色分布特徴量から色考慮率 γ を半自動的に設定することを考える．

色考慮率の決定法を定義する前に，削減率と色考慮率を変化させたときの結果がどのような傾向を持つのかを把握するために，比較的小さなデータで実験を行った．削減率は10%から90%まで10%刻みにとり，色考慮率は0.0から1.0まで0.05刻みにとった．特徴損失量を測定しやすいように，ここでは形状，色分布双方がある程度特徴を持つ機械部品データ(5.1節)を用いた．2.4節で定義した特徴損失量から得られた結果を評価した(図3)．この結果から，削減率が高いときに色の考慮率を高く設定すると形状特徴損失量だけでなく色分布特徴損失量もかえって大きくなるのが分かった．これは，データの形状が歪んだときに，削除された頂点から簡単化されたデータまでの最近点か，もともと頂点が存在していた面ではない面にとられることが起こるためと考えられる．逆に，削減率が低いときには色考慮率を高く設定すると効果的に色分布特徴を保持することができる．そこで，与えられた削減率を加味して，削減率が高くなるにつれて色の考慮割合を相対的に落とすようにする．

具体的に，削減率 r での色考慮率 γ を次式で定義する：

$$\gamma = \frac{F_c}{F_c + F_s a \{\log_{10}(N_v)\}^b} (1.5 - r) \quad (1)$$

特徴量 F_s, F_c は，異なる定義によって測られたものであるため，これらの相互関係を調節する必要がある．そこで，パラメータ a によって，色考慮率 γ を決定する際にそれぞれの特徴量が及ぼす貢献度を調節する．さらに対象データのサイズが異なるものに対してより柔軟に対応することを目指し，パラメータ b を導入す

る．ここでは，図 3 の結果から適した色考慮率が求まるように式 (1) 中のパラメータ値を $a = 200$, $b = 2$ とする．

4. 復元操作

頂点，および三角形パッチを削除する稜線縮退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^{5),14)}．そのために，削除される頂点とその縮退先の頂点，さらに縮退先の両脇の頂点 ID を削除履歴情報として保存する．図 2 の場合は， V_1, V_2, V_3, V_7 らがそれらにあたる．元データに完全に復元するために，削除された頂点の 3 次元空間内の座標値，および色に反映されるフィールド値も保存する．このようにして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 (図 2) ．

復元後も，適した色考慮率で削減されたものと同等の結果を得るために，色考慮率を段階的に変化させるべきである．機械部品データを用いて，式 (1) で r の値だけを変えて得られた結果を，逐一形状と色分布の特徴量を測定し直して色考慮率を設定したものと比較した．その結果，精度の差はデータ全体のスケールの 1%未満に抑えられたので，計算効率を優先し， r 値の変化だけで対応する．

5. 実験

実装・実験環境には，SGI 社製 OCTANE システム (CPU: R10000×2, Clock: 195 MHz, RAM: 2 GB) を用いた．描画画面の大きさは 512×512 ピクセルである．処理時間測定の実験は 10 回行い，中間の値 8 回分の平均を求めた．実験データにはすべて，科学技術庁振興調整費研究「地球シミュレータ: GeoFEM」¹⁵⁾ の構造解析サブシステムで計算されたものを使用した．

5.1 機械部品データの簡単化

図 4 は機械部品データで，応力値を色にマッピングした．図 4 (b) は，解析結果である非構造格子データ (図 4 (a)) に対して応力値を用いて区間型ボリウムを抽出したものである．このデータに対してパッチ数を 50%削減した．式 (1) で色考慮率を設定すると 0.63 となり，この設定で簡単化したときの結果を，色考慮率を 0.0, 1.0 とした場合と比較した (図 4 (c) ~ (e)) ．これらの結果から，式 (1) で色考慮率を決定した場合は，形状，および色分布特徴が効果的に保持できていることが確認できる．それぞれの結果を，2.4 節で定義した特徴損失量の値から評価しても，式 (1) で決定した色考慮率は適していると判断できる (表 1) ．簡単化に要した時間も表 1 に示した．計算時間の単位は CPU

表 1 図 4 の機械部品データの特徴損失量と実行時間
Table 1 Errors and timings in simplifying mechanical part in Fig. 4.

色考慮率 γ	形状特徴損失量	色分布特徴損失量	計算時間
0.00	3.20×10^{-3}	21.3×10^{-3}	1.99
0.63	4.15×10^{-3}	11.2×10^{-3}	4.72
1.00	5.24×10^{-3}	23.7×10^{-3}	71.7

表 2 各データの特徴損失量と実行時間
Table 2 Errors and timings in simplifying datasets.

色考慮率 γ	形状特徴損失量	色分布特徴損失量	計算時間
カーボンブロックデータ (削減率 50%)			
0.00	8.25×10^{-3}	28.1×10^{-3}	0.870
0.42	11.1×10^{-3}	18.9×10^{-3}	1.04
1.00	12.7×10^{-3}	23.6×10^{-3}	82.3
断層データ (削減率 50%)			
0.00	20.3×10^{-3}	29.3×10^{-3}	0.721
0.23	21.5×10^{-3}	23.2×10^{-3}	0.703
1.00	30.9×10^{-3}	40.3×10^{-3}	298
透水係数データ (削減率 50%)			
0.00	3.12×10^{-3}	5.20×10^{-3}	60.8
0.04	3.13×10^{-3}	4.82×10^{-3}	61.0
1.00	3.90×10^{-3}	4.35×10^{-3}	85.2
透水係数データ (削減率 75%)			
0.00	4.52×10^{-3}	7.21×10^{-3}	89.8
0.03	4.59×10^{-3}	6.73×10^{-3}	90.0
1.00	5.45×10^{-3}	6.07×10^{-3}	252
透水係数データ (削減率 90%)			
0.00	8.88×10^{-3}	12.2×10^{-3}	355
0.02	8.99×10^{-3}	11.4×10^{-3}	371
1.00	10.9×10^{-3}	10.9×10^{-3}	1,860

秒である．描画時間は，元データでは 4.6×10^{-2} CPU 秒であったが，パッチ数を 50%削減したことにより，約 40%短縮された．

5.2 他データの簡単化

提案した色考慮率の半自動設定法が有効であるかどうかを調べるために，他データにも適用した．式 (1) 中のパラメータ値 a, b は本来，入力データごとに最適値が存在すると考えられるが，ここでは先に決定した， $a = 200, b = 2$ をそのまま利用した．

サイズの小さいカーボンブロックデータを使用し，パッチ数を 50%削減した (図 5) ．また，2 枚のプレートがぶつかり合うような断層データをとりあげ，パッチ数を 50%削減した (図 6) ．これらは応力値を用いて形状抽出，および色へのマッピングを行った．より大規模なデータとして，複雑な分布を持つ透水係数データにも適用した (図 7) ．削減率を 50%, 75%, 90% と変えた結果をそれぞれ示す (図 7 (b) ~ (d)) ．このデータは流速値で形状を抽出し，色付けには透水係数値を用いた．それぞれの場合で，形状と色分布の特徴損失量，および簡単化にかかった時間を表 2 にまとめる．

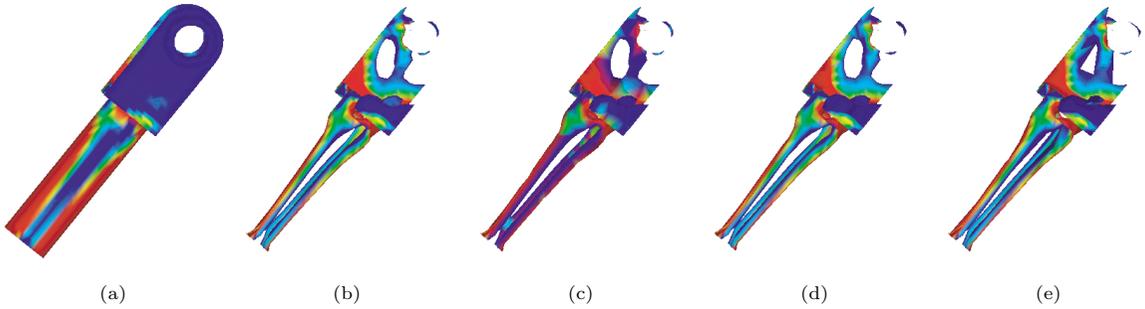


図4 機械部品データの簡単化結果(削減率:50%); (a)ボリュームデータ, (b)区間型ボリューム(頂点数:3,407;パッチ数:6,706), (c)簡単化($\gamma = 0.00$), (d)簡単化($\gamma = 0.63$;半自動設定), (e)簡単化($\gamma = 1.00$)

Fig. 4 Simplifying interval volume for mechanical part (reduction ratio: 50%); (a) Volume data for mechanical part, (b) Original interval volume (Number of vertices: 3,407; Number of patches: 6,706), (c) Simplified interval volume ($\gamma = 0.00$), (d) Simplified interval volume ($\gamma = 0.63$; semi-automatic), (e) Simplified interval volume ($\gamma = 1.00$).

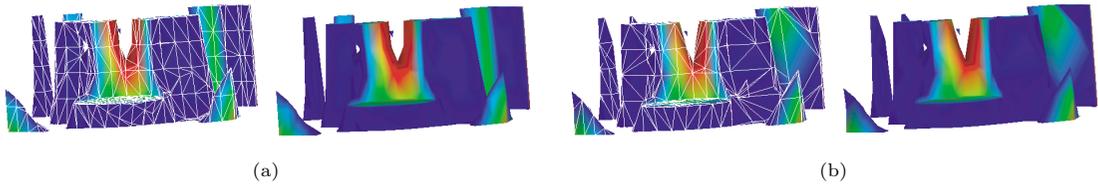


図5 カーボンブロックデータの簡単化結果(削減率:50%); (a)元データ(頂点数:581;パッチ数:1,123), (b)簡単化($\gamma = 0.42$;半自動設定)

Fig. 5 Simplifying interval volume for carbon block (reduction ratio: 50%); (a) Interval volume for carbon block (Number of vertices: 581; Number of patches: 1,123), (b) Simplified interval volume ($\gamma = 0.42$; semi-automatic).

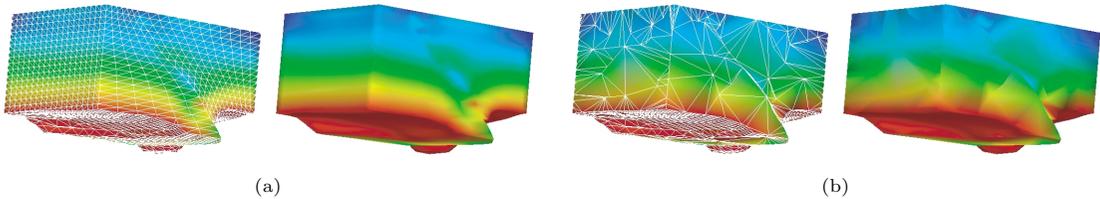


図6 断層データの簡単化結果(削減率:50%); (a)元データ(頂点数:2,304;パッチ数:5,180), (b)簡単化($\gamma = 0.23$;半自動設定)

Fig. 6 Simplifying interval volume for fault (reduction ratio: 50%); (a) Interval volume for fault (Number of vertices: 2,304; Number of patches: 5,180), (b) Simplified interval volume ($\gamma = 0.23$; semi-automatic).

これらの結果(図5~7,表2)からも,各々のデータの特徴をとらえ,効果的な色考慮率が設定されていることが確認できる.

5.3 機械部品データの復元

簡単化したデータから適宜必要な精度のデータを復元した(図8).元データに対してパッチの枚数を90%削減したデータを用意した.ここでの色考慮率も,式(1)から求めた.このデータから,元データのパツ

チ数に対して50%削減された状態と,完全に元の状態に復元することを試みた.色分布を考慮したデシメーションアルゴリズムでパッチ数を90%削減するのに25.8 CPU秒を要したが,このデータから50%削減された状態のデータを得るのには0.04 CPU秒,元の状態に復元したデータを得るのにも0.10 CPU秒しかかからなかった.さらに,復元データから再度データを簡単化する際にも,削除履歴情報を参照することで,

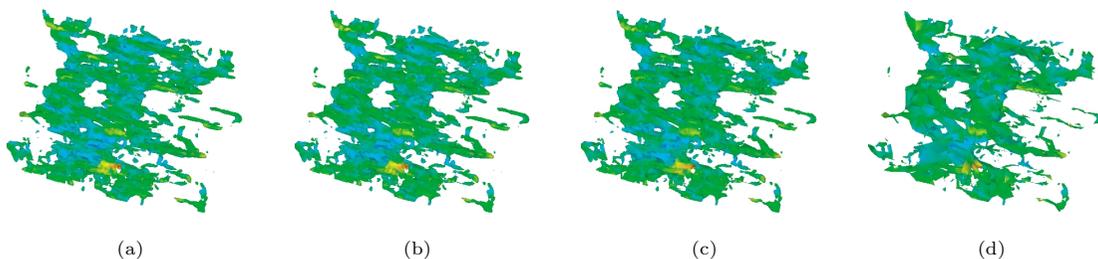


図7 透水係数データの簡単化結果；(a) 元データ(頂点数：97,667；パッチ数：194,358)，(b) 簡単化(削減率：50%； $\gamma = 0.04$ ；半自動設定)，(c) 簡単化(削減率：75%； $\gamma = 0.03$ ；半自動設定)，(d) 簡単化(削減率：90%； $\gamma = 0.02$ ；半自動設定)

Fig. 7 Simplifying interval volume for water permeability; (a) Original interval volume (Number of vertices: 97,667; Number of patches: 194,358), (b) Simplified interval volume (reduction ratio: 50%; $\gamma = 0.04$; semi-automatic), (c) Simplified interval volume (reduction ratio: 75%; $\gamma = 0.03$; semi-automatic), (d) Simplified interval volume (reduction ratio: 90%; $\gamma = 0.02$; semi-automatic).

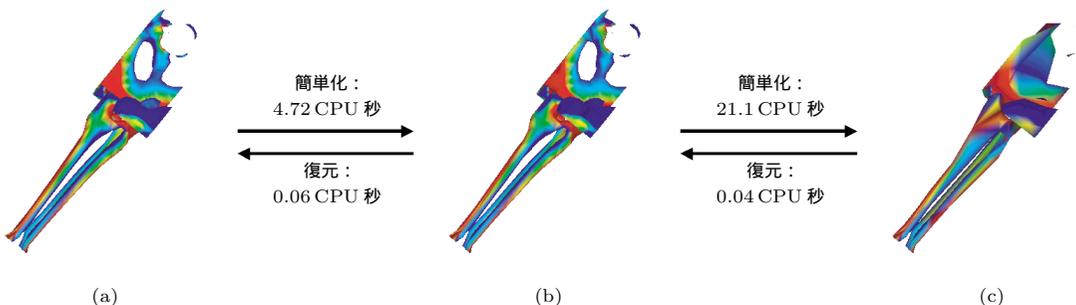


図8 図4の機械部品データの簡単化と復元の結果；(a) 元データ，(b) 簡単化(削減率：50%)，(c) 簡単化(削減率：90%)

Fig. 8 Simplifying and restructuring mechanical part in Fig. 4; (a) Original interval volume, (b) Simplified interval volume (reduction ratio: 50%), (c) Simplified interval volume (reduction ratio: 90%).

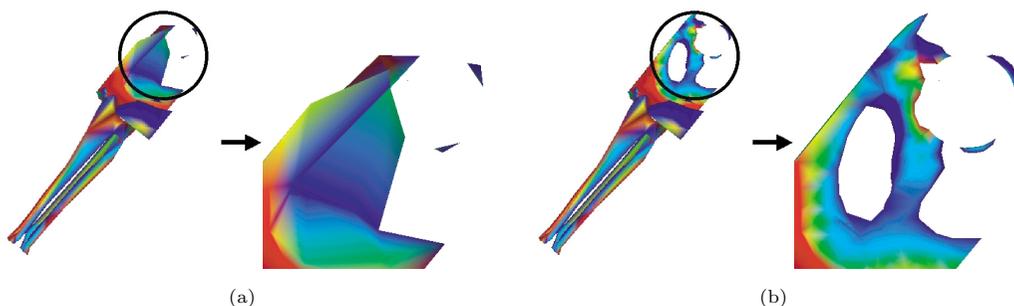


図9 図4の機械部品データの局所的な復元結果；(a) 簡単化(削減率：90%)，(b) 局所的に復元
Fig. 9 Partial restructuring of simplified mechanical data in Fig. 4; (a) Simplified interval volume (reduction ratio: 90%), (b) Restructuring a portion of simplified data.

復元とほぼ同じ時間オーダしかかからなかった。これらの復元操作は、必要な領域を指定することもでき、今回は、3次元空間での領域を指定し、その中だけを復元した結果を図9に示す。

6. まとめと今後の課題

デシメーションアルゴリズムで色分布を考慮することによって、大きな凹凸などの形状的に重要な特徴や、

表面にマッピングされた色情報を保持しながらパッチ数を削減することができた。しかし、色分布の特徴量を重視するにつれて、失われる形状特徴は大きくなる。形状特徴損失量と色分布特徴損失量との間には複雑な関係があり、これらはデータのサイズや削減率にも依存する。また、機械部品での特徴損失量測定の結果から、色の情報を重視したいからといって色考慮率を高く設定すると、形状に歪みが生じて色の情報量も大きく失われるという結果が得られた。さらに、計算時間は色考慮率を上げるにつれて大きくなる傾向がうかがえる。以上の結果から、データごとに適した色考慮率を設定する方針の有効性が検証でき、本論文では色考慮率を半自動的に設定する手法の1つを提案した。図4-7で示した実験結果から、特徴やサイズの異なるデータで効果的な結果が得られた。

さらに、削除履歴情報をもとにユーザが指定する精度にデータを復元する手法も提案した。削除された頂点の座標値と色に反映されるフィールド値も保存することで、完全に元の状態に戻すことができた。また、削除履歴情報を用いた復元は、デシメーションアルゴリズムにかかる時間に比べ短時間であることが確認された。復元されるデータは、適した色考慮率で特徴を保ちながら削減されたものと同様の結果が得られた。ユーザによって指定された領域だけを復元することも可能であり、その効果もあわせて確認した。

実験には科学技術データを用いたが、提案手法である適した色考慮率での詳細度制御法は、色分布が与えられたポリゴンを用いた画像合成にも適用可能である。

本論文では、色考慮率を決定する際のパラメータ a と b の値を固定したが、これらは本来、入力データに依存するとも考えられるため、今後の実験によって設定方法を工夫する必要がある。色分布特徴の大きさを測定する方法に対しては、その変化の様子を測り、より効果的に色考慮率を決定することを考えている。形状や色分布の特徴量を全体的に測っているが、局所的にも測定し、その結果を反映させるような拡張も検討中である。さらに、本手法を地球シミュレータが対象とするような大規模データに適用することを目指す。

謝辞 解析データの提供だけでなく、日頃から貴重なコメントを頂戴している(財)高度情報科学技術研究機構(RIST)のGeoFEMメンバの方々へ感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) Fujishiro, I., Maeda, Y., Sato, H. and Takeshima, Y.: Volumetric Data Exploration

Using Interval Volume, *IEEE Trans. Visualization and Computer Graphics*, Vol.2, No.2, pp.144-155 (1996).

- 2) 藤代一成, 竹島由里子, 前田裕治: 階層的空間索引構造を用いた区間型ボリュームの高速抽出, 情報処理学会論文誌, Vol.38, No.8, pp.1593-1602 (1997).
- 3) Schroeder, W.J., Zarge, J.A. and Lorensen, W.E.: Decimation of Triangle Meshes, *Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH '92)*, Vol.26, No.2, pp.65-70 (1992).
- 4) Bajaj, C. and Schikore, D.: Error-Bounded Reduction of Triangle Meshes with Multivariate Data, *Proc. Visual Data Exploration and Analysis III*, SPIE2656, pp.34-45 (1996).
- 5) Hoppe, H.: Progressive Meshes, *Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH 96)*, pp.99-108 (1996).
- 6) Cohen, J., Olano, M. and Manocha, D.: Appearance-Preserving Simplification, *Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH 98)*, pp.115-122 (1998).
- 7) Garland, M. and Heckbert, P.: Simplifying Surfaces with Color and Texture Using Quadric Error Metrics, *Proc. IEEE Visualization '98*, pp.263-269 (1998).
- 8) Hoppe, H.: New Quadric Metric for Simplifying Meshes with Appearance Attributes, *Proc. IEEE Visualization '99*, pp.59-66 (1999).
- 9) 中村浩子, 竹島由里子, 藤代一成, 奥田洋司: 色分布を考慮した区間型ボリュームの詳細度制御, Visual Computing/グラフィクスとCAD 合同シンポジウム 2000 予稿集, pp.27-32 (2000).
- 10) Nakamura, H., Fujishiro, I. and Takeshima, Y.: Towards Optimizing Metric to Simplify Colored Interval Volumes, *Proc. Work in Progress, IEEE Visualization 2000 (Work in Progress)*, IEEE Visualization 2000 (2000).
- 11) Hoppe, H., DeRose, T., Duchamp, T., McDonald, J. and Stuetzle, W.: Mesh Optimization, *Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH 93)*, pp.19-26 (1993).
- 12) 富田文明, 白井良明, 辻三朗: テクスチャの解析, 情報処理, Vol.19, No.2, pp.173-182 (1978).
- 13) Takeshima, Y. and Fujishiro, I.: Measuring Volumetric Coherence, *ACM SIGGRAPH98 Conference Abstracts and Applications*, p.260 (1998).
- 14) Pajarola, R. and Rossignac, J.: Compressed Progressive Meshes, *IEEE Trans. Visualization and Computer Graphics*, Vol.6, No.1, pp.79-93 (2000).
- 15) GeoFEM: <http://geofem.tokyo.rist.or.jp/>
(平成12年10月2日受付)
(平成13年3月9日採録)



中村 浩子(学生会員)

昭和 51 年生。平成 13 年 3 月お茶の水女子大学大学院人間文化研究科博士前期課程修了。同年 4 月同大学院人間文化研究科複合領域科学専攻博士課程入学。現在、在学中。ポリゴンデータの詳細度制御やボリュームビジュアライゼーションに興味を持つ。



竹島由里子(正会員)

昭和 46 年生。平成 11 年 3 月お茶の水女子大学大学院人間文化研究科博士課程修了。理学博士。同年 4 月お茶の水女子大学大学院人間文化研究科助手。現在に至る。平成 9 年 9 月より(財)高度情報科学技術研究機構特別招聘研究員を兼務。ボリュームビジュアライゼーションやインフォメーションビジュアライゼーションに興味を持つ。IEEE CS, ACM 各会員。



藤代 一成(正会員)

昭和 35 年生。昭和 60 年 3 月筑波大学大学院工学研究科博士課程修士号取得退学。昭和 63 年 10 月理学博士(東京大学)。昭和 60 年 4 月東京大学理学部情報科学科助手。筑波大学電子・情報工学系を経て、平成 3 年 4 月お茶の水女子大学理学部情報科学科助教授。平成 10 年 8 月より同教授。現在に至る。平成 9 年 9 月より(財)高度情報科学技術研究機構特別招聘研究員を兼務。ビジュアルコンピューティング全般に関する研究・教育に従事。現在、IEEE TVCG 編集委員、可視化情報学会 VDM 研究会委員長ほか。IEEE CS, ACM, Eurographics, 日本 VR 学会, 画像電子学会等会員。著書に「コンピュータビジュアライゼーション」(共立)ほか。



奥田 洋司

昭和 37 年生。平成 2 年 3 月東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。工学博士。同年 4 月東京大学講師。平成 6 年 4 月より同助教授。平成 8 年 4 月横浜国立大学助教授。平成 12 年 9 月東京大学助教授。現在に至る。平成 9 年 9 月より(財)高度情報科学技術研究機構特別招聘研究員を兼務。並列有限要素法による流体・構造解析、固体地球シミュレーション、メッシュレス法、科学技術計算ミドルウェア等の研究・教育に従事。固体地球シミュレータ GeoFEM 開発グループリーダー。日本計算工学会、日本機械学会等会員。著書に「有限要素法流れの解析」(朝倉書店、共著)、「計算力学」(岩波、共著)ほか。