

拡張ボロノイ線図を用いた等高線画像の大局的復元処理

渡辺孝志・山本善一・阿部英志・木村彰男

Global Restoration of Topographic Contour Image by Using Extended Voronoi Diagram

Takashi WATANABE, Zen-ichi YAMAMOTO, Hideshi ABE and Akio KIMURA

Abstract: It has been strongly requested to get automatically a precise digital elevation model from a topographic contour image. But, because of overlapping other symbols, the image usually includes many broken contours. To connect these correctly, a global restoration technique considering states of adjacent contours is needed. In this paper we propose a new global restoration method using an extended Voronoi diagram that produces a relationship graph of adjacent contours. Based on an idea of reference contours, it determines pairs of broken contours to be connected and interpolates their gaps with spline curves. It can satisfactorily restore broken contours that have been considered difficult to connect.

Keywords: 地形図(topographic map), 断線等高線(broken contour), 画像処理(image processing), 数値標高モデル(DEM), ボロノイ線図(Voronoi diagram)

1. はじめに

近年、地理情報システム (GIS) の多分野に渡る利用拡大とともに、3次元地形データとしての数値標高モデル (DEM) の体系的整備に関心が集まっている(例えば、明野・熊木, 1997)。

現在、国内において入手可能なDEMとしては国土地理院発行の「数値地図」があるが、精度が50mメッシュにとどまっております、GISによる各種地形解析やリモートセンシングデータの輝度補正などの基礎データとしては十分でない。これに対して、縮尺二万五千分の一や縮尺五万分の一の地形図が広く市販されている。また、国、県、市町村の関連機関や各種企業体においても、測量で得た大縮尺の測量図が等高線地形図の形で膨大に蓄積されている。これらの地形図から画像処理技術を用いて等高線情報を抽出し、それに基づいて数mメッシュ精度のDEMを手軽に構築できるとしたら、その波及効果は極めて大きいと言えよう。

筆者らは、このような観点から、市販の地形図を画像処理して等高線データを抽出し、これから細密なDEMを自動生成する計算機処理システムの開発を行っている。その際、特に問題となるのは途切れた等高線をどのようにして復元するかである。等高線上には各種の文字や記号が重畳して印刷されており、これらによって複雑に隠ぺいまたは分断された等高線を正しく接続し直すことは簡単な問題ではない。この問題に対処する方法としては、これまでに、

- (1)接続すべき等高線の端点对を等高線の途切れた方向に探索して接続する(森ほか, 1988),
- (2)等高線間の隣接情報を利用して接続する(水谷ほか, 1991; 李ほか, 1995),
- (3)正則化手法を用いて途切れた等高線群から3次元形状を直接復元する(村木ほか, 1990; 川島ほか, 1993),

などの手法が提案されている。しかし、これらの手法にはそれぞれ次に述べるような問題がある。例えば、方法(1)は等高線の局所的な情報だけに注目しているため、単純な断線パターンにしか適用できない。方法(2)は等高線の隣接情報の抽出とその利用が十分でないために、断線が少し複雑になるとうまく対処できない。方法(3)は一般に膨大な計算時間とメ

渡辺：〒020-8551 盛岡市上田4-3-5
岩手大学工学部情報工学科
Department of Computer Science
Iwate University
4-3-5 Ueda, Morioka-shi, 020-8551 Japan
E-mail: watanabe@cis.iwate-u.ac.jp

メモリ量を必要とし、実用的手法とはなりにくい。実用的な復元手法としては、等高線が長く欠損している場合や断線箇所が密に分布している場合にも適用可能であること、パソコンレベルの計算機でも十分実行可能な手法であること、などの条件を満たすことが望まれる。

本論文では、これらの条件を満足する等高線復元手法として、新たに拡張ボロノイ線図を用いた復元手法を提案した。拡張ボロノイ線図は水谷ほか(1991)が用いたボロノイ線図の拡張であり、これによって等高線間の隣接関係をよりの確に表現することが可能となった。さらに、基準等高線を用いた接続端点对の抽出法とスプライン曲線を用いた補間接続法を考案することで、従来手法では復元が難しかった複雑な断線パターンにも対処できるようになった。評価実験の結果、提案手法は必要とするメモリ量と計算量も比較的少なく、実用的な手法であることが確認できた。

なお、安居院ほか(1982)によって、完全に復元された等高線群に対して等高線標高値を自動付与する効率的なアルゴリズムが与えられている(断線等高線がある場合の自動付与は一般に困難である)。そして、標高値が付与された等高線群から適当な補間処理を用いることによって格子点データとしてのDEMが最終的に得られるが、これらの後続する処理については本論文では論じない。

2. 等高線画像の前処理と局所的復元処理

2. 1. 等高線画像の前処理

まず、等高線の復元処理に先んじて行われる前処理について、その概要を以下に説明する。

[地形図画像の入力]

スキャナなどを用いて地形図を入力画像として取り込む。本研究で検討対象とした地形図は、国土地理院が発行する二万五千分の一地形図(3色刷)と五万分の一地形図(4色刷)である。入力画像はRGB値が各256階調のフルカラー画像とする。

[等高線の抽出]

地形図では等高線が茶色、文字と地図記号が黒色、植生が緑色または黒色、水域が水色で描かれており、色情報に注目することで等高線が抽出可能で

ある。本研究では森ほか(1988)による色情報の正規化を用いた等高線抽出法を採用した。

[等高線のラベリングと細線化]

得られた等高線画像(2値画像)にラベリングと細線化を行って、線幅が1画素の等高線を得る。ラベリングと細線化には途切れに強い8連結による手法を採用した(例えば、長谷川ほか, 1986)。

[雑音成分の除去]

細線化処理を行った後の等高線画像には、まだ枝や分岐点、短線分などの雑音成分が存在しているので、これらを除去する必要がある。ここでは次のような順序に従って処理するものとした(森ほか, 1988)。

- (1)枝はすべて除去する。
- (2)他と連結している小さな閉曲線は除去する。
- (3)長い等高線間にまたがる短線分は除去する。
- (4)残った分岐点を除去し、等高線を分岐点位置で異なったラベルを持つ複数の等高線に分割して、その後でしきい値以下の短線分を除去する。

2. 2. 等高線の局所的復元処理

等高線上には各種の文字や地図記号が重畳して印刷されているので、上記の前処理を適用して得られる等高線画像には等高線の途切れが多数発生する。本研究では、途切れた等高線を復元する処理を2段階に分けて、第1段階で比較的軽微な断線を局所的情報に基づいて復元し(局所的復元処理)、続く第2段階で複雑な断線を大局的情報に基づいて復元するものとした(大局的復元処理)。これにより、復元処理手続きの複雑化が避けられる。

[局所的復元処理]

等高線の2端点が次の3条件をすべて満たすとき、その間を直線で結んで接続する。

- (a₁)両端点間の距離がしきい値以下である。
- (a₂)両端点の周辺に他の端点が存在しない。
- (a₃)両端点を直線で結んでも他の等高線と交差せず、しかも端点位置での接続角度が共に鈍角である。

3. 等高線の大局的復元処理

第1段階での局所的復元処理では、等高線が長く欠損している場合、断線箇所が密に分布している場

合、あるいは断線が断続的に続いているような場合、などには対処できない。この種の複雑な断線パターンに対しては、等高線間の隣接情報を利用する第2段階での大局的復元処理によって対処する。従って、以下で処理対象とする画像は局所的復元処理を終えたラベル付き等高線画像である。

3. 1. 拡張ポロノイ線図の作成

水谷ほか(1991)は等高線間の隣接情報をポロノイ線図を作成することで求めた。

[定義：ポロノイ線図] ラベル $\{1,2,\dots,n\}$ が付いた等高線の集合 $\{C_1,C_2,\dots,C_n\}$ に対して、等高線 C_i の勢力範囲を

$$SI(C_i) = \{z = (x, y) \mid d(z, C_i) \leq d(z, C_j), \text{ for } j=1,2, \dots, n\} \quad (1)$$

で定める。ここで、 $z = (x, y)$ は座標位置 (x, y) の画素 z を表し、 $d(z, C_i)$ は画素 z と最も近い等高線 C_i 上の画素との距離を表す。異なる勢力範囲の境界上に位置する画素の集合を $\{C_1,C_2,\dots,C_n\}$ のポロノイ線図と言い、 V で表す。ただし以下では、境界上の画素は1画素幅になるように細線化して考え、各境界画素 $z \in V$ にはそこで隣接する勢力範囲のラベルの組(集合)が画素値 $V(z)$ として割り当てられるものとする。

ポロノイ線図から隣接する等高線のラベルとその隣接強度(境界画素数)に関する情報が得られる。しかしポロノイ線図では、隣接等高線が注目等高線の左側に位置するのか右側に位置するのかわけられない。そのため、ポロノイ線図に基づいて等高線の隣接関係グラフを作成しても等高線間の隣接関係を正しく推論することはできない。その結果、少し複雑な断線状態になると復元に対処できないという事態が生じる。このため、次の定義を導入する。

[定義：拡張ポロノイ線図] ラベル $\{1,2,\dots,n\}$ が付いた等高線の集合 $\{C_1,C_2,\dots,C_n\}$ を考えて、そのポロノイ線図を V とする。また、等高線 C_i には曲線としての向きが定められているものとする。このとき $\{C_1,C_2,\dots,C_n\}$ の拡張ポロノイ線図 EV とは、 V と同じ画素集合からなり、その画素値 $EV(z)$ が $V(z)$ に次のような修

飾を施したものである場合をいう。すなわち、境界画素 $z \in EV$ で隣接する各ラベル $i \in EV(z)$ について、 z が等高線 C_i の左側に位置する、右側に位置する、どちらでもない(中性)、のいずれかの区分がなされているとする。

拡張ポロノイ線図の具体的な作成手順を以下に示す。ただし、ここでは処理の簡単化のため、2点 $z = (x, y)$ と $z' = (x', y')$ の距離として次の4近傍距離を採用する。

$$d(z, z') = |x - x'| + |y - y'| \quad (2)$$

[拡張ポロノイ線図の作成手順]

対象とするラベル付き等高線画像を $I = \{I(z)\}$ で表し、 $I(z)$ で画素位置 z のラベルを表す。ただし、背地画素のラベルを0、背地以外の画素 z は $1 \leq I(z) \leq L_{\max}$ とし、 $L_{\text{add}} = L_{\max} + 1$ とする(L_{\max} は最大ラベルである)。

(1)すべての等高線に対して、その曲線としての向き(進行方向)を任意に定める。

(2)各ラベル i ($1 \leq i \leq L_{\max}$)の等高線に対して、進行方向の右側で等高線画素に直接隣接する画素 z のラベルを0から右側ラベル $I(z) = i + L_{\text{add}}$ に変更する。等高線に途切れがある場合には、その端点に直接隣接する画素のラベルを0から端点ラベル

$$I(z) = i + 2L_{\text{add}} \quad (\text{始端点の場合})$$

$$I(z) = i + 3L_{\text{add}} \quad (\text{終端点の場合})$$

に変更する。これらのラベルは L_{add} を法とする剰余演算を施すことで元のラベル i が得られる。なお、等高線上の画素は $1 \leq I(z) \leq L_{\max}$ であるが、これらは左側ラベルと解釈する。

(3)右側ラベルと端点ラベルを追加した新たなラベル画像 I において、0でないすべてのラベルの画素をそれぞれ同時に4近傍で膨張させていき、0以外の異なるラベルを持つ画素と重なるまで膨張処理を繰り返す。

(4)最終結果の画像から複数のラベルが重なった画素 z を集めて EV とし、画素 $z \in EV$ で重なっているラベルの組(集合)を画素値として $EV(z)$ に記録したものが拡張ポロノイ線図である。

画素 $z \in EV$ は、ラベル $i \in EV(z)$ の値の大きさに応じて、その等高線の左側に位置する(左側ラベル： $1 \leq i \leq L_{\max}$)、右側に位置する(右側ラベル： $L_{\max} + 2$)

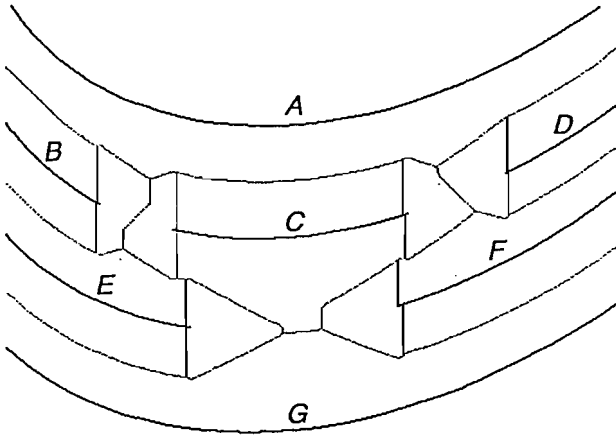


図1 拡張ポロノイ線図の例

$\leq i \leq 2L_{\max} + 1$), 中性である (始端点ラベル: $2L_{\max} + 3 \leq i \leq 3L_{\max} + 2$, 終端点ラベル: $3L_{\max} + 4 \leq i \leq 4L_{\max} + 3$), の区分がなされている. 図1に拡張ポロノイ線図の例を示す. 太い線(A~G)が等高線で, 細い線が勢力範囲の境界線である.

3. 2. 隣接関係グラフの作成

次に, 拡張ポロノイ線図から等高線の隣接関係を記述する隣接関係グラフを作成する.

[隣接関係グラフの作成手順]

拡張ポロノイ線図をEVとする.

(1)隣接関係行列の全要素 $M(i,j)$ ($1 \leq i,j \leq L_{\max}$) を0に初期化する.

(2)ラベル i を $1 \leq i \leq L_{\max}$ の範囲で動かして, 以下の処理を行う. 等高線 i と隣接している等高線 $j \neq i$ ($1 \leq j \leq L_{\max}$) について, 次の4つの値

$$N_{ll} = \text{num}\{z \mid i \in \text{EV}(z), j \in \text{EV}(z)\}$$

$$N_{lr} = \text{num}\{z \mid i \in \text{EV}(z), j + L_{\text{add}} \in \text{EV}(z)\}$$

$$N_{rl} = \text{num}\{z \mid i + L_{\text{add}} \in \text{EV}(z), j \in \text{EV}(z)\}$$

$$N_{rr} = \text{num}\{z \mid i + L_{\text{add}} \in \text{EV}(z), j + L_{\text{add}} \in \text{EV}(z)\}$$

を求め, その最大値をNとする. このとき,

(a) $N = N_{ll}$ または $N = N_{lr}$ のとき, $M(i,j) = N$

(b) $N = N_{rl}$ または $N = N_{rr}$ のとき, $M(i,j) = -N$

と定める. $\text{num}\{S\}$ は集合Sの要素数を表す.

(3)等高線の各ラベル i ($1 \leq i \leq L_{\max}$) を節点として, しきい値以上の $|M(i,j)|$ に対して, ラベル i の節点からラベル j の節点へ枝を引き, 枝に付加情報として隣接

の強さ $M(i,j)$ を与える. このようにして作成したグラフを隣接関係グラフという. ここで, $M(i,j)$ が正ならば等高線 j は等高線 i の左側に隣接し, 負ならば右側に隣接することを意味する.

3. 3. 基準等高線の選択

[定義: 完全等高線と不完全等高線] 途切れのない等高線を完全等高線と言い, それ以外の等高線を不完全等高線と言う. 完全等高線には閉曲線と開曲線 (両端点が画像端にある) がある.

本研究では, 後述するように, 不完全等高線同士が接続できる条件としてそれらに共通して隣接する他の等高線 (これを基準等高線と言う) の存在を要求する. 基準等高線の選択順序の違いは処理結果を左右するので, その指定が重要となる. 一般に, 基準等高線としては不完全等高線よりも完全等高線を選択した方が正しい隣接関係を得やすい. また, 画像端では等高線間の隣接関係が曖昧になるため, 画像の中央部から画像端へ復元処理を行った方が安定である. そこで, 本手法では次のように定めた.

[基準等高線の選択]

基準等高線としてラベル画像から1本の完全等高線を選ぶ. その選択順位は, (1)短い完全閉曲線, (2)長い完全閉曲線, (3)長い完全開曲線, (4)短い完全開曲線, とする. また, 画像中に初めから完全等高線が存在しない場合や, 処理途中で見い出された完全等高線のみでは復元可能な等高線が存在しなくなった場合には, (5)画像中で最も長い不完全等高線, が次の基準等高線として選ばれる. ただし, いずれの場合も選ばれる基準等高線には少なくとも2本の不完全等高線がその片側に隣接しているとする.

3. 4. 隣接関係の吟味

等高線が長く欠損している場合には, 隣接関係グラフにおいて偽の隣接関係が発生する可能性がある. 例えば図2のような場合, ラベルCとDの等高線が接続すべき不完全等高線であるが, ラベルAの基準等高線とラベルBの不完全等高線の勢力範囲が隣接するために, それらの等高線間に偽の隣接関係が発生してしまい, 不都合である. そこで, これらを次の手順で除去するものとする.

[隣接関係の吟味]

選ばれた基準等高線のラベルをAとし、隣接関係グラフにおいてAの片側に隣接する不完全等高線のラベルを B_1, B_2, \dots, B_n とする。このとき、あるラベル B_i が(B_i から見て)Aの存在する側にA以外の他の不完全等高線 B_j を隣接させている場合、Aと B_i の隣接関係は偽であると判定し、隣接関係グラフからそれに対応する枝を削除する。

この結果、基準等高線の片側に隣接する不完全等高線の集合はすべて1本の等高線として接続すべきものと判断されるので、後はそれらの不完全等高線の接続法だけが問題となる。

3. 5. 接続端点对の抽出と接続

不完全等高線を接続する際に、従来手法の多くは等高線端点の中でユークリッド距離が最小となる端点对を接続すべき端点对としていた。しかしこれでは、等高線が長く欠損している場合や断線箇所が密に分布している場合などには、接続間違いを引き起こす可能性がある。また、従来手法では端点間の欠落部分を単純に直線で接続していたが、これでは等高線が長く欠損している場合に周囲の等高線との調和がとれないので、本来あるべき等高線の姿を復元したとは言えない。そこで、本研究ではこれらに対処するために次に示す手法を採用した。

[接続端点对の抽出方法]

図3の上部に示すような場合、接続端点对としては $\{E_1, E_2\}$, $\{E_3, E_4\}$ を抽出する必要がある。そこで、不完全等高線の各端点 E_i に対してユークリッド距離が最短となる隣接する基準等高線上的対応点 C_i を求

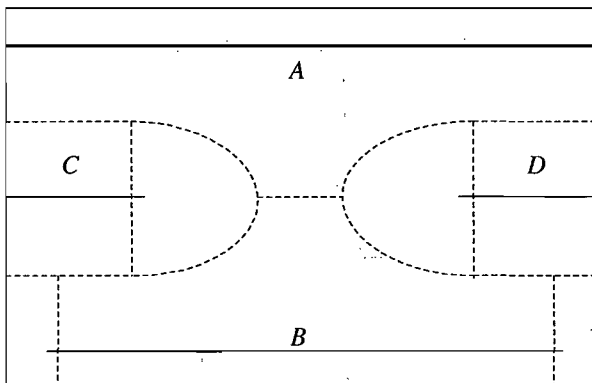


図2 偽の隣接関係の例

める。次に、対応点 C_1 を始点として端点 E_1 から途切れた方向に基準等高線上を探索して行き、最初に現れる他の対応点 C_2 を求める。その C_2 と対応する端点 E_2 を端点 E_1 の接続相手側とする(すなわち、基準等高線上の道のりで計って最短な端点同士を接続する)。以下、これを繰り返す。

[接続端点对の接続方法]

一般に、隣接する等高線同士の形状は似ている場合が多い。そこで、端点間の欠落している部分の接続曲線は隣接する基準等高線の形状を模倣して与える。その手順を次に示す(図3の下部参照)。

- (1) 接続すべき端点 E_1 と E_2 の基準等高線上的対応点をそれぞれ C_1 と C_2 とする。
- (2) 線分 C_1C_2 を線分 E_1E_2 へ相似変換するパラメータ(回転角, 伸縮度, 移動量)を求める。
- (3) 基準等高線上的 C_1C_2 間をある間隔でサンプリングし、その点列を $\{c_1, c_2, \dots, c_n\}$ とする。これらを上で求めたパラメータで相似変換して、対応する点列 $\{e_1, e_2, \dots, e_n\}$ を求める。
- (4) 点列 $\{E_1, e_1, e_2, \dots, e_n, E_2\}$ をスプライン関数で滑らかに補間する(市田・吉本, 1979)。ただし、補間曲線が他の等高線と交差した場合には補間を中止し、別途手作業で補間のための点列を与えてそれをスプライン関数で補間するものとする。

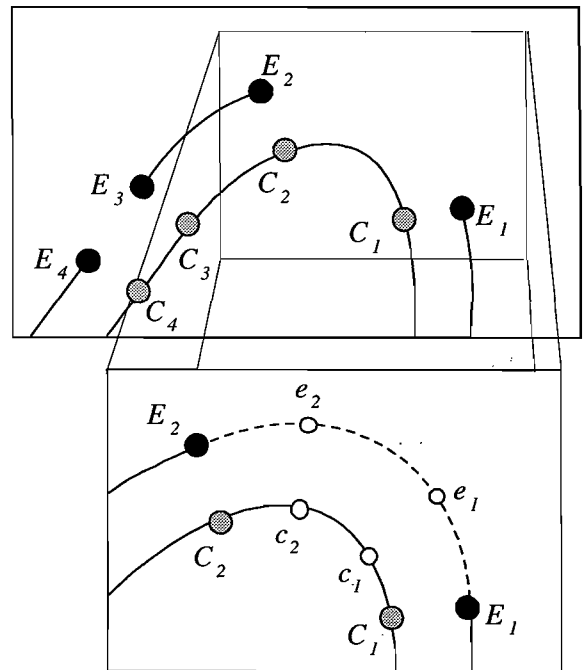


図3 基準等高線による接続端点对の抽出と接続

3. 6. ラベルの書き換えと反復制御

不完全等高線の接続を行う前と後では等高線のラベルに違いが生じるので、接続後にラベル画像と隣接関係グラフにおける該当ラベルを書き換える。

[ラベルの書き換え手順]

ラベルAの基準等高線を基にして不完全等高線 B_1, B_2, \dots, B_n が接続されたとする(ラベル値の大小関係を $B_1 < B_2 < \dots < B_n$ とする)。このとき、ラベル画像では接続後の等高線のラベルを B_1 として、隣接関係グラフではラベル B_1, B_2, \dots, B_n の節点を B_1 に統合し、対応する枝も統合した形に変更する。

[反復制御手順]

ラベルの書き換えが終了したら、3.3に戻って別の等高線を基準等高線を選んで処理を繰り返す。

3. 7. 大局的復元処理の繰り返し

1回の大局的復元処理の適用だけでは接続可能な不完全等高線が復元されずに残ってしまう場合がある。これは、当初の等高線ラベル画像ではあいまいさを完全に解消することが難しいからである。大局的復元処理を施した後の等高線ラベル画像では断線状態がかなり復元されるので、それから再び拡張ポロノイ線図を作り直せば、より正確な隣接情報が得られ、接続できなかった不完全等高線も接続可能となる。そこで、次の反復手順を採用する。

[大局的復元処理の反復手順]

不完全等高線が復元されずに残ってしまった場合には、3.1に戻って更新された等高線ラベル画像で拡張ポロノイ線図を作り直して、大局的復元処理をやり直すものとする。そして、不完全等高線が1本も復元しなかった場合に、大局的復元処理の反復を終了する。

以上が第2段階における大局的復元処理である。

4. 実験結果と検討

4. 1. 前処理の結果

実験に用いた地形図画像を図4に示す。これは国土地理院発行の五万分の一地形図から盛岡市近郊の岩手山頂上付近を選んで画像入力したものである。使用したスキャナはフラットベッド型で、分解能は600 DPIである。画像サイズは $1,024 \times 1,024$ 画素であ

る。この画像に前処理を施して等高線のみを抽出した等高線画像を図5に示す(短線分として除去する線長のしきい値は10画素とした)。その結果、等高線は全体的に満足できるレベルで抽出できたが、文字や記号が描かれている山頂付近は断線が密集しており、標高数値が描かれている部分にも等高線の長い欠損が見られる。さらに、行政境界線が描かれていた部分には断続的に生じる断線が見られる。また、崖記号が描かれていた部分にも等高線の長い欠損と断線の密集が見られる。これらの断線等高線の総端点数は591個である。なお、崖記号と標高数値は等高線と同じく茶色で描かれており、上記の前処理だけでは完全に除去することは困難である。そこで、今回これらはその一部を手作業で除去して、自動処理の対象からはずしている。

4. 2. 局所的復元処理の結果

第1段階における局所的復元処理を施した結果を図6に示す。ここで、接続できる端点間距離のしきい値は15(画素)とした。局所的復元処理の適用により単純な断線は復元できたが、等高線が長く欠損している箇所、等高線が密に断線している部分、断続的に断線している部分などは復元できずにそのまま残っている。残った断線等高線の総端点数は308個で、半分以上が復元されずに残っている。

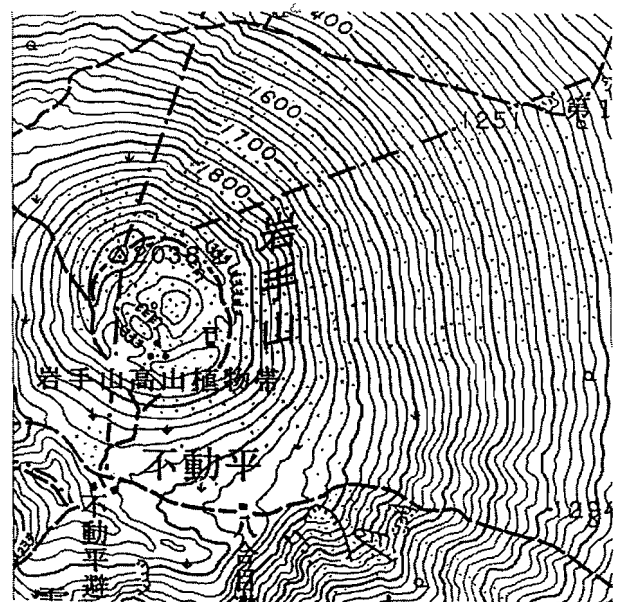


図4 実験に用いた地形図画像

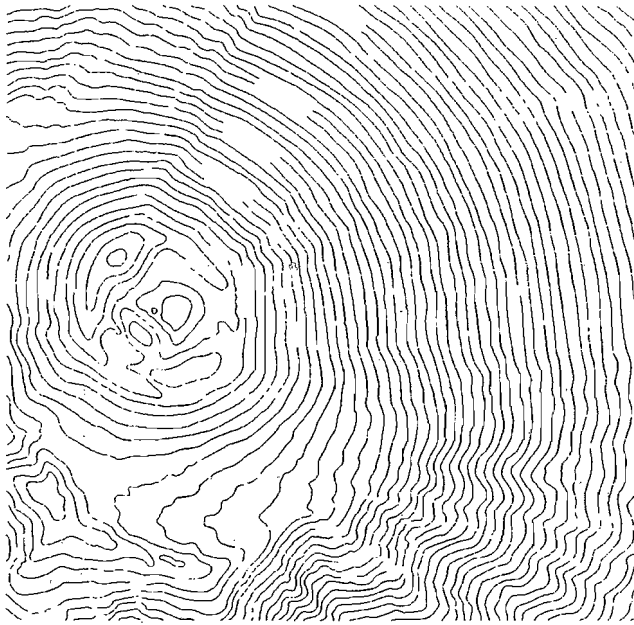


図5 前処理で得られた等高線画像



図7 実験画像の拡張ポロノイ線図

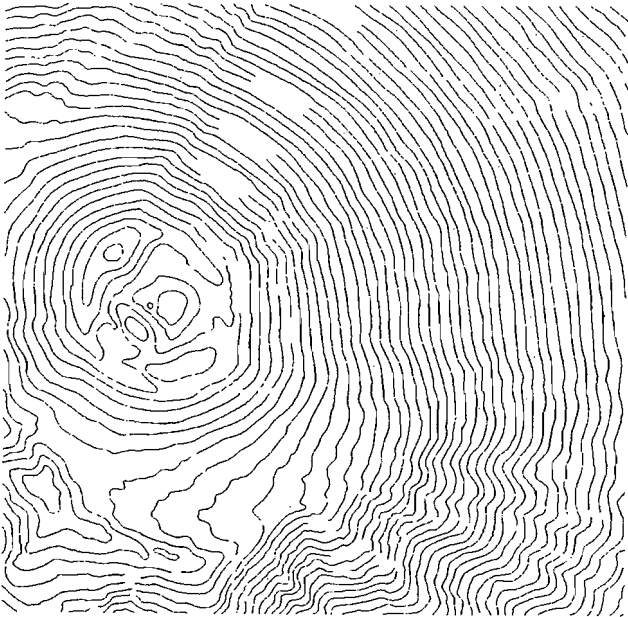


図6 局所的復元処理の結果

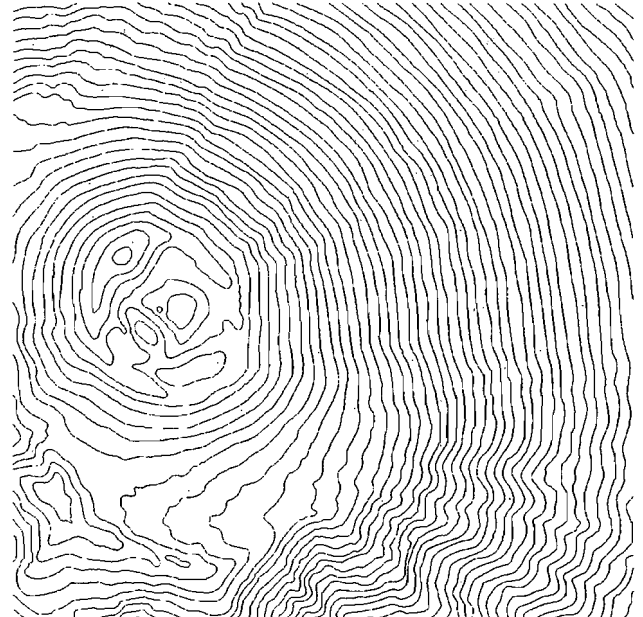


図8 大局的復元処理の結果

4. 3. 大局的復元処理の結果

第2段階における大局的復元処理で得られた拡張ポロノイ線図の一部を拡大して図7に示す。太い線で描かれているのが等高線、細い線で描かれているのが拡張ポロノイ線図（すなわち、勢力範囲の境界）である。等高線の左側部分、右側部分、端点部分の勢力範囲が明確に区分できていることが判る。続いて、大局的復元処理を適用した結果を図8に示す。この例では計6回の大局的復元処理を要したが、その結果、局所的復元処理では復元できなかった断線等高線がすべて矛盾なく復元できた。また、

欠落部分を補った補間曲線の形状についても、周囲の等高線に対して違和感のない形で良好に接続されていることが判る。

4. 4. 結果の検討

(1)処理能力について

上記以外の地形図画像についても評価実験を行ったが、実験した範囲内では不完全等高線を良好に復元できた。従って、本手法は複雑な断線パターンに対してかなり有効な手法と言える。しかし、実地形図における等高線の断線パターンは多種多様に存在

し、今回処理できたのはまだその一部に過ぎない。例えば、基準等高線として適当なものが得られないような断線パターンが存在し得る。さらに、本論文で用いた等高線の隣接関係の吟味法もまだ単純であり、拡張ポロノイ線図の持つ情報を完全に生かし切っているとは言えない。また、膨張処理による拡張ポロノイ線図の作成では短い等高線が周りの大きな勢力圏に影響されてしまい、正しい隣接関係が得られない場合もあり得る。これらの問題は今後の検討課題として残されている。

(2)処理時間について

局所的復元処理はあまり処理時間を要しないが、大局的復元処理では拡張ポロノイ線図の作成にかなりの時間が掛かる。大局的復元処理の反復回数は地形図の複雑さに依存するが、今回の実験では比較的等高線が密集した地域を選んだので、その反復回数が4~6回となり、処理時間は8~10分程度を要している（使用した計算機は内蔵CPUがPentium II (266MHz) のパソコンである）。従って、処理時間的にはまだ十分ではなく、さらに高速化の工夫が必要である。

(3)提案手法の特徴

提案手法の主たる特徴は次の通りである。

(a)ポロノイ線図による従来手法では等高線の左側隣接性と右側隣接性を区別できないので、これを補うために等高線の局所的平行性を利用した複雑な接続判定手続きを必要としていた。これに対して提案手法では、拡張ポロノイ線図を用いることで左側隣接性と右側隣接性が明確に区分できるようになったので、等高線間の隣接関係の吟味と接続端点对の抽出が簡単な処理法でより効果的に実現できた。

(b)提案手法では完全等高線を優先的に基準等高線として利用することで信頼性の高い接続処理を実現している。特に、不完全等高線は接続されて完全等高線として復元されると基準等高線として利用可能となる。これは完全等高線が伝搬して行く（すなわち、信頼できる隣接関係情報が増加して且つ利用される）と言う形での安定した復元処理が実現されたことを意味する。その結果、スプライン曲線を用いた接続方法と組み合わせて、従来手法では復元が難しかったような断線パターン（例えば、湾曲部に長

い断線がある場合、各等高線に多数の断線を生じている場合、など）にも対処できるようになった。

5. おわりに

本論文では、画像処理技術を用いて地形図から細密なDEMを自動生成する計算機処理システムの研究に関連して、等高線画像における断線等高線を接続し直すための手法として、拡張ポロノイ線図を用いた大局的復元手法を提案した。これにより従来手法では復元が困難であった断線状況にも対処できるようになった。さらに、提案手法は必要とするメモリ量と計算時間も比較的少なく、通常のパソコンレベルの計算機でも十分に実行可能であるという特徴を有している。しかし、性能改善の上でまだ工夫すべき課題は残されており、今後も各種の評価実験を踏まえて処理アルゴリズムの改善に努めて行きたいと考えている。また、復元された等高線群に対する等高線標高値の自動付与処理と補間によるDEM生成処理についても現在検討を進めているが、これらについては別の機会に論じたいと考えている。

謝辞

本研究に対してご協力を頂いた岩手大学工学部情報工学科横山隆三教授に感謝します。

参考文献

- 安居院猛・伊藤忠芳・中嶋正之(1982) 等高線群に対する効率的な高度付与方法,「電子通信学会論文誌」, J65-D(12), 1507-1512.
- 明野和彦・熊木洋太(1997) 地理情報システム,「情報処理」, 38(2), 143-149.
- 市田浩三・吉本富士市(1979) 『スプライン関数とその応用』, 教育出版.
- 川島深雪・徳永隆治・平井有三(1993) マルチモジュール型並列計算機構による等高線再構成,「電子情報通信学会論文誌」, J76-DII(9), 1910-1921.
- 長谷川純一・奥水大和・中山晶・横井茂樹(1986) 『画像処理の基本技法』, 技術評論社.
- 水谷宣夫・渡辺豊英・吉田雄二・岡部直木(1991) ポロノイ線図による隣接関係を用いた等高線の抽出,「電子情報通信学会論文誌」, J74-DII(11), 1499-1506.
- 村木茂・横矢直和・山本和彦(1990) 正則化法による等高線画像からの曲面再構成,「電子情報通信学会論文誌」,

J73-DII(11), 1854-1862.

森正寿・瀬戸浩昭・中村彰(1988) 地形図における3次元情報の自動抽出とその応用,「情報処理学会論文誌」, **29(3)**, 221-232.

季在淵・福江潔也・下田陽久・坂田俊文(1995) コンターの隣接関係を用いた等高線画像の復元処理,「写真測量とリモートセンシング」, **34(2)**, 45-53.