

# 山岳表面の等高線に基づいた曲線メッシュの生成

## Curve Mesh Reconstruction Based on Mountain Contours

張 志毅<sup>†</sup>, 正会員 今野 晃 市<sup>†</sup>, 正会員 徳山 喜 政<sup>††</sup>

Zhiyi Zhang<sup>†</sup>, Kouichi Konno<sup>†</sup> and Yoshimasa Tokuyama<sup>††</sup>

**Abstract** The need for ways to obtain highly accurate 3D shape data from existing 2D contours is increasingly necessary in some applications, such as in disaster prevention, environmental analysis, and creating construction plans. In this paper, we propose an algorithm that reconstructs a curve mesh model of mountain with triangular and quadrilateral domains that is generated from discrete contours data by using constrained Delaunay triangulation method. To prove the effectiveness of our method, we interpolated the curve mesh into free-form surface model with  $G^1$  continuity and compared the accuracy and quantity of data with other methods.

キーワード: 等高線 曲線メッシュ  $G^1$  連続性 Gregory パッチ Gregory 三角形

### 1. ま え が き

地形図から得られた等高線は、地球表面の標高データを表現するための一般的な形式である。しかし、防災、環境解析、映像教育、工事計画などに対して、2次元等高線地図の精度や表現力は不十分であることも多い。例えば、国土地理院が発行する10mメッシュのDEM(Digital Elevation Model)は日本で最も精度が高い地形データの一つであるが、それより精密なデータが必要な場合に、どのようにしてそのデータを算出するのが重大な問題となる。また、2次元等高線地図上の任意位置における標高を求めするために、既存のデータから任意位置の標高を精度よく補間する方法も必要とされている。これらの問題を解決するために、以下の考え方は有効である。まず、現存の離散的な等高線データを補間し、連続的な表面モデルを生成する。そして、生成した表面モデルから、要求された等高線や任意位置の標高値を得ることができる。したがって、等高線を連続的な表面モデルで補間する方法は、これらの問題を解決するための基本手法の一つである。

従来、等高線からの表面復元問題は、隣接する等高線間の対応問題、分岐問題、タイリング問題および表面補間問

題の四つの子問題に分解することができる<sup>1)</sup>。この四つの問題の中で困難な問題は、分岐構造を持つ等高線間のタイリング問題と表面補間問題である。Zhangら<sup>2)</sup>は、局所指向性のあるCDT(Constrained Delaunay Triangulation)手法を利用して、等高線空間をいくつかの三角形領域に分割することによって、分岐構造を持つ等高線間のタイリング問題を解決した。その結果として、山岳地形の表面を多面体表面モデルで表現することができた。しかし、多面体表面モデルでは、以下のような問題がある。

多面体表面モデルを、任意の高さ方向のピッチで切断すると、得られた等高線はポリラインでしか表現できない。得られた等高線データは離散的なデータであるため、その精度は、多面体表面モデルの精度に依存する。多面体表面モデルの精度を高くするにしたがって、計算コストが高くなる。また、指定した位置の標高値を求めるとき、指定した位置とある頂点が一致すれば、その頂点をそのまま利用できる。一方、頂点以外の場所は補間法で計算するため、補間法に依存して頂点の周りの標高値は不連続な値となる。

したがって、少ないデータ量で精度の高い表面モデルを生成するためには、パラメトリック曲面などの連続関数表現が必要である。また、表面モデルを構成する曲面と曲面の間に、少なくとも $G^1$ 連続性<sup>3)</sup>を保証する必要がある。

本論文では、離散的な点列で表現された等高線に対して、局所指向性のあるCDT法を利用したタイリング手法<sup>2)</sup>に基づいて、三角形領域と四辺形領域を含む曲線メッシュの生成手法を新しく提案する。生成された曲線メッシュを $G^1$ 連続な曲面内挿法<sup>4)5)</sup>により内挿した曲面モデルと、多面体表面モデルとの精度およびデータ量を評価し、本手法の有効性を示す。

2006年3月20日受付, 2006年8月23日最終受付, 2006年9月10日採録

<sup>†</sup>岩手大学 工学部

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

<sup>††</sup>東京工芸大学 工学部

(〒243-0297 神奈川県厚木市飯山 1583, TEL 046-242-9518)

<sup>†</sup>Faculty of Engineering, Iwate University, Japan

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

<sup>††</sup>Faculty of Engineering, Tokyo Polytechnic University, Japan

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

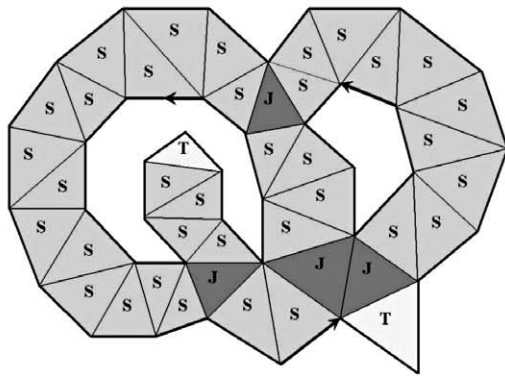


図 1 生成したタイリング三角形の分類  
Classification of generated tiling triangles.

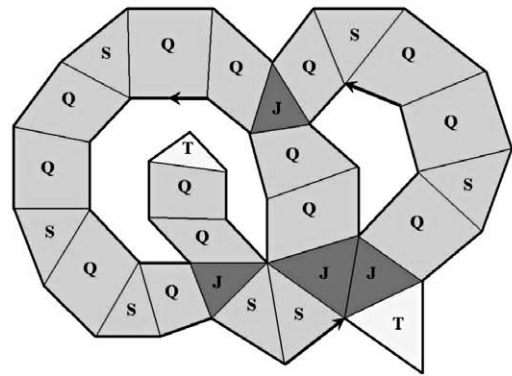


図 2 四種類の特徴領域  
Four characteristic domain cases.

## 2. 関連研究

従来, C.Gold ら<sup>6)</sup> は, Delaunay 三角形と Voronoi 図を利用し, 対応する等高線の間を三角形領域に分割し, 多面体表面モデルを生成した. その後, 生成したモデルの精度を上げるために, 骨格線(尾根線と谷線)や各頂点の横断接線ベクトルを追加情報として利用した. しかし, 骨格線や横断接線ベクトルなどの追加情報を利用しても, 元になる形状モデルが多面体表面モデルであるため, 1章に述べたデータ量と精度に関する問題点は解決されなかった.

K.Hormann ら<sup>7)</sup> は, 一般的な CDT を利用し, 等高線間を三角形で分割した. 形状が正しくかつサイズが均一な三角形を得るために, 等高線間にサポート頂点を追加した. それに基づいて, 各頂点の横断接線ベクトルを追加情報として  $C^1$  連続性<sup>3)</sup>を持つ陰関数曲面モデルの生成手法を提案した. この手法では, 陰関数曲面モデルを使用することで, 1章に述べた連続性に関する問題点を解決した. しかし, 追加したサポート頂点の数は元の等高線頂点の数の4倍~15倍に増えるため, 分割された三角形領域の数や生成した陰関数曲面の数もほぼ同じ倍数になり, データ量は多面体表面モデルと比較して, 4倍~15倍も増加し, 計算コストも大幅に増加するという問題がある. また, 陰関数曲面は座標変換により表現式が大きく変化したり, 曲面を可視化するのに手間がかかる.

## 3. 三角形分割

対応する等高線間を三角形で分割することは本研究の基盤である. 本章では, Zhang らが提案した局所指向性のある CDT 手法<sup>2)</sup>を利用して, 等高線間を三角形領域に分割する手法について説明する.

(1) 密度が均一な等高線点列を得るために, 最初の等高線データを周期的 B-spline 曲線<sup>3)</sup>で近似し,  $s$ -sample という基準に沿って, 再サンプリング化する. 新たな等高線データの頂点は近似した周期的 B-spline 曲線上の点となる. B-spline 曲線より, 各頂点における単位接線ベクトルを得ることができる. すべての単位接線ベクトルは  $XY$  平面と平行であ

るため, 本論文では, 単位接線ベクトルを平行接線ベクトルと呼ぶ. 新たな等高線データは, 各頂点の座標値と平行接線ベクトルで構成される. これにより, 同じ等高線上の隣接頂点間は, 3次 Bézier 曲線で補間することができる.

(2) 局所指向性のある CDT(Constrained Delaunay Triangulation) 手法を利用し, 対応する等高線間をいくつかの三角形領域に分割する<sup>2)</sup>. 分割手法により得られた三角形はタイリング三角形と呼ぶ. また, タイリング三角形の頂点をタイリング頂点と呼ぶ. 本研究では, タイリング三角形の稜線を等高線稜線とタイリング稜線の2種類に分類する. 本論文では, 同じ等高線上の隣接頂点間の稜線を等高線稜線と呼ぶ. 等高線稜線以外のタイリング三角形の稜線をタイリング稜線と呼ぶ. 以上より, タイリング三角形は, 次の3種類に分類することができる<sup>2)</sup>.

- Terminal 三角形: 二本の等高線稜線と一本のタイリング稜線を持つタイリング三角形である.
- Sleeve 三角形: 一本の等高線稜線と二本のタイリング稜線を持つタイリング三角形である.
- Junction 三角形: 等高線稜線を持たない, 三本のタイリング稜線を持つタイリング三角形である.

図 1 において, T, S と J はそれぞれ Terminal 三角形, Sleeve 三角形と Junction 三角形の略記である. 太線は等高線稜線であり, 細線はタイリング稜線である.

## 4. 曲線メッシュの生成

$G^1$  連続な曲面モデルを生成する前処理として, 三角形分割データから曲線メッシュを生成する必要がある. しかし, CDT 法で生成した三角形分割データに基づいて, 曲線メッシュを生成する手法はこれまでに提案されていない. 本章では, 3章で述べた三角形分割法の結果に基づいた, 曲線メッシュの生成手法を新しく提案する.

### 4.1 三角形領域の結合

3章で述べたように, 3種類に分類されたタイリング三角形の数を減らすために, 我々は二つの三角形領域を一つの四角形領域に結合する. もし, 隣接する任意の二つの三角形領域を結合すると仮定すると, 同一の等高線データに対

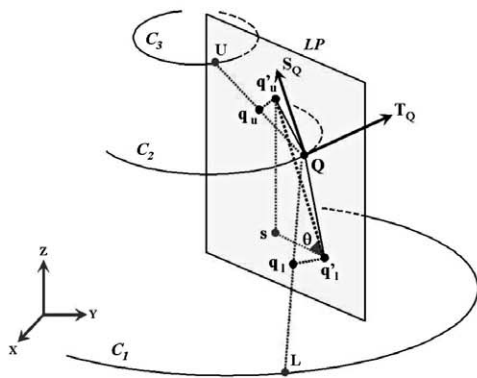


図3 ある頂点の横断接線ベクトルの計算方法  
How to calculate the slope of a vertex.

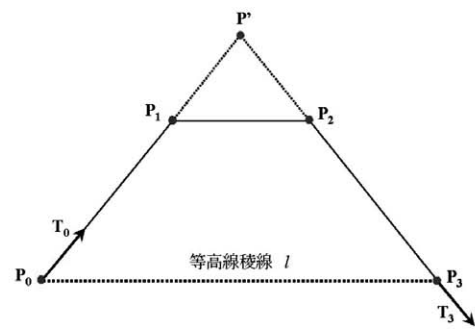
して、得られた四角領域を一意に決定できない場合がある。その場合を避けるために、我々は隣接する二つの Sleeve 三角形を一つの四角領域に結合する。本手法では、次のような結合規則を採用する。隣接する二つの Sleeve 三角形の等高線稜線同士が隣接していないものを結合し、重複した二つのタイリング稜線を削除して四角領域を生成する。組合せが複数個存在する場合、結合した結果が長方形に近づくようなペアを選択する。

結合操作の結果、次の四種類の領域が生成される：四角形(Q)、Terminal 三角形(T)、Junction 三角形(J) および結合されなかった Sleeve 三角形(S) である。図2は、図1の形状に対して、結合規則を適用した例である。各四角形では、相対する二つの稜線ペアは、等高線稜線のペアであり、もう一つのペアはタイリング稜線のペアであるという特徴がある。Sleeve 三角形を構成する3辺のうちの一つの稜線は、必ず等高線稜線である。等高線稜線の相対する側にある頂点を、縮退した等高線稜線と見なすと、Sleeve 三角形領域は、縮退した四角形曲面で表現することができる。Terminal 三角形を構成する稜線のうちの1本は、必ずタイリング稜線であるため、その相対側の頂点を縮退したタイリング稜線と見なすと、Terminal 三角形は、縮退した四角形曲面で表現することができる。Junction 三角形の各稜線はタイリング稜線であり、その幾何形状はXY 平行平面上にのらない曲線で表されるため、特別な三角形とする。

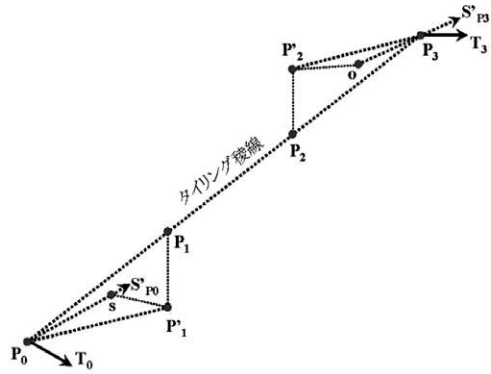
#### 4.2 領域境界線の曲線化

3章の(1)で述べたように、平行接線ベクトルを持つ等高線稜線はXY 平行平面にのる3次 Bézier 曲線で表現することができる。また、メッシュの境界線がタイリング稜線の場合、その稜線を適切な Bezier 曲線によって表現するためには、その稜線の両頂点に対応する横断接線ベクトルが必要である。図3には、ある頂点Q に対応する横断接線ベクトル  $S_Q$  を得るための計算方法を示す。

- (a) Q を共有するすべてのタイリング稜線の中点を  $q_i$  とする。 $q_i$  の高さは、両端点の高さの線形補間で計算する<sup>2)</sup>。
- (b) Q を含むローカル平面 LP を生成する。LP は Q に対応する平行接線ベクトルを法線ベクトルとする。



(a) 等高線稜線を表わす Bézier 曲線の制御点



(b) タイリング稜線を表わす Bézier 曲線の制御点

図4 境界曲線を表わす制御点

The control points of representing a boundary curve.

(c) Q につながるタイリング稜線のうちで、Q との距離が最短となる、上方タイリング稜線の中点  $q_u$  と下方タイリング稜線の中点  $q_l$  を選ぶ。 $q_u$  と  $q_l$  を平面 LP 上に正射投影し、 $q'_u$  と  $q'_l$  を得る。線分  $q_u q'_u$  と  $q_l q'_l$  は XY 平面と平行なため、 $q'_u$  と  $q_u$  の Z 値は、 $Z_{q'_u} = Z_{q_u}$  である。同様に、 $q'_l$  と  $q_l$  の Z 値は、 $Z_{q'_l} = Z_{q_l}$  である。点  $s (s \in LP)$  は  $q'_l$  を通過する XY 平行平面上に  $q'_u$  を射影した点であり、 $\theta$  は  $q'_u - q'_l$  と XY 平行平面の傾斜角度である。 $T_Q$  を Q の平行接線ベクトルとし、 $X_{T_Q}$  と  $Y_{T_Q}$  を平行接線ベクトルの X と Y 成分とすると、対応頂点 Q の横断接線ベクトル  $S_Q$  は式(1)のように定義する。

$$\begin{aligned} X_{S_Q} &= -Y_{T_Q} \\ Y_{S_Q} &= X_{T_Q} \\ Z_{S_Q} &= \tan\theta \end{aligned} \quad (1)$$

各頂点の平行接線ベクトルと横断接線ベクトルが得られると、図2で示されている四種類の領域は曲線メッシュとして表現することができる。領域の境界曲線は次のような3次の Bézier 曲線で表現する。

各境界曲線の両端点  $P_0$  と  $P_3$  を Bézier 曲線の制御ポリゴンの両端点とする。中間の制御点  $P_1$  と  $P_2$  は境界曲線の種類、すなわち等高線稜線かタイリング稜線かによって、別々の方法で計算する。

図4(a)に示すように、線分  $P_0 P_3$  の長さが  $l$  の等高線稜線が境界曲線の場合、 $T_0$  と  $T_3$  をそれぞれ  $P_0$  と  $P_3$  の平行接線ベクトルとする。 $T_0$  と  $T_3$  の干渉点を  $P'$  とする。

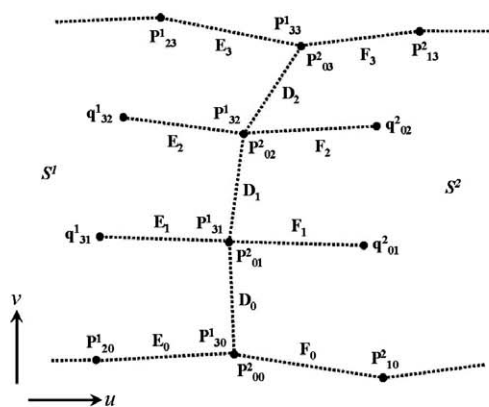


図5  $G^1$  連続性の必要充分条件  
The necessary and sufficient condition of  $G^1$  continuity.

$P_0, P', P_3$  を 2 次 Bézier 曲線と考えると, 3 次に次数上げたときの二つの中間制御点を  $P_1, P_2$  とする.  $P_1, P_2$  の座標値は式 (2) から計算される.

$$\begin{aligned} P_1 &= \frac{P_0 + 2P'}{3} \\ P_2 &= \frac{P_3 + 2P'}{3} \end{aligned} \quad (2)$$

式 (2) により, 得られた  $P_1, P_2$  と  $P_0, P_3$  は対応する等高線で定義された平面上に存在する.

図 4(b) に示すように, タイリング稜線が境界曲線の場合, 二つの中間制御点  $P_1$  と  $P_2$  の座標値を求める方法を以下に示す.  $T_0$  と  $T_3$  はそれぞれ  $P_0$  と  $P_3$  の平行接線ベクトルであり,  $S'_{P_0}$  と  $S'_{P_3}$  はそれぞれ  $P_0$  と  $P_3$  の横断接線ベクトル  $S_{P_0}, S_{P_3}$  を, 対応する  $XY$  平行平面上に射影したベクトルである. まず,  $P_1 = (2P_0 + P_3)/3$ ,  $P_2 = (P_0 + 2P_3)/3$  と仮に決定する.  $P'_1$  は  $P_0$  を通過する  $XY$  平行平面に  $P_1$  を射影した点であり,  $P'_2$  は  $P_3$  を通過する  $XY$  平行平面に  $P_2$  を射影した点である.  $s$  は  $P'_1$  を  $S'_{P_0}$  上に射影した点であり,  $o$  は  $P'_2$  を  $S'_{P_3}$  上に射影した点である.  $l_1 = |s - P_0|$ ,  $l_2 = |o - P_3|$  とし,  $P_1, P_2$  の  $Z$  座標値を式 (3) のように補正する.

$$\begin{aligned} Z_{P_1} &= Z_{P_0} + l_1 Z_{S_{P_0}} \\ Z_{P_2} &= Z_{P_3} - l_2 Z_{S_{P_3}} \end{aligned} \quad (3)$$

ただし,  $Z_{S_{P_0}}$  は,  $P_0$  における横断接線ベクトル  $S_{P_0}$  の  $Z$  値である. 同様に,  $Z_{S_{P_3}}$  は,  $P_3$  における横断接線ベクトル  $S_{P_3}$  の  $Z$  値である.

式 (3) から, 得られた  $P_1$  は  $P_0$  の平行接線ベクトルと横断接線ベクトルで定義された平面上に存在し,  $P_2$  は  $P_3$  の平行接線ベクトルと横断接線ベクトルで定義された平面上に存在することがわかる. また,  $P_0, P_1, P_2, P_3$  は  $XY$  平面に垂直なある平面上にのることがわかる.

以上のことにより, 平行接線ベクトルと横断接線ベクトルを, 等高線上の各点に設定する. 点と平行接線ベクトルから, 等高線稜線を 3 次 Bézier 曲線で補間し, 点と横断接線ベクトルから, タイリング稜線を 3 次 Bézier 曲線で

補間する. 等高線稜線とタイリング稜線を自由曲線で補間することによって, 曲線メッシュを生成することができる.

## 5. 曲面の補間

4 章で述べた手法により生成した曲線メッシュは, 不規則な曲線メッシュ<sup>4)</sup>である. 不規則な曲線メッシュをパラメトリック曲面で補間するとき, Gregory パッチ<sup>8)</sup>や Gregory 三角形<sup>9)</sup>は  $G^1$  連続性を容易に制御できるので, 本研究では, これらの曲面表現を利用する.

### 5.1 曲面間の $G^1$ 連続性と接続式

2 枚の曲面の共有境界曲線上の任意の点で, 接平面が一致することが  $G^1$  連続性の定義である<sup>3)</sup>. 以下では, 4 章で述べた曲線メッシュの共有境界曲線の両側の曲面について,  $G^1$  連続となる必要充分条件を述べ, 本手法で生成した曲線メッシュの利点を説明する.

図 5 に示すように, 2 枚の Gregory パッチ  $S^1$  と  $S^2$  を接続するとき, 共有境界線が  $P_{3j}^1 = P_{0j}^2$  となる.  $E_j = P_{3j}^1 - P_{2j}^1$ ,  $F_j = P_{1j}^2 - P_{0j}^2$  ( $j = 0, 1, 2, 3$ ),  $D_i = P_{3(i+1)}^1 - P_{3i}^1$  ( $i = 0, 1, 2$ ) を共有境界線に隣接する制御点間ベクトルとすると,  $G^1$  連続の必要充分条件<sup>4)</sup>は式 (4) になる.

$$\begin{aligned} F_0 &= k(v)E_0 + h(v)D_0 \\ F_1 &= k(v)E_1 + h(v)\frac{D_0 + 2D_1}{3} \\ F_2 &= k(v)E_2 + h(v)\frac{2D_1 + D_2}{3} \\ F_3 &= k(v)E_3 + h(v)D_2 \end{aligned} \quad (4)$$

ただし,  $k_0, k_1$  を正の実数とし,  $h_0, h_1$  を任意の実数とすると,  $k(v), h(v)$  は式 (5) に示すような  $v$  に関するスカラー関数で表現される.

$$\begin{aligned} k(v) &= k_0(1-v) + k_1v \\ h(v) &= h_0(1-v) + h_1v \end{aligned} \quad (5)$$

4 章の手法で生成した不規則な曲線メッシュにおいては,  $F_0, E_0, D_0$  は同一平面上に存在し,  $F_3, E_3, D_2$  は同一平面上に存在する. すなわち, 境界制御点間ベクトル  $F_0, E_0, D_0, F_3, E_3, D_2$  は曲線補間するとき,  $G^1$  連続性の条件式 (4) を満たすように生成されている.

共有境界曲線が等高線稜線の場合, 式 (2) により得られた制御点間ベクトル  $D_i$  ( $i = 0, 1, 2$ ) は,  $2D_1 = D_0 + D_2$  を満たした. 共有境界曲線がタイリング稜線の場合, 4 章で得られた  $E_0$  と  $F_0$  は同一直線上に存在し,  $E_3$  と  $F_3$  は同一直線上に存在するため,  $h(v) = 0$  である. 制御点間ベクトル  $E_1, E_2$  を基礎パッチ法<sup>4)</sup>に基づいて式 (6) のように想定する.

$$\begin{aligned} E_1 &= \frac{2E_0 + E_3}{3} \\ E_2 &= \frac{2E_3 + E_0}{3} \end{aligned} \quad (6)$$

式 (6) と条件  $2D_1 = D_0 + D_2$  および  $h(v) = 0$  を式 (4)

に代入すると、 $\mathbf{F}_1$ ,  $\mathbf{F}_2$  は次の式 (7) から計算できる。

$$\mathbf{F}_1 = \frac{2\mathbf{F}_0 + \mathbf{F}_3}{3}$$

$$\mathbf{F}_2 = \frac{2\mathbf{F}_3 + \mathbf{F}_0}{3} \quad (7)$$

以上のように、4章に述べた手法で得られた不規則な曲線メッシュを  $G^1$  連続な自由曲面で補間するとき、内部制御点は、式 (6) と (7) で簡単に算出される。

式 (6),(7) は、Gregory 三角形同士、Gregory 三角形と Gregory パッチの間を  $G^1$  連続で接続するときも適用できる。

## 5.2 補間曲面の選択

Gregory パッチと Gregory 三角形の制御ネットを軸対称図形として考えると、それぞれ四個と三個の対称軸がある。本研究では、曲面の対称軸の数と、4章で述べた曲線メッシュの4種類の領域における対称軸の数を考慮して、補間曲面を選択する：メッシュの領域が四個の対称軸を持つ場合、Gregory パッチで補間する。メッシュの領域が三個の対称軸を持つ場合、Gregory 三角形で補間する。

四辺形領域を Gregory パッチで補間する場合、内部制御点は、それぞれの対応する境界曲線上の制御点間ベクトルを用いて算出される。Sleeve 三角形と Terminal 三角形の領域は Gregory 三角形で補間するほうが、自然な考え方である。しかし本手法では、等高線稜線とタイリング稜線を区別しているため、Sleeve 三角形と Terminal 三角形は、ただ一つの対称軸を持つことになる。したがって、我々はこれらの特徴三角形を縮退した四辺形に変更し、Gregory パッチで補間する。

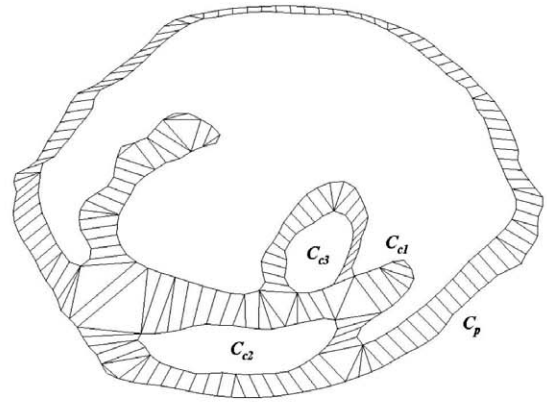
Junction 三角形のすべての境界曲線は、タイリング稜線であるため、三個の対称軸を持つ。そこで、我々は Junction 三角形領域を Gregory 三角形で補間する。

## 6. 実例と結果

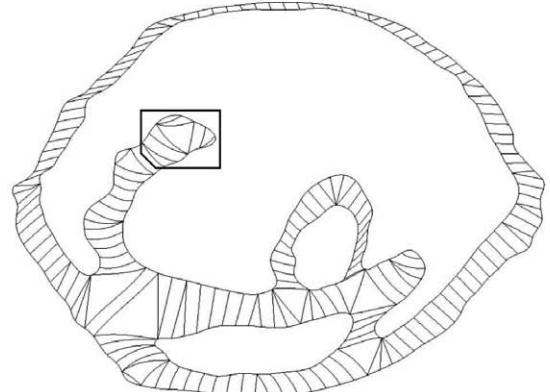
我々は、国土地理院が刊行した 10m メッシュの DEM(「数値地図 10m メッシュ(火山標高)」) から抽出した等高線データや、地形図から得た等高線データに、提案する手法を適用した。得られた結果を以下の図と表に示す。

図 6 には、分岐構造がある典型的な等高線を示す。図 6(a) 中の  $C_p$  は親等高線であり、 $C_{c1}$ ,  $C_{c2}$  と  $C_{c3}$  は  $C_p$  の子等高線である。3章で述べた三角形分割手法によって、四種類の特徴領域を生成することができた。図 6(b) は、(a) に対応する曲線メッシュを示す。図 6(c) の左側は、(b) に示した限定範囲内の曲線メッシュを一部拡大表示したものである。右側は、3次 Bézier 境界曲線の制御点と制御ポリゴンを示す。図 6(d) は、(a) に対応する補間曲面モデルを示す。四辺形領域、Sleeve 三角形領域および Terminal 三角形領域を Gregory パッチで補間し、Junction 三角形領域を Gregory 三角形で補間した。

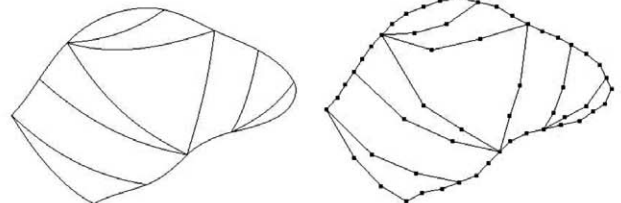
図 7 には、四つの山岳等高線データに、提案する手法を適用して得られた補間曲面モデルを示す。図 7 の (a), (b),



(a) 一对三分岐等高線間の領域分割例



(b) (a) に対応する曲線メッシュ



(c) (b) に示す一部曲線メッシュの拡大表示



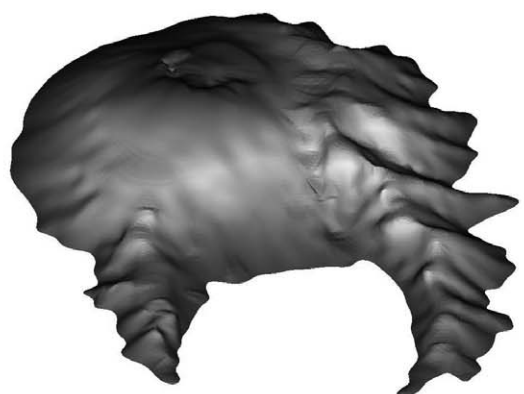
(d) (a) に対応する補間曲面モデル

図 6 分岐等高線間のメッシュと補間曲面モデル  
Mesh and Surface model of branching contours.

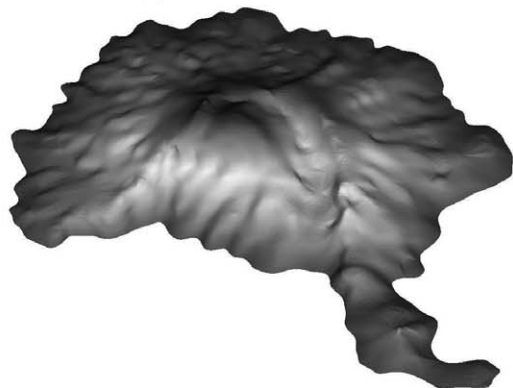
(c), (d) には、それぞれ高さのピッチが 50m の岩手山と鳥海山、高さのピッチが 20m の秋田駒ヶ岳と岩手山頂上部の等高線データに、本手法を適用した結果である。これらの結果から、本手法では隣接する等高線間を三角形領域に分割する方法に基づいて、結合操作によって曲線メッシュや滑らかな曲面モデルを生成することができた。

表 1 曲面モデルから得た等高線の精度評価  
Evaluate the accuracy of contours from surface model.

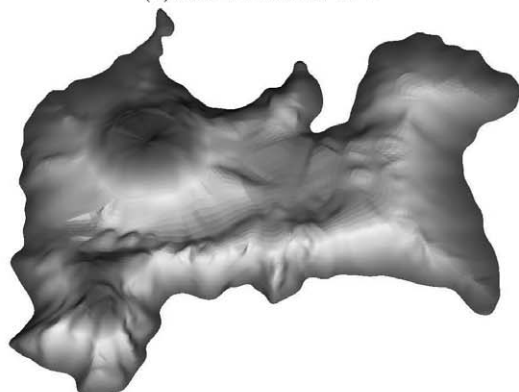
火山名	岩手山	鳥海山	秋田駒ヶ岳	岩手山頂上部
等高線数	13	15	16	14
頂点数	13236	8512	6456	8788
標高範囲 (m)	1500-2000	1650-2150	1480-1620	1850-2030
最大絶対誤差 (m)	1.46(m)	2.59(m)	1.72(m)	1.87(m)
最大相対誤差 (%)	0.096%	0.148%	0.054%	0.059%



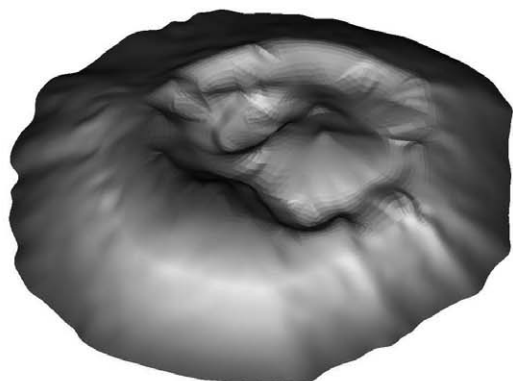
(a) 岩手山の補間曲面モデル



(b) 鳥海山の補間曲面モデル



(c) 秋田駒ヶ岳の補間曲面モデル



(d) 岩手山頂上部分の補間曲面モデル

図 7 山岳の補間曲面モデル  
Surface models of Mountains.

本手法で生成した曲面モデルが、与えられた等高線とどの程度誤差があるのか、また、精度やデータ量に関して、多面体表面モデルと比較したときに、どちらがよいのかを検

証するために、我々は以下に示す二つの実験を行った。

実験 1: 本手法で生成した曲面モデルから抽出された等高線と元々の等高線との誤差を求める。図 7 に示した曲面モデルについて、岩手山と鳥海山は 50m ピッチで、秋田駒ヶ岳と岩手山頂上部は 20m ピッチで、それぞれ切断し、得られた等高線と元々の等高線間の誤差を求める。

実験 2: 2 章で述べたように、K.Hormann らが提案した陰関数曲面モデルは、C.Gold らが提案する多面体表面モデルよりもデータ量の点で問題が残ることから、本研究では、C.Gold らの手法との比較実験を行うこととする。まず、図 7 に示した曲面モデルと C.Gold の方法で生成した四つのポリゴンモデルを、岩手山と鳥海山は 25m ピッチで切断し、秋田駒ヶ岳と岩手山頂上部は 10m ピッチで切断する。次に、DEM から高さのピッチが同じ等高線を抽出する。曲面モデルと多面体表面モデルから得られた等高線と、DEM から得られた等高線間の最大絶対誤差と最大相対誤差をそれぞれ比較する。同様に、曲線メッシュのデータ量と多面体表面モデルのデータ量を比較する。

本研究では、二つの等高線の誤差は、次のような方法で算出する。曲面モデル(多面体表面モデル)から得られた等高線のある頂点と元々の等高線の最短距離を絶対誤差を  $E_i$  とすると、最大絶対誤差  $E_{Max}$  をを次式のように定義する。

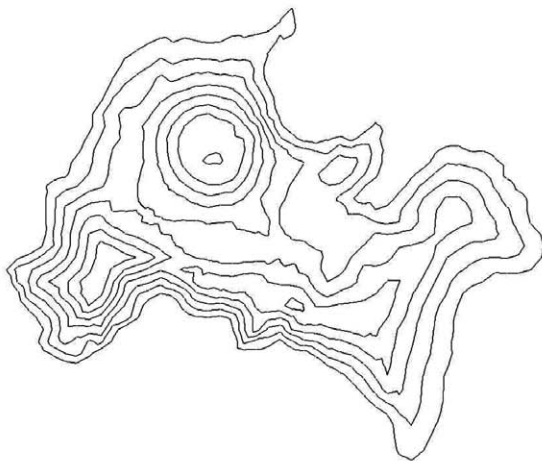
$$E_{Max} = \text{Max}\{E_i\} (i = 0, \dots, m) \quad (8)$$

$n$  本の等高線の中で、一番長い等高線の長さを  $L_{Max}$  とすると、最大相対誤差は、次式 (9) で定義する。

$$\text{最大相対誤差} = \frac{E_{Max}}{L_{Max}} \quad (9)$$

実験 1 の結果を表 1 に示す。また、図 8 には、秋田駒ヶ岳を 20m ピッチで切断したときの等高線を示す。図 8 の (a), (b) には、それぞれ DEM と本手法で生成した曲面モデルから抽出した高さのピッチが 20m の秋田駒ヶ岳の等高線を示す。実験 1 の結果により、本手法で生成した曲面モデルからは、元々の等高線データを相対誤差が 0.1% 程度で近似した等高線を抽出することができた。

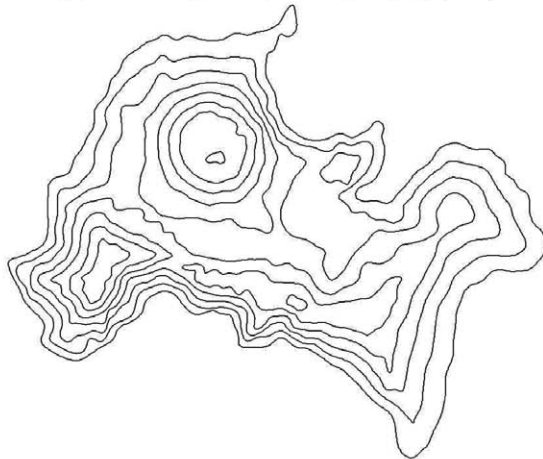
実験 2 の結果を表 2 に示す。また、図 9 には、秋田駒ヶ岳を 10m ピッチで切断したときの等高線を示す。表 2 に示した結果から以下のことがわかる。(a): 本手法で生成した曲面モデルは多面体表面モデルより、最大絶対誤差や最大相対誤差が小さいため、曲面モデルの精度は多面体表面モ



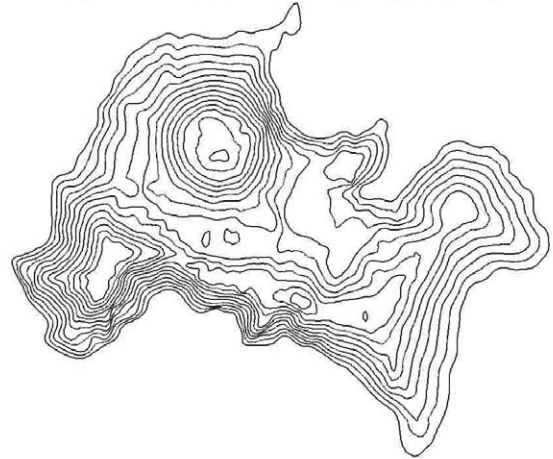
(a) DEM から抽出した秋田駒ヶ岳の等高線 (20m)



(a) DEM から抽出した秋田駒ヶ岳の等高線 (10m)



(b) 補間曲面モデルから得た秋田駒ヶ岳の等高線 (20m)



(b) 補間曲面モデルから得た秋田駒ヶ岳の等高線 (10m)

図 8 本手法で得た等高線と元々等高線の比較 (1)

Compare the new contours with original contours (1).

図 9 本手法で得た等高線と元々等高線の比較 (2)

Compare the new contours with original contours (2).

表 2 多面体表面モデルと曲面モデルの比較

Compare the surface model to polygon mesh model.

火山名	岩手山	鳥海山	秋田駒ヶ岳	岩手山頂上部
曲面モデルの誤差とデータ量				
最大絶対誤差 (m)	3.59(m)	3.85(m)	3.21(m)	2.25(m)
最大相対誤差 (%)	0.235%	0.220%	0.099%	0.072%
パッチ数	1897	1435	1271	1202
データ量 (KB)	408(KB)	316(KB)	287(KB)	268(KB)
多面体表面モデルの誤差とデータ量				
最大絶対誤差 (m)	6.11(m)	6.93(m)	3.89(m)	3.23(m)
最大相対誤差 (%)	0.399%	0.395%	0.120%	0.103%
ポリゴン数	14820	11076	9876	9480
データ量 (KB)	964(KB)	726(KB)	652(KB)	614(KB)

デルの精度より高い。(b): 同じ等高線データに対して、多面体表面モデルのポリゴン数は曲面モデルのパッチ数の約 8 倍であり、データ量は約 2.3 倍であるため、曲面モデルは多面体表面モデルより少ないデータ量で表現できる。このことから、提案手法を利用することで、精度とデータ量の問題が解決され、本手法の有効性が確認された。

任意位置の標高値は、その位置がどのパッチ(多面体表面モデルでは三角形)に存在するのかを判断し、曲面のパラメータを適切に与えることで取得することが可能である。

図 9 の (a), (b) には、それぞれ DEM と曲面モデルから抽出した高さのピッチが 10m の秋田駒ヶ岳の等高線を

示す。(a) と (b) を比較すると、頂上、尾根、窪地、谷などの付近では、高さや深さの情報不足しているため等高線の数や形状が一致しないところがある。2 章で述べた多面体表面モデルと陰関数曲面モデルにも同様の問題点がある。これはモデルの生成手法の問題ではなく、情報不足の問題と考えられる。

## 7. むすび

本論文では、離散的な等高線データから精度のよい山岳表面モデルを生成するために、CDT 法に基づいた三角形分割データから曲線メッシュを生成する手法を新しく提案した。本手法では、隣接する等高線間を三角形領域に分割した後、結合操作によって分割された三角形領域を四種類の特徴領域に変換し、曲線メッシュを生成した。さらに、我々は Gregory パッチと Gregory 三角形を利用し、 $G^1$  連続な自由曲面で曲線メッシュを補間し、山岳の表面モデルを生成した。また、四つの山岳等高線データに、本手法を適用し、生成したモデルの誤差評価やデータ量評価を行った。これらにより、新しく提案した曲線メッシュ表現の有効性を明らかにした。

今後の課題としては、山岳地形の地理的特徴を、曲線メッ

シュ生成手法へ追加できるように、本手法を拡張し、より正確な地形モデルを生成することがあげられる。最後に、本研究の一部は「夢県土岩手戦略研究推進事業」の助成により行った。また、開発環境を貸与してくれたラティス・テクノロジー（株）に感謝する。

### 〔文 献〕

- 1) C.L.Bajaj, Edward J.Coyle, kwum-Nan Lin: "Arbitrary Topology Shape Reconstruction from Planar Cross Sections", Graphical Models and Image Processing, **58**, pp.524-543 (1996)
- 2) Zhiyi Zhang, Kouichi Konno, Yoshimasa Tokuyama: "3D Terrain Reconstruction Based on Contours", The 9th International CAD/Graphics conference, Hong Kong, pp.325-330 (Dec. 2005)
- 3) G.Farin: "Curves and Surfaces for Computer Aided Geometric Design-A Prectical Guide". Second Edition, Academic Press, Inc. (1990)
- 4) 鳥谷浩志・千代倉弘明 編著: "3次元CADの基礎と応用", 共立出版株式会社, (1997)
- 5) J.A. Gregory: "Triangular Interpolation Patch for CAGD", Computer Graphics and Image Processing, **13**, pp.80-87 (1980)
- 6) Christopher Gold, Maciej Dakowicz: "Terrain Modelling Based on Contours and Slopes", Advances in Spatial Data Handling : 10th International Symposium on Spatial Data Handling. Published by Springer-Verlag, Berlin, pp.95-107 (Aug. 2002)
- 7) Kai Hormann, Salvatore Spinello, Peter Schröder: " $C^1$  Continuous Terrain reconstruction from Spares Contours", VMV2003, IOS Press, Munich, Germany, pp.289-297 (Nov. 2003)
- 8) H.Choyokura, F.Kimura: "Design of Solids with Free-Form Surfaces", Computer Graphics, **17**, 3, pp.289-298 (1983)



**張 志毅** 1998年、中国山西大学化学系卒業。2004年、岩手大学大学院工学研究科博士前期課程修了。現在、同大学院研究科博士後期課程在学中。CAD、CGにおける自由曲線・曲面の生成手法、形状制御などに関する研究に従事。



**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。CG、CAD、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。著書に「3次元形状処理入門」がある。博士(工学)。正会員。



**徳山 喜政** 1986年、東京大学大学院工学系研究科産業機械工学専攻修士課程修了。(株)リコーを経て、現在、東京工芸大学工学部教授。CG、CAD、VR、モデリング手法、形状変形の研究に従事。博士(工学)。正会員。