

等高線地図に忠実な山岳形状再生に関する研究

安居院 猛 長 敬三 中嶋 正之

東京工業大学 像情報工学研究施設

本報告では実際の山岳部のように尾根や谷が複雑に存在している地形の等高線地図に対して、自動的に三角形パッチを施し山岳形状を再生するアルゴリズムを提案する。このアルゴリズムを用いることにより、筆者らが先に報告した山岳形状再生手法では適用が困難であった等高線形状に対しても、自動的に三角形パッチを施すことができるようになった。実際の山岳地の形状は、崖崩れや河川による侵食によってその基本的な形状が形作られると考えられ、そしてこれら崖崩れなどの現象は山の峰の傾きによる影響が大きいと考えられる。そこで、ここで提案するアルゴリズムでは、三角形パッチによって作成される山岳形状ができるだけ自然な形状になるように、山の峰の傾きを重視して三角形パッチを行った。

A FAITHFUL RECONSTRUCTION ALGORITHM OF MOUNTAIN FROM CONTOUR LINES

Takeshi AGUI Keizo CHO Masayuki NAKAJIMA

Imaging Science and Engineering Laboratory, Tokyo Institute of Technology
4259, Nagatsuta, Midori-ku, Yokohama, 227 Japan

We propose an algorithm which reconstructs a mountain from complex contour lines, an actual mountainous region complexly has ridges or valleys. This algorithm automatically triangulates a set of contour lines which has been not triangulated in an earlier paper. The slope of a mountain importantly effects on the mountain shape. Then this triangulation method is applied to the slope of the mountain in order to get a triangulation result being as natural as possible.

1. まえがき

筆者らは先に2次元平面上に描かれた等高線データから、自動的に3次元山岳形状を作成する手法について報告した¹⁾。これは、2次元の等高線データに対し、各等高線を多角形近似し、多角形近似された等高線群に対して三角形パッチを行ったのち、フラクタル理論を応用して3次元山岳形状を再生するものであった。

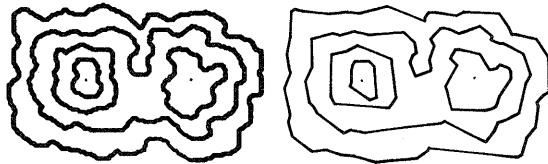
等高線群に三角形パッチを行う手法には、Delaunayの三角形パッチ法等が知られているが²⁾、文献1)では山岳の全体形状を重視する新たな三角形パッチ法を提案した。しかし、実際の山岳部のように風化や侵食などによる影響で谷や尾根が複雑に存在する地域の等高線は、非常に入り組んでおり、自動的に三角形パッチを施すことが困難であった。

そこで本報告では、このような等高線形状から自動的に山岳形状を再生するための三角形パッチ法を提案する。ここでは、三角形パッチ処理後の形状が自然な形状となるようにするため、入力等高線群から得られる峰の傾きを重視して三角形パッチを行う。これは、文献1)で提案した三角形パッチ法を拡張したものである。

2. 入力データの前処理

本報告では3次元山岳形状再生のオリジナルデータとして、2次元平面上に描かれた等高線を用いる。入力された等高線に対して前処理として次の処理を行う。

- (1) 各等高線の鋭角部や曲線部などの特徴点を抽出して、等高線を多角形近似する³⁾。
- (2) 多角形近似された2次元の等高線データに高度を付与して3次元データに変換する。
- (3) 等高線群を高度情報を用いて木構造の形で表現する。



(a) 入力した等高線 (b) 多角形近似した等高線

図1 等高線の特徴点の抽出例

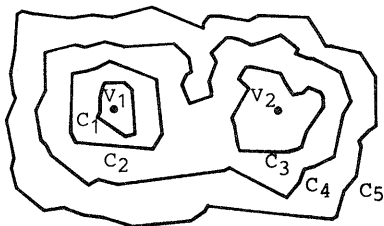


図2 等高線群の例

等高線の特徴点抽出には、ベクトル・トレーサ法⁴⁾を用いる。図1(a)に示す等高線を多角形近似した例を図1(b)に示す。各等高線の高度は、各等高線の包含関係から与えられ、これによって等高線群の高度に関する木構造リストが得られる⁴⁾。図2の等高線群を木構造で表現した例を図3に示す。木構造リスト上の葉は峰の頂点に対応し、分岐点の存在は峰が2つ以上あることを意味する。

3. 入力等高線に対する制限

山岳部における自然形状は、風化・侵食・隆起等の影響を受け易く、等高線形状が非常に複雑になる。そこで本報告では、問題を簡単にするための等高線形状に次のような制限を設ける。

- (1) 各等高線は閉じている。
- (2) 木構造リストにおける分岐点において、子節は3つ以上存在しない。
- (3) 各峰には必ず頂点が存在する。

これ以後の議論では、等高線は以上の制限を満たすものだけを扱う。おわりに木構造リストの分岐点において、子節が3つ以上存在する場合の処理の問題点について述べる。

4. 葉から分岐点までの三角形パッチ法

多角形近似された等高線群に対して、2.で述べた木構造リストを用いて三角形パッチを施す。三角形パッチは木構造リストの葉から根に向かう順序で行う。木構造リストにおいて、葉から分岐点までに対応する等高線群に対して三角形パッチを行う手法は、文献1)の手法を用いる。以下に葉から分岐点までの三角形パッチ手法を図2の等高線群と、図3の木構造リストを例に説明する。

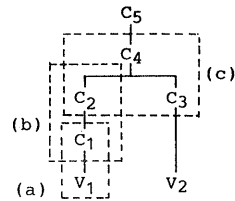


図3 等高線群の木構造リスト

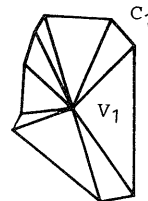
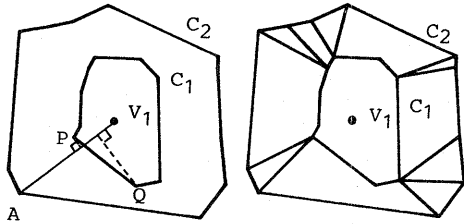
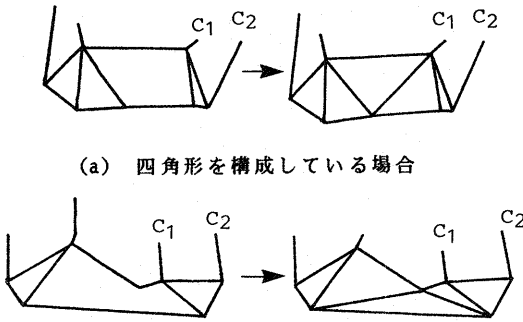


図4 葉と葉の親節の三角形パッチ



(a) 各特徴点の対応点 (b) 対応点の決定の検索

図5 中間節の親節と子節の間の三角形パッチ



(a) 四角形を構成している場合

(b) 五角形以上の場合

図6 三角形でない部分の三角形パッチ

4. 1 葉と葉の親節の間の三角形パッチ

これは、葉に対応する頂点と、葉の親節にあたる等高線の各特徴点をそれぞれ結ぶことにより行う。図3の(a)の部分にあたる頂点 V_1 と等高線 C_1 への適用例を図4に示す。

4. 2 中間節の親節と子節の間の三角形パッチ

これは頂点以外の2つの等高線によって囲まれる帯の部分に対する三角形パッチである。この三角形パッチ処理について図3の(b)の部分为例に説明する。三角形パッチ処理は次の2つのステップで行う。

Step 1 対応点の検索

まず木構造リストの親節にあたる等高線上の各特徴点を、子節にあたる等高線上的の特徴点に対応させる。図3(b)では等高線 C_2 上の特徴点を、等高線 C_1 上の特徴点に対応させることになる。対応の規則は、図5(a)のように、頂点 V_1 と等高線 C_2 上の点Aを結ぶ線分 V_1A に対して、等高線 C_1 上の各特徴点のうち最も距離の短いものを対応させる。図5(a)では点Pが点Aに対応する。もし線分PAが等高線 C_1 または C_2 と交差する場合、次に距離の短い等高線 C_1 上の特徴点と対応させる。そして対応する点どうしを結ぶ。対応する点を結ぶ線分が全て等高線と交差する場合は、そのままにする。等高線 C_2 上の全ての特徴点に対して同様な処理を行う。等高線 C_2 の全ての特徴点に対して処理を行った結果を図5(b)に示す。

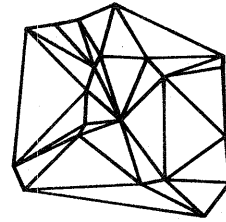
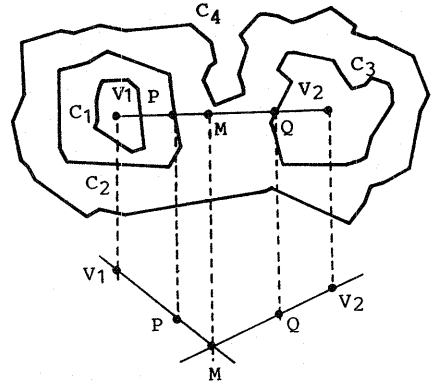
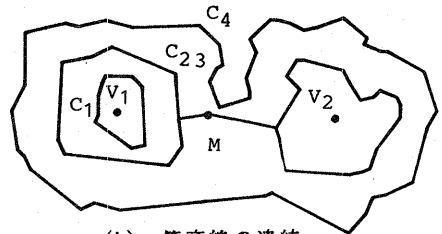


図7 分岐点までの三角形パッチ結果



(a) 連結点の算出



(b) 等高線の連結

図8 分岐点における三角形パッチ I

Step 2 三角形でない部分の検索

次に三角形を形成していない部分を自動的に検索し、三角形パッチを行う。図6(a)のように四角形を構成している場合は、対角線のうち等高線 C_1 の特徴点と等高線 C_2 の特徴点を結ぶ線分の中で長さの短い方を結ぶことにより三角形パッチを行う。図6(b)のように五角形以上の場合には、等高線 C_1 の特徴点と等高線 C_2 の特徴点を結ぶ対角線の中で一番長さの短いものから結んで三角形パッチを行う。

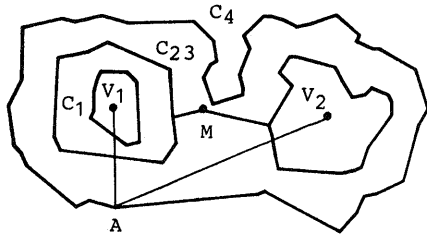
分岐点までの三角形パッチ結果を図7に示す。

5. 改良三角形パッチアルゴリズム

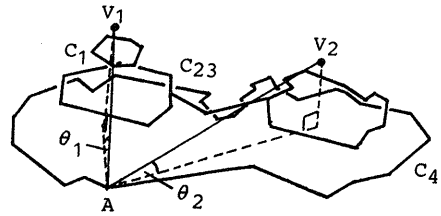
5. 1 分岐点の親節と子節の三角形パッチ

文献1)では、分岐点の親節と子節にあたる等高線の三角形パッチを次のように行った。

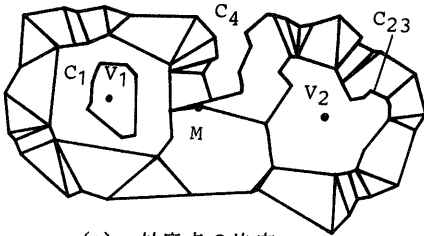
まず、2つの峰の頂点を結ぶ線分を考える。



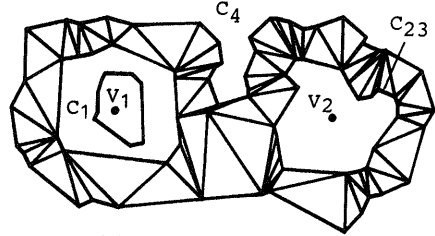
(a) 特徴点の対応頂点の検索 I



(b) 特徴点の対応頂点の検索 II



(c) 対応点の決定



(d) 三角形パッチ結果

図9 分岐点における三角形パッチ II

次にそれぞれの頂点に対応する分岐点の子節の等高線で囲まれる面積を用いて、頂点間を結ぶ線分を内分する点を求める。そして、ここで求めた内分点を用いて、分岐点の親節の等高線を2つに分けることにより、2つの峰を別々の山と考えると三角形パッチを施した。

しかし自然現象が山岳形状の形成に与える影響を考えると、例えば、河川の水流による侵食や、崖崩れによる岩石・土砂の流れは、峰の傾斜による影響が非常に大きいと考えられる。また峰と峰の間の谷の部分は、これら2つの峰からの土砂の流積、河川の侵食などが重ね合わさって形成されていると考えられる。そこで本報告では、分岐点の子節にあたる等高線を連結して、2つの峰が連なりとなるように三角形パッチを行う⁹⁾。2つの峰を連なりとして表現することによって、峰の間に形成されている谷の部分は2つの峰が相互に影響して形成されていることが表現される。また等高線の連結に際して、2つの峰の傾斜を考慮する。等高線の連結は、2つのステップで行う。処理手順を以下に示す。

Step 1 連結点の算出

図3の木構造リストの(c)の部分为例に説明する。各分岐点の葉に対応している頂点 V_1 、 V_2 間を直線で結ぶ。図8(a)に示すように2次元平面上で線分 V_1V_2 と木構造リストの子節にあたる2つの等高線 C_1 、 C_2 との交点をそれぞれP、Qとする。図8(a)の下部に示すように、線分 V_1V_2 を通る紙面に垂直な平面を考え、直線 V_1P と V_2Q との交点Mを求める。点Mに対応する線分 V_1V_2 上の点を、等高線を連結するための特徴点とする。以後この点を連結点と呼ぶ。連結点Mの高度には木構造リストの親節の高度と子節の高度の中間の高度を与える。

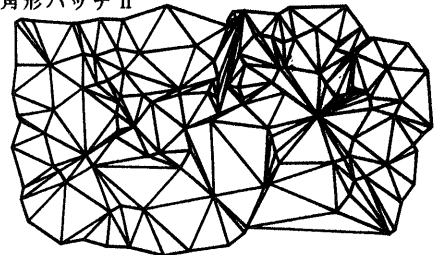


図10 三角形パッチの終了

Step 2 等高線の連結

次に等高線の連結について述べる。等高線 C_2 の特徴点の中から、連結点Mに最も近い特徴点と連結点Mを結ぶ。等高線 C_3 に対しても同様に連結点Mと結ぶ。以上の手順で、図8(b)のように、等高線 C_2 と C_3 が連結される。等高線 C_2 と C_3 を連結した仮想的な等高線を仮想等高線を C_{23} と表すことにする。

Step 3 対応点の検索

次に木構造リストの子節にあたる仮想等高線 C_{23} と親節にあたる等高線 C_4 で囲まれる帯の部分に対する三角形パッチについて述べる。まず等高線 C_4 上の特徴点と仮想等高線 C_{23} 上の等高線の特徴点との対応づけを行う。対応の規則は、次のようにする。図9(a)のように、等高線 C_4 上の特徴点Aと2つの峰の頂点を結ぶ線分 V_1A 、 V_2A をそれぞれ考える。そして図9(b)のように線分 V_1A と等高線 C_4 によって作られる平面となす角度を θ_1 、線分 V_2A と等高線 C_4 によって作られる平面となす角度を θ_2 としたとき、 θ_1 と θ_2 の関係が式(1)で表されるならば、特徴点Aが角度の大きい方の頂点の影響を受けていると考えて、頂点 V_1 に特徴点Aを対応させる。

$$\tan \theta_1 > \tan \theta_2 \quad (1)$$

対応する頂点が決定したら、仮想等高線 C_{23} 上の特徴点との対応を考える。これは、4.2のStep 1と同様に、仮想等高線 C_{23} 上の特徴点のうち線分 V_1A に最も距離の短い特徴点に対応させる。

以上の処理を等高線 C_4 上の全ての特徴点に対して行う。処理結果を図9(c)に示す。

Step 4 三角形でない部分の検索

4.2のStep 2の手法を用いて、三角形でない部分を探索し、三角形以外の多角形の部分に三角形パッチを行う。処理結果を図9(d)に示す。

5.2 分岐点から根までの三角形パッチ

分岐点から根までの等高線間の三角形パッチは5.1に示したStep 3とStep 4を用いて三角形パッチを行う。図2の等高線群の三角形パッチ結果を図10に示す。

6. 形状の複雑な等高線に対する処理

以上が基本アルゴリズムであるが山岳部の等高線は、尾根や谷が複雑に存在しているため、等高線の形状が非常に入り組む場合が数多く存在する。そこでこのような形状の等高線に対しても三角形パッチ処理を自動的に行えるように例外処理を加える。

6.1 峡谷等高線に対する三角形パッチ

図11(a)の破線で囲まれた部分のように、等高線が内側に深く窪んでいたり、また細長く突き出している等高線を峡谷等高線と呼ぶことにする。

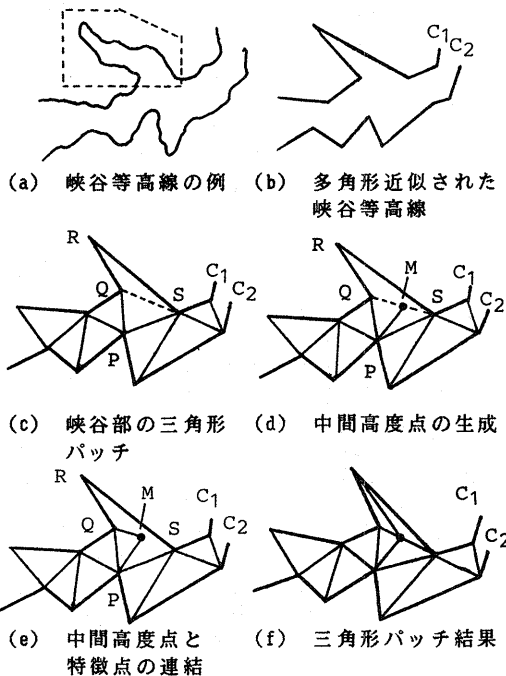


図11 峡谷等高線に対する三角形パッチ

図11(a)のような峡谷等高線に対して、特徴点抽出を行うと図11(b)のようになる。この図11(b)のような多角形近似された等高線に対して4.2で述べた三角形パッチ法を適用すると、図11(c)の四辺形PQRSの内部は、三角形PQSと三角形RQSにしか分割できない。しかし三角形RQSは全て同じ等高線の特徴点によって構成されるため、原等高線QRSによって表現されている峡谷が、点Qと点Sを結ぶことによって消えてしまう。この場合、次の処理を行う。

Step 1 峡谷等高線の検出

峡谷等高線の検出は、4.2のStep 2で述べた三角形でない部分の検索処理において行う。峡谷等高線では、異なる等高線どうしを結ぶ対角線が存在せず、かつ多角形内のどちらかの等高線の特徴点の数が1となる。よって、多角形内の等高線ごとの特徴点の数と、対角線を調べることによって峡谷等高線を検出することができる。

Step 2 中間高度点の付加

峡谷等高線を検出したら、図11(d)に示すように点Pの両隣の点Q、Sを結ぶ線分QSの中点Mを新しい特徴点として発生させる。この新しい特徴点の高度は等高線 C_1 と C_2 の間であるので、等高線 C_1 と C_2 の高度の中間の高度とする。新しい特徴点Mと点Pを結ぶ。そして点Mと点Q、R、Sの中で最も短い点を結ぶ。点Mは線分QSの中点であるので、点Qまたは点Sのどちらかと点Mを結ぶ。図11(e)では、点Qと結ぶ場合を示す。新しく発生させた特徴点は仮想的に等高線 C_2 に属するものと考え、4.2のStep 2で述べた三角形検索を図11(e)の多角形PMQRSに対して行い、三角形パッチを完了する。三角形パッチ結果を図11(f)に示す。

6.2 湾曲等高線に対する三角形パッチ

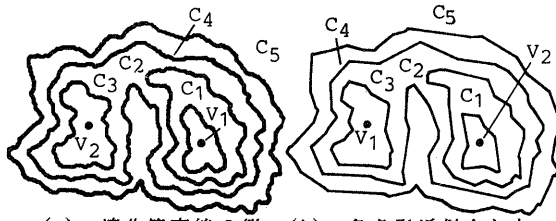
図12(a)の C_4 に示すように弓状に湾曲している等高線を湾曲等高線と呼ぶことにする。図12(a)の等高線に対して特徴点抽出を行うと、図12(b)のようになり、木構造リストを作成すると、図12(c)のようになる。この木構造リストの分岐点の親節と子節に対応する等高線に対して、5.1で述べた等高線の連結アルゴリズムを適用すると、連結点が親節の等高線 C_4 で囲まれる領域の外側に存在する。そのため子節の等高線を連結する線分が全て等高線 C_4 と交差するため、等高線を連結することができない。この場合、次のような処理を行う。

Step 1 湾曲等高線の検出

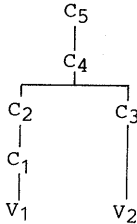
湾曲等高線を検出する手法は、5.1のStep 1において、2つの峰の頂点を結ぶ線分 V_1V_2 と木構造リストの親節にあたる等高線 C_4 の交差判定を行い、線分 V_1V_2 と等高線 C_4 が交差する場合は、湾曲等高線と判断する。

Step 2 分割比の決定

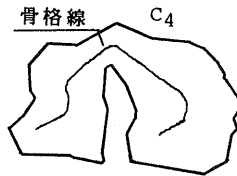
5.1のStep 1の手法を用いて連結点を



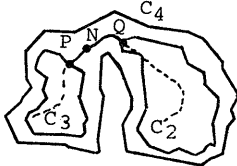
(a) 湾曲等高線の例 (b) 多角形近似された湾曲等高線



(c) 木構造リスト



(d) 骨格線の抽出



(e) 曲線PQの抽出 (f) 等高線の連結

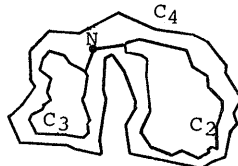


図12 湾曲等高線に対する三角形パッチ

求めるための内分比 $V_1M : V_2M$ を算出する。

Step 3 連結点の算出

湾曲等高線と判断された場合、連結点の算出は次の手順で行う。

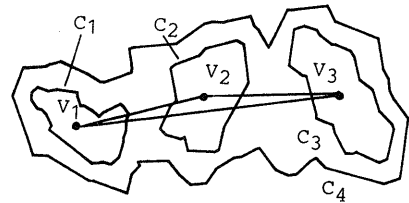
(1) 木構造リストの親節にあたる等高線 C_4 で囲まれる領域の骨格線を抽出する。骨格線の抽出には削除法を用いる⁷⁾。骨格線の抽出例を図12(d)に示す。

(2) 木構造リストの子節にあたる等高線 C_2 , C_3 と、(1)で求めた骨格線との交点を求め、図12(e)に示すように等高線 C_2 と C_3 を結ぶ曲線PQを求める。

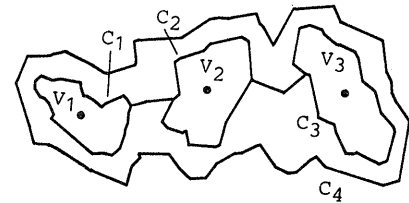
(3) Step 2で求めた内分比を用いて、曲線PQを分割する点Nを連結点とする。連結点の高度は5.1のStep 1と同様に木構造リストの親節と子節の高度の中間の高度を与える。

Step 4 等高線の連結

次に連結点Nと、木構造リストの子節の等高線を連結する。連結方法は、2次元平面上で連結点Nと等高線 C_2 の特徴点を結ぶ線分のうち、親節の等高線 C_4 と交差しない線分の中で、最も長さが短い線分で等高線 C_1 と点Nを連結する。点Nと等高線 C_2 の特徴点を結ぶ線分が全て等高線 C_4 と交差するときは、曲線PNの長さを1:1に分割する点を新たに連結点として加える。等高線 C_3 と点Nについても、同様に処理を行い連結する。等高線の連結結果を図12(f)に示す。等高線の連結後5.1のStep 3, Step 4の処理を行うことにより、三角形

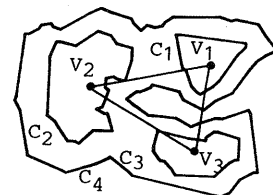


(a) 3峰の等高線

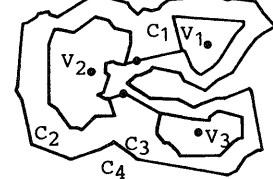


(b) 等高線の連結

図13 3峰以上の等高線に対する三角形パッチ I



(a) 頂点間を結ぶ線分が親節の等高線と交差する例



(b) 等高線の連結

図14 3峰以上の等高線に対する三角形パッチ II

パッチを行う。

7. 峰が3つ以上の等高線に対する三角形パッチ

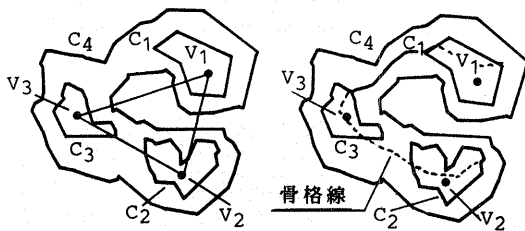
本報告においては、木構造リストの分岐点において、子節は、3つ以上存在しないことを条件とした。本章では、木構造リストの分岐点において子節が3つ以上存在する場合の本三角形パッチ法の適用の問題点について考察する。図13(a)のように分岐点が3つ以上存在する場合には、それぞれの子節の葉に対応する峰の頂点間の距離を調べ、頂点間距離の最も短い頂点の間を5.1で示した分岐点から親節までの三角形パッチの手法を用いて等高線の連結を行う。連結結果を図13(b)に示す。図14(a)のように頂点間を結ぶ線分が木構造リストの親節にあたる等高線と交差する場合には、頂点間距離が次に短い峰との間で連結判定を行う。連結結果は図14(b)のようになる。図15(a)のようにどの峰とも連結のできない峰に対しては以下のように処理を行う。

親節にあたる等高線で囲まれる領域の骨格線抽出をして、6.2で示した方法により長さの一番短い峰の間で等高線の連結を行う。全ての峰の等高線を連結したのち、5.1のStep 3, Step 4に示した手法によって親節の等高線の各特徴点と峰の頂点、分岐点にあたる等高線上の特徴点との対応関係を求めて、三角形パッチを行う。

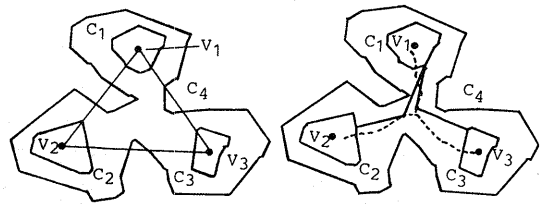
以上の基本アルゴリズムの他に、図16のように全ての峰が他の峰と連結できない場合がある。この場合、連結点同士がすぐ近くに2つ生じてしまうなどの問題がある。この場合には、峰を連結するための連結点をオペレータが指示することによって等高線を連結し、5.2の手法を用いて三角形パッチを行う。

9. 実験結果

以上に述べた手法を用いて三角形パッチを行う

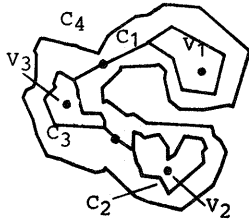


(a) 他の頂点と結ぶ線分が全て親節の等高線と交差する例
(b) 骨格線の抽出



(a) 頂点間の線分が全て親節の等高線と交差する例
(b) 等高線の連結

図16 等高線の連結アルゴリズムが適用できない場合



(c) 等高線の連結

図15 3峰以上の等高線に対する三角形パッチⅢ

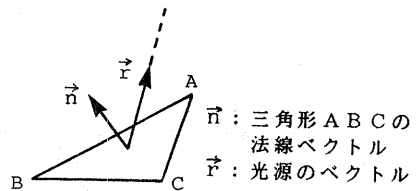
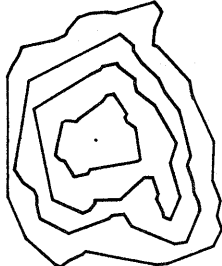
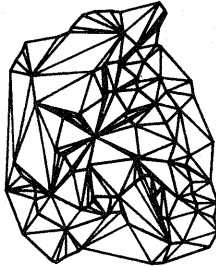


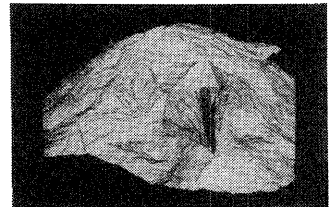
図17 三角形の輝度の計算法



多角形近似した等高線



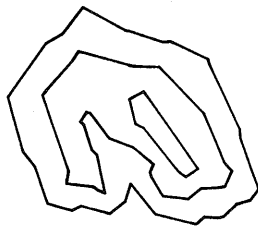
三角形パッチ結果
(a) 等高線 NO.1



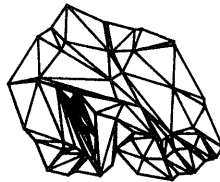
再生形状

図18 実験結果

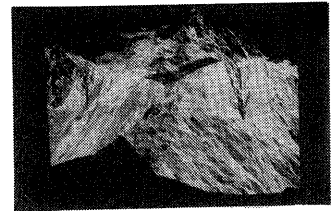
た実験例を図18に示す。また、各三角形パッチ結果から再現した山岳形状を併せて示す¹⁾。山岳形状は、三角形パッチされたデータに視点座標変換、透視座標変換を施して表示した。光源には平行光線を用い、各三角形の輝度は、図17に示すように三角形の法線ベクトルと、光源のベクトルの内積値で決定した。隠面消去はZバッファ法を用いた。等高線no.1とno.2は峡谷等高線に対する三角形パッチ例である。等高線no.1の再生形状から尾根の部分が表現されていることがわかる。等高線no.2のように大きく等高線が湾曲している場合も三角形パッチが可能である。等高線no.3は、双峰の山に対する三角形パッチの例である。そして等高線no.4は、湾曲等高線に対する処理結果である。再生形状は、山が連峰として表現されていて自然な形状に感じられる。



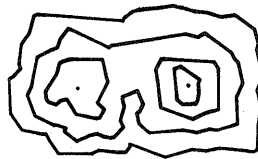
多角形近似した等高線



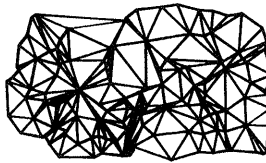
三角形パッチ結果
(a) 等高線 NO. 2



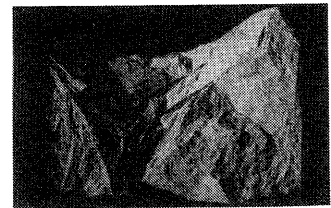
再生形状



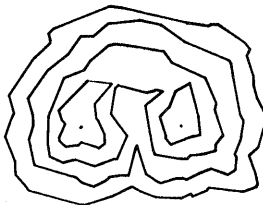
多角形近似した等高線



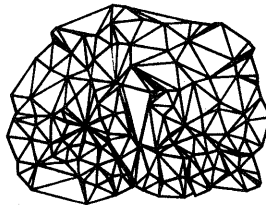
三角形パッチ結果
(a) 等高線 NO. 3



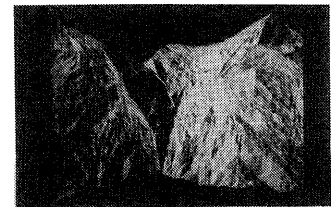
再生形状



多角形近似した等高線



三角形パッチ結果
(a) 等高線 NO. 4



再生形状

図18 実験結果(続き)

10. まとめ

山岳形状再生において入力等高線データに対して三角形パッチを自動的に行うアルゴリズムについて提案した。本手法により、双峰の場合の山岳形状を自動的に生成することが可能になった。しかし実際の山岳部における等高線地図では、峰が3つ以上ある場合や等高線が閉じていない場合などがあり、今回用いた等高線に対する制限よりも複雑である。今後は、これらの複雑な等高線に対しても対応できるような三角形パッチ法の検討を行う。

参考文献

- 1) 中嶋、宮田、安居院：“三次元山岳形状の等高線からの自動作成法” 信学論(D), J69-D, 12, pp.1905-1911 (昭61-12)
- 2) L. De Floriani, B. Falcidieno, and C. Pienovi: "Delaunay-based Representation of Surfaces Defined over Arbitrarily Shaped Domains", Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 32,

pp.127-140, 1985

- 3) 安居院、宮田、中嶋：“フラクタル次元に基づいたデジタル輪郭線の符号化法” 信学全大 1950 (1985)
- 4) T. AGUI, M. NAGAJIMA, K. MATSUBARA: "An Automatic Generation Algorithm of Closed Curves in Contour Map Processing" Trans. IECE Japan, vol.E 64, no.9, pp.610-611, 1981
- 5) 安居院、飯塚、中嶋：“ピラミッド階層構造データの位相変化情報を利用した市街地図の処理”、信学論(D), J65-D, 10, pp.1243-1249, 1982
- 6) S. M. Piser, et. al.: "3-D Shaded Graphics in Radiotherapy and Diagnostic Imaging", NCGA '86, Conference Proceedings pp.107-113, 1986
- 7) 安居院、中嶋：“コンピュータ画像処理” 第4章 産報出版