局所平滑化フィルタリングによる コンター／グリッド変換

A Contour / Grid Conversion Method by Using Local Smoothing Filter

李 在淵*, 福江 潔也*, 下田 陽久*, 坂田 俊文*

Jaeyeon LEE, Kiyonari FUKUE, Haruhisa SHIMODA, Toshibumi SAKATA

Abstract : A new contour/grid conversion method is proposed which is based on smoothing filter. By applying the smoothing filter to the contour image repeatedly, the image is gradually changed to target grid data.

The implementation of this algorithm is extremely simple, because the algorithm only requires 3×3 masking operation. Also, the proposed method can be applied to contour image with cut lines. This feature is important in reducing the work burden because generating a complete contour image automatically is almost impossible and generally requires much efforts for experienced human operator.

To compare the performance of the proposed method with previously reported methods, several algorithms which satisfy the simple implementation condition is actually implemented. In the experiment, the proposed algorithm showed best performance in maximum error. Also, it was most stable for contours with cut lines. Even though the result for average error was not the best, the error was 71cm for contours with 10m elevation interval, which is thought to be sufficient for practical use in many applications.

1. はじめに

地形図の等高線や天気図の等圧線などで見られるように、コンターは2次元の平面上に3次元の情報を表す有効な手段であり、多くの分野で多用されている。しかし、コンピュータでこれらの情報を活用するには、コンターの形態ではなく、各々の点が3次元の値を持つグリッド形態のデータが必要とされる場合が多い。そこでコンター形態のデータをグリッド形態のデータに変換する必要性が生じる。

一般にコンターからグリッド形態のデータを生成する手法については、その利用価値が大きいこともあって、従来多くの研究がなされている^{1)~15)}。2次元から3次元を復元する問題は、いわゆる ill-posed な問題として認識されており、理論的には解が一意に定まらない¹⁶⁾。このため、いかに効率よく解を求めるかという

解法の側面ではなく、実用性の観点から、得られる結果の精度や利用のしやすさなどの側面が重要となる。このような観点から従来提案されている手法を概観すると、精度がよいものは概してアルゴリズムが複雑で、インプリメントが困難という問題点を持っている。この困難さの故に実際にグリッド形態のデータが必要であってもすぐには使えないという場面も少なくない。一方インプリメントが容易なものは、変換精度が低く、実利用上問題が発生することが多い。また、コンター／グリッド変換の必要性が生じる場面を考えてみると、数枚から十数枚程度の比較的少量のコンター図を対象とする場合も多い（このような場合は、処理速度はあまり重要な問題とはならない）。さらに、開発途上国などでは（筆者自身もそうであるが）、パーソナルコンピュータ（PC）上でとにかく手軽にコンター／グリッド変換を行いたいというニーズも強い。なお、地形図の等高線のようなコンター図の場合は、主に紙に描かれた地図から抽出されるが、抽出された等高線の復元などはまだ完全に自動化されておらず、多大な作業負担を強いられているのが現状である^{2),17),18)}。

* 東海大学情報技術センター

「写真測量とリモートセンシング」Vol. 34, No. 3, 1995

そこで、本研究ではコンターとしてとりあえず等高線を念頭に、まず第1に簡単にインプリメントできること、第2に比較的良好な精度を保てること、第3にパーソナルコンピュータのような計算機環境でも充分実行可能なこと、第4に対象とするコンターが完全な閉曲線に復元されていなくても適用できること、の4点を満足するコンター／グリッド変換アルゴリズムの開発を目標とした。これはこのような変換アルゴリズムであれば、小規模のプロジェクトや研究においてコンター／グリッド変換が必要になった際に、技術者や研究者が比較的手軽に利用できるのではないかと考えたからである。

従来手法において最も頻繁に見られる問題点は、局所的な不連続性の問題である。特にコンターの間隔や配置が不規則な部分でこの現象は多く見られ、アルゴリズムによっては不自然な線状の段差ができてしまう場合もある。このような問題は、コンター上の点(補間基準点)が持っている3次元の情報が補間対象のグリッド点における補間に対して、空間的に不連続に影響を与えていることに起因していると思われる。

そこで、筆者らは各々の補間対象点から補間基準点の探索を行うかわりに、コンターそのものをユークリッド距離変換¹⁹⁾によって伝播させることで3次元情報の伝播が空間的に滑らかに行われるようにする手法を考案し、すでに報告している¹⁰⁾。しかし、この手法は、伝播されるコンター情報の保持のため多量のメモリを消費するという欠点を持っている。これはワークステーションレベルのコンピュータにおいてはさほど問題にならないが、一般に搭載されているメモリの量が少ないPCレベルのコンピュータにおいては、実用上深刻な問題を引き起こしてしまう。また、一般に原図(地形図など)からコンターを抽出することから始まる一連の処理には、オペレータとの対話的作業を必要とするものが多く含まれており、このような場合、高価なワークステーションでしか処理できないということは小規模のプロジェクトにおいてはかなりの負担要因になると思われる。そこで、ここでは3次元情報を空間的に滑らかに伝播させる新しい手法として、局所平滑化フィルタリングの反復処理によるコンター／グリッド変換手法を提案する。平滑化はノイズ除去などの目的で画像処理分野で広く用いられている手法であり、この処理を施すことで画像はスムーズになることが知られている²⁰⁾。同様の処理を輝度値ではなく標

高値に対して行うことで空間的にスムーズなグリッドデータを生成できるのではないかとというのが基本的なアイデアである。

この手法は3×3画素の局所フィルタリングで行うことができる平滑化処理のみで構成されているためそのアルゴリズムは極めて単純であり、また平滑化の特性からコンターが断線していても安定した結果が期待できる。しかも、多くのメモリを必要とするようなことは原理的になく、PCレベルのコンピュータでも充分に実行できると思われる。

なお、提案する手法を評価するために簡単な比較実験を行った。この比較実験は、すでに論文などで報告されており、そのアルゴリズムが既知であるものの中から、インプリメントが比較的容易という本研究目的の条件の1つを満たすものを選択し、実際にそれをインプリメントして行った。対象としたコンター／グリッド変換手法は、ユークリッド距離変換による手法¹⁰⁾、8方向の探索を用いる単純化された最急勾配法¹⁸⁾、x,y方向のスプライン曲線によって補間する手法²⁾、ローパスフィルタリングによる手法⁴⁾の4種類である。

2. 基本的な考え方

提案する局所平滑化フィルタリングの反復処理によるコンター／グリッド変換と類似した考え方として、コンター間の領域を各々の標高値で塗りつぶしていわゆるボール箱モデル(コンターに沿ってボール紙を切り、それを重ねて作られる地形模型)を作り、空間周波数領域でローパスフィルタをかける手法が報告されている⁴⁾。これは空間周波数領域において平滑化を行うことを意味している。しかし、このように空間周波数領域でローパスフィルタリングを行う場合は、最も信頼できるはずのコンター上の点(既に標高が得られている点)も他の補間対象の点とまったく同様に取り扱われ、結果としてコンター上の点の標高も変わってしまい、全体的にスムーズにはなるが精度面においてはあまり良い結果が期待できない。また、フィルタの遮断周波数やフィルタ形状などによってその結果は大きく変わり、実務上フィルタの設計が困難である。

本研究では、このような側面を考慮し、空間周波数領域ではなく画像空間領域でのローパスフィルタリングを行う。画像空間領域では当然画素ごとの細かな制

御ができるため、コンター上の点に対しては平滑化処理を行わず標高を固定させることができ、コンター上の標高値をまわりに向けて一方的に伝播させることができる。

平滑化によるコンター／グリッド変換手法の基本的な考え方を説明するため、図1に例を示す。図1では簡単のため1次元のデータを用いているが、もちろん実際には2次元の画像データに適用する。図1の点Aと点Bがコンター上の点、その間のP1,P2,P3が補間対象の点とし、A点とB点の初期値はコンターに与えられる標高を、また点P1～P3については、任意の値が初期値として与えられているものとする。提案する手法では、これらのデータに対して平滑化を反復的に施すが、コンター上の点である点Aと点Bについては元の値（コンターに与えられている標高）を保持させる。すなわち、(n+1)回目の反復処理では、各点は次に示すような値Zを持つようになる。

$$\begin{aligned} Z_A(n+1) &= Z_A(n) \\ Z_B(n+1) &= Z_B(n) \\ Z_{P1}(n+1) &= (Z_A(n) + Z_{P1}(n) + Z_{P2}(n)) / 3 \\ Z_{P2}(n+1) &= (Z_{P1}(n) + Z_{P2}(n) + Z_{P3}(n)) / 3 \\ Z_{P3}(n+1) &= (Z_{P2}(n) + Z_{P3}(n) + Z_B(n)) / 3 \end{aligned}$$

ここで、 Z_A 、 Z_B はそれぞれ点Aと点Bの標高、 Z_{Pi} は点 P_i の標高である。なお、 $Z_i(n)$ は点 i に対するn回目の平滑化を施した結果得られる標高である。この処理を Z_{Pi} の値が変化しなくなるまで繰り返すことによって Z_{Pi} は Z_A と Z_B の間をスムーズに補間した値を持つようになる。

表1に初期値として $Z_A=30$ 、 $Z_B=40$ 、その間の Z_{Pi} が全て0であった場合、上記の平滑化を繰り返すことによって得られる Z_{Pi} の変化を示す。反復回数が43回になったところで補間値は均衡状態に入っていることがわかる。図1中の点線は、この最終結果を示したものである。なお、表1では Z_{Pi} の初期値を0にしてあ

図1 平滑化による補間法

表1 平滑化による補間の例

回数	Z_A	Z_{P1}	Z_{P2}	Z_{P3}	Z_B
0	30.00	0.00	0.00	0.00	40.00
5	30.00	22.43	20.74	27.41	40.00
10	30.00	29.10	30.19	34.10	40.00
15	30.00	31.35	33.38	36.35	40.00
20	30.00	32.11	34.45	37.11	40.00
25	30.00	32.37	34.82	37.37	40.00
30	30.00	32.46	34.94	37.46	40.00
35	30.00	32.49	34.98	37.49	40.00
40	30.00	32.49	34.99	37.49	40.00
42	30.00	32.50	35.00	37.50	40.00
43	30.00	32.50	35.00	37.50	40.00

るが、実際には任意の値であっても収束の早さが変わるだけで得られる最終結果は同じである。また、浮動小数点の値を用いている理由は、整数演算で生じる打ち切り誤差によって標高の伝播が止まってしまうことがあるためである。

この処理を2次元に拡張すれば一般に画像処理分野で知られている平滑化処理になるが、提案する手法における平滑化はその平滑化といくつかの点において異なるので、次にそれを記しておく。

- (1) コンター上の点に対しては平滑化を行わない。
- コンター図をグリッドデータに変換する際、最も信頼できるのは既に値が知られているコンター上の点の値である。従って、コンター上の点の標高は周囲に影響を与えるが、それ自身が変わるべきではない。
- (2) 平滑化フィルタ中でコンターで隔離されている点は平滑化の対象から外す。

これはコンターが8連結である場合生じる問題を回避するためのものである。たとえば、図2に示す画素P0に対して3×3画素の局所平滑化フィルタを適用する場合を考える。同図で黒く示されている画素はコンター上の点とする。通常の3×3画素の局所平滑化フィルタを適用すれば、当然P4も平均を求める対象に入ってしまう。しかし、P4はコンターによってP0から隔離されており、P4は図中に示す領域Aに、P0は領域Bに属する画素である。このような場合、P4がP0の値に影響を与えることは、P4の値が領域Bに伝播されることを意味し、望ましくない。従って、P4を

図2 8近傍に関する考慮

除いてそれ以外の8画素から平均を求めるようにする。

(3)画像の周縁部では、 3×3 画素の局所平滑化フィルタが画像と重なる部分に対して平均を求める。

3×3 画素の局所平滑化フィルタリングでは、画像の周縁部の1画素に対してフィルタをかけることができない(図3に示す黒い部分と斜線の部分)。このような場合、一般的な平滑化処理では原画像の値をそのまま用いる場合が多い。しかし、本手法においては平滑化は反復され、それぞれの値が広範囲に波及されてゆくため、周縁部の画素に対する処理を省略すれば、その画素の値がおかしくなるばかりでなく、その付近の画素の値にも大きな影響を与えてしまう。したがって、画像の4隅(図3の黒い部分)に対しては 3×3 画素の局所平滑化フィルタと画像が重なる4画素の平均を平滑化の結果とし、それ以外の周縁部(図3の斜線部分)に対しては同じく 3×3 画素の局所平滑化フィ

N : 画素数/ライン
M : 画像のライン数

図3 周縁部における平滑化

ルタと重なる6画素の平均を平滑化の結果とする。

(4)平滑化処理は浮動小数点演算で行う。

本手法は全画像データ(標高)が均衡状態になるまで、すなわち、各画素の値が変化しなくなるまで平滑化を繰り返すが、整数演算では打ち切り誤差によって実際に均衡状態に達していなくても均衡状態に達したかのように振る舞う場合がある。例えば、表1に示した演算を整数で行うと表2のような結果となり、明らかに真の均衡状態に達する前に変化が検出できなくなり、値の伝播が止まってしまうことがわかる。このような問題を避けるためには浮動小数点で演算を行うことが必要である。

ただし、コンターの標高の範囲がそれほど広くない場合は、予め一定の整数をかけてから処理を行うことで、整数で演算を行っても実質的に打ち切り誤差の影響を低くすることができる。たとえば、予めすべての点の値を100倍してから演算を行えば整数演算でも0.01までの精度で処理を行うことと等価である。

なお、地形図の等高線には山頂部や窪地などの閉ループが存在するが、本手法では、それらの閉ループ内領域は一定値となってしまう。これを回避する方法も考えられるが、追加処理が必要になるので、ここでは手法の簡潔さを優先し、上記の基本的な考え方をそのまま適用することとする。

3. 処理の流れ

本手法の処理の流れは、図4に示すようににデータの初期化と変化する画素がなくなるまで繰り返される平滑化のみで構成される単純なものである。次にインプリメントの詳細について述べる。

提案する手法は基本的にライン単位の処理を行っており、インプリメントするための必要最小限のメモリ

表2 整数による補間の例

回数	Z_A	Z_{P1}	Z_{P2}	Z_{P3}	Z_B
0	30	0	0	0	40
5	30	22	21	27	40
10	30	29	30	34	40
14	30	31	33	36	40
15	30	31	33	36	40

図4 平滑化によるコンター／グリッド変換の流れ

は、入力コンター図用の3ラインのバッファC、グリッドデータ用の3ラインのバッファGおよびファイル出力用の1ライン分のバッファOである。ここで、Cは整数型、GとOは浮動小数点型の配列を用いる。

(1) 初期化処理

平滑化の反復処理を行う前に、コンター画像ファイルの内容をグリッド画像ファイルにコピーする。入力データであるコンター画像は、コンター上の点においては標高、それ以外の点においては0の値を持つものとする。グリッド画像はコンター画像と同じサイズの画像であるが、上述した演算の精度の問題から浮動小数点型を用いる。この初期化により、グリッド画像ファイルもコンター上の点においては標高、それ以外の点においては0の値を持つようになる。

なお、0ではなく、できるだけ真の値に近い値で初期化した方が後述する反復処理の収束がより早くなり実務的には好ましい。その場合の簡単な方法としては次のような初期化方法があげられる。

たとえば、コンター画像データをグリッド画像ファイルに1ラインずつコピーする際、コンター上の画素が検出されたら、その画素より右側のコンター以外の画素にその標高をコピーしておくようにする。これによって、ほとんどのグリッド点において、目的とする標高に近い値が初期値としてセットされるようになる。

(2) 平滑化処理

コンター画像ファイルとグリッド画像ファイルのデータをそれぞれCとGバッファに1ラインずつ読み込みながら、次の処理を行う。

a) $C(x,y)$ が0でなければ(すなわち、コンター上

の点であれば)。

$$G(x,y)' = G(x,y)$$

ここで、xは画素のx座標、yは3ラインバッファのy方向のインデックスであり、画像上の縦方向の座標をYとした場合($Y \bmod 3$)の値を持つ。

b) コンター上の点でなければ平滑化を行う。平滑化は図5に示す 3×3 画素の局所平滑化フィルタと重なる画素の平均を求めることで行われるが、2で述べたように中心画素とコンターによって隔離されている画素は平均を求める対象から外される。ここで、中心画素とコンターによって隔離されている画素は次の条件によって検出される。

[コンターによって隔離されている画素の検出]

図5に示す P_0 がコンター上になく、 P_i ($i = 1, 3, 5, 7$) および P_{i+2} がコンター上の点であれば、 P_{i+1} は P_0 とコンターによって隔離されている。ただし、 $P_9 = P_1$ とする。

平滑化を行った結果はファイル出力バッファOに格納され、1ライン分の処理が終わった時点でグリッド画像ファイルの該当するラインを更新する。ただし、メモリに余裕がある場合はもちろん全画像をメモリに読み込んで処理を行うことによって処理時間を短縮することができる。

図6に処理が進むにつれて変化する画像の様子を示す。図6(a)が初期状態のコンター図で、コンター上の画素には標高が与えられており、それ以外の画素は0の値を持っている。図6(b)に示したのは100回目の反復結果、(c)は500回目の反復結果であり、(d)が最終的に均衡状態に達したグリッドデータである。反復処理によってコンター上の値が周囲に伝播されていき、目的とするグリッド形態のデータに変化していく様子がわかる。以降、この手法を平滑化法とよぶことにする。

P_4	P_3	P_2
P_5	P_0	P_1
P_6	P_7	P_8

図5 3×3 画素の局所平滑化フィルタ

$$(\text{出力}) = \frac{1}{9} \sum_{i=0}^8 P_i$$

4. 実 験

コンター／グリッド変換手法に関してはこれまでも多くの研究がなされてきており、種々の手法が報告されている。そこで、研究の前提であるインプリメントの容易さの条件を満たすいくつかの手法を選択して実際にインプリメントし、その変換精度、処理速度などの観点から提案した手法と比較した。

4.1 実験対象手法

実験の対象とした既存の手法は次の4種類である。

(1) ユークリッド距離変換を用いたコンター／グリッド変換¹⁰⁾

補間対象の点から補間基準点を探索する次に述べる(2)や(3)の手法とは逆に、コンターそのものをユークリッド距離変換によって伝播させることで、補間基準点の探索を不必要にした手法である。補間対象点の標高は伝播されてきたコンターまでの距離に反比例する重み付き平均で求められる。ユークリッド距離変換という単純反復処理に基づいているため、そのインプ

リメントは容易である。以降、この方法をユークリッド距離変換法とよぶことにする。

(2) 単純化された最急勾配法^{1),8)}

一般に人間がコンターからの補間を行う時、最も単純な方法としては勾配が最も急な方向を探索し、その方向で検出されるコンターから補間を行うだろうと思われる。最急勾配法は、そのような考え方をインプリメントしたものと言える。すなわち、補間対象画素のまわりの勾配を調べ、最も勾配が急な方向に存在するコンターの標高から補間を行う手法である。

しかし、一般的に全方向の勾配を求めることが煩雑であるため、実際には図7に示すように、たとえば8方向を調べ、そのうち勾配が最も急な方向を選択する単純化された方法が用いられることが多い。ここでインプリメントしたものも、8方向を調べる単純化された最急勾配法である。以降、この方法を最急勾配法とよぶことにする。

(3) x,y方向のスプライン曲線によって補間する手法²⁾

グリッド点からX方向とY方向にスキャンし、検出されるコンターから得られるスプライン曲線によって

(a) 元のコンター図

(b) 100回の平滑化後

(c) 500回の平滑化後

(d) 最終結果 (1700回目)

図6 平滑化によるコンター／グリッド変換の推移例
(グリッド点の初期値 = 0 の場合)

図7 8 方向探索による最急勾配法

そのグリッド点の標高を補間する。次にXとY方向から得られた2つの補間値の平均を各グリッド点の最終的な標高とする。以降、この方法をスプライン補間法とよぶことにする。

(4) ローパスフィルタリングによる方法4)

この手法は元々正確なDEMを求める目的ではなく、コンピュータグラフィックス(CG)の分野で地形のスムーズな3次元モデルを求めるために提案されたものである。まず最初に、コンターを塗りつぶしていわゆるボール箱モデルを作る。次にそれを2次元フーリエ変換し、空間周波数領域でローパスフィルタを掛けた上で、2次元逆フーリエ変換することでグリッドデータを求める手法である。この方法を以降、ローパスフィルタリング法とよぶことにする。

4.2 実験および評価

実験対象データとしては、コンターの中でも最も広く用いられている地形図の等高線を選んだ。しかし、提案した手法と比較対象の手法のいずれも対象となる3次元データ、すなわち地形の性質に依存したアルゴリズムを使用していないため、この実験の結果は一般的なコンター図にも適用できると思われる。

図8に実験対象のコンター図を示す。これは縮尺1/25,000地形図から抽出したもので、標高の範囲は70m~340m、標高間隔は10mである。画像サイズとしては408×370画素であり、地表でおよそ1,020m×950mに相当する。この場所を選定するにあたっては、急斜面や緩斜面ができるだけ含まれているようなエリアを選んだ。

なお、精度評価のために、人間が実験対象画像の全ての画素における標高を推定して作ったグリッドデータを用意し、基準データとして用いた。誤差は、人間

図8 実験対象コンター図
(閉曲線コンター：断線なし)

が読み取った標高を Z_h 、コンター／グリッド変換によって生成された標高を Z_0 として、次式で定義した。

$$E = |Z_h - Z_0| \dots\dots (式1)$$

また、コンターが完全に復元されておらず、断線している場合の性能を調べるために、人為的にコンターを断線させたコンター図を作成した。それを図9に示す。図9(a), (b), (c)はそれぞれ10カ所、30カ所、50カ所を断線させたコンター図である。ただし、ローパスフィルタリング法はボール箱モデルを作ることを前提にしているため、断線したコンター図には適用できず、断線したコンター図に対する実験からは除いた。

図8に示した閉曲線コンターに5種類のコンター／グリッド変換手法を適用した結果に、見やすくするため影処理を施したものを図10に示す。平滑化法は、ユークリッド距離変換法の場合と比べると元々存在していたコンター付近で若干不連続な感じが見受けられるが、最急勾配法とスプライン補間法の場合のような不自然な直線状の不連続性は見られない。見た目、最もスムーズな感じのグリッドデータを生成できたのはローパスフィルタリング法であり、これは当然予想できた結果であろう。

図9(c)の50カ所の断線を含むコンター図に対して各々の手法を適用した結果を図11に示す。おおむね図10の結果と同様であるが、ユークリッド距離変換法においてコンターが断線している所で少し不自然な凸凹が見受けられる。また、最急勾配法やスプライン補間法の場合においても不連続な直線状の箇所が増えており、断線の影響が確認できる。

以上はスムーズさの観点から変換結果を定性的に概観したものである。定量的な変換精度については、式

(a) 10カ所の断線あり

(b) 30カ所の断線あり

(c) 50ヶ所の断線あり

図9 断線したコンター図

(1)に基づいて各手法の誤差を求めた。それを表3～表7に示す。なお、これらの表には、処理時間も示してあるが、これは、i486DX2(66MHz)パーソナルコンピュータを用いたときの値である。ローパスフィルタリング法については試行錯誤でフィルタ形状の決定を行ったが、その時間は表中には含めていない。なお、平滑化法の場合、他の手法と同じ実行条件にするため、画像全体をメモリに読み込んだ場合の処理速度を示してある。また、初期化法としては、3.(1)の最後で述べた方法を用いた。

この結果によると、平均誤差と標準偏差の面で最も優れているのはユークリッド距離変換法である。ただし、最大誤差は平滑化法が最も小さく、断線されている箇所が増えても平均誤差と最大誤差は非常に安定している。最急勾配法の場合は比較的良好な平均誤差を示しているが、最大誤差が大きく、また図10や図11の画像から解るように不連続性の問題が実用上大きな問題になるものと思われる。不連続性の問題はスプライン補間法の場合でも同様で、やはり実用上問題がある。ローパスフィルタリング法の場合は、最も低い精度となっているが、これは手法の性格を考えると当然の結果であろう。

一方、処理時間の面ではローパスフィルタリング法が最も遅いが、それを除くと平滑化法、ユークリッド距離変換法が遅く、最急勾配法、スプライン補間法が比較的早い。これは前者の2つのアルゴリズムは処理の単純化のため多量の反復演算が使用されており、それだけ処理時間の面では不利になっているためと思われる。しかし、その絶対値(平滑化法の場合、約8分。また、画像全体をメモリに読み込まず、3で述べたア

ルゴリズムで処理を行った場合の処理時間は約16分であった)は、地図からのコンター図の入力、復元を含むグリッドデータの生成に必要とする全処理時間から見るとわずかであり、特に対象とするコンター図が大量とはならない小規模なプロジェクトなどでは、あまり深刻な問題にはならないのではないかと考えられる。

また、各手法のメモリ使用量は実際のインプリメントの仕方によってかなり差があるので一概には言えないが、一般に最急勾配法のように画像へのランダムアクセスを含んでいる場合、もしくはユークリッド距離変換法やスプライン補間法のように縦方向のデータアクセスやスキャンを含んでいる手法の場合は、画像全体をメモリに読み込まないと処理が非常に煩雑になり、処理速度も著しく低下してしまう。したがって実際にはラインごとの処理が困難なため、当然多量のメモリが必要である。特にユークリッド距離変換法の場合は、伝播されてきたコンター情報を保持するために最低6枚分の画像データ用メモリを必要とし、PCレベルのコンピュータで実行するのは通常困難と思われる。このような点を考慮すると、ライン単位の処理が簡単にできる平滑化法はPCレベルのコンピュータに適していると思われる。

5. おわりに

インプリメントの容易さ、比較的良好な精度、PC程度の計算機環境での実行、完全な復元処理が不要などを満たし、手軽に利用可能なコンター／グリッド変換アルゴリズムの開発を目標に画像処理などで広く用

(a) 平滑化法

(b) ユークリッド距離変換法

(c) 最急勾配法

(d) スプライン補間法

(e) ローパスフィルタリング法

図10 閉曲線コンターの変換結果

(a) 平滑化法

(b) ユークリッド距離変換法

(c) 最急勾配法

(d) スプライン補間法

図11 断線したコンターの変換結果

表3 平滑化法の変換結果

	平滑化法			
	平均誤差(m)	標準偏差(m)	最大誤差(m)	処理速度(分)
閉曲線	0.71	0.69	5	7.5
断線10カ所	0.71	0.69	6	7.5
断線30カ所	0.72	0.70	6	7.5
断線50カ所	0.72	0.70	6	7.5

表4 ユークリッド距離変換法の変換結果

	ユークリッド距離変換法			
	平均誤差(m)	標準偏差(m)	最大誤差(m)	処理速度(分)
閉曲線	0.37	0.54	6	4.9
断線10カ所	0.38	0.56	7	13.5
断線30カ所	0.39	0.58	7	12.2
断線50カ所	0.41	0.63	9	11

表5 最急勾配法の変換結果

	最急勾配法			
	平均誤差(m)	標準偏差(m)	最大誤差(m)	処理速度(分)
閉曲線	0.60	0.80	10	1
断線10カ所	0.60	0.82	15	1
断線30カ所	0.61	0.83	15	1
断線50カ所	0.62	0.84	15	1

表6 スプライン補間法の変換結果

	スプライン補間法			
	平均誤差(m)	標準偏差(m)	最大誤差(m)	処理速度(分)
閉曲線	0.94	0.92	9	0.5
断線10カ所	0.95	0.93	9	0.5
断線30カ所	0.96	0.96	9	0.5
断線50カ所	0.97	0.96	9	0.5

表7 ローパスフィルタリング法の変換結果

	ローパスフィルタリング法			
	平均誤差(m)	標準偏差(m)	最大誤差(m)	処理速度(分)
閉曲線	3.57	3.37	45	46
断線10カ所	(実験不可能)			
断線30カ所				
断線50カ所				

いられている平滑化処理をコンター図に繰り返し適用することによってグリッドデータに変換できる手法を提案した。

この手法は 3×3 画素の局所平滑化フィルタリングのみで構成されており、そのインプリメントは極めて簡単である。なお、その変換精度は 10 m 間隔のコンター図を対象とした場合、平均誤差 0.71 m、標準偏差 0.69 m、最大誤差 5 m と、多くの場合充分実用に耐えられるものと思われる。なお、コンターが完全に復元されてなく断線している場合でも、実験によると平均誤差はわずか 1 cm 大きくなるだけであり、標準偏差 0.70 m、最大誤差 6 m と非常に安定した結果を示している。

性能比較実験では、ユークリッド距離変換法、最急勾配法、スプライン補間法およびローパスフィルタリング法をとりあげて実験を行った。その結果、平均精度と標準偏差の面においてはユークリッド距離変換法と最急勾配法に劣るものの最大誤差の面においては最も優れた結果を示している。特に断線したコンターに対して安定しており、他の手法の場合に見られるような不連続性や不自然な凸凹などの不都合もほとんど生じない。また使用メモリ量は、対象画像データの 7 ライン分のバッファがあれば実行できる。

以上のような点を考慮すると PC などを使って非常に手軽に使用できる本手法の有用性は、実務的にはかなりあるのではないと思われる。ただし、処理時間については、高速な手法とは言えず、この問題を改善するには、より適当な初期化処理や収束していない領域のみを平滑化するなどの方法が有効と思われる。

(受付日 1995.2.21, 受理日 1995.5.12)

参考文献

- 1) 稲葉, 「傾斜情報を利用した等高線からの DTM 作成法」, 写真測量学会秋期学術講演会, PP9-12, 1987.
- 2) 森, 瀬戸, 中村, 「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, Vol. 29, No.3, pp221-232, 1988.
- 3) 安, 梶原, 建石, 「TM 画像による潮間帯の DEM と干潟区分図の作成」, 写真測量とリモートセンシング, Vol. 2, No. 3, pp50-55, 1993.
- 4) 千葉, 村岡, 三沢, 斉藤, 「CG におけるデジタル地形モデルのための補間法」, 情報処理学会論文誌, Vol.28, No.11, pp1121-1133, 1987.
- 5) 建石, 「ランダム配置データから格子データへの変換」, 写真測量とリモートセンシング, Vol.24, No.3, PP3-13, 1985.
- 6) Jan Terje Bjorke, 「Quadrees and Triangulation in Digital Elevation Models」, ISPRS, Vol.27, Part B4, Commission IV, pp38-44, 1988.
- 7) Lin, Chen, Chern, 「New Approach to semi-automatically generate digital elevation data by using a vidicon camera」, Symposium on Remote Sensing for Resource Development and Environmental Management, pp.51-55, Aug. 1986.
- 8) Sincar, Ragan, 「An Interactive Technique To Generate Digital Elevation Data」, Hydrologic Research Series, Remote Systems Sensing Laboratory, University of Maryland, 1984.
- 9) 村井, 河合, 「空中写真ステレオ画像の自動認識と DTM の自動作成」, 写真測量学会年次学術講演会, PP13-18, 1983.
- 10) 李, 福江, 下田, 坂田, 「ユークリッド距離変換を用いたコンター/グリッド変換」, 写真測量とリモートセンシング Vol.33, No.6, pp26-34, 1994.
- 11) 石, 深見, 信田, 「地形図からの標高メッシュデータの作成」, 写真測量学会年次学術後援会, pp171-172, 1983.
- 12) Kweon, Kanade, 「High-Resolution Terrain Map from Multiple Sensor Data」, IEEE PAMI, Vol. 14, No.2, Feb. 1992.
- 13) 秋山, 奥山, 久松, 「1/25,000 地形図修正へのコンピュータマッピング技術の適用に関する研究」, 写真測量学会年次学術講演会, PP15-18, 1988.
- 14) 前田, 村井, 「DTM による SAR 画像の地形歪の補正」, 写真測量学会年次学術講演会, PP85-88, 1982.
- 15) 梶原, 建石, 「地形図からの DEM 作成における前処理の効率化」, 写真測量学会年次学術講演会, PP31-34, 1983.
- 16) 画像解析ハンドブック編集委員会, 「画像解析ハンドブック」, 東京大学出版会, pp194-195, 1991.
- 17) ヴィセシン, 「ラスタ化地図データからの等高線認識」, 写真測量学会年次学術講演会, pp113-116, 1988.
- 18) 李, 福江, 下田, 坂田, 「地形図から DEM 生成の省力化に関する研究」, 写真測量学会秋季学術講演会, pp93-98, 1994.
- 19) 山田, 「ベクトル伝播によるユークリッド距離変換」, 電子通信学会, PRL82-24, pp21-28, 1982.
- 20) 画像解析ハンドブック編集委員会, 「画像解析ハンドブック」, 東京大学出版会, pp538-548, 1991.
- 21) 長島, 「CG のための図学(7)」, PIXEL, No. 73, pp176-180, 1988.