

高度推定に基づく等高線の自動接続†

若山 忠雄††

地理画像データベースシステムの構築を意図した地形図ファイル化技術の一環として、地形図から等高線図形を分離・抽出する手法が研究されてきている。この場合、得られるデジタル線図形は文字・記号・入力雑音等により所々切断されるため、切断部を接続する必要がある。等高線図形の切断部の接続法としては従来より既にいくつか提案されているが、それらは図形の幾何学的形状（二次元平面上での図形の形状や位置関係）のみに基づいており、見た目に必ずしも自然でなく、自ずと限界がある。本論文では、これらの等高線切断部の接続手法として、上記の地形図ファイル化技術で得られる等高線データが高度情報をもつことに着目し、この高度情報を用いて切断部を自動接続する方法を提案する。具体的には、切断部端点の近傍の高度未知の点の高度を推定し、その中で最適の点（例えば対象としている等高線高度に最も近い推定高度をもつ点）を連結点として選択しながら切断部端点を順次延長していく手法であり、これにより平面図形としての幾何学的形状にのみ基づく従来の手法の難点の解決を図る。なお、高度未知の点の高度推定はその点を通る補間直線と呼ばれる直線を求め、この直線と既存の等高線との交点の高度情報を用いる直線補間法を新たに提案する。

1. まえがき

近年、各種の地図・地形図等を対象とした地理情報処理システムの研究が盛んに行われるようになり、一部実用に供されている¹⁾。我々は先に国土情報管理システム²⁾の構築を意図した地形図ファイル化技術の一環として地形図（2万5千分の1）から色別表示されている等高線や河川等をそれぞれの色成分情報を用いて分離・抽出する手法を提案した^{3),4)}。この場合、得られる線図形は文字・数字・記号あるいは入力雑音により所々切断されるため、切断部を接続する必要がある。

地形図等高線・天気図等圧線等（以下では単に等高線と呼ぶ）を含む線図形の切断部の接続法としては従来より既にいくつか提案されているが⁵⁾⁻⁸⁾、それらは図形の幾何学的形状（二次元平面上での図形の形状や位置関係）のみに基づいており、見た目に必ずしも自然でなく、自ずと限界がある。本稿では、これらの等高線切断部の接続手法として、上記の地形図ファイル化技術で得られる等高線データが高度情報をもつことに着目し、この高度情報を用いて切断部を自動接続する方法を提案する。具体的には、切断部端点の近傍の高度未知の点の高度を推定して、その中で最適の点を連結点として選択しながら切断部端点を順次に延長していく手法であり、これにより平面図形としての幾何学的形状にのみ基づく従来の手法の難点の解決を

図る。

以下、2章では従来手法を概観し、より柔軟性のある接続を得るには高度情報が必要なことを指摘する。次いで3章では等高線画像の記述を行い、4章で高度情報をもたない白画素の高度を近傍の等高線群から推定する手法を論ずる。これらの準備のもとに5章で等高線接続アルゴリズムを示し、その実際の画像への適用例を6章に与える。

2. 等高線の接続と高度の推定

2.1 幾何学的形状にのみ基づく接続

いま図1(a)のような切断部をもつ等高線図形を考える。図で P, P' 間が切断されている場合、湯川らの方法⁵⁾は線図形を直線で近似し、その進行方向の近傍のみで接続の対象端点を探索するため、必ずしも端点対が求まるとは限らず、接続できない場合もある。また、Aguiらの方法⁶⁾は線図形群を隣接グラフで表現し、谷口らの手法⁷⁾は切断部端点群をいくつかのクラスターに分類することによって接続の端点対を求めているので、接続は可能となるが、図1(a)のような切断部は P, P' を直線で結び、他の等高線との交叉を許しているため、得られる図形が不自然になることがある。これに対して阿部らの手法⁸⁾は等高線図形の切断部端点を線の伸びている方向に伸ばす手法を取っているが、この場合、等高線上にない白画素に対して隣接等高線からの距離変換情報を用いて、ある程度幅をもたせて切断部端点を拡散させていくため、図1(a)のような図形の場合も接続可能となる。

しかし、これら幾何学的形状にのみ基づく方法では

† Automatic Contour Restoration Based on Elevation Estimation by TADAO WAKAYAMA (NTT Technology Transfer Corporation).

†† NTT 技術移転(株)

図1 (b)のように接続の端点对をもたない切断部を接続することはできない。あるいは図1 (c)のような線図形では、幾何学的形状にのみ基づく限り、接続端点对としては (P_1, P_2) , (P_3, P_4) または (P_1, P_3) , (P_2, P_4) のどちらをとってもよいが、線図形を等高線として見た場合、前者の端点对では矛盾を生ずることとなる。

このように等高線図形の切断部を幾何学的形状にのみ基づいて接続するにはいくつかの限界が存在する。

2.2 等高線の高度情報の利用

これらの難点の解決を図る一つの手法として画像の各々の等高線図形に高度情報を付与し⁹⁾、これを用いて切断部を接続する方法が考えられる。ところが我々の上述の地形図フェイル化法で得られる等高線画像は等高線の各々に高度情報が付与されている。したがって、本論文ではこの点に着目し、高度情報を用いて切断部を滑らかに接続する手法を提案する。この手法の基本的考え方は、例えば図2において、切断部の(片方の)端点Pの近傍の、高度が未定義の点の高度を推定してPに連結すべき点を決定し(図では P_2 が選択されよう)、順次端点を延長することにより切断部を接続しようとするものである。

すなわち本稿で提案する等高線接続アルゴリズムは切断部の端点延長を基本原理としており、また端点延長は高度推定による連結点の選択手続きに基づいている。

3. 等高線画像の記述

3.1 等高線の形式化

標本化されたデジタル画像は、画像の大きさを表す正の整数を A, B として、 $A \times B$ の格子配列上の格子点集合で定義されており、その各々の点に画素が対応しているものとする。デジタル画像に対する4(8)近傍(近傍点)、4(8)連結等の用語は通常のそれに従うこととする¹⁰⁾。また、ある画素Pに対してその画素値を $v(P)=(0, 1, 2, \dots)$ 、その4近傍または8近傍を $N(P)$ とし、画素値0なる画素を白画素、画素値1以上の画素を黒画素と呼ぶものとする。さらに点Pの近傍の中の黒画素集合を $N^+(P)$ で表す。

いま互いに異なる画素点 $P_i(i=0, 1, \dots, n)$ の列 $C = [P_0, P_1, \dots, P_n]$

が存在して、条件

- (1) $0 \leq i, j \leq n$ に対して、 $i \neq j$ ならば

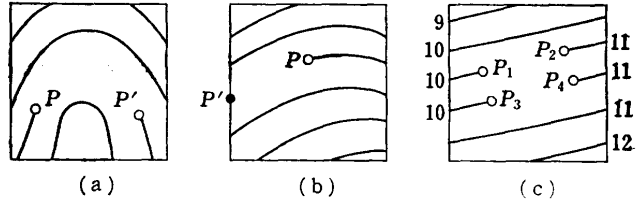


図1 接続が困難な例

Fig. 1 Examples of contour lines which are difficult to be connected.

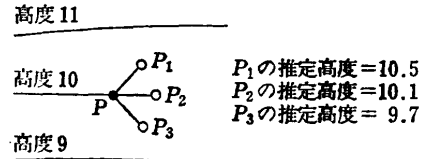


図2 高度推定による端点延長の概念図

Fig. 2 End point stretching based on elevation estimation.

(In the figure, point P_2 will be selected.)

$P_i \neq P_j$

- (2) $0 \leq i \leq n$ に対して、整数 $hc > 0$ が存在して、

$v(P_i) = hc$

- (3) $1 \leq i \leq n-1$ に対して $N^+(P_i) = \{P_{i-1}, P_{i+1}\}$

- (4) $N^+(P_0) = \{P_1\}$ かつ $N^+(P_n) = \{P_{n-1}\}$

であるか、または

$N^+(P_0) = \{P_n, P_1\}$ かつ

$N^+(P_n) = \{P_{n-1}, P_0\}$

がすべて成立するならば、画素点の列Cを等高線、定数hcを等高線Cの(等高線)高度と呼ぶ。また条件(4)において、前半が成立するならば等高線Cは(定義領域において)開いていると言い、後半が成立するならばCは閉じていると言う。また、点 $P_i(0 \leq i \leq n)$ を等高線Cの(等高線)構成点と呼ぶ。特に開いた等高線に対しては構成点 P_0 および P_n は等高線Cの(等高線)端点と呼ぶ。

ある等高線Cに対して、Cが開いているならば、Cの端点Pは通常は画像を定義する $A \times B$ の領域の周辺上に存在する。これに対してPが定義領域の真に内部に存在するならば、等高線Cは点Pで切断されていると言い、このときの端点Pを切断部端点と呼ぶ。また切断された等高線を切断等高線と呼ぶ。

前述の条件において構成点Pの近傍 $N(P)$ が4近傍で定義されるならば等高線Cを4連結等高線、また

$N(P)$ が 8 近傍で定義されるならば C を 8 連結等高線と呼ぶ。さらに等高線 C に対して、その高度 hc を $h(C)$ で表すこともある。

3.2 等高線の記述

ある点 P に対して、 P から見た P の 8 近傍点 $P' \in N(P)$ の方向は図 3 に示すような方向コードまたはチェーンコードと呼ばれる整数 $d=0, 1, \dots, 7$ で与えられる。いまある等高線 $C=[P_0, P_1, \dots, P_n]$ に対して、 C を P_0 から出発して P_1, P_2, \dots の順に追跡することを考える。この場合 $P_i (1 \leq i \leq n)$ に対して P_{i-1} から見た P_i の方向 (方向コード) を $(P_{i-1}$ に対する) P_i の接続方向と呼ぶ。この値を d_i とするとき、点 P_i と P_{i-1} との関係は $P_{i-1} \xrightarrow{d_i} P_i$ で表す。

この場合、 C の構成点 $P (P \neq P_0)$ に対してその接続方向を d とするとき、点集合 $N_a(P, d)$ を

$$N_a(P, d) = \{P' | P' \xrightarrow{d'} P$$

$$\text{where } d' = \text{mod } 8 (d + k - 2)$$

$$\text{for } k = 1, 2, 3\}$$

と定義し、点 P の (接続方向 d による) 接続近傍と呼ぶ (図 4)。また $k (=1, 2, 3)$ を接続方向 d に対する接続方向 $d' (= \text{mod } 8 (d + k - 2))$ の相対接続方向と呼ぶ。 d と d' との関係は $d \xrightarrow{k} d'$ で表記する。さらに点 P の接続近傍 $N_a(P, d)$ に対してその中の 1 点を $P' \in N_a(P, d)$ とするとき、点 P' を P の接続点と呼ぶ。接続点 P' は点 P の接続方向 d に対する相対接続方向 k を定めることにより選択することができる。

いま 8 連結等高線 $C=[P_0, P_1, \dots, P_n]$ において、 $P_i \xrightarrow{d_i} P_{i-1} (i=1, 2, \dots, n)$ とし、 P_i が常に

$$P_i \in N_a(P_{i-1}, d_{i-1})$$

$$\text{for } i=1, 2, \dots, n$$

を満たすとき、 C を滑らかな 8 連結等高線と呼ぶ。滑らかな 8 連結等高線の追跡において、 $k=1$ は追跡方向に対して右折を、 $k=2$ は直進を、 $k=3$ は左折を意味する。

等高線 $C=[P_0, P_1, \dots, P_n]$ はその構成点の列 $[P_0, P_1, \dots, P_n]$

により記述できるが、また始点と接続方向列

$$[P_0; d_1, d_2, \dots, d_n]$$

$$\text{where } P_{i-1} \xrightarrow{d_i} P_i$$

によっても記述できる。さらに滑らかな 8 連結等高線の場合は $k_i (i=1, 2, \dots, n-1)$ を $d_i \xrightarrow{k_i} d_{i+1}$ なる相対接続方向とすれば、

$$[P_0; d_0; k_0, k_1, \dots, k_{n-1}]$$

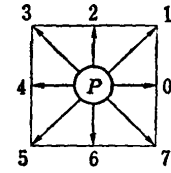


図 3 方向コード
Fig. 3 Direction codes (or chain codes).

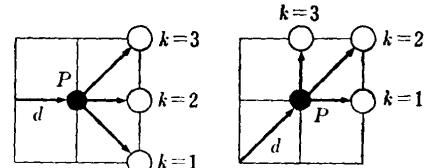


図 4 点 P の接続点
Fig. 4 Directionally adjacent points of point P.

により記述することもできる。ただし、 d_0 および k_0 はそれぞれ $0 \leq d_0 \leq 7$ および $1 \leq k_0 \leq 3$ なる定数であり、 $d_0 \xrightarrow{k_0} d_1$ を満たす。

3.3 等高線画像

互いに異なる 2 点 P, P' に対して、互いに異なる点 $P_i (i=0, 1, \dots, n)$ の列 $L=[P=P_0, P_1, \dots, P_n=P']$ が存在して、 $P_i \in N(P_{i-1}) (i=1, 2, \dots, n)$ を満たすならば、 L を P から P' への経路と呼ぶ。この場合 $N(P_{i-1})$ が 4 近傍ならば 4 連結経路を、8 近傍ならば 8 連結経路を定義することができる。さらに切断部をもたない等高線のみを含む画像上のある 2 つの等高線 C, C' に対してそれぞれの任意の構成点の 1 つを P, P' とするとき、点 P から P' への経路 $L=[P=P_0, P_1, \dots, P_n=P']$ が存在して、 $v(P_i)=0 (i=1, 2, \dots, n-1)$ を満たすならば等高線 C と C' とは互いに隣接していると言う。

いま図形として閉じた等高線、または切断部端点をもたない開いた等高線のみを含む画像を I 、ある正定数を Δh とするとき、 I 内の互いに隣接する任意の 2 つの等高線 C, C' に対して、条件

$$h(C) = h(C')$$

または

$$h(C) = h(C') \pm \Delta h$$

が常に成立するならば、画像 I を等高線画像、値 Δh を (等高線) 高度差と呼ぶ。さらにある等高線画像に対して、その中の 1 つ以上の等高線をそれぞれその空でない部分集合 (切断等高線) で置き換えたような画像を切断部を含む等高線画像と呼ぶ。

なお、以下においては等高線画像内の $v(P)=0$ なる

点 P はその高度が未定義 (未知) の点を表すものとする。さらに、切断部を含む等高線画像において等高線の隣接性を議論する場合は、切断部が正しく接続されている状態でのそれを想定する。

3.4 方向指標

切断部を含む等高線画像 I において、 I に含まれる切断等高線の1つを C 、 C の切断部端点 (の1つ) を P とするとき、 P は次に述べる方向指標と呼ばれる値 $\eta(P)$ をもつ。いま C の構成点を P から順に追跡した場合、追跡方向に対して C の右側において C に隣接する (C の右側に隣接する) 等高線 C_R 、および C の左側に隣接する等高線 C_L が存在して、

$$h(C_R) > h(C) > h(C_L)$$

を満たすとき $\eta(P)=1$ 、また、

$$h(C_R) < h(C) < h(C_L)$$

を満たすとき $\eta(P)=-1$ とする (図5)。どちらの条件も満たさない場合は未定義値として $\eta(P)=0$ としておく。 C が2つの切断部端点 P, P' をもつならば

$$\eta(P) = -\eta(P')$$

が成立する。

なお、この場合の等高線の隣接性は切断部が正しく接続されている状態でのそれを考えているが、後述の切断部接続処理における $\eta(P)$ の決定に際しては、実用上は、 P を通る垂直線または水平線 (どちらを取るかは等高線の切断部分の形状による) と交差し、追跡方向に対してそれぞれ左右に存在する P に最近の等高線構成点の高度を用いている。

4. 高度の推定

本稿で述べる等高線接続法は画素点の高度推定に基づいているので、ここではまず直線補間法と称する高度推定アルゴリズムを提案し、その記述を行う。

4.1 直線補間法による高度推定

いま図6に示すような等高線画像の平面上において高度未知 (未定義) の点を P_0 、 P_0 を通る直線を g^1, g^2, \dots とし、直線 g^i ($i=1, 2, \dots$) と等高線群との交点を $\dots, P_2^i, P_1^i, P_{-1}^i, P_{-2}^i, \dots$ とする。このとき直線 g^i が与える交点群から図7に示すように曲線補間を用いて点 P_0 の補間高度 H^i を求めることができる。

そこでこれらの補間高度群 $\{H^i\}$ を用いて P_0 の高度を推定することを考える。いま直線 g^i (このような直線を補間直線と呼ぶ) の集合 (補間直線群) を $G = \{g^i\}$ とし、各補間直線 $g^i \in G$ から得られる補間高度を H^i とすれば、点 P_0 の推定高度 $\hat{v}(P_0)$ は加重



図5 方向指標
Fig. 5 Direction indicator.

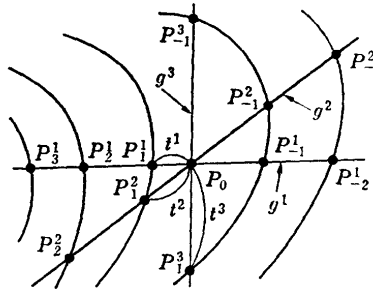


図6 高度推定法の説明図 (その1)
Fig. 6 Illustration of estimating method of elevations (Part 1).

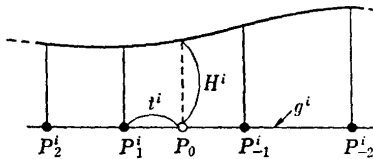


図7 曲線補間による高度の補間
Fig. 7 Elevation interpolations by curve fitting.

係数 w^i ($0 \leq w^i \leq 1$) を適当と定めることにより一般に

$$\hat{v}(P_0) = \sum_{g^i \in G} w^i \cdot H^i$$

で求めることができる。

次に加重係数 w^i の決定法について述べる。まず補間直線 g^i 上の等高線群との交点 $\dots, P_2^i, P_1^i, P_{-1}^i, P_{-2}^i, \dots$ が条件

$$\overline{P_1^i P_0} \leq \overline{P_{-1}^i P_0}$$

を満たすものとする (図7)。またこのような条件を満たすように交点を定める。いま $t^i = \overline{P_1^i P_0}$ と置くと、 g^i によって得られる点 P_0 の補間高度 H^i は一般に距離 t^i (>0) の値が小さければ小さいほど、 P_0 のもつべき真の高度に近くなるものと考えられる。そこで本稿では加重係数 w^i を次のように定める。

$$w^i = \alpha \cdot \left(\frac{1}{t^i}\right)^m \quad \text{where } \alpha = \frac{1}{\sum_{g^i \in G} \left(\frac{1}{t^i}\right)^m}$$

ここに m は $m=0, 1, 2, \dots$ なる正整数であり、 m の値が大きければ大きいほど、推定高度 $\hat{v}(P_0)$ は t^i のより小さな補間直線によって得られる補間高度に大き

く影響されることとなる。なお $m=0$ の場合、推定高度は各々の補間高度の単純平均となる。

4.2 高度推定アルゴリズムの記述

以上の準備のもとに本節では高度未知の点の高度を推定するアルゴリズムについて述べる。

いま高度未知の点 P_0 の高度を推定するものとして、諸記号を次のように定める (図 8),

S_l : 中心 P_0 、一辺の画素数が $2l+1$ ($l=1, 2, \dots$) の正方形

B_l : 正方形 S_l の辺上の画素の集合

i : 補間回数

l_{\max} : l の許容最大値

i_{\max} : i の許容最大値

P_i : $P_i \in B_l$ なる等高線構成点

g^i : P_0 と P_i とを通る直線を近似する経路 (補間直線)

$\dots, P_i, P_i, P_{i-1}, P_{i-2}, \dots$: g^i 上に存在するか、または g^i 上の点の近傍に存在する等高線構成点

H^i : データ点列 $\dots, P_i, P_i, P_{i-1}, P_{i-2}, \dots$ によって補間される P_0 の補間高度 (図 7)

G : 補間直線の集合

$\theta(g^i, g^j)$: 補間直線 g^i と g^j ($i \neq j$) との間の小さい方の交角

θ_{\min} : 上記交角の許容最小値

このとき、点 P_0 の推定高度 $\hat{v}(P_0)$ は次に示すアルゴリズムで計算される。

高度推定アルゴリズムの記述

- (1) Let $l=0$, $i=1$, and $G=\phi$ (empty set).
- (2) Let $l=l+1$. If $l > l_{\max}$, then go to (10).
- (3) Select (another) point $P_i \in B_l$. If failed, then go to (2).
- (4) Compute g^i .
- (5) If there exists a line $g \in G$ such that $\theta(g, g^i) < \theta_{\min}$, then go to (3).
- (6) Let $G = G \cup \{g^i\}$.
- (7) Get the point sequence $\dots, P_i, P_i, P_{i-1}, P_{i-2}, \dots$.
- (8) Compute the interpolated height H^i of P_0 by using the sequence.
- (9) Let $i=i+1$. If $i \leq i_{\max}$, then go to (3).
- (10) The estimate $\hat{v}(P_0)$ is now computed by the set $\{H^i\}$.

上記において、 $i' = \overline{P_i P_0}$ とするとき、ステップ (3) における点 P_i の選択は i' が小さい順に行われる。

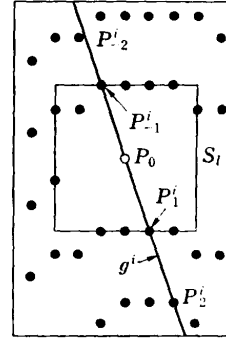


図 8 高度推定法の説明図 (その 2)

Fig. 8 Illustration of estimating method of elevations (Part 2).

また補間高度 H^i の計算 (ステップ (8)) における補間の手法 (図 7) はいくつか考えられるが、本稿では 3 次スプライン曲線による補間法を用いている。

5. 等高線接続アルゴリズム

2.2 節で述べたように、本稿で提案する等高線接続アルゴリズムは切断部の端点延長を基本原理としており、また端点延長は高度推定による連結点の選択手続きに基づいている。そこで本章ではこれらの点をもう少し具体的に論じ、しかる後に接続アルゴリズムの全体を記述する。なお以下の議論では方向指標は常に定義されるものとする。

5.1 端点延長と等高線画像の修復

切断部端点 P_0 をもつ切断等高線 $C = [\dots, P_{-1}, P_0]$ に対して、 P_0 の接続近傍 $N_a(P_0, d_0)$ (ただし、 $P_0 \xrightarrow{d_0} P_{-1}$) から一つの接続点 P を選択し、 $v(P) = h(C)$ ならしめることを P を等高線端点 P_0 に連結する、また等高線 C の端点 P_0 を延長すると言う。またこのような点 P を端点 P_0 に対する連結点と呼ぶ。 C と P の全体は再び (切断) 等高線であり、 P はその切断部端点となる。さらに $\eta(P_0) = \eta(P)$ である。

いま切断等高線 C とその切断部端点 P に対して切断等高線 C' (C' は C と同じであってもよい) とその切断部端点 P' ($P' \neq P$) が存在して、

$$h(C') = h(C) \text{ かつ } \eta(P') = -\eta(P)$$

となるとき、 C の端点 P を繰り返し延長することにより P から P' への経路が形成し得るならば、 P と P' とは接続可能であると言い、このような端点 P' を P の接続対象点と呼ぶ。またこのように端点を延長することを、 P と P' (の間の切断部) を接続すると言う。このとき、 C, C' および個々の連結点の全体は一つの等高線となる。

切断部端点が必ずしも接続対象点をもつとは限らない。例えば図1(b)で端点Pを繰り返し延長すれば、Pは定義領域周辺の上にある点P'に至る。以下では切断部の接続にはこのような場合も含める。一般に、切断部を含む等高線画像Iに対して端点延長手続きにより個々の切断部を接続することを画像Iを修復すると言う。

5.2 連結点選択手続きと高度推定誤差

点P₀を初期の切断部端点とする等高線C=[..., P₋₁, P₀]が端点延長手続きにより図9に示すように、点P_i(i>0)まで延長されてきたとする。いまP_iの接続方向をd_i、接続近傍S_iを

$$S_i = N_e(P_i, d_i) = \{P_{i+1}^1, P_{i+1}^2, P_{i+1}^3\}$$

とし(図10)、それぞれの点P_{i+1}^k ∈ S_i (k=1, 2, 3)は相対接続方向の推定高度v(P_{i+1}^k)を前章で述べた高度推定アルゴリズムにより計算する。このとき、この推定値と等高線高度h(C)との差の絶対値を

$$e(P_{i+1}^k) = |h(C) - v(P_{i+1}^k)|$$

とおき、これを高度推定誤差と呼ぶ。これにより、接続近傍S_iから選択すべき連結点P_{i+1}(点P_iの連結点)はその高度推定誤差が最小になり、かつ所与の高度が未知である点、すなわち

$$P_{i+1} = P_{i+1}^k \text{ such that } v(P_{i+1}^k) = 0, \\ \text{and } e(P_{i+1}^k) = \text{Min}_k \{e(P_{i+1}^k)\}$$

で与えられる。このような手続きを連結点選択手続きと呼ぶ。ただし、実際の連結点選択手続きにおいてはこの推定誤差にある補正係数を乗じたものが用いられる。これについては次節で述べる。

5.3 補正係数

前章の高度推定法においては、与えられた等高線画像に対して三次元的に見てその画像に含まれる等高線の全体をうまく当てはめるような滑らかな三次元曲面を求め、それによって必要な点の高度を補間しているのではなく、一点一点個別に補間直線を求めてそれにより高度を推定している。特に鞍部点のような高度変化の小さい場所においては連結点選択の信頼性が小さくなることとなり、これにより、例えば端点延長されつつある等高線が延長方向に対して振動したり、接続対象点に接続できなかったり、また場合によっては誤接続したりする可能性がある。そこでこのような難点を回避するため、それぞれの高度推定誤差に以下に述べるような補正係数を乗ずる。

直進係数 いま切断部端点をP₀とする切断等高線C=[..., P₋₂, P₋₁, P₀]が端点延長手続きを受けて点P_i

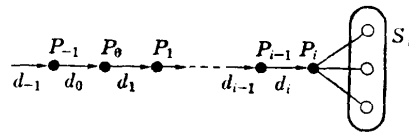


図9 連結点の選択
Fig. 9 Selection of points to be connected.

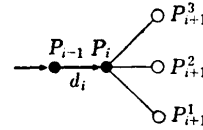


図10 接続近傍
Fig. 10 Directionally adjacent neighbors.

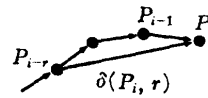


図11 r点列延長方向
Fig. 11 r-point-sequence stretching directions.

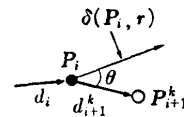


図12 直進係数
Fig. 12 Advancing coefficients.

(i>0)まで延長されたとする(図9)。このとき、図11に示すようにP_iからr(r=1, 2, ...)個遡った点P_{i-r}(P_{i-r}は端点延長される前のCの構成点、すなわちi-r ≤ 0であってもよい)から見たP_iの方向P_{i-r}→P_iをP_iのr点列延長方向と呼び、δ(P_i, r)で表す。P_iの1点列延長方向δ(P_i, 1)はP_iの接続方向d(P_i)と一致する。

■ 連結点P_{i+1}^k ∈ S_i (k=1, 2, 3, ...)に対してd_{i+1}^kをP_i→P_{i+1}^kを満たす接続方向とすると(図12)、r点列延長方向δ(P_i, r)と接続方向d_{i+1}^kとのなす角をθ、微小値をεとして

$$\beta_1(P_{i+1}^k) = (|\sin \theta| + \epsilon)^{\sigma_1}$$

を連結点P_{i+1}^kの直進係数と呼ぶ。σ₁は正の定数である(後述)。

誘導点接近係数 r点列延長方向δ(P_i, r)に対して点P_iから見て一定角度θ₀以内に存在する画素点の集合(扇形領域)をP_iの接続対象点探索領域と呼ぶ(図13)。いまそれぞれの切断部端点P₀およびP₀'が互いに接続可能であるような2つの切断等高線をそれぞれC=[..., P₋₁, P₀]およびC'=[P₀', P₁', ...]とし、

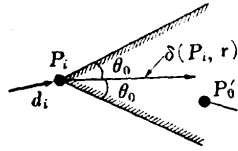


図 13 探索領域

Fig. 13 Searching domain for the end point to be connected.

C の端点 P_0 が P_i まで延長され、その接続対象点探索領域がその中に接続対象点 P'_0 を含むようになったとする (図 13)。もしこのとき P_i から P'_0 への直線近似の経路の上に P_i, P'_0 以外のどんな等高線の構成点も存在しないならば、接続対象点 P'_0 を P_i の (接続) 誘導点と呼ぶ。すなわち誘導点は端点延長の方向を自分自身に向けさせるような点である。

P_i の接続近傍 S_i 内の点 $P_{i+1}^j \in S_i$ および誘導点 P'_0 に対して $\beta_2(P_{i+1}^j)$ を

$$\beta_2(P_{i+1}^j) = \left(\frac{P_{i+1}^j P'_0}{P_i P'_0} \times 2 - 1 \right)^{\sigma_2}$$

と定義し、 P_{i+1}^j の誘導点接近係数と呼ぶ。

上記において $\beta_j(P_{i+1}^j)$ ($j=1, 2$) は $0 < \beta_j(P_{i+1}^j) < 1$ であり、その値が 0 に近いほど、それぞれ、端点延長の直進性、誘導点への接近性が強くなる。本稿ではこれら 2 つの係数を総称して高度推定誤差の補正係数と呼ぶ。

したがって、点 P_{i+1}^j に対する補正後の高度推定誤差を $\bar{e}(P_{i+1}^j)$ で表すと、

$$\bar{e}(P_{i+1}^j) = e(P_{i+1}^j) \cdot \beta_1(P_{i+1}^j) \cdot \beta_2(P_{i+1}^j)$$

となる。前節で述べた接続点選択手続きにおいてはこの値が用いられる。

なお、 σ_j ($j=1, 2$) は正の定数であり、 $\sigma_j > 1$ の場合はそれぞれの係数の表す性質を大きくし、 $\sigma_j < 1$ の場合は小さくする。

5.4 接続アルゴリズムの記述

以上の準備のもとにこの節では本稿で提案する等高線接続アルゴリズムの記述を行う。まず図 9 に示すように切断部端点 P_0 をもった等高線を $C = [\dots, P_{-2}, P_{-1}, P_0]$ とし、諸記号を次のように定める。

I : 対象とする (切断部を含んだ) 等高線画像

B_i : I の定義領域周辺上の画素点の集合

P_i : 端点延長で生ずる連結点 ($i=1, 2, \dots$)

d_i : P_i の接続方向 (ただし、 $P_{i-1} \xrightarrow{d_i} P_i$)

$\eta(P_0)$: 端点 P_0 の方向指標

S_i : P_i の d_i による接続近傍

k_i : d_i に対する d_{i+1} の相対接続方向

K_i : S_i から選択された接続点 P_{i+1} に対する相対接続方向の集合

$h(C)$: 等高線 C の高度

SELECT: 連結点選択手続き (5.2 節) により接続近傍から連結点を選択すること

以上の定義のもとに等高線接続アルゴリズムは次のように記述される。

等高線接続アルゴリズム

- (1) Search I for an unflagged endpoint.
- (2) If failed, then the algorithm will halt.
- (3) Let the point be flagged.
- (4) Let P_0 be the point, and $C = [\dots, P_{-1}, P_0]$ be the contour with P_0 as its endpoint.
- (5) Compute d_0 where $P_{-1} \xrightarrow{d_0} P_0$, and $\eta(P_0)$.
- (6) Let $i=0$.
- (7) Let $K_i = \phi$ (empty set).
- (8) Compute $S_i = N_e(P_i, d_i)$.
- (9) If there exists $P' \in S_i$ such that $P' \in B_i$, then go to (1).
- (10) If there exists $P' \in S_i$ such that, for P' , there exists contour C' with P' as its endpoint where $h(C') = h(C)$ and $\eta(P') = -\eta(P_0)$, then go to (1).
- (11) SELECT $P_{i+1} \in S_i$ such that $k_i \in K_i$ where, for $P_i \xrightarrow{d_{i+1}} P_{i+1}$, k_i satisfies $d_i \xrightarrow{k_i} d_{i+1}$.
- (12) If failed, then go to (16).
- (13) Let $K_i = K_i \cup \{k_i\}$.
- (14) Let $i=i+1$.
- (15) Go to (7).
- (16) If $i=0$, then go to (1).
- (17) Let $i=i-1$.
- (18) Go to (11).

ステップ (9), (10) において、それぞれの条件が満たされるということは端点延長が完結したことを意味し、特に (10) の場合は P_0 と P' との間の切断部が接続されたことを意味する。また (16) で $i=0$ の場合は、何らかの原因により端点延長ができなかったことを意味する。(17) は 1 つ前の点に戻り、再試行することを意味する。

6. 実験例

図 14 および図 15 に示すような、大きさ 512×512 画素の等高線画像 (切断部端点数はそれぞれ 55 個および 32 個) に対して本提案の切断部接続処理を施し

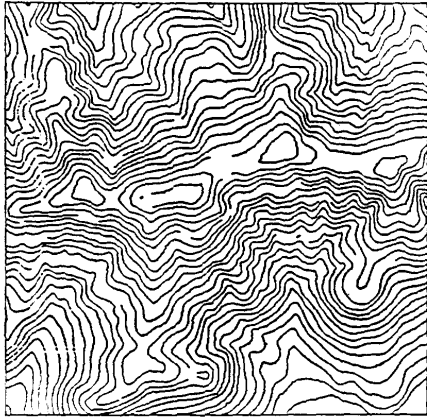


図 14 切断部を含む等高線画像 (その 1)
Fig. 14 Contour image involving cut-off portions (Part 1).

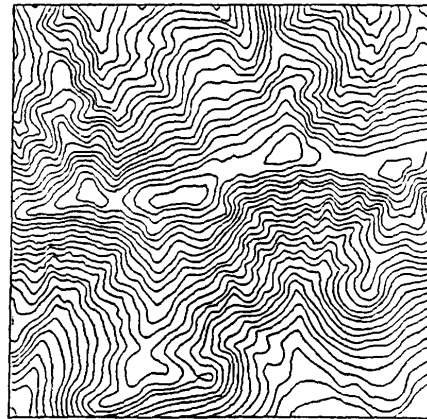


図 16 等高線画像 (図 14) の接続処理例
Fig. 16 Example of contour restorations for the contour image of Fig. 14.

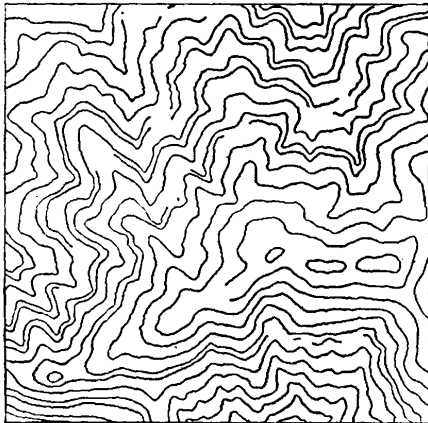


図 15 切断部を含む等高線画像 (その 2)
Fig. 15 Contour image involving cut-off portions (Part 2).

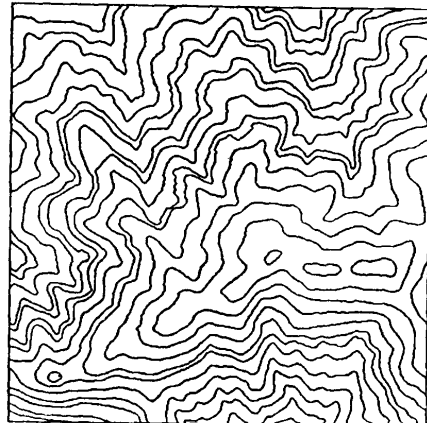


図 17 等高線画像 (図 15) の接続処理例
Fig. 17 Example of contour restorations for the contour image of Fig. 15.

たところ、それぞれ図 16 および図 17 に示すような結果が得られた。ここで前述の各制御パラメータの値は次のように定めた。

$$l_{\max}=60 \quad r=10 \quad \sigma_1=0.3 \quad \sigma=7.0$$

$$\theta_{\min}=20 \quad \theta_0=85 \quad m=3$$

この場合、高度推定における補間直線上の等高線交点列の算出に当っては P_0 を中心にそれぞれ反対側に探索する等高線交点の数を 3 個 (全体で 6 個) に固定している。ただし、探索が画像定義領域の周辺に達したときは 2 個または 1 個のみをも可としている。また、補間直線の数 i_{\max} は図 16 および図 17 ではどちらも $i_{\max}=3$ としたが、例えば $i_{\max}=2$ または $i_{\max}=4$ としたような場合もほとんど同じような結果が得られた。 $i_{\max}=1$ とした場合はいくつかの切断部が接続できなかったり、形状が不規則になったりした。したが

って、接続処理の安定性を保つため $i_{\max}=3$ とした。その他のパラメータに対してはいくつかの試行の結果、上掲の値が適当となった。

与えられた複数の画像データが等高線形状として同じような性質をもつ以上は、高度未定義点の高度推定の際に探索される補間直線およびその上の等高線交点列が相似的な類似性を持ち、したがって、等高線密度の疎密にかかわらず基本的には同じような接続処理が可能となる。このことは等高線密度の異なる上記 2 つの画像データへの本手法の適用結果からも確認できる。この場合、補間直線上の等高線交点の探索範囲は (したがって、接続処理時間は) 平均的には等高線密度の 2 乗に反比例することが想定されるが、これは図 15 の切断部単位当たりの接続処理時間が図 14 のその 1.8 倍程度となったことでも確認できる。なお、画

像メモリ上の等高線データをミニコンにより接続処理した場合の処理時間は、図14に対しては4分ほどであったが、そのほとんどは画像メモリ上の画素値の読み出し処理に費やされており、これは画像データを主記憶上にもつなり、専用画像処理装置を利用するなりして処理の高速化が図れる。

さらに、実験例からも分かるように本手法は図1のような切断部形状を含む等高線画像の修復に有効に機能することが確認された。

7. あとがき

本論文では等高線・等圧線のように数値情報(高度・気圧)をもった線図形群が切断部を含む場合の画像修復法として、それらの数値情報を用いた切断部の自動接続法を提案し、その手法を具体的等高線画像に適用したときの接続処理の実験結果を示した。本手法は高度推定に基づく切断部の端点延長を基本原理としており、実験結果からも明らかなように、広範囲にわたって複雑に切断された等高線図形を含む画像の修復が可能であり、より本来の形状に近い自然な修復画像が得られることが確認された。この意味で幾何学的位置情報にのみ基づく従来の手法の難点を解決を図るといふ所期の目的が達せられた。

一般にこの種のデータの修復アルゴリズムは、その具体的データ(切断部を含む等高線画像データ)への適用によって得られる処理結果とそれに対応する元のデータ(切断部を含まない等高線画像データ)とを比較し、修復された部分の元のデータとどれくらいの差を生じているかを調べることにより、その性能を評価することができる。しかし、等高線画像の修復アルゴリズムに対してはこの評価法は妥当ではない。いまここで図18(a)のような等高線図形を修復することを考える。この場合、本アルゴリズムの適用により同図(b)のような結果が得られたとする。しかし切断部を含まない元のデータが同図(c)であったとしても、この接続結果が間違いであるとは言えない。(b)と(c)とが逆の場合も同様である。すなわち、3.3節で述べた条件を満たす以上はどのような接続結果であったとしてもそれはそれで正しいと言える。ただし、接続された部分が常識的に見て周囲の形状と比べて非常に乱れた形状を成すことは余りないと考えられる。この点からも本接続アルゴリズムは妥当であると思われる。

ここで、アルゴリズム上検討すべき問題点として図19を考へる。同図(a)は同じ高度をもつ等高線が図

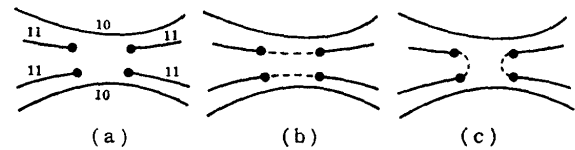


図18 等高線接続処理の多様性

Fig. 18 Versatilities of contour restorations.

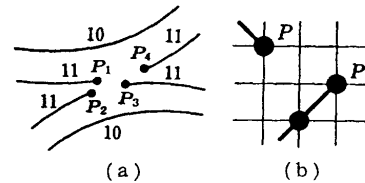


図19 アルゴリズム適用の困難な等高線の例

Fig. 19 Examples of contour lines to which the algorithm is inapplicable.

のように切断されたものである。この場合、最初に端点 P_1 の処理を行うと P_1 は P_3 と接続される可能性が大である。また、同図(b)は等高線図形が鋭く折れ曲がった部分で切断されたような場合であり、この場合は P と P' とは滑らかな8連結等高線のみで接続することは不可能となる。また、本手法を大型画像や低密度画像に適用する場合は処理時間の短縮化を考慮する必要がある。さらに、起伏の少ない平坦な地形や鞍部点では方向指標が求められなかったり、また、画像の大きさに比して密度が極めて疎なる画像の場合は等高線交点列が求められなかったりすることもありえる。

今後はこれらの問題点への対処法を検討することとしたい。

謝辞 日頃より御指導頂く NTT 研究所の杉山画像通信研究部長、米沢前画像応用研究室長、若菜主幹研究員、小杉画像処理研究室長および末永・星野両主幹研究員に深く感謝いたします。また、本研究を進めるに当たり奥平主幹研究員には等高線の前データを提供して頂き、さらにいろいろと議論を頂いた。ここに深謝の意を表します。

参考文献

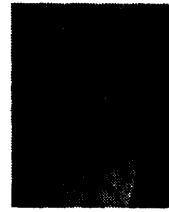
- 1) 特集Ⅱ 数値地図の現状と動向、写真測量とリモートセンシング、Vol. 24 (1985).
- 2) 金子, 森, 奥平, 三ツ矢: 国土画像情報管理実験システム—PLAINS—, テレビ学技報, IPD 71-4 (1982).
- 3) 金子, 奥平: 地形図の色分離ファイル化法, 第11回画像工学コンファレンス, pp. 155-158 (1980).
- 4) 奥平, 金子: 地形図等高線のファイル化法, 昭

- 和 56 信学会総合全大, 1079 (1981).
- 5) 湯川ほか: 天気図中の等圧線図の抽出, 昭和 56 信学会総合全大, 1075 (1981).
- 6) Agui, T. and Fukumura, T.: A Method for Extracting and Restoring of Contour Lines on a Contour Map, *Trans. IECE*, Vol. E-63, No. 6, pp. 581-587 (1980).
- 7) 谷口ほか: 天気図を対象とした等線図処理について, 昭 56 テレビ学全大, 2-2 (1981).
- 8) 東谷, 阿部: 拡散を用いた等高線の接続法, 昭 60 信学総全大, 1689 (1985).
- 9) 安居院, 伊藤, 中嶋: 等高線群に対する効率的な高度付与方法, 信学論 (D), Vol. J65-D, No. 12, pp. 1507-1512 (1982).
- 10) Rosenfeld, A. and Kak, A. C. (eds.): *Digital Picture Processing* (Second Edition, Vol. 2), Academic Press, New York and London (1982).

(昭和 61 年 5 月 20 日受付)

(昭和 62 年 3 月 25 日採録)

若山 忠雄 (正会員)



昭和 41 年愛知工業大学工学部電気工学科卒業。同年日本電信電話公社 (現, NTT) 入社。以来, NTT 電気通信研究所において, 時分割計算機スケジューリング方式の解析処理, 自然言語処理, 3次元形状解析処理, 二値画像を主対象とする画像処理などの研究に従事。昭和 61 年 4 月 NTT 技術移転(株)ソフトウェア技術開発部次長。画像処理ソフトウェアの開発に従事。電子情報通信学会会員。