局所 DTM 手法による等高線の自動編集

Automatic compilation of contour lines
by Local DTM method

浦部ぼくろう*

Bokuro URABE

Abstract : A raw manuscript directly plotted by stereo plotter contains many mistakes and failures which should be edited and compiled manually. In the case of contour lines, editing process takes long time and needs high skills.

Now analytical plotters and analogue plotters equipped with digital encoders became available and thus digital contour line data can be obtained, and an automatic method to compile digital contour lines has been studied.

Compilation of contour lines is a kind of smoothing of the surface plane expressed by contour lines. Therefore, simple curved surface (named Local DTM, DTM=digital terrain model) is calculated to represent the local terrain within the neighborhood of the concerned point on a contour line. Then the point is to be moved horizontally so that the point is dropped on the computed surface.

Local DTM of the neighboring points are so strongly correlated to each other that we can obtain smooth contour lines consist of the moved points.

1. はじめに

図化機を用いて描画される図化素図は、作業者の熟練度や空中写真の写り具合など様々な要因による不整合や粗雑箇所を多く含んでおり、ほとんどの場合図化の後の編集の工程で修正を施さなければ最終的な地図とすることはできない。この編集作業は、特に描画する量の膨大な等高線については多大な時間と熟練を要した。

解析図化機が普及してきた今日においても編集作業が必要である事情は変わらないが、図化素図データを座標列の数値データとして計算機により取得できるようになったため、編集処理を直接座標データに対して行うことが可能となった。ワークステーション等による対話処理、数値計算による一括処理双方の面から様々な研究がなされ、技術が実用化されようとしている。

等高線データの編集を対話的に行うと、通常多大な編集時間を要するため実用的ではない。等高線同士の交差・接触などの不良箇所が一般に大量な上に、多くの場合それらの修正は局部的なものでは済まず、広域にわたってデータを描き直す必要があるためである。またデータ取得の際の不規則な画線や歪雑部分を平滑にする処理も非常に手間がかかる。平滑化処理を個々の等高線を対象に機械的に施すだけでは表わされる全体の地形が平滑になるとは限らない。

このように等高線を平面上の図形として処理するのは困難が多い。そこで、描かれた等高線から平滑な地表面を類推しその面に沿って等高線を描き直すという編集の本来のプロセスを、コンピュータ処理によって実現する方法を模索した。その成果は等高線データの各点の近隣にある座標観測点から局所的な地形モデルを計算する方法であり、この地形モデルを局所 DTM (DTM=Digital Terrain Model) と呼ぶ。

2. 編集のプロセス

図化とは、航空写真に撮られた地形を図化機を用い

* 建設省国土地理院測図部写真測量技術開発室
「写真測量とリモートセンシング」Vol. 30, No. 1, 1991

表1 マニュアル編集と局所 DTM 編集の対比

	マニュアル編集	局所 D T M 編集
観測データ	図化素図	座標データファイル
地形モデル	推測による地形のイメージ	局所 D T M (低次の曲面式)
データの補正	フリーハンドで修正しながら再描画	観測データの補正量を計算により求める

て観測することである。このとき得られる観測データは、アナログ図化機による図化の場合は図化素図としてのみ得られるのに対し、解析図化機による図化の場合は同時に座標数値リストのコンピュータファイルとして得ることができる。観測は常に誤差を伴う。等高線の図化の場合には地表の平面位置と標高が同時に観測され、その双方に誤差が含まれる。これらの誤差が図化素図上の等高線の歪みや交差などを生じるのである。

編集とは図化の際のこうした誤差を補正し、観測データを実際の地形に合わせることである。等高線の編集を手作業で行なう工程を分析すると、作業者はまず図化素図の中のある小さな部分に着目し、その範囲の等高線から局所的な地形を想像する。次にその想像した地形に合わせて等高線を描き直して行くのである。

本研究の局所 DTM による手法は、この編集の工程を数値図化データとコンピュータ処理によって行なうものである。ここでは想像による地形モデルの代わりに、等高線を構成する各点の周囲における局所的な DTM を計算により求める。そうした上で、各点をこの局所 DTM 上に合致させることによって各点の持つ平面位置および高さの観測誤差を補正する。こうして一点一点を移動して行くことにより、等高線全体が新しく描き直される。(表①)

3. 局所 DTM 手法についての基本理論

① 局所 DTM の概念

図化機で計測された標高 z の等高線の座標点列 $(x_i,$

$y_i)$ は、その構成点各々の平面座標における標高の観測と見なせる。各構成点を中心にな一定範囲の観測を集め、最小自乗法により曲面 $z=F(x, y)$ で表わされる局所 DTM を計算する。各点の局所 DTM は、隣接する点のそれと較べて連続的に変化するので、全体としてなめらかな曲面が生成される。こうして得られた曲面に対して等高線を描き直すことにより、全体を数学的整合のとれたものにすることができると考えられる。実際の処理では、作成した DTM 上に元の点を移動することによって等高線を描きなおしている。

② 局所 DTM の係数の算出

点 $A(x_0, y_0, z_0)$ の周囲に半径 r の近傍円を設定したとき、その中に n 個の観測点が含まれていたとする(図①)。これらの観測を最小自乗法にあてはめ、最もよく近似する DTM の曲面式を算出する。なお DTM 計算に用いる点の観測値は、予め点 A を原点とする相対座標に変換しておく。

図1 点 A 近傍の観測点の収集

[局所 DTM の形式]

点 A の局所 DTM は、高さを平面位置の関数とする
方程式

$z=F(x,y) \cdots \cdots \cdots (3.1)$

で表わされる。例えば 1 次, 2 次, 3 次の一般曲面式
はそれぞれ

$z=a+bx+cy \cdots \cdots \cdots (3.2)$

$z=a+bx+cy+dx^2+exy+fy^2 \cdots \cdots \cdots (3.3)$

$z=a+bx+cy+dx^2+exy+fy^2+gx^3+hx^2y+ixy^2+jy^3 \cdots \cdots \cdots (3.4)$

となる。以下この章では上の 2 次式 (式 3.3) をもちいて説明する。

[観測方程式]

近傍円内の n 個の点の相対座標データ (x_i, y_i, z_i)_{i=1,n} をそれぞれその平面位置における標高の観測とし、求める DTM に対する観測標高の補正を v_i とすると、式 (3.3) について次の観測方程式が立てられる。

$$\begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & x_1^2 & x_1y_1 & y_1^2 \\ 1 & x_2 & y_2 & x_2^2 & x_2y_2 & y_2^2 \\ & & & \vdots & & \\ 1 & x_n & y_n & x_n^2 & x_ny_n & y_n^2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \\ f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_n \end{bmatrix}$$

これを $L \cdot X = C + V \cdots \cdots (3.5)$

$L \cdot X = C + V \cdots \cdots (3.6)$

と表わす。

[観測の重み]

集められた n 個の観測の各々の重みは点 A からの距離に相関すると考えるべきである。すなわち点 A 近傍での DTM は点 A に近い点からより多くの影響を受

図 2 点 A から観測点までの距離と観測の重み

けるはずである。重みの設定について、距離にしたがって適度に重みを漸減する関数として選択の結果

$p_i = \exp\{- (D_i/D_0)^2\} \cdots \cdots \cdots (3.7)$

ここに D₀ : 重み基準半径

$D_i = (x_i^2 + y_i^2)^{1/2}$

を用いることにした。式 (3.7) で設定される重みは図 ② のようになる。

[正規方程式]

正規方程式は式 (3.6), (3.7) より

$SX = K \cdots \cdots \cdots (3.8)$

ここに S = L^TPL

$K = L^T P C$

$$P = \begin{bmatrix} p_1 & & 0 \\ & p_2 & \\ & & \vdots \\ 0 & & & p_n \end{bmatrix}$$

となる。求める DTM の係数はこれを解いて、

$X = S^{-1}K \cdots \cdots \cdots (3.9)$

実際の計算処理では、S の各要素に観測座標値を直接代入しコレスキー法による逆行列計算によって未知量 a ~ f を計算している。

③ 点 A の座標の修正

こうした DTM 計算をもとに、今度は点 A の座標を求められた DTM に合わせて修正しなければならない。点 A の座標を DTM 表面の観測とし、平面位置・高さ双方に誤差を持つと考えると、「座標補正後の点 A が求めた DTM 上にある」という条件を定めて座標値の補正量を求めることができる。すなわち点 A の座標観測の高さと平面位置各々に重みを設定した条件方程式を立て、各々の最適な補正量を算出するが、点 A は移動後も等高線を表わさねばならないので、実際の補正は平面位置についてのみ行うものとする。また作成

図 3 点 A の座標の修正

された DTM そのものの精度が低い場合、点 A を完全にその面上に移動するのは適当でない。そこで DTM の作成精度を考慮して条件方程式に組み入れ、DTM の係数も補正する必要がある (図③)。

[点 A の観測及び局所 DTM の精度]

4 万分の 1 の空中写真を用いた等高線の座標観測の標準偏差は、経験的に平面位置に関して $\sigma_v = 5 \text{ m}$ 、高さに関して $\sigma_h = 2 \text{ m}$ 程度と推定されるが、実際には図化者の熟練度など不確定な要素を考慮しなければならない。また居所 DTM の作成精度を的確に求めるのは難しいが、ここでは DTM 計算に用いた観測点と求められた DTM との標高差の標準偏差 (σ_{DTM}) を計算し、代用することにした。

[条件方程式]

点 A において生成された DTM が

$$z = F(x, y) = a + bx + cy + dx^2 + exy + fy^2 \quad \dots (3.10)$$

であったとすると、仮に点 A がこの面上にあるとすれば $z_0 - F(x_0, y_0) = 0$ を満たすはずである。実際にはそうならないため条件方程式を立てて点 A の座標 (x_0, y_0, z_0) と DTM の係数を補正する (ただし相対座標になっているので実際には $(x_0, y_0, z_0) = (0, 0, 0)$)。ここで DTM については z 方向の平行移動量 (係数 a) のみ補正するものとする。

補正後の a, x_0, y_0, z_0 の値を Ma, Mx_0, My_0, Mz_0 とし、各々の補正量を $\Delta a, \Delta x_0, \Delta y_0, \Delta z_0$ とすると、条件方程式は

$$Mz_0 - Ma - b \cdot Mx_0 - c \cdot My_0 - d \cdot Mx_0^2 - e \cdot Mx_0 My_0 - f \cdot My_0^2 = 0 \quad \dots (3.11)$$

である。これに $Ma = a + \Delta a, Mx_0 = x_0 + \Delta x_0, My_0 = y_0 + \Delta y_0, Mz_0 = z_0 + \Delta z_0$ を代入し、

$$\begin{aligned} & z_0 + \Delta z_0 - (a + \Delta a) - b(x_0 + \Delta x_0) - c(y_0 + \Delta y_0) - d(x_0 + \Delta x_0)^2 \\ & - e(x_0 + \Delta x_0)(y_0 + \Delta y_0) - f(y_0 + \Delta y_0)^2 = 0 \end{aligned} \quad \dots (3.12)$$

$\Delta a, \Delta x_0, \Delta y_0, \Delta z_0$ は

$$[p \Delta \Delta] = p_a (\Delta a)^2 + p_{x_0} (\Delta x_0)^2 + p_{y_0} (\Delta y_0)^2 + p_{z_0} (\Delta z_0)^2 = \min. \quad \dots (3.13)$$

ここに $p_a = (1/\sigma_{\text{DTM}})^2, p_{x_0} = p_{y_0} = (1/\sigma_v)^2,$

$$p_{z_0} = (1/\sigma_h)^2$$

$$\sigma_{\text{DTM}} = [\Sigma \{z_i - F(x_i, y_i)\}^2 / n]^{1/2}$$

を満たす量である。これを解くと、

$$\begin{aligned} \Delta x_0 &= -\{a \cdot b \cdot \sigma_v^2\} / \{(b^2 + c^2) \cdot \sigma_v^2 + \sigma_h^2 + \sigma_{\text{DTM}}^2\} \\ \Delta y_0 &= -\{a \cdot c \cdot \sigma_v^2\} / \{(b^2 + c^2) \cdot \sigma_v^2 + \sigma_h^2 + \sigma_{\text{DTM}}^2\} \\ \Delta z_0 &= a \cdot \sigma_v^2 / \{(b^2 + c^2) \cdot \sigma_v^2 + \sigma_h^2 + \sigma_{\text{DTM}}^2\} \end{aligned} \quad \dots (3.14)$$

となる。この後点 A の座標を式 (3.15) によって修正し、次の点の計算に移る。

$$(x, y, z)_{\text{new}} = (x, y, z)_{\text{old}} + (\Delta x_0, \Delta y_0, 0) \quad \dots (3.15)$$

4. プログラミング上の考慮点

① 観測点の集め方

地表面標高の観測としてみた場合、等高線データは必ずしも均等には分布していない。点 A の近傍の観測を集める際、単純に近い順に一定数の観測を集めると観測の分布が大きく偏る恐れがある。そのため近傍円を 8 方向に分割した上で各方面から均等に近い点を採用し、一定数の観測を集める方法をとった。このとき 3 方向連続して一つも点が見つからなかった場合は、分布の偏りによる DTM の精度低下が大きいと考えられるためこの点の修正は行わない。また集められた点の合計数が少なすぎる場合も精度が悪くなるので、局所 DTM 計算に必要な最小点数を正規方程式数の 2 倍 (2 次式では 12 点) とした。

② イテレーション

1 回目の計算時に作成される局所 DTM は精度が低く、十分平滑な地形を表わさない。また式 (3.14) の σ_{DTM} に影響して修正度が小さくなることも考えられる。そこで修正後の座標値を新たに観測値に置き換えて全点での処理を反復する必要がある。ただし 2 回目以降の場合でも、修正後の座標値は局所 DTM 計算にのみ用い、その新しい局所 DTM への点 A の移動量は常に最初の観測値を基準に計算する。これは作成される DTM が極端に元の位置からずれていかないうにするためである。

5. 実験の経過

実際の計算では様々な条件を設定する必要があり、その多くは理論的な最適値を見つけることが困難である。本研究では結果に影響を及ぼすと想定される条件

を様々な組合せで用いて実験を行い、編集の意義である「目でみて美しく、図化素図に忠実な地形表現」を判断基準として、最適な値を追求していった。

① 実験データ（図④）

使用した等高線データは1/40,000の空中写真から解析図化機により図化された1/25,000の図化素図データで、図化範囲約2 km×2 km、等高線間隔は10mである。データ取得後、等高線の途切れの接続やゴミ処理などの基本的な手入れをし、パイプライン処理によって微小な屈曲を削除した上で、ストリング構成点を10 m（図上0.4mm）あるいは5 m（同0.2mm）間隔に均密挿入したものを実験データとした。データ量は等高線数で80本、構成点数で挿入密度10mの場合約20,500点、5 mの場合約38,000点である。

図4 実験データ

② 種々の設定条件による結果の比較（表②）

局所DTM計算による調整を行う際の主要な条件は以下のとおりである。これらの条件の組合せは無数にあり、相関するものも多い。ここでは各項目ごとの影響のしかたを調べるために、比較的良好な結果を得られた設定条件の組合せを標準とし、項目別に設定値を変えて計算した結果を示す。

[イ. 局所DTM計算時の観測方程式]

地形を近似する曲面式の次数が1次、2次、3次の各条件で計算する。次数が高いほど自由度が大きく、より観測に忠実なDTMとなるが修正される度合は小さくなる。逆に1次式では強引に平面的な修正が行われる。

[ロ. 局所DTM計算における観測の重み]

点Aからの距離により観測に重みをつけるが、この際の式(3.7)における重み基準半径(Do)を変化させる。半径が大きいかほど修正量に影響を及ぼす観測の範囲が広がり、地形はより連続的に緩やかな（いわゆる平板測量的な）表現となる。

[ハ. 局所DTM半径]

局所DTMを計算するときに観測を集める範囲(r)である。半径が小さいほど中に含まれる観測点数が減り、等高線の疎らな箇所では3—①に示した条件により修正されない点が多くなる。また半径を大きくすると計算時間が長くなる。

[ニ. 座標観測の標準偏差]

平面位置と標高の各々の観測の標準偏差を設定する。観測の標準偏差が大きいかほど、また平面位置観測の標高観測に対する相対精度が小さいほど修正される度合は大きくなる。

[ホ. 局所DTMの作成精度の考慮の有無]

点Aの座標補正量計算において、2—③で述べたDTM作成時の標準偏差を、条件方程式に組み入れた場合とそうでない場合について実験する。

表2 各ケースの設定項目とその設定値

項目	標準値	ケース	設定値
(イ)	2次式	① ②	3次式 1次式
(ロ)	50m	③ ④	25m 100m
(ハ)	50m	⑤	100m
(ニ)	$\sigma_v=5m/$ $\sigma_h=2m$	⑥ ⑦	$\sigma_v=1m/\sigma_h=1m$ $\sigma_v=5m/\sigma_h=1m$
(ホ)	考慮する	⑧	考慮しない
(ヘ)	10m	⑨	5m
(ト)	3	⑩ ⑪	5 1

図5 各ケースの実験結果(「」1 km, 右下は2倍拡大図)

[へ、等高線の構成点列の点密度]

5—①で述べた構成点の挿入密度である。密度が高ければ局所 DTM 計算時の観測数が多くなり、また修正後の等高線がよりきめ細かく描ける。ただし地形の表現は図上0.4mm のもので十分であり、計算時間も短くてすむ。

[ト、イテレーション回数]

通常のデータから作成する局所 DTM はおよそ 3 回の反復処理で安定し、それ以降の移動量はごく微小であるが、極端に図化データの不良なところや複雑な地形は平滑になるのにより多くの反復計算を要する。

6. 実験結果

5—②の各ケースの処理結果を図⑤に示す。計算所要時間は各ケースとも概ね2.5～4時間(ケース⑨のみ7時間)であった。(計算機 DEC 社 VAX8350, CPUtime)

7. 結 論

標準の条件設定での計算結果は適度に均質化・平滑化が施されており、地形図原図として使用するのに十分な美しさをもっている。また図化素図の地形の特徴を損なわず、手作業での編集結果を想定してもそれと違和感のない表現となっている。このことから、適切な条件設定による計算結果は編集成果として十分良好であり、手作業での編集の作業量を考えると計算機の一括処理によるこの方式は十分価値が高いと結論できる。この研究成果を踏まえて、国土地理院では既にこの手法による編集を実作業で行っている。そのほか各設定条件での実験から、以下のようなことが言える。

- ・地形を近似する曲面は 1 次式の場合は谷奥など大きな変曲をうまく調整できず、3 次式の場合は調整後も不均質さが残る。
- ・観測精度の設定は修正の度合に特に大きく影響

し、平面位置と標高の観測の標準偏差を共に 1 m と小さくしたケース⑥の設定ではほとんど観測のままの等高線となり、平面位置観測に標高観測の 5 倍の 5 m の標準偏差を設定したケース⑦では極端に修正され、平板な地形表現となっている。

- ・局所 DTM の計算に用いる観測点の範囲は、25m から100mの間ではほぼ同様の結果が得られる。
- ・イテレーションの回数が増えるほど地形は平板になって行くが、3 回目以降の変化はごく微小である。

8. 課 題

結果として得られた等高線は概ね良好であるが、全般に以下のような傾向がある。

- ・図化素図と比べて尾根が若干膨らみ、谷が狭まる。また谷の最奥部がかなり鋭角的になる。
- ・山の頂上の位置が計算時に図化素図と対応づけられていないため、等高線から推測される頂上の位置が幾分移動する場合がある。
- ・実際の観測では同一等高線の連続した点は相関をもつが、計算時は相関を考慮していないため、各点は各々求められた DTM 上に前後の点とのつながりを無視して移動する。このため点列が等高線方向に整列しない場合がある。

この手法は現行の編集製図作業と同等な成果を簡便に得られることを目的として開発された。このため研究の主眼は処理結果の質におかれ、実際の処理が図化素図のどういう箇所をどのように修正しているのかは曖昧である。今後は上記の課題の解決のためにも、局所 DTM 手法の意味を理論的に裏付けする必要がある。また、現在地形図一面約50時間かかっている処理時間の短縮も重要な課題である。さらに、今回は各ケースの実験結果を見た目の美しさを基準に判定したが、処理の良否を定量的に比較する方法が必要である。