

## 弛緩法と正則化による等高線画像からの曲面再構成

3E-9

村木 茂<sup>†</sup>

山本和彦<sup>†</sup>

<sup>†</sup>電子技術総合研究所

### 1. はじめに

我々は2次元画像である地形図から3次元地形形状を把握するシステムの研究に取り組んでおり、これまで等高線の性質を利用した曲面再構成法<sup>[1]</sup>などを提案してきた。しかし、これまでのシステムでは地形を再構成するために、画像上のいくつかの点で基準となる標高値を与える必要があった。本稿では標高値を一切与えることなく等高線画像からおおよその地形形状を推定する方法を提案し、並列計算による解法を示す。

### 2. 方向ラベルの弛緩

曲面再構成のための手がかりである等高線は地形図中の非常に限られた数の画素でしかない。そこで全等高線画素を8連結方向でラベル付けし、それを画像全体に伝播させる。連結からは2通りの方向が考えられるが、ここではどちらか一方に限定することを避け、確率的弛緩法により両方向とも等しく評価する。確率的弛緩法はZucker他により線強調に応用されているが<sup>[2]</sup>、線方向が0~πの範囲でしか定義されないことや、確率の更新方法が線強調を目的としたものである点で本問題には適さない。ここでは曲面の滑らかさを最大にするという拘束と熱平衡の理論を導入して0~2πの範囲の方向ラベルの弛緩を行なう。

いま各方向ラベルに対して等高線方向余弦  $\Delta x, \Delta y$  と、大きさ一定の勾配成分  $p = \partial u / \partial x, q = \partial u / \partial y$  が表1のように与えられていると仮定する。このとき曲面の滑らかさは2次微分の自乗和

$$R = \int \int_{\Omega} \left[ \left( \frac{\partial p}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial p}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial q}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial q}{\partial y} \right)^2 \right] dx dy \quad (1)$$

で評価される。この差分近似のうち、方向ラベル  $\lambda$  を持つ画素  $i$  に寄与する部分

$\lambda$	→	↘	↓	↙	←	↖	↑	↗
$\Delta x(\lambda)$	1	1/√2	0	-1/√2	-1	-1/√2	0	1/√2
$\Delta y(\lambda)$	0	1/√2	1	1/√2	0	-1/√2	-1	-1/√2
$p(\lambda)$	0	1/√2	1	1/√2	0	-1/√2	-1	-1/√2
$q(\lambda)$	-1	-1/√2	0	1/√2	1	1/√2	0	-1/√2

表1: 等高線方向余弦と勾配。

$$E_i(\lambda) = \sum_{i'} [(p_i(\lambda) - \bar{p}_{i'})^2 + (q_i(\lambda) - \bar{q}_{i'})^2] \quad (2)$$

に注目する。ここで  $i'$  は  $i$  の上下左右の4近傍を示す。(2)式に現れる  $\bar{p}_{i'}, \bar{q}_{i'}$  は近傍  $i'$  における  $p, q$  の平均値を示し、画素  $i$  が方向ラベル  $\lambda$  を取る確率  $P_{i'}(\lambda)$  を用いて、それぞれ

$$\bar{p}_{i'} = \sum_{\lambda} p_{i'}(\lambda) P_{i'}(\lambda), \quad \bar{q}_{i'} = \sum_{\lambda} q_{i'}(\lambda) P_{i'}(\lambda) \quad (3)$$

で与えられる。方向の弛緩は  $E_i(\lambda)$  が最小になるように実行すればよい。ここでは  $E_i(\lambda)$  をエネルギーとみとて統計力学の Boltzman 分布による熱平衡をシミュレートする。つまり時刻  $k+1$  において画素  $i$  が方向ラベル  $\lambda$  を取る確率は、時刻  $k$  における (2) 式の値を用いて

$$P_i^{(k+1)}(\lambda) = \frac{\exp(-E_i^{(k)}(\lambda)/T)}{\sum_{\lambda} \exp(-E_i^{(k)}(\lambda)/T)} \quad (4)$$

に画素ごとに並列に更新される。ここで  $T$  は温度パラメータと呼ばれ、近傍からの影響の強さを制御できる。

### 3. 方向ラベルからの標高値の正則化

方向ラベルの伝播によって、表1から等高線画像の全画素に勾配成分  $p, q$  が定義できる。この情報をもとに標高値を正則化する。正則化に用いるエネルギー関数は曲面の勾配と  $p, q$  との自乗誤差

$$A = \int \int_{\Omega} \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} - p \right)^2 + \left( \frac{\partial u}{\partial y} - q \right)^2 \right] dx dy \quad (5)$$

と、文献 [1] で用いられた等高線拘束

$$B = \int \int_{\Omega} \left[ \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial u}{\partial y} \Delta y \right]^2 dx dy \quad (6)$$

を加え合わせた

$$E = A + \alpha B \quad (7)$$

とする。ここで  $\alpha$  は結合係数で、等高線拘束の強さを制御する。連立1次方程式

### 3D Surface Reconstruction from Contour Image Data using Relaxation and Regularization

Shigeru MURAKI, Kazuhiko YAMAMOTO

Electrotechnical Lab.



図 1: 等高線画像 (太線は方向を固定した等高線)

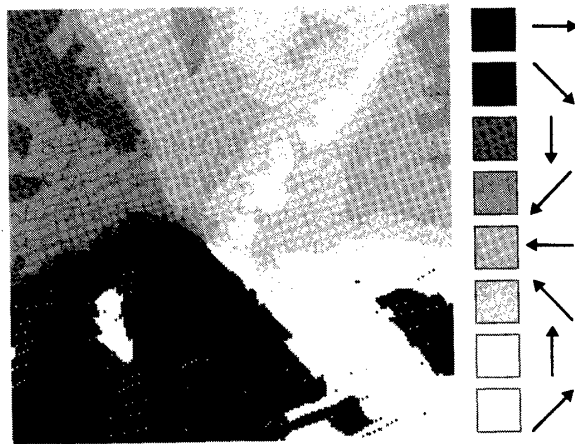


図 2: 方向ラベル画像

$$\frac{\partial E}{\partial u_i} = 0 \quad (8)$$

を解くことによって求める曲面が得られる。

#### 4. 実験

図 1 は地形図から色分離により抽出された筑波山山頂付近の等高線画像である。画像サイズは  $200 \times 200$  画素で、2万5千分の1地形図中の420m四方に相当する。線追跡により等高線画素上に8方向のラベルをつけ、その方向に基づいて(3)式の初期確率を決定する。等高線画素上ではラベルの方向と、その正反対の方向の2つの確率を1/2と定め、それ以外の方向の確率は0とする。等高線以外の画素では8つの方向すべてを等確率(1/8)にする。このままでは方向が正反対の2通りの解が存在し、解が1つに収束しない。そこで等高線のうちの1本だけについては線分追跡で得られた方向での確率を1に固定し、確率を更新しない。今回この等高線は線追跡の結果、最も長かった等高線(図1の太線)を選んだ。

この初期確率から(4)式に従って確率の更新を行なう。この時、温度パラメータをあまり大きくすると全ての方向ラベルについて等確率になり、確率の伝播が起こらな

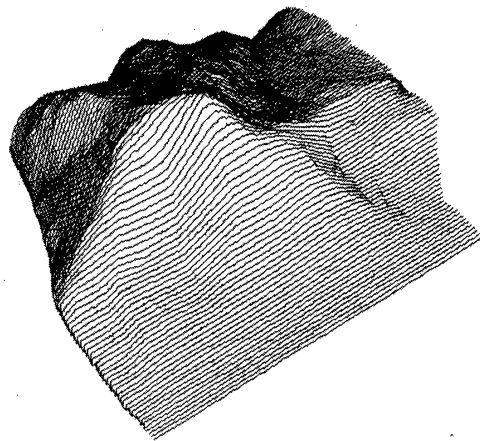


図 3: 3次元表示

い。ここでは温度パラメータを10から1回の反復ごとに0.01ずつ下げる simulated annealing<sup>[3]</sup>を行なった。

図 2 は1000回反復後における確率最大の方向ラベルを濃淡で表示している。ここで得られた方向ラベルから(8)式の連立1次方程式を求め、並列型のJacobi法で解いた。反復の初期値は標高値0の平面で、(7)式の $\alpha$ は0.1とした。反復は標高値の変化が十分小さくなるまで繰り返した。図 3 は再構成された地形の3次元表示である。図 1 の等高線と比較すると地形の特徴がうまく再現されているのが分かる。

#### 5. あとがき

従来の確率的弛緩法に熱平衡の考え方を導入し、地形図から抽出した等高線から3次元地形形状を推定する方法を提案し、並列アルゴリズムによる解法を示した。図 1 の等高線を満たす地形は幾通りも考えられ、ここで求められた地形はその中の最も滑らかな地形の一つにすぎず、これが実際の地形に対応するという保証はない。しかし人間は図 1 のような等高線から図 3 のような地形を思い浮かべることが多く、これは人間の知覚においても、なんらかの連続性が利用されている可能性を示唆する。今後は本手法を人間の視覚の問題にも適用して行きたい。

なお、本研究は「電子計算機相互運用データベース」大型プロジェクトの一環として行なわれた。

#### 謝辞

日頃御討論頂く画像研究室の山田博三主任研究官、横矢直和主任研究官の両氏に感謝致します。

#### 参考文献

- [1] 村木 他: “等高線との整合性を考慮した3次元曲面の生成法” 信学技報, PRU88-77, 1988
- [2] 坂上, 田村, 高木: “画像処理アルゴリズムの概観(2)-弛緩法の応用-”, 電総研イ報, Vol.44 No.7/8, pp.451-463, 1981
- [3] 深尾: “アニーリング法-一つの最適化手法-”, 信学誌, Vol.70 No.12, pp.1247-1250, 1988