

形状特徴解析に基づく地形データの詳細度制御

1E-01

中村 浩子¹ 高橋 成雄² 藤代 一成^{3,4}

1 お茶の水女子大学 大学院人間文化研究科

2 東京大学 大学院総合文化研究科

3 お茶の水女子大学 理学部

4 財団法人 高度情報科学技術研究機構 (RIST)

1 背景と目的

近年、コンピュータの性能の向上に伴い、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、大規模な複雑な 3 次元ポリゴンデータで用いられる多角形パッチの枚数は、ひじょうに膨大になる。このような膨大な枚数の多角形パッチから構成されたポリゴンデータを、そのままディスプレイに描画したりネットワークを介して転送するのは、計算機のメモリ容量や処理時間の面からみて負荷が大きい。そこで、この問題を改善するための、適応的なポリゴンデータの詳細度制御法が近年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要素を削減する手法 [1] や、与えられたポリゴンデータと詳細度を制御されたポリゴンデータの距離誤差を考慮する手法 [2] などがある。また、体積を保存させる機能を組み込んだアルゴリズムも提案されている [3]。著者の一部も、曲率を基準に、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、これらの手法は座標の重みが x, y, z 軸それぞれに関して等しいようなポリゴンデータを詳細度制御の対象データに仮定しており、地形形状のように高さ (z 軸) 方向が特別な意味をもつポリゴンデータには新たな手法が必要と考えられる。

本稿では、地形標高データから構成されるポリゴンデータの詳細度制御について検討する。ここで、地形標高データは、Digital Elevation Model (DEM) とよばれる、一価関数 $z = f(x, y)$ で表現される曲面上のサンプル点から構成される。われわれはこの DEM から、特に頂上・峠・谷底、さらには尾根線・谷線な

どの曲面の微分位相特徴を抽出し、ポリゴン形状の詳細度制御に用いる。これらの特徴の特筆すべき点は、従来の研究と同様に局所的な形状特徴をとらえられることに加え、曲面の性質から導かれる大局的な性質も満たす新たな側面をもっていることである。DEM から構成されるポリゴン形状表現の多重解像度制御に関しては、De Floriani らによる研究 [5] が有名であるが、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。本稿では、詳細度制御に上記に述べたような微分位相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の特徴の詳細度を制御可能にしており、その点が上に述べた従来の詳細度制御手法と大きく異なる。

2 地形形状の詳細度制御

先に述べた通り、本研究では頂上・峠・谷底、尾根線・谷線などの微分位相特徴を用いて地形データの形状特徴を解析する。特に、頂上・峠・谷底は形状の局所的な特徴をとらえたとともに、オイラーの公式 $\#\{\text{頂上}\} - \#\{\text{峠}\} + \#\{\text{谷底}\} = 2$ で表される大局的な性質を満たしている。ただし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の方の一部を占めていると考え、球面の底にあた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以降、仮想谷底とよぶ。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 つの線が地形表面上に互に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特徴抽出アルゴリズム [7] を用いて臨界点 (頂上・峠・谷底) と特徴線 (尾根線・谷線) を抽出する。

本提案手法は、今まで述べたような微分位相特徴を用いながら、三角形パッチの数を削減するため、以下のようなステップで詳細度を制御する。

LoD Control of Geographical Elevation Data Based on Differential Topological Features.

Hiroko Nakamura¹, Shigeo Takahashi², Issei Fujishiro^{3,4}

¹ Graduate School of Humanities and Sciences, Ochanomizu University, ² Graduate School of Arts and Sciences, University of Tokyo, ³ Faculty of Science, Ochanomizu University, ⁴ Research Organization for Information Science & Technology.

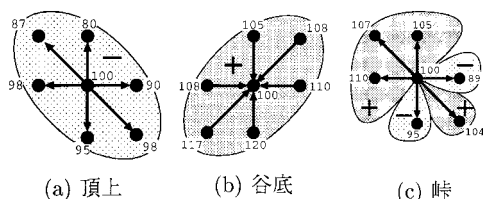


図 1: 臨界点分類

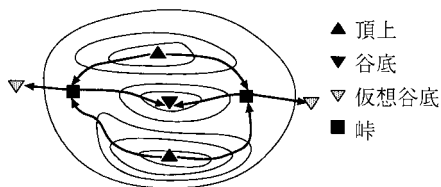


図 2: サーフェイスネットワークと等高線

1. 地形形状の特徴抽出
2. 特徴線からのポリゴン再構成
3. 三角形ポリゴンの均等化

以下、各ステップでの処理について説明を加える。

2.1 地形形状の特徴抽出

本手法で用いられる地形データは、 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 平面に関してグリッド状にサンプリングしたものであると仮定する。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 [8] を用いて、なるべく形状全体が滑らかなようになるよう三角形分割を構成する。

まず、それぞれのサンプル点について、三角形分割のリンクで直接接続する隣接点を求め、その高さをみることで臨界点を抽出する。具体的には、すべての隣接点を対象となるサンプル点より低い場合、その点は頂上と判定され (図 1(a))、逆に高い場合は谷底と判定される (図 1(b))。峠は、例えばサンプル点に関し隣接点を反時計回りにみたときに、サンプル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 (図 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、抽出された各峠に関し、上に述べたような高い隣接点列それぞれから代表点を選びだし、これらの点を出発点として頂上へ単調上昇する 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の単調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。図 2 は、サーフェイスネットワークを等高線と一緒に表示したものである。ここでは、地形データの等高線を実線で表し、矢印は下り坂を示している。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を効果的に表現できる。

2.2 特徴線からのポリゴン再構成

前節で DEM から抽出したサーフェイスネットワークを形状の大局的構造としてとらえ、その特徴線をポリゴンデータの要素である三角形パッチのエッジ群の一部となるように全体の地形形状を再構成する。地形形状は $z = f(x, y)$ の一価関数の形で表現されるため、三角形パッチの再構成は、 xy 平面上で三角形分割を求めることに他ならない。

ここで再構成されるポリゴンデータは、元の地形データには存在しない穴や交差が生じてはならない。しかし、 xy 平面に射影したときに交差するようなエッジ群から、地形形状を表すポリゴンを再構成すると、穴や交差が生じる場合がある。もし地形形状が理想的な曲面であった場合、サーフェイスネットワークの特徴線を xy 平面に射影しても、臨界点以外では交差が生じないが、ここでは離散的なサンプル点から特徴線を抽出し、特徴線を臨界点を両端点とするような直線で表しているため交差することがある。そこで、この問題を回避するために、まずサーフェイスネットワークを一度 xy 平面に射影し、もし特徴線同士が交点をもつならば、その交点で双方の特徴線を 2 本に分割する。

次に、生成した交差のないサーフェイスネットワークの特徴線を一部とするような、三角形パッチのポリゴンデータを以下の手順で再構成する。

1. 地形データの領域、仮想谷底を除いたサーフェイスネットワーク (図 3(a)) をそれぞれ xy 平面上に投影する (図 3(b))。
2. 特徴線の両側 (図 3(c) 中の 2 つの矢印方向) に、特徴線と臨界点を用いて三角形パッチを生成する (図 3(c))。
3. すべての特徴線に対して、ステップ 2 の処理を行う (図 3(d))。
4. 特徴線以外の三角形パッチのエッジに対してもステップ 2 の処理を行う (図 3(e))。

ステップ 2 で三角形パッチを構成する臨界点を選択するとき、特徴線からの距離に近い順に候補点とする。

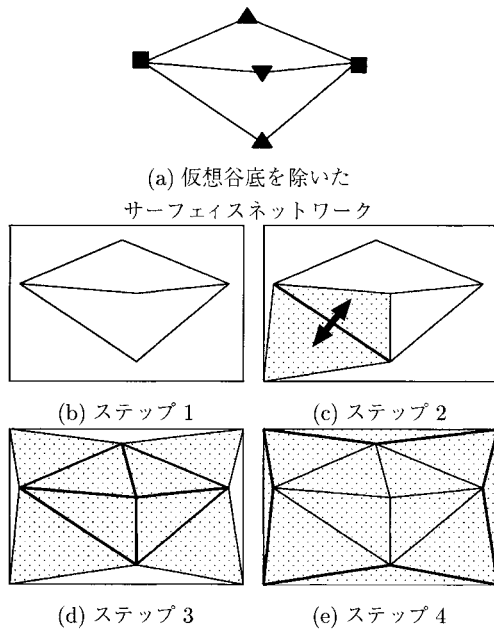


図 3: 地形形状ポリゴンデータの再構成処理

この候補点を用いて三角形パッチを作成する際、すでに生成されているエッジ、三角形パッチと xy 平面上で交差判定を行い、交差する場合は他の候補点で再度検討する。上記のステップを、すべての特徴線、エッジの両側に三角形パッチが生成されるまで繰り返す。

2.3 三角形ポリゴンの均等化

サーフェスネットワークから張られた三角形パッチの近似精度を高めるために、細長い三角形パッチをできるだけ排除する。ここでは、均等化された三角形パッチ群の生成を実現するための手法のひとつであるドロネー分割を用いる。ドロネー三角形は、その外接円内部に母点を含まないという「空円の性質」(empty circle property) を満たす [9]。そこで、各三角形パッチの外接円内に他の臨界点が存在する場合は、稜線交換操作 (edge swap) (図 4) を行う。ただし、特徴線である尾根線、谷線は稜線交換操作の対象外とすることで、これらの特徴を保持する。言い換えれば、特徴線を残し、できるだけドロネー三角形分割に近い三角形分割を行う。

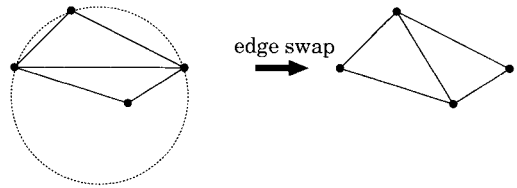


図 4: 稜線交換操作

3 実験

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。実験には、図 5(a) に示す箱根・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のサーフェスネットワークを図 5(b) に示す。ここでは、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。また、ここでのサーフェスネットワークの特徴線は、 xy 平面に射影したとき、特徴線同士が交点をもつ場合はその交点で分割されている。

箱根・芦ノ湖周辺の地形データ (図 6(a)) のサーフェスネットワークから地形形状を表すポリゴンデータを再構成した結果を図 6(b) に示す。元の地形データは 5,000 枚の三角形パッチから構成されていたのに対し、再構成によって得られたポリゴンデータは 505 枚の三角形パッチから構成されている。

次に、本手法と、1992 年に Schroeder らによって提案されたデシメーションアルゴリズム [1] で詳細度を制御した結果を比較する。デシメーションアルゴリズムは、各頂点に対して、その頂点に接続する三角形パッチ群から頂点近傍の曲率を測定し、その曲率を基準に詳細度を制御する。つまり、近傍の曲率が大きい頂点は保存され、近傍の曲率が小さい頂点を削除するように局所変形操作を行い、形状の特徴を保ちながら段階的にパッチの枚数を減少させる。この手法では、ユーザは詳細度を制御する割合を指定することが可能である。図 6(a) に示す箱根・芦ノ湖の地形データをデシメーションアルゴリズムを用いて制御割合率を変えて詳細度を制御した結果を図 6(c), (d) に示す。

本手法とデシメーションアルゴリズムによって詳細度を制御した結果 (図 6) を比較すると、本手法は詳細度を制御する割合をユーザが指定できないという問題点があるが、頂上・峠・谷底、尾根線・谷線のような形状特徴が保持できていることが確認できる。

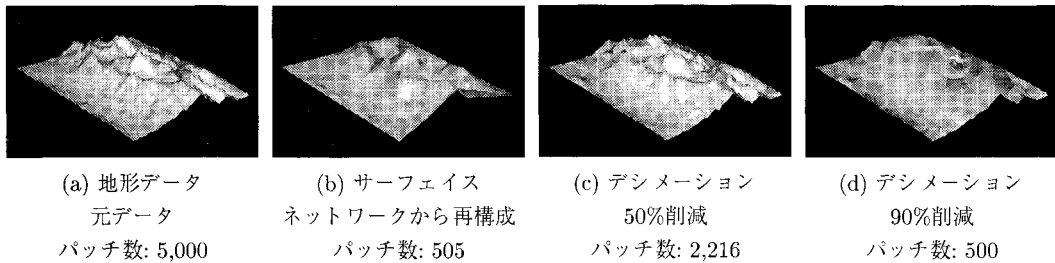


図 6: 箱根・芦ノ湖地形データの詳細制御結果

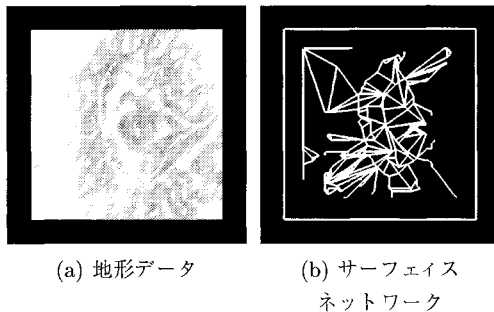


図 5: 箱根・芦ノ湖周辺の地形

4 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サンプル点から構成される地形データに対し、頂上・峠・谷底、尾根線・谷線などの曲面の微分位相的な形状特徴を抽出し、これらの特徴を保持するポリゴンデータの詳細制御法を提案した。本手法は、従来の詳細制御法と異なり、詳細度を制御する割合を指定することができないという問題がある。しかし、詳細制御に微分位相特徴を用いることで、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、本手法では、ポリゴンデータを転送する際に、サーフェスネットワークデータだけを転送し、転送先でポリゴンデータを再構成できるため、効果的な転送の実現が期待できる。

今後は、2次元画像に対して、その色情報を高さ方向に置き換えて本手法を適用することを考えている。さらに、位相的特徴だけでなく、曲率などの局所的特徴量も制御基準に組み込むことで、制御割合を指定できるようにする。また、対象データの次元を上げ、3次元ポリゴンデータに適用させるように拡張することを目指す。

参考文献

- [1] Schroeder, W. J., Zarge, J. A., and Lorensen, W. E.: "Decimation of Triangle Meshes," *Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH '92, Chicago)*, pp. 65-70, July 1992.
- [2] Hoppe, H.: "Progressive Meshes," *Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH 96, New Orleans)*, pp. 99-108, August 1996.
- [3] Gueziec, A.: "Surface Simplification with Variable Tolerance," In *Proc. Annual International Symposium on Medical Robotics, and Computer Aided Surgery*, November 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制御」, 情報処理学会論文誌, Vol. 42, No. 5, pp. 1115-1123, 2001年5月
- [5] De Floriani L., and Puppo, E.: "Hierarchical Triangulation for Multiresolution Surface Description," *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, Vol. 14, No. 4, 1995.
- [6] Pfaltz, J. L.: "Surface Networks," *Geographical Analysis*, Vol. 8, pp. 77-93, 1976.
- [7] 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, pp. 181-192, May 1995.
- [8] Dyn, N., Levin, D., and Rippa, S.: "Data Dependent Triangulation for Piecewise Linear Interpolation," *IMA Journal of Numerical Analysis*, Vol. 10, pp. 137-154, May 1990.
- [9] Delaunay, B.: "Sur la sphere vide," *Izvestia Akademia Nauk SSSR, VII Seria, Otdel'nie Matematicheskii i Estestvennyka Nauk* 7, pp. 793-800, 1934.