QEM を利用した 3 次元地形データの軽量化

3D Geographic Data Simplification by Using Quadric Error Metrics

佐藤 研一[†], 正会員 今野 晃市[†], 正会員 徳山 喜政^{††},
正会員 曾根 順治^{††}, 李 仕剛[†]

Kenichi Satoh[†], Kouichi Konno[†], Yoshimasa Tokuyama^{††}, Junji Sone^{††} and Shigang Li[†]

あらまし 本論文では、数値標高データから 3 次元形状モデルを生成するための手法について提案する。一般に 3 次元モデルはデータ量が膨大であるため、Web3D などの応用分野で利用するためには、データを簡略化することが望ましい。本研究では、地形データから等高線モデルを生成し、等高線の特徴を残しながら断面形状データを軽量化する。その後、軽量化した断面間にスキニング手法を適用し、3 次元形状モデルを生成する。

キーワード: DEM, XVL, スキニング, QEM

1. はじめに

地理情報システムにとって、3 次元地形データは欠くことのできない基本データである。地形モデルの表現方法のひとつに、格子点に高さ情報を持たせた Digital Elevation Model (DEM) がある¹⁾。しかし、DEM データはサイズが大きく、インターネットを通じて手軽にやり取りするのが難しい。そのため、Web3D²⁾ などの応用分野で利用するためには、データを軽量化することが望ましい。そこで本研究では、3 次元地形データから軽量化された 3 次元地形モデルを生成する手法を提案する。本手法では、DEM データから等高線モデルを生成し、等高線の特徴を保ちながら地形データを軽量化する。その後、軽量化された等高線に対して、スキニング手法を適用し 3 次元地形モデルを生成した。

2. データ軽量化手法

3 次元形状データを軽量化する手法として Quadric Error Metrics (QEM) 手法³⁾がある。QEM 手法は、形状を構成する三角形ポリゴンを簡略化する手法である。本章では、本研究の基礎技術である QEM 手法について説明する。QEM 手法は、 4×4 の対称行列 Q を個々の頂点に割り当て、頂点 v における誤差評価式を次式のように定義する。

$$\Delta(v) = v^T Q v \quad (1)$$

形状を簡略化するために、 $\Delta(v)$ の小さい頂点から順に削除していき、目標となる頂点数に達したら削除を終了するというものである。ここで、行列 Q は頂点のまわりの平面の方程式 $planes(v)$

$$ax + by + cz + d = 0 \quad (2)$$

の総和であり、次式で表すことができる。

$$Q = \sum_{P \in planes(v)} K_P \quad (3)$$

$$K_P = \begin{pmatrix} a^2 & ab & ac & ad \\ ab & b^2 & bc & bd \\ ac & bc & c^2 & cd \\ ad & bd & cd & d^2 \end{pmatrix} \quad (4)$$

DEM データは 2.5 次元のデータであり、形状の表面データが生成されていないので、QEM 手法をそのまま利用することができない。そこで本論文では、DEM から抽出した 3 次元の等高線に対して QEM を適用するための手法を次章に示す。

3. 3 次元地形モデルの生成

本章では、DEM データから 3 次元地形モデルを生成する手法について説明する。以下に、その概要を示す。

- (1) DEM データから 1 ピクセル単位で取り出した等高線の点の座標値を入力データとし、そのデータの座標を 3 次元空間に配置する。同じ高さにある点を繋ぎ、3 次元断面形状を生成する。
- (2) 3 次元断面形状に QEM を適用することでデータ

2002 年 5 月 31 日受付、2002 年 9 月 13 日最終受付、2002 年 9 月 24 日採録

[†] 岩手大学 工学部

(〒020-8551 盛岡市上田 4-3-5, TEL 019-621-6476)

^{††} 東京工芸大学 工学部

(〒243-0297 厚木市飯山 1583, TEL 046-242-9508)

[†] Faculty of Engineering, Iwate University

(4-3-5, Ueda, Morioka-shi, 020-8551, Japan)

^{††} Faculty Of Engineering, Tokyo Institute of Polytechnics

(1583, Iiyama, Atsugi-shi, 243-0297, Japan))

サイズの軽量化を行う。軽量化率を高くすることにより、データ量は削減できるが、その場合に生じる形状の角張りを補正することが必要である。そこで、本研究では、構成頂点すべてに適切な丸め係数⁴⁾を設定し、形状を丸める操作により角張りの補正を行う。

- (3) 軽量化された3次元断面形状は、高さごとに別々の形状となっているため、スキニング手法⁶⁾を用いて各々の3次元断面形状を補間し1つのモデルとして統合する。

3.1 QEM 手法の適用

(1) 面の定義

2章で述べたように、ポリラインである等高線データにQEM手法を適用するためには、頂点のまわりに平面を定義することが必要である。すなわち、頂点における誤差の算出には平面の方程式を用いて誤差行列 Q を定義しなければならない。しかし、等高線モデルの頂点のまわりには複数のポリゴンが存在しないため、Garlandらの手法では誤差行列を求めることができない。そこで本手法では、断面線に垂直な平面を仮想的に定義することにより誤差行列を算出し、QEM手法を適用する。すなわち、図1に示すように、等高線を表す断面形状における法線ベクトル $\mathbf{n}$ と、それに属する頂点間のベクトル $\mathbf{v}_A$ の外積ベクトル $\mathbf{n}_A$ を法線ベクトルとする仮定の面 A を想定する。同様の方法で、各稜線上に仮定面を設定する。このようにして設定された仮定面の平面の方程式を用いて、各頂点における誤差行列 Q を算出する。等高線データはポリラインであるので、各頂点には2本の稜線が連結している。よって行列 Q は、この2本の稜線における仮定面から求めた行列を加算すればよい。

(2) 丸め係数の設定

QEM手法を適用することにより、形状は軽量化されるが、軽量化された形状は角張ってしまうので、頂点すべてに丸め係数を設定し、形状を丸めて角を落とし、元の形状

を近似する。すなわち、丸め係数を付加した元の形状をラティスマッシュ⁴⁾とみなし、Lattice Kernel⁴⁾の機能である丸め操作⁵⁾を用いて丸めた形状を生成する。丸め係数は、ある頂点 v に注目したとき、それに隣接する稜線のうち、短い方の稜線を L_0 、長い方の稜線を L_1 とし、以下の式を用いて求める。(図2参照)

$$\text{丸め係数} = \sqrt{\frac{L_0}{L_1}}/k \quad (5)$$

ただし、 $L_1 > L_0$ である。丸め操作によって生成される形状は丸め係数を小さくすると元の形状、すなわちラティスマッシュの形状に近づく⁵⁾。そこで本研究では、丸め係数を制御するために、元の稜線の形状をどの程度変化させるかを表すパラメータである k を導入する。

具体的な適用方法を図2に示す。Aのポリラインは軽量化された形状である。ポリラインの全稜線の長さを計算し、式(5)を利用して頂点に丸め係数を付加する。丸め操作により丸めた結果がBの曲線である。このように、丸め処理を適用することにより、角張った形状から、滑らかな曲線形状を生成することができる。 k を小さくすると、丸め係数が大きくなり、形状が大きく変化するので、本研究では、 $k = 100$ 程度が適当であると経験的に判断した。このとき頂点 v は、丸め係数に従って頂点 v' に移動する。元の形状と、丸めた後の形状の誤差については、4章で考察する。

3.2 スキニング手法の適用

断面を補間して側面を生成するための手法のひとつにスキニング手法がある。本研究では、軽量化された断面形状をスキニング手法により結合し側面を生成する。本節では、スキニング手法の適用法について説明する。

(1) 補間ネットワークの作成

本手法では、隣接する断面形状を接合し4辺で囲まれた側面ができるように複数の断面間を補間する曲線を生成する。以降、この曲線のことを断面補間曲線と呼ぶ。断面補間曲線の幾何形状を決定するために、次に示す手法により山岳地形の特徴を利用した三角形のネットワークを作成する。

図1 各頂点における平面の定義
Definition of plane at each vertex.

図2 丸め係数の設定
Set rounding weight at a vertex.

- (a) 山頂部や窪地を表す断面を選択する。選択された断面で最も標高が高いものに0と番号をつけ、それ以外のもに通り番号をつける(図3)。
- (b) (a)で選択された断面の中心点を標本点とし、標本点間連結し、3角形を形成する。
- (c) 断面の中心点と、境界箱の4隅の点とを連結し、山頂部と窪地、山岳地形図の4隅を標本点とした3角形ネットワークを生成する。例えば、図4に示すように、断面の境界箱の角をA, B, C, Dとし、これらの点を利用して、地形図を3角形ネットワークで領域分割する。

(2) 断面補間曲線による3次元モデルの生成

(1)で述べた手法で作成した3角形ネットワークを利用して、断面補間曲線を生成する。ここで生成する曲線は、ネットワークの三角形の1辺を含み、等高線の断面形状に垂直な仮想平面と断面曲線との干渉点を通過点として指定し、その間に滑らかな区分Bézier曲線を生成したものであ

図3 断面の選択
Selection of cross sectional data.

図4 3角形ネットワークの生成
Generating triangler network.

る。本節で述べた手法で生成した断面補間曲線を利用して、断面間を位相的に接続することができる。3.1節で述べたように、断面には丸め処理が施されているので、各断面間を接続した側面は、 C^0 連続な頂点が4ヶ所存在する4辺形領域となる。

4. 結果と考察

本節では、DEMデータから3次元形状モデルを生成した例を示す。図5は、DEMから抽出した等高線を示す。等高線はポリラインで表されている。データの大きさは237KBであり、頂点数は35048である。本手法を適用した等高線データを図6に示す。その結果、データサイズは30KBで頂点数を1752とすることができた。結果から、データサイズは約1/8に軽量化することができた。このとき、軽量化のみを行うとポリラインが角張ってしまうため、3.1節で述べた丸め手法を利用して角を丸める。形状を丸めたときに、元の形状と視覚的に違和感のない形状を生成することができた。元の形状の頂点 v と丸めた後の形状の頂点 v' 間の距離 d を用いて、元の形状と丸めた形状の変化を評価するために、頂点 vv' 間の距離の最大値 d_{max} と元の形状の境界箱の最長の辺の長さの比率を変化率と定義する。図4に示すデータでは、丸め手法を適用する前と後での変化率は2.9%になった。この値は十分に小さいと考えられ、視覚的に違和感のない形状を定量的に評価することができたと考える。

また、図7は、軽量化後の断面形状をスキニング手法により4辺形領域を生成した例である。生成された4辺形領域はkonnoらの手法⁹⁾により自由曲面を生成することが可能である。図7に示した形状の一部を拡大し、4辺形領域を自由曲面で内挿したときの制御点を図8に示す。スキニング手法を適用すると、断面補間曲線が同一面を分割する場合がある。このような場合には、4辺形領域を形成できないので、断面補間曲線を利用した接続を行わずに、非4辺形領域のままとした。よって、いくつかの個所では、非4辺形領域が生成されるため曲面を生成することができない。非4辺形領域の扱いは今後の課題となる。

5. 結論

本論文では、DEMデータから3次元形状モデルを作成するための手法を提案した。本手法では、DEMデータから断面を抽出し、断面をQEM手法を用いて軽量化する。軽量化により断面が角張る問題を解決するために、頂点に丸め係数を設定し、断面を丸めることで近似形状を生成した。その後、スキニング手法により断面間を補間した3次元モデルを生成した。我々の手法により、3次元モデルのデータサイズを約1/8に軽量化しながら、もとの形状と違和感のない形状を得ることができた。

図 5 DEM データから生成した等高線
Contour lines generated from DEM data.

図 6 等高線データの軽量化結果
Result of simplification using our method.

図 7 スキニング手法による側面の生成例
Generated 4-sided faces using skinning method.

図 8 曲面の制御点表示
Control point of 4-sided face.

6. 今後の課題

今後は、より高い軽量化率を適用しながら地形の特徴を保存できるように QEM 手法を拡張する。また、非 4 辺形領域を意図どおりに内挿するための曲面生成理論に関する研究を実施する予定である。最後に、DEM データを提供してくださった、岩手大学工学部情報システム工学科渡邊研究室に感謝する。また、研究用の形状モデリングカーネルを貸与してくれた、ラティス・テクノロジーの鳥谷浩志氏に感謝する。

【文 献】

- 1) 古館守通, 渡辺孝志, 阿部英志, 横山隆三: “数値標高モデルの生成に用いる補間手法の性能評価”, 地理情報システム学会, GIS-理論と応用, **8**, 1, pp.29-38, 2000.
- 2) 脇田玲: “Web3D の最前線”, 情報処理, **42**, 2, pp.167-172, 2001.
- 3) Michael Garland and Paul S. Heckbert, “Surface Simplification Using Quadric Error Metrics”, Proc. SIGGRAPH'97, pp.209-216, 1997.
- 4) Akira Wakita, Makoto Yajima, Tsuyoshi Harada, Hiroshi Toriya, Hiroaki Chiyokura: “XVL: Compact Qualified 3D Representation with Lattice Mesh and Surface for The Internet”, Web3D-VRML2000-Fifth Symposium on the Virtual Reality Modeling Language (Web3D VRML2000 San Francisco), pp.45-51, 2000.
- 5) 脇田玲, 矢島誠, 原田毅士, 鳥谷浩志, 千代倉弘明: “ラティス構造に基づく軽量で高品質な Web3D データ表現”, 情報学論, **42**, 5, pp.1170-1181, 2000.
- 6) Yoshimasa Tokuyama, “Skinning-surface generation based on spine-curve control”, The Visual Computer, **16**, 2, pp.134-140, 2000.
- 7) 鳥谷浩志, 千代倉弘明: “3次元CADの基礎と応用”, 共立出版 1991.
- 8) Konno, K., Tokuyama, Y. and Chiyokura, H., “A G^1 connection around complicated curve meshes using C^1 NURBS Boundary Gregory Patches”, Computer Aided Design, **33**, 4, pp. 293-306, 2001.

さとう けんいち
佐藤 研一 2000 年、東北工業大学工学部通信工学科卒業。現在、岩手大学大学院工学研究科情報工学専攻。3次元モデルの軽量化に関する研究に従事。

こんの こういち
今野 晃市 1985 年、筑波大学第三学群情報学類卒業。(株)リコー ソフトウェア研究所、ラティス・テクノロジー(株)を経て、現在、岩手大学工学部助教授。VR, 自由曲面の内挿法、レンダリングアルゴリズム、並列処理アルゴリズムなどの研究に従事。博士(工学)、正会員。

とくやま よしまさ
徳山 喜政 1986 年、東京大学工学部産業機械工学科修士課程修了。(株)リコーを経て、現在、東京工業大学助教授。CG, VR, および製造システムの研究に従事。博士(工学)、正会員。自由曲面生成手法、形状制御手法の研究に従事。博士(工学)、正会員。

そね じゅんじ
曽根 順治 1985 年、豊橋技術科学大学大学院修士課程修了。(株)東芝、慶應義塾大学 SFC 研究所訪問員を経て、現在、東京工業大学助教授。CAD, CG における自由曲面生成手法、形状制御手法の研究に従事。博士(工学)、正会員。

り しごう
李 仕剛 1985 年 7 月、中国北京清华大学电机工程卒業。1987 年来日。1993 年、大阪大学博士課程修了。同年大阪大学基礎工学部助手。広島市立大学情報科学部助教授を経て、現在、岩手大学工学部助教授。コンピュータ・ビジョン、ロボット・ビジョン、映像メディア、複合現実などの研究に従事。博士(工学)。