位相的特徴解析に基づく数値標高モデルの詳細度制御*

宮村(中村) 浩子^{1,2}, 高橋 成雄³, 藤代 一成⁴

LoD Control of Digital Elevation Models Based on Features of Differential Topology

Hiroko Nakamura MIYAMURA, Shigeo TAKAHASHI and Issei FUJISHIRO

ABSTRACT

In the traditional approaches to the level of detail (LoD) control of polygonal datasets, local features, such as curvature and distance energy, have been used as representative control parameters. However, when our targets are restricted to digital elevation models (DEMs), features of differential topology are expected to play a key role as global features in determining the LoD of these shapes. This paper proposes a novel method of simplifying a given DEM while keeping this kind of features as much as possible. Two sample datasets are used to demonstrate the feasibility of the proposed method.

Keywords : Level of detail control, Topological features, Polygonal surface simplification

1. 背景と目的

近年、コンピュータや計測機器の性能が向上したのに伴い、さまざまな分野で大規模なデータが扱われるようになった。しかし、大規模なデータを転送したり描画したりする際には処理に時間を要する。そのため、特徴を保持しながら要素数を削減するポリゴンデータの詳細度制御法が盛んに研究されてきている。

詳細度制御法の先行研究では、与えられたポリゴンデータから曲率などの特徴を測定し、その特徴を保存するようにポリゴンを削減する手法¹⁾や、元のポリゴンデータと詳細度を制御されたポリゴンデータとの距離を考慮する手法²⁾などがある。また、体積を保存する機能を組み込んだアルゴリズムも提案されている³⁾。著者らの先行研究でも、曲率を基準にして、形状だけでなくポリゴンデータの表面にマッピングされた色情報も効果的に保持する詳細度制御法を提案した⁴⁾。しかし、これらの手法を用いて数値標高モデルの詳細度を制御する場合には、局所的な特徴しか考慮されないため、頂上 (peak)・峠 (pass)・谷底 (pit) を結ぶ尾根線 (ridge)・

谷線 (ravine) によって表現されるような大局的な情報が失われるおそれがある。尾根線や谷線は、登山経路や落水経路を表現し、尾根線や谷線の経路は等高線に直交しながら地平面をトレースするため、これらは数値標高モデルの特徴を捉える際に重要な役割をもつと考えられる。

そこで本研究では、高さ (z 軸) 方向が特別な意味をもつ数値標高モデルから構成されるポリゴンデータの大局的な特徴を考慮した詳細度制御について検討する。数値標高モデルは、Digital Elevation Model (DEM) とよばれ、一価関数 $z = f(x, y)$ で表現される曲面上の頂点から構成される。われわれはこの DEM から、特に頂上・峠・谷底、尾根線・谷線などの曲面の微分位相幾何学的特徴を抽出し、ポリゴンデータの詳細度制御に用いる。本手法の特長は、先行研究^{1) - 4)}と同様に局所的な形状特徴をとらえられるだけでなく、曲面の性質から導かれる大局的な性質も満たすことである。DEMの多重解像度制御に関しては、De Floriani らによる研究⁵⁾が知られているが、そこで用いられる形状特徴は局所的な特徴に限られている。本手法では、詳細度制御に上で述べた微分位相幾何学的特徴を用いることで、形状の大局的な構造 (骨組み) を保持したまま局所的特徴の詳細度を制御可能にしておき、その点が従来の詳細度制御手法から大きく異なる。

対象データの大局的な構造を保持することで、詳細度を制御したデータから特徴領域を特定する指標となる等

* 原稿受付 2003 年 10 月 10 日

¹ 非会員 東京農工大学 大学院生物システム応用科学教育部 (〒184-8588 東京都小金井市中町2-24-16, E-mail: miyamura@cs.tuat.ac.jp)

² 正会員 お茶の水女子大学 大学院人間文化研究科

³ 非会員 東京大学 大学院総合文化研究科

⁴ 正会員 お茶の水女子大学 理学部情報科学科

高線遷移の特徴も効果的に保持できる。これは、微分位相幾何学的特徴を考慮しない先行研究^{1) - 5)}を用いて詳細度を制御する際に、等高線遷移の特徴が崩れることでユーザが特徴領域を誤って認識する問題を解決する。また、詳細度制御によって削除された要素を必要に応じて復元する際に、等高線遷移に代表される大局的な構造特徴を、復元領域の選択に利用できる。さらに、復元操作を利用することで、大規模データの段階的転送にも利用できる。これは、結果画像だけを転送する場合と比べ、クライアントマシン側で対話的に可視化操作ができる利点につながる。

2. 微分位相幾何学的特徴の解析

本研究では臨界点（頂上・峠・谷底）と特徴線（尾根線・谷線）の微分位相幾何学的特徴を用いて地形データの形状特徴を解析する。頂上・峠・谷底は以下に示すオイラーの公式を満たすことが必要とされる：

$$\#\{peak\} - \#\{pass\} + \#\{pit\} = 2, \quad (1)$$

ここでの $\#\{peak\}$, $\#\{pass\}$, $\#\{pit\}$ はそれぞれ頂上, 峠, 谷底である頂点数を表す。なお、このオイラーの公式の計算に際しては、地形形状が球面の上方を占めていると考え、球面の底に対応する谷底を仮想的に加える必要がある。この仮想的に加えられた谷底を仮想谷底 (virtual pit) とよぶ。さらに、尾根線・谷線は、それぞれ頂上と峠, 峠と谷底を結ぶ特徴線を表し、この2種類の線が地形表面上に双対関係をもつ大局的な領域分割を構築する。われわれは、上記のような曲面の大局的な性質を、離散データからでも頑健に抽出するアルゴリズム⁶⁾を用いて抽出する。

2.1 地形形状データの特徴抽出

地形データは、 z 軸を高さとしたとき $z = f(x, y)$ で表される地形形状曲面を、 xy 平面に関して格子状にサンプリングしたものと仮定する。このデータに対して、まず各サンプル点を頂点とする三角形分割を施す。ここでは、データ依存三角形分割⁷⁾を施すことで、形状全体が滑らかになるようにする。

それぞれの頂点について、三角形分割のリンクで直接接続する隣接点を求め、その高さを比較することで臨界点を抽出する。具体的には、すべての隣接点が対象となる頂点より低い場合、その頂点は頂上と判定され (Fig. 1 (a))、逆に高い場合は谷底と判定される (Fig. 1 (b))。峠は、対象となる頂点に関して隣接点を一巡するように比較したときに、頂点より高い点列と低い点列が2回ずつ交互に現れるものとして抽出される (Fig. 1 (c))。

次に抽出された臨界点から、特徴線を抽出する。まず尾根線は、抽出された各峠に対し、上で述べたような高い隣接点列それぞれから、一番高い点である代表点を選び出し、これらの点を出発点として頂上へ単調に上昇する DEM 上の経路として求めることができる。谷線は、

逆に谷底に行き着くまで単調に降下する経路を求めればよい。このようにして、臨界点を特徴線で結んだグラフをサーフェイスネットワークとよぶ⁸⁾。Fig. 1 (c) では、対象頂点より高い点列 $\{P_1, P_5, P_6\}$, $\{P_3\}$ からそれぞれ一番高い頂点 P_5 , P_3 を通るような尾根線が抽出され、同様に P_2 , P_4 を通るような谷線が抽出される。Fig. 2 は、サーフェイスネットワークのリンク (実線) を等高線 (破線) と一緒に表示した例である。矢印は下り方向を示している。このようにして、サーフェイスネットワークは地形表面の尾根線と谷線の配置を効果的に表現できる。

実際の地形データからサーフェイスネットワークを抽出した結果を Fig. 3 に示す。箱根・芦ノ湖周辺の地形データ (Fig. 3 (a)) からサーフェイスネットワークを構築する (Fig. 3 (b))。ただし、Fig. 3 (b) では仮想谷底、

Fig. 1 Classification of critical points.

Fig. 2 Surface network and contour lines.

(a) Original DEM data

(b) Surface network

Fig. 3 Surface network of the Hakone area.

および仮想谷底へ接続する谷線は表示していない。ここでのサンプル点総数は 2,601 ($= 51 \times 51$) 個であり、その中で頂上として抽出された頂点は 29 個、谷底は 69 個、峠は 96 個である。この解析結果から式(1)に示すオイラーの公式を満たしていることが確認できる。尾根線、谷線はともに 190 本抽出された。

2.2 スカラデータの特徴抽出

2次元画像のような xy 座標上にスカラ値が与えられたスカラデータに関しても、スカラ値を高さ関数とみなすことで DEM として扱うことができ、サーフェイスネットワークを構築できる。

ここでは、竜巻の風速を表す 3次元スカラ場を用いて説明する。対象データは、 $64 \times 64 \times 64$ の規則格子ボリュームデータであり、Fig. 4(a) はそこからある等風速値面を抽出した結果である。3次元ボリュームデータを詳細に観察する際には、しばしば Fig. 4(b) に示すような 2次元断面画像が複数枚用いられる。Fig. 4(b) は xy 平面に対して水平方向に抽出した断面上の風速値を擬似カラーコーディングしており、抽出された断面位置での風速の分布状態を把握できる。この断面画像の微分位相幾何学的特徴を解析するために、まず、風速値をハイトフィールドとみなし Fig. 4(c) に示すような一価関数で表現される曲面データを得る。そして、このデータからサーフェイスネットワークを構築する (Fig. 4(d))。Fig. 4(d) では、仮想谷底、および仮想谷底へ接続する谷線は表示していない。ここでのサンプル点総数は 4,096 ($= 64 \times 64$) 個であり、その中で頂上として抽出された頂

Fig. 4 Surface network of a tornado numerical model.

点は 6 個、谷底は 18 個、峠は 22 個である。前節の地形データ同様、式(1)のオイラーの公式を満たしている。なお、尾根線、谷線はともに 44 本抽出された。

3. 位相的特徴を考慮した詳細度制御

尾根線や谷線のような微分位相幾何学的特徴を考慮するために、曲面内部の稜線特徴を捉えながらサーフェイスポリゴンデータの詳細度を制御するデシメーションアルゴリズム (Decimation Algorithm: DA)¹⁾ を拡張する。DA は、頂点に接続する三角形パッチの状態から、頂点近傍での幾何学的特徴を測定し、この特徴を効果的に保ちながら要素数を削減する。DA を拡張することで、微分位相幾何学的特徴で表現される大局的な特徴だけでなく、局所的な幾何学的特徴も併せて保持できる。

3.1 デシメーションアルゴリズム

1992 年に Schroeder らによって提案された DA¹⁾ では、以下のステップに従って形状的に重要な特徴を保ちながら 3次元ポリゴンデータの詳細度を制御する：

ステップ 1：頂点を隣接要素の状態から以下の 5 つに分類 (Fig. 5 上)

- *simple*：パッチが 1 巡
- *interior edge*：特徴稜線が 2 本接続
- *corner*：特徴稜線が 1，または 3 本以上接続
- *complex*：交差するパッチが存在
- *boundary*：境界稜線が接続

ステップ 2：分類された頂点に対して、分類ごとに以下に示す距離誤差 d を測定し、形状特徴を評価

- *simple, corner*：頂点に接続する要素のアベレージ平面と頂点の距離 d 。アベレージ平面は次式で与えられる：

$$\text{法線: } \vec{N} = \frac{\vec{n}_i A_i}{A_i}, \text{ 平面上の点: } \vec{x} = \frac{\vec{x}_i A_i}{A_i}$$

($\vec{n}_i$, A_i , $\vec{x}_i$ はそれぞれ隣接要素 i の法線、面積、重心)

- *boundary, interior edge*：境界線や鋭角線の端点によって生成される直線と頂点の距離 d

..... : feature edges

— : ridges and ravines

Fig. 5 Extended classification of vertices in polygonal decimation.

ステップ3：ステップ2で求めた形状特徴 d が小さい頂点を削除し，再三角形化

ここでの特徴稜線とは，隣接する2つのパッチの外向き法線がなす角度が，ユーザによって指定された一定角度以上である稜線のことをさす．本論文の実験では，経験的に， $\pi/3$ 以上の稜線を特徴稜線とする．また，*complex* は形状の特徴が大きいので，削除の対象とはならない．以上のステップにそった処理を，減少割合や形状変形などで表れる誤差許容量によってユーザが定めた限界に達するまで，頂点削除の基準を緩和させながら繰り返す．

3.2 位相的特徴を考慮した詳細度制御

DA では局所的な稜線の特徴を保持しながらポリゴンデータの詳細度を制御する．われわれは，大局的な特徴をもつ稜線にも着目し，DA では失われる微分位相幾何学的特徴を考慮する．実際 DA に以下の処理を加えることにより解析された微分位相幾何学的特徴の特徴を保持していく：

- 頂点分類前に，以下に示す4種類を追加し (Fig. 5 下)，これらに分類されない頂点は従来の DA の分類を使用
 - *peak*：頂上
 - *pit*：谷底
 - *pass*：峠
 - *feature line*：特徴線が2本接続する頂点．サーフェスネットワークの尾根線，谷線上に存在
- 特徴線が接続する頂点を削除するときは，特徴線を直線近似するように稜線縮退 (edge collapse) を実行²⁾ (Fig. 6)
- 特徴線以外の稜線は，Delaunay 三角形パッチ¹⁰⁾ を満たすように稜線交換 (edge swap) 操作⁹⁾ で均等化 (Fig. 6)

位相特徴の解析によって抽出された臨界点を完全に保存することも可能であるが，臨界点が多数抽出された場合にはユーザが指定した減少割合に到達しないことがある．そのような場合には，以下に示す重みの小さい *pass* を削除の対象とする．

$$W = f(P_1) + f(P_2) - f(P_3) - f(P_4),$$

ここで， $f(P_1)$, $f(P_2)$ は *pass* に接続する2本の尾根線の接続頂点 P_1 , P_2 の標高値を表し， $f(P_3)$, $f(P_4)$ は *pass* に接続する2本の谷線の接続頂点 P_3 , P_4 の標高値を表す．*pass* を削除の対象に組み入れることで，式(1)に示すオイラーの公式を満たすように *peak* または *pit* が臨界点としての特徴を失う．臨界点としての特徴を失った頂点は削除の対象に加えられる．例えば Fig. 7 では，頂点 P_2 は *pass* に分類されるが (2.1 節参照)，この頂点を削除し，稜線 (P_1, P_2) を縮退させると，もともと *pit* に分類されていた頂点 P_1 が *pit* でなくなり，削除の対象とされる．これは， P_1 の *pit* として特徴が P_3 の *pit* の特徴に吸収されたことを意味する．

Fig. 6 Edge collapse and edge swap by taking feature edges into account.

Fig. 7 An example where features of differential topology are lost by removing a *pass*.

3.3 詳細度制御による特徴損失量の評価

ポリゴンデータの詳細度制御法の精度を比較・検討するために，詳細度制御で要素数を削減したことによって失われた特徴を定量的に評価する必要がある．そこで，既存の形状特徴損失量に加えて，新たに微分位相幾何学的特徴損失量を定義し，それぞれを評価する．形状特徴損失量では，詳細度が制御されたサーフェスポリゴンデータ S' 上の頂点 P' から元のサーフェスポリゴンデータ S までの距離を求める．この距離を，元データを含む矩形領域の最長辺の長さ $d_{\text{box}}(S)$ で割ることにより正規化したものの和を形状特徴損失量 $E_{\text{shape}}(S')$ とする¹¹⁾：

$$E_{\text{shape}}(S') = \sum_{P' \in S'} \left(\frac{\min_{P \in S} \|P - P'\|}{d_{\text{box}}(S)} \right),$$

微分位相幾何学的特徴損失量 $E_{\text{critical}}(S')$ については，サーフェスネットワークの変化量や，臨界点分布の変化量などで表せる．ここでは，位相特徴の解析によって抽出された臨界点を完全に保存したときに特徴損失量が0になるように，削除した臨界点数と臨界点としての特徴を失った頂点数の割合で表現し，新たに臨界点の性質を得た頂点数はカウントしない．元データの微分位相幾何学的特徴解析によって抽出された臨界点群 ($\#\{\text{critical}\}$) の中で，詳細度制御処理によって削除された峠の数 ($\#\{\text{lost_pass}\}$) と峠を削除したことによって臨界点としての性質を失った臨界点の数 ($\#\{\text{lost_critical}\}$) の割合を求める：

$$E_{\text{critical}}(S') = \frac{w_1 \#\{\text{lost_pass}\} + w_2 \#\{\text{lost_critical}\}}{\#\{\text{critical}\}},$$

ここでは，削除した臨界点と，臨界点としての特徴を失った頂点の重みを等しくするために $w_1 = w_2 = 1$ とする．

3.4 復元

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である頂点分割 (vertex split) 操作 (Fig. 8)²⁾ によって、データを元の状態に戻す。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。Fig. 8 では、 (P_1, P_2, P_3, P_4) を削除履歴情報として保存する。完全に復元するために、削除された頂点の 2 次元空間内の座標値、および高さ (スカラ値) も保存する。削除履歴情報を用いて復元するには、 P_2 から反時計回りに接続頂点をたどったときに、 P_3 と P_4 には含まれる三角形パッチの頂点 P_2 を P_1 に移動し、さらに三角形パッチ (P_1, P_2, P_3) 、 (P_2, P_1, P_4) を新しく作成する。このデータ格納を利用すると、三角形パッチ (P_1, P_2, P_3) 、 (P_2, P_1, P_4) を削除履歴情報である (P_1, P_2, P_3, P_4) で置き換えることができる。

Fig. 8 Edge collapse and vertex split.

4. 実験

提案手法を用いて、局所的な形状特徴に加えて微分位相幾何学的特徴を考慮して詳細度を制御した。実験には、2 章で示した地形データとスカラデータを用いた。実装・実験環境には、SGI 社製 O2 システム (CPU: R10000, Clock: 180MHz, RAM: 192MB) を使用した。提案手法を DA と DEM の多重解像度制御 (Hierarchical Triangulation: HT)⁵⁾ と比較した結果も示す。HT では、粗い三角形パッチとその領域内の元データ頂点との距離を測定し、その距離が大きい頂点を挿入し、細かい三角形パッチ群に分割する。

4.1 地形データの詳細度制御

地形データの詳細度制御実験には、Fig. 3 に示した箱根・芦ノ湖周辺の地形データを用いた。箱根・芦ノ湖周辺の地形データと、その臨界点分布図を Fig. 9(a) に示す。ここでは、元データで頂上、峠、谷底として抽出された頂点をそれぞれグリフで表示している。この地形データに対して臨界点、特徴線の形状特徴を保持しながら三角形パッチ数を 75% 削減した結果を Fig. 9(b) に示す。次に、本手法と、DA で詳細度を制御した結果 (Fig. 9(c)) を比較する。本手法は DA と比べ、凹凸のような局所的な形状特徴に加えて、頂上・峠・谷底、尾根線・谷線として認識される大局的な形状特徴も保持できていることが確認できる。HT では、元データで隣接パッチの成す角が鋭角であるような稜線が残るため、形状特徴を精密に表現できるが、DA と同様に微分位相幾何学的特徴損失量は大きくなる (Fig. 9(d))。

3 章で定義した形状特徴損失量、微分位相幾何学的特徴損失量をそれぞれの結果から測定した値を Table 1 に示す。さらに、地形データの詳細度を制御するのに要した時間を 3.1 節のステップごとに計測した。位相解析に要した時間 (T_{topology}) もそれぞれ示す。提案手法では、

Table 1 Errors and timings (cpu seconds) in simplifying the geographical data in Fig. 9.

		Present	DA	HT
Reduction		75%	75%	75%
Error	E_{shape}	5.33×10^{-2}	5.52×10^{-2}	3.21×10^{-2}
	E_{critical}	5.57×10^{-1}	7.42×10^{-1}	7.11×10^{-1}
Timing	Step 1	0.105	0.290	—
	Step 2	0.306	0.136	—
	Step 3	0.560	0.438	—
	T_{topology}	0.166	—	—
	Total	2.24	2.06	6.11

(a) Original data
(Vertices: 2,601; Patches: 5,000)

(b) Present algorithm

(c) Decimation algorithm

(d) Hierarchical triangulation

Fig. 9 Simplifying the geographical data of the Hakone area (reduction ratio: 75%).

位相解析に時間を要するが、位相解析時に *peak*, *pit*, *pass*, *feature line* が特定できるため、DA でのステップ 1 に要する時間が短縮される。しかし、*feature line* に分類された頂点は、尾根線、谷線を直線近似するため、特徴量測定に時間を要する。計算時間をトータルで比較したときには、ほぼ同等の時間で詳細度を制御できる。

4.2 スカラデータの詳細度制御

風速値（0 から 255）が与えられた竜巻の流れ場の 3 次元構造を表すボリュームデータから水平方向に抽出された断面の一枚を実験に用いた。断面上の頂点は 2 から 218 までの風速値をスカラデータとしてもつ。風速値を高さ関数にとることでサーフェスネットワークを構築した。Fig. 10(a) に風速の臨界点分布図、等値線図、擬似カラーコーディングした図を示す。ここでは、元データで頂上、峠、谷底として抽出された頂点をグリフで表示している。サーフェスネットワークは、元データの風速値を高さ関数にとることで構築した。抽出された臨界点、特徴線を保つことを誤差許容量として設定しながら三角形パッチを削減した結果を Fig. 10(b) に示す。DA では、誤差許容量指定にアベレージ平面との距離 d (3.1 節) を利用し、 d がスカラデータ幅の 1/10 以下であることを誤差許容量として詳細度を制御した (Fig. 10(c))。DA で詳細度を制御したことによって、断面上の最大風速値は 217 となった。提案手法では最大値をもつサンプリング点は頂上として定義され、保存される。HT での誤差許容量には、新しく生成される三角形パッチの隣接パッチ間の外向き法線の成す角が 10° 以下と指定して詳細度を制御した (Fig. 10(d))。ただし、ここでは正規化したスカラデータを高さ関数に用いた。DA と同様に、微分位相幾何学的特徴である大局的な構造が失われる。

スカラ値を高さ方向に置き換えたときの形状特徴損失量、微分位相幾何学的特徴損失量をそれぞれ Table 2 に

Table 2 Errors and timings(cpu seconds) in simplifying the scalar data in Fig. 10.

		Present	DA	HT
Reduction		99%	99%	99%
Error	E_{shape}	3.36×10^{-1}	4.22×10^{-1}	3.12×10^{-1}
	E_{critical}	0.0	9.57×10^{-1}	9.35×10^{-1}
Timing	Step 1	0.0625	0.110	—
	Step 2	0.0622	0.0799	—
	Step 3	0.575	0.666	—
	T_{topology}	0.269	—	—
	Total	1.31	1.55	3.50

示す。さらに、スカラデータの詳細度を制御するのに要した時間を 3.1 節のステップごとに示す。スカラ値を高さ方向に置き換えてから微分位相幾何学的特徴を解析するのに要した時間もそれぞれ示す。提案手法では、位相解析に時間を要するが、ステップ 1 に要する時間が短縮される。

4.3 特徴領域の特定効果

竜巻データを擬似カラーコーディングする際の伝達関数を変えて可視化した結果を示す (Fig. 11)。伝達関数を変更することによって、同一の対象データからさまざまな情報を得ることができ、興味ある領域を効果的に観察することができる。Fig. 11(a)–(d) では上側の渦に注目した伝達関数を用いて可視化し、Fig. 11(e)–(h) では下側の渦に注目した伝達関数を用いて可視化した。提案手法は、形状の大局的な構造を保持するため、伝達関数の変化に対して頑強に特徴を保持できていることがわかる。

さらに、一度削減された要素を復元することを考える。提案手法では、微分位相幾何学的特徴を保存しているた

Fig. 10 Simplifying the scalar data of a tornado numerical model (reduction ratio: 99%).

Fig. 11 Simplifying the scalar data of tornado numerical model. Different transfer functions are used to locate the upper vertex structure in (a)–(d) and the lower vertex structure in (e)–(h).

Fig. 12 Partial restructuring from the simplified data in Fig. 10 (b).

め、興味ある領域を指定しやすい。Fig. 12(a) 中の楕円枠内を復元した結果を Fig. 12(b) に示す。

5. まとめと今後の課題

一価関数 $z = f(x, y)$ で表現される曲面上の頂点から構成される数値標高モデルに対し、微分位相幾何学的な特徴を抽出し、これらの特徴を保持するポリゴンデータの詳細度制御法を提案した。局所的な形状の特徴と、微分位相幾何学的特徴の双方を制御基準に組み込むことで、地形形状の大局的な構造を保持したまま局所の特徴の詳細度を制御できた。また、2次元断面上のスカラ値を高さ方向に置き換えて本手法を適用し、その効果を確認した。等高線や等値領域などの特徴そのものを画像として転送する場合¹²⁾と比較して、本手法はスカラデータを数値標高モデル化し、詳細度を制御するため、クライアントマ

シン側で対話的に可視化操作ができる。さらに、頂点間の接続関係を保ったまま転送するため、不規則格子データを扱う際にも有効である。なお、処理時間は DA で詳細度を制御するのに要した時間に対して 15%未満に抑えられた。

今後は、対象データの次元を上げ、3次元ボリュームデータに適用できるように拡張することを目指す。先行研究で提案されている3次元ボリュームデータの詳細度制御法は、頂点に与えられたスカラ値の周辺における勾配から特徴の大小を決定している^{13,14)}。しかし、ボリュームレンダリングする際に用いる伝達関数を変えるたびに特徴量が変化するという問題が生じる。そこで、スカラ値勾配の大局的な変化を表す微分位相幾何学的特徴を用いることにより、この問題を解決することを目指す。

謝 辞

本論文で使用した竜巻データの生成プログラムを提供してくれた米国オハイオ州立大学の R. Crawfis 氏に深謝する。

参考文献

- 1) Schroeder, W.J., Zarge, J.A., and Lorensen, W.E.: Decimation of Triangle Meshes, In *Proc. SIGGRAPH '92*, Chicago (1992) pp. 65–70.
- 2) Hoppe, H.: Progressive Meshes, In *Proc. SIGGRAPH 96*, New Orleans (1996) pp. 99–108.
- 3) Gueziec, A.: Surface Simplification with Variable Tolerance, In *Proc. Annual International Symposium on Medical Robotics and Computer Aided Surgery* (1995) pp. 132–139.
- 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 (2001) pp. 1115–1123.
- 5) De Floriani L., and Puppo, E.: Hierarchical Triangulation for Multiresolution Surface Description, *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 14, No. 4 (1995) pp. 363–411.
- 6) Takahashi, S., Ikeda, T., Shinagawa, Y., Kunii, T.L., and Ueda, M.: Algorithms for Extracting Correct Critical Points and Constructing Topological Graphs from Discrete Geographical Elevation Data, *Computer Graphics Forum*, Vol. 14, No. 3 (1995) pp. 181–192.
- 7) Dyn, N., Levin, D., and Rippa, S.: Data Dependent Triangulation for Piecewise Linear Interpolation, *IMA Journal of Numerical Analysis*, Vol. 10 (1990) pp. 137–154.
- 8) Pfaltz, J.L.: Surface Networks, *Geographical Analysis*, Vol. 8 (1976) pp. 77–93.
- 9) Hoppe, H., DeRose, T., Duchamp, T., McDonald, J., and Stuetzle, W.: Mesh Optimization, In *Proc. SIGGRAPH 93*, Anaheim (1993) pp. 19–26.
- 10) Delaunay, B.: Sur la Sphere Vide, *Izvestia Akademii Nauk SSSR, VII Seria, Otde lenie Matematicheskii i Estestvennyka Nauk* 7 (1934) pp. 793–800.
- 11) Cignoni, P., Rocchini, C., and Scopigno, R.: Metro: Measuring Error on Simplified Surfaces, *Computer Graphics Forum*, Vol. 17, No. 2 (1998) pp. 167–174.
- 12) 武井利文, 松本秀樹, 村松一弘, 土肥俊: 「大規模非定常数値シミュレーションのためのリアルタイム可視化システム」; NEC SX-4 上での並列ベクトル処理性能」, 可視化情報学会誌, Vol. 20, Suppl. 1 (2000) pp. 115–118; (JAERI-J 17741).
- 13) Staadt, O.G., and Gross, M.H.: Progressive Tetrahedralizations, In *Proc. IEEE Visualization '98, Research Triangle Park* (1998) pp. 397–402.
- 14) Cignoni, P., Costanza, D., Montani C., Rocchini, C., and Scopigno, R.: Simplification of Tetrahedral Meshes with Accurate Error, In *Proc. IEEE Visualization 2000, Salt Lake City* (2000) pp. 85–92.