ドットを用いた等高線の自動作成に関する研究

朝倉 堅五*

A Study on the Automatic Formation of the Contour Map by Continuous Dots

by Kengo Asakura*

Abstract: Contour map is widely used not only in engineering fields, but also in agricultural or scientific fields. So, many studies have been done to make a contour map with high accuracy automatically from digital terrain data measured in the mesh system, accompanied by the use of a large computer. In most of these studies, contour lines are regarded as "lines".

But in this study, from a different point of view, contour lines are regarded as "small continuous dots". According to the method used in this study, the computer work is quite simple, because the computer has only to make the on-off judgement of each dot which corresponds to each datum obtained from the close interpolation between a set of four neighbouring digital terrain data. The work to recognize "continuous dots" as a line, therefore, is done not by a computer, but by the human eyes.

Moreover, this method has a great advantage that it can be applied to any kind of digital data which are converted into mesh system.

要旨 等高線図は、工学の分野に限らず、農学、理学の分野でも広く利用されている。そのため、精度の高い等高線図を、デジタルなメッシュ状の地形データから、自動的に作成しようとする試みが、コンピュータの利用に伴って、数多くなされてきた。しかしこの多くは、等高線を、「線」として扱うものである。

本研究では、発想を転換して、等高線を「点の連続」として、表現しようとするものである。この方法は、デジタルデータ間を細かく内挿して生じた1つ1つのデータについて、対応するドットの on か off かを、判定するという単純なものである。従って、線として認知する作業は、コンピュータではなく、人間の眼が行っている。

さらに、この手法は、メッシュのデジタルデータとして表現されるものには、全て適用できる。

1. はじめに

最近、メッシュ状のデジタルな地形データが、航空写真から、手軽に収集できるようになってきた。こうしたデジタルなデータは、コンピュータ処理には都合が良く、たとえば、デジタルレイアウトモデルを作成するのには、便利に利用できる。ところが、こうしたメッシュ状のデータから、アナログな等高線図を自動的に作成しようとする、多くの問題に突きあたる。

等高線図は、一般に「線」として処理される。したがって、デジタルデータから線を抽出しようとするれば、次のような過程を経ねばならない。まず、一定の標高値 Z を示す二次元座標 (X, Y) を、適当な平面距離をおいて、次々に求めていく。このときには、デジタルデータ間の地形標高を求める内挿式が必要とさ

れる。次いで、求めた (X, Y) 座標を、滑らかな曲線で結んでいく。このときには、二次元のフェアリングが必要である。

コンピュータとプロッタを用いて、この作業を行うとすれば、以上の二つのステップを連続して行わねばならず、計算時間はかなり膨大になる。さらには、メッシュサイズだけのコンピュータの容量を必要とするので、メッシュサイズが大きくなれば、小型コンピュータでは計算できない。

本研究では、以上のような欠点を避けるため、等高線図を「点の連続」で表現することを試みた。点の最小間隔は、 X, Y 方向ともに 0.25mm であるから、人間の眼には、十分、連続性のある線として感じられる。

この方法におけるコンピュータ処理は、内挿計算後の一つ一つのデータについて、ドットの on か off かを判定しているにすぎない。したがって、等高線に沿って、ランダムにメッシュを探索していく必要はな

*三菱総合研究所ソフト開発部 Mitsubishi Research Institute Inc.
「写真測量」Vol. 13 No. 3, 1974

く、計算時間は、かなり節約される。さらにコンピュータの容量も、より小さくてすむ。

ドットを用いる方法では、コンピュータ処理の段階で、「線」を意識する必要がないので、前記の方法の後者のステップ——つまり、(X,Y)座標を滑らかに結んでいくフェアリングは、必要ない。「点の連続」という概念からすれば、こうした作業は、人間の眼が行うということになるろう。

ドットを用いる表現形態は、一般に、次のような利点を持っている。

- A. 線処理が可能なこと。
- B. 面処理が可能なこと。
- C. 線処理と面処理とをあわせた処理が可能なこと。
- D. 漢字を含めた文字や任意の特殊文字と、図形とをあわせて処理できること。

本研究では、Aを主に扱い、B,C,Dは、その例をあげるにとどめる。

2. 等高線図作成の手法

2.1 等高線作成の基本的アルゴリズム

今、メッシュサイズ (10, 10)の地形データA(10, 10)が、あるとしよう。このデータに対し、次に示す判定を行う。この判定を、判定Aとしておこう。

判定A if $A(i, j) < B$ ならば $KA(i, j) = 1$
if $A(i, j) \geq B$ ならば $KA(i, j) = 2$

ここにBは、定数である。この判定後には、整数データKA(10, 10)が、生じる。KA(10, 10)が、仮に、図1のようになったとしよう。

```

1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
1 1 1 2 1 1 2 1 1 1
1 1 2 2 1 2 2 2 1 1
1 1 2 2 2 2 2 2 1 1
1 1 2 2 2 2 2 2 1 1
1 1 1 2 2 2 2 2 1 1
1 1 2 2 2 2 2 2 1 1
1 1 1 2 2 2 1 1 1 1
1 1 1 1 2 1 1 1 1 1
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1

```

図1 KA (10,10)

1と2の境界の点だけをドット on にして、それ以外の点をドット off にするため、次のような判定を行う。この判定を、判定Dとしておこう。

判定D

if $KA(i, j) \neq KA(i-1, j)$ or $KA(i, j) \neq KA(i, j-1)$ ならば $IA(i, j) = 1$
if $KA(i, j) = KA(i-1, j)$ and $KA(i, j) = KA(i, j-1)$ ならば $IA(i, j) = 0$

```

0 0 1 1 0 1 1 0 0
0 1 0 1 1 0 1 1 0
0 1 0 1 0 0 0 1 0
0 1 0 0 0 0 0 1 0
0 1 1 0 0 0 0 1 0
0 1 0 0 0 0 1 0 0
0 1 1 0 0 1 0 0 0
0 0 1 1 1 0 0 0 0
0 0 0 1 0 0 0 0 0

```

図2 IA (9,9)

```

× × ● × × × × × ×
× ● × ● × × × × ×
× ● × × × × × × ×
× ● × × × × × × ×
× ● × × × × × × ×
× ● × × × × × × ×
× ● × × × × × × ×
× × ● × × × × × ×
× × × × × × × × ×

```

図3 IA (9,9) のドット表現

ここに $i \neq 1, j \neq 1$ で、ある。この判定後には、整数データIA(9, 9)が生じる。IA(9, 9)は、図2のようになる。

IA(9, 9)のうち、0をドット off, 1をドット on にすれば図3のようになる。図3の、黒丸はドット on ×はドット off を示す。

図3で、ドット間隔が、0.25mmならば、人間の眼には、十分、線として感じられる。

図3は、KAの値が1と2を示す二つの領域の境界線を示していることになる。これは、判定Aにもどって考えると、標高値Bの等高線に相当する。

これが、等高線作成の基本的アルゴリズムである。ここに示した例では、判定Aで二つのグループに分割したにすぎないが、三つのグループに分割すれば、二種類の等高線ができ上がる。一般にn個のグループに分割すればn-1個の等高線が生じることになる。このとき、標高値 $B_1, B_2, \dots, B_{n-1}$ の等高線を描くとして、判定Aは、次のように、拡大される。これを判定A'とする。

判定A'

if $A(i, j) < B_1$ ならば $KA(i, j) = 1$
if $A(i, j) \geq B_1$ and $A(i, j) < B_2$ ならば $KA(i, j) = 2$
⋮
if $A(i, j) \geq B_{n-2}$ and $A(i, j) < B_{n-1}$ ならば $KA(i, j) = n-1$

if $A(i, j) \geq B_{n-1}$ ならば $KA(i, j) = n$

ただし $B_1 < B_2 < \dots < B_{n-2} < B_{n-1}$ とする。

2.2 等高線図作成の概略フロー

まず、この概略フローを図4に示して、この図にしたがって説明を加える。

図4 等高線図作成の概略フロー

STEP 1. ここでいう初期データとは、たとえば、メッシュサイズ、内挿データの個数、等高線の標高値 $B_1 \sim B_{n-1}$ などである。

STEP 2. 地形データを順次、2行ずつ読みこんでいく。ただし、計算機の容量が大きい時は、数行分を読みこんでも良い。

STEP 3. 隣りあう行と行の間で、データの内挿を行う。この段階で、2.1で説明したメッシュデータAが作成される。

STEP 4. 判定A'を実行する。メッシュデータKAが作成される。

STEP 5. 判定Dを実行する。メッシュデータIAが作成される。

STEP 6. EDITINGとは、計算技術上の問題で、8ドットあるいは、16ドットを1ワードとして、まとめる作業をいう。

STEP 7. KAの値、1~nのそれぞれの個数を計算して、全体の個数で除する作業をする。

出力されたMT内のデータは、ドットプリンターにより、ドットに変換される。1ビットが1ドットに

対応しているため、ドットプリンターの制御は、アセンブラで行うのが便利である。

2.3 内挿式について

図4のステップ3で用いた内挿式を説明する。

2.3.1 比例配分法

(i, j) , $(i+1, j)$, $(i, j+1)$, $(i+1, j+1)$ の4つのメッシュ交点でつくられるメッシュ内に、 $n \times n$ 個のデータを内挿する場合を考える。メッシュ間隔を単位とする座標をとると、メッシュ内の任意の格子点 (u, v) の標高 Z は、次に示す内挿式で求められる。

$$\left. \begin{aligned} Z &= (1-u)(1-v)Z_{i,j} + u(1-v)Z_{i+1,j} \\ &\quad + (1-u)vZ_{i,j+1} + uvZ_{i+1,j+1} \\ u &= (1/n) \times (I-1), I=1, 2, \dots, n \\ v &= (1/n) \times (J-1), J=1, 2, \dots, n \\ 0 &\leq u < 1, 0 \leq v < 1 \end{aligned} \right\} (1)$$

2.3.2 3次曲面近似法

この方法は、デジタル Terrain モデルで、しばしば用いられる方法で、既に確立されている¹⁾。この方法の概略を説明する。

(i, j) , $(i+1, j)$, $(i, j+1)$, $(i+1, j+1)$ の4つのメッシュ交点とは、メッシュ間隔を単位とする座標系をとると、A(0, 0), B(1, 0), C(0, 1), D(1, 1)に対応する。この4点に対応する標高 Z_A, Z_B, Z_C, Z_D は、与えられている。この4点で形成される曲面を次に示す式で近似する。

$$\left. \begin{aligned} Z = f(x, y) &= a_1x^3y^3 + a_2x^2y^3 + a_3xy^3 + a_4y^3 \\ &\quad + a_5x^3y^2 + a_6x^2y^2 + a_7xy^2 + a_8y^2 \\ &\quad + a_9x^3y + a_{10}x^2y + a_{11}xy + a_{12}y \\ &\quad + a_{13}x^3 + a_{14}x^2 + a_{15}x + a_{16} \end{aligned} \right\} (2)$$

ただし $0 \leq x \leq 1, 0 \leq y \leq 1$

いま、この3次曲面の x 方向の勾配を R , y 方向の勾配を S , 曲面のねじれを T とすると次の式が成り立つ。

$$\left. \begin{aligned} R &= \partial z / \partial x \\ S &= \partial z / \partial y \\ T &= \partial^2 z / \partial x \partial y \end{aligned} \right\} (3)$$

したがって格子点 A, B, C, D において、 Z, R, S, T が与えられたとすると、次の式が成り立つ。

$$Z = KA \quad (4)$$

または、成分で書けば、次のようになる。

$$\begin{pmatrix} Z_A \\ Z_B \\ Z_C \\ Z_D \\ R_A \\ R_B \\ R_C \\ R_D \\ S_A \\ S_B \\ S_C \\ S_D \\ T_A \\ T_B \\ T_C \\ T_D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & 2 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 3 & 2 & 1 & 0 & 3 & 2 & 1 & 0 & 3 & 2 & 1 & 0 & 3 & 2 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 3 & 3 & 3 & 3 & 2 & 2 & 2 & 2 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & 2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 9 & 6 & 3 & 0 & 6 & 4 & 2 & 0 & 3 & 2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \\ a_6 \\ a_7 \\ a_8 \\ a_9 \\ a_{10} \\ a_{11} \\ a_{12} \\ a_{13} \\ a_{14} \\ a_{15} \\ a_{16} \end{pmatrix} \quad (5)$$

したがって、係数 A は、

$$A = K^{-1}Z \quad (6)$$

として求められる。 K^{-1} は、次のようになる。

$$K^{-1} = \begin{pmatrix} 4 & -4 & -4 & 4 & 2 & 2 & -2 & -2 & 2 & -2 & 2 & -2 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ -6 & 6 & 6 & -6 & -4 & -2 & 4 & 2 & -3 & 3 & -3 & 3 & -2 & -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & -2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 2 & 0 & -2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -6 & 6 & 6 & -6 & -3 & -3 & 3 & 3 & -4 & 4 & -2 & 2 & -2 & -2 & -1 & -1 \\ 9 & -9 & -9 & 9 & 6 & 3 & -6 & -3 & 6 & -6 & 3 & -3 & 4 & 2 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -3 & 0 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2 & 0 & -1 & 0 \\ -3 & 0 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & -2 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -3 & 3 & 0 & 0 & -2 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & -2 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -3 & 3 & 0 & 0 & -2 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (7)$$

上にあげた R, S, T の求め方は、図5に示すように、四隣の格子点の高さから次のように計算する。

図5 メッシュのデータ

$$\left. \begin{aligned} R_p &= \partial z / \partial x = (z_4 - z_8) / 2 \\ S_p &= \partial z / \partial y = (z_8 - z_2) / 2 \\ T_p &= \partial^2 z / \partial x \partial y = \{z_1 + z_5 - (z_2 + z_7)\} / 4 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

こうして(6)式より、係数が求められれば、 A, B, C, D 内に、 $n \times n$ 個の内挿データを作ることは、容易である。このとき、 x, y は、次のような値をとる。

$$\left. \begin{aligned} x &= (1/n) \times (I-1) \quad I=1, \dots, n \\ y &= (1/n) \times (J-1) \quad J=1, \dots, n \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

この (x, y) を(2)式に代入すれば、 z が求められる。

3. 作図例

本研究では、 45×65 のメッシュサイズの地形データを利用した。このデータは、縮尺1/5000の地形図から25m間隔で読み取って作成されたものである。シミュレーション用のデータとしては、これで十分である。

図6は、内挿式として、比例配分法を用いた等高線図の例である。等高線は、標高5, 25, 50, 75, 100, 125, 150, 175, 200mの合計9種類である。この標高値は、図7, 8, 9とも、等しい。

図7は、内挿式として、3次曲面近似法を用いた等高線図の例である。

図6, 7とも、図中に数字と題字があるが、数字は 16×16 ドット、題字は 96×96 ドットで作られている。数字の方は、あらかじめ、コードを作成しておけば、図中の任意の位置に書きこめる。

図8は、濃淡をつけた等高線図の例である。

図9は、シンボルをあてはめた等高線図の例である。

図8, 9からわかるように、等高線と等高線の間には、任意のイメージをあてはめ

ることが可能である。

以上の例では、 22×22 のデータの内挿を行っているので、コンピュータによる処理データは、約130万個で、演算時間は、IBM 370/168を使用して、図6, 7について約70sec, 図8, 9について約100sec かかる。

ドットプリンターを用いて、プリントに要する時間は、MTを使えば、約40~50sec である。

4. 考察

ここで用いた手法の問題点と、将来性について論じてみよう。

- (1) 地図という観点からは、精度のチェックをどうしても行う必要がある。
- (2) 計算時間をさらに短縮するため、計算技術上、さまざまな改良を行う余地がある。
- (3) 今後、地図作成の合理化、省力化への要求が高まると思われ、この手法で示した発想は、そうした時に、十分、役に立つだろう。

<作図例集>

図6 比例配分法を用いた等高線図

図7 三次曲面近似法を用いた等高線図

(4) 本研究では、メッシュの地形データを入力したが、この手法は、実は、メッシュのデジタルデータなら、何にでも応用できる。したがって、この手法の応用分野は、驚くほど広いと言えよう。図10は、その1例である。図10は、図8と同じ手法で、渦運動のシミュレーションへ応用したものである。

(5) 線処理、面処理、文字処理が、同じ扱い方でできるので、多面的な情報を同時に処理できる利点がある。この方面では、幅広い発展が期待できよう。

5. おわりに

本研究を、進めるにあたっては、東京大学生産技術研究所村井研究室から、有形、無形の援助をいただいた。記して深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 「地形情報の抽出とその自動処理」
東京大学生産技術研究丸安研究室資料
資料 No.69-01

図8 濃淡をつけた等高線図

図 9 シンボルをあてはめた等高線図

図10 渦運動のシミュレーションへの応用