

自然の画像生成†

—山の手続き的形狀定義法—

三 沢 雅 一^{††} 千 葉 則 茂^{†††} 齋 藤 伸 自^{††}

自然物（現象）のリアルな画像生成は、造園設計やフライトシミュレーションなどの景観図の作成と、多くの応用を持つ重要な課題である。しかしながら、木や山や雲などの自然物は、人工物と比べ、その形状が複雑で多種多様であるため、通常の形状定義法では、設計や入力に多くの時間を必要とする。本論文では、山を定義するための、等高線生成法と呼ぶ、手続き的形狀定義法について報告する。この定義法は、与えられた、種子等高線と呼ぶ、唯一つの等高線から、他のすべての等高線を生成するものであり、実在の山であれ、架空の山であれ、その良い近似を与えるものであり、広く有効な方法である。さらに、今後の課題として、広大な景観を構成するためには、どのような研究が必要となるかを述べ、いくつかについてはその方針も述べた。

1. ま え が き

コンピュータグラフィクスによる、山、木、水、火、雲などの自然物（現象）のリアルな画像生成は、造園設計や、フライトシミュレーションなどにおける景観図の作成と、多くの応用を持つ重要な課題である。

一般に、コンピュータグラフィクスにおける画像生成は、形状の定義とその描画からなりたつ。通常、形状の定義は人工物、自然物を問わず、多角形面を張り合わせて定義 (B-rep) するか、基本立体の集合演算として定義 (CSG) されており、複雑な形状を定義するためには膨大なデータの入力を必要とする。したがって、自然物（現象）のような複雑な形状を持つものの定義には、少量の入力データとそれを“成長”させるアルゴリズムとで、膨大なデータを生成するような手続き的形狀定義法が期待される。

本研究では、自然物として山を取りあげ、その手続き的形狀定義法として、1本の等高線の形状を与えれば、その他のすべての等高線を生成するという“等高線生成法”を考案し検討を行ってきた。

これまでの山の形状定義法としては、次のような静的なものや手続き的のものがあげられる。静的なものとしては、等高線地図から、等高線のデータをひろい、となりあう等高線を三角形面で張り合わせて定義するものや、国土数値情報の格子点上での標高データ

を利用し、三角形面や四角形面を張り合わせて定義するもの、などがある。また、2次曲面に、合成したテクスチャを張りつけて定義するものもある¹⁾が、かなりリアリティに乏しい。手続き的なものとしては、逆フーリエ変換により得られるフラクタルブラウン運動²⁾や、中点変位法により得られるフラクタルブラウン運動の近似³⁾⁻⁵⁾により定義するものがあげられる。これらは、リアリティのある山の画像を得る簡便な方法として広く認められているようであるが、どのような山に対しても向いているとは思われない。特に、日本でよく見られるような山が持つ、流れるような尾根線や谷線は、フラクタルブラウン運動やその近似だけで構成することは難しいと思われる。図1の岩手山の写真（“日本の山”，山と溪谷社刊より転載）とフラクタルブラウン運動にもとづくもの⁴⁾を比べて見られたい。

一般に静的なものは、実在の山の定義には向くが、架空の山の定義には向かない。また、手続き的なものは、架空の山の定義には向くが、実在の山の定義には向かない。意図した形の山を定義しようとする、その形状の骨格を与える“低周波成分”は入力データとして与えなければならない。ここで提案する等高線生成法は、山の特徴をよく表しているような等高線を1本与えれば、他のすべての等高線を生成するというものであり、尾根線や谷線もうまく生成され、実在の山であれ、架空の山であれ、その良い近似を与えるものであり、広く有効な方法であると考えられる。

2. 多角形縮小問題

本方法は、山の等高線の形状の類似性にもとづき、すなわち、ある等高線に注目したときに、その内側や

† Simulation of Natural Scenes: Procedure Modeling for Mountains by MASAKAZU MISAWA (Faculty of Engineering, Tohoku University), NORISHIGE CHIBA (Sendai National College of Technology) and NOBUJI SAITO (Faculty of Engineering, Tohoku University).

†† 東北大学工学部

††† 仙台電波工業高等専門学校

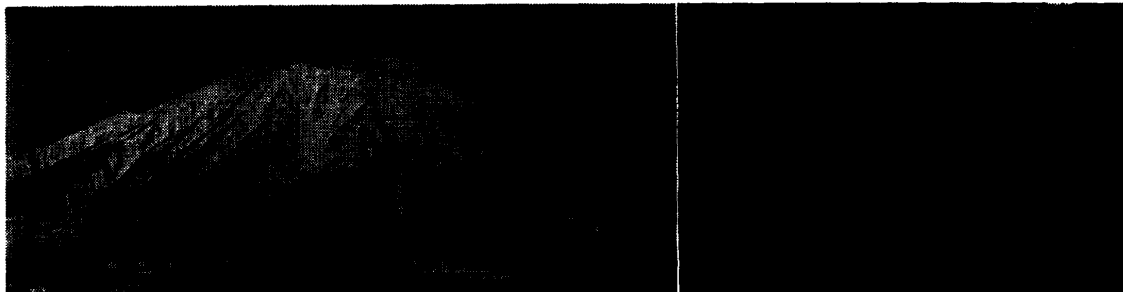


図 1 岩手山とフラクタルブラウン運動による山
Fig. 1 Mt. Iwate and a fractal landscape generated by a fractional Brownian motion.

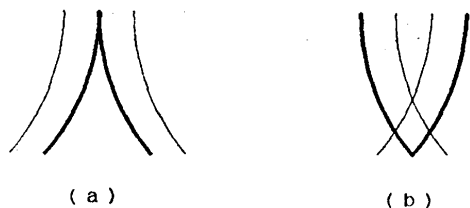


図 2 不連続と交差

Fig. 2 Collision of the offset curves: a gap and an intersection.

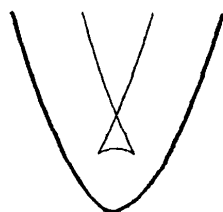


図 3 “角”問題

Fig. 3 “Cusps” problem.

外側の等高線の形状とが、非常によく似ていることから、“種子等高線”と呼ぶ、ただ一つの等高線だけから他の等高線をすべて生成できないだろうかというアイデアにもとづいている。

まず、等高線の生成を次のような閉曲線縮小問題（山の裾野方向への生成は拡大となる）として考え、検討を行った。

閉曲線縮小問題：

閉曲線を一定距離（オフセット） d だけ縮小した“相似閉曲線”を求めよ。

この問題は、CAD の分野ではオフセット問題と呼ばれ、これ自体応用も多く興味深い問題である^{6)~8)}。いま、“一定距離 d だけ縮小”ということを実際に次のように考えてみる。

“与えられた閉曲線上のすべての点をその法線方向に d だけ移動する。”

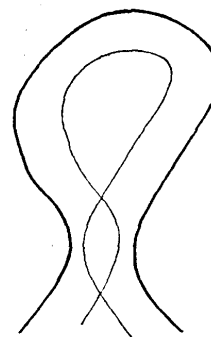


図 4 “島”問題

Fig. 4 “Island” problem.

すると、次のような三つの問題が生じる。

- (1) 図 2 に示すように、閉曲線の折れた凹部では不連続部分が生じ、折れた凸部では不連続となり、交差は生じる場合と生じない場合がある。
- (2) 図 3 に示すように、閉曲線のなめらかな凸部では“角”が生じる。
- (3) 図 4 に示すように、閉曲線の幅の狭い領域で、移動してできる曲線に交差が生じ、複数の“島”が生じる。

したがって、(2)、(3)の問題については、不要な交差により生じた閉曲線部分は除去しなければならない。(1)の問題のうち、図 2 (b)に示す問題については不要な線分を除去しなければならない。また、図 2 (a)に示す不連続に対しては、その連続のさせ方により、図 5 に示すような 3 通りの形状が考えられる。図 5 (a)のものは、“延長線”により定義するものであり、(b)は直線で接続してしまうものであり、(c)は半径 d の円弧で接続するものである。ただし、(b)では、後で述べるように、うまく閉曲線が生成できない場合がある。図 5 (c)による相似曲線は、“与えられた閉曲線の最も近い点への距離が d であるような

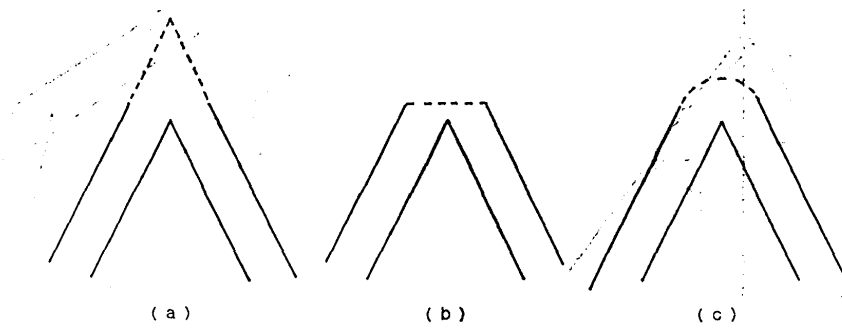


図 5 連続化の方法

Fig. 5 Three possible offsets at a junction point of curves.

点の集合”として厳密に定義できる。海岸線に対する等距離線、すなわち水線はこの定義によるものである。等高線の形状としては、どの定義が良いかは不明であり、もちろん、“一定距離 d だけ縮小”ということ自体、良い等高線を生成するとは思われないが、まず、ここでは図 5 (a), (b), (c) について検討を行ってみた。

また、ここでは、等高線データは、点列として与えられるので、閉曲線は、多角形となり、図 3 の“角”の問題は生じない。

ここで、多角形（等高線）の縮小アルゴリズムをまとめておく。ここでは図 5 (c) に示す等距離線を求めるものを示しておくが、他の場合も同様である。図 6 に例を示す。

多角形縮小アルゴリズム：

- ステップ 1. 多角形の各線分について、左まわりに方向を与え、その多角形の内部（線分方向の左側）へ距離 d だけ平行移動した有向線分を求め、縮小図形を構成する線分の集合 C に加える（図 6 (a)）。
- ステップ 2. 多角形の凹部の頂点に対して、半径 d の有向円弧を求め、 C に加える（図 6 (b)）。
- ステップ 3. C 中の線分どうしのすべての交点を求め有向グラフ D を求める（図 6 (c)）。
- ステップ 4. 有向グラフ D 中からすべての左まわりの閉路（面、領域）を見つける。これを求める縮小図形とする（図 6 (d)）。

ただし、求める縮小図形も、ここでは等高線であり、多角形として得られた方が、次の等高線の生成の

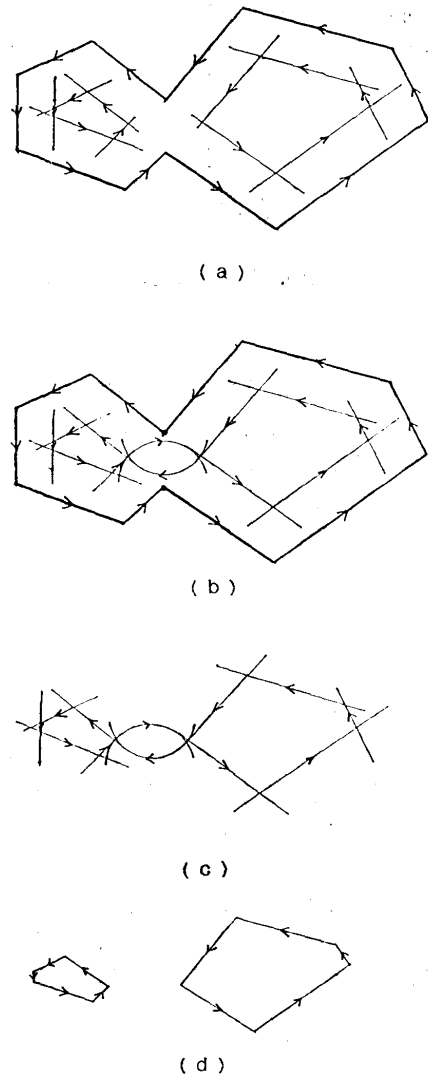


図 6 多角形縮小アルゴリズム

Fig. 6 A polygon shrinking algorithm.

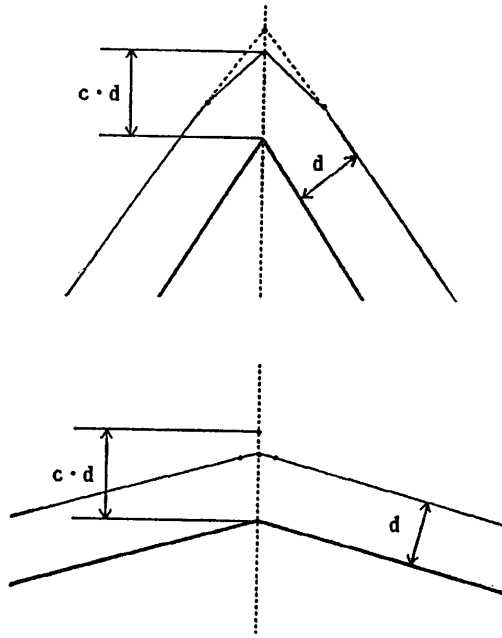


図7 円弧の近似

Fig. 7 Line approximation of a circular arc.

ためには都合がよい。したがって、ステップ2における円弧を次のように多角形で置き換えて求めている。

図7に示すように、 $c (\geq 1.0)$ を定数として、角の二等分線に $c \cdot d (=d')$ の距離の点と、その角を示す二つの線分を平行移動して求まる線分の延長線どうしの交点までの距離とのうち、小さい方の点と、その角を示す線分の端点を結ぶ。したがって、 c が大きければ、その形状は図5(a)に近づく。 c の値により、(a)と(b)の間に位置する形状が種々生成でき都合がよい。

なお、等距離線は、多角形のポロノイ領域^{9),10)}を求めてから計算すると、容易に求められることがわかっている¹¹⁾が、そのポロノイ領域を求めるアルゴリズム自体が複雑であるため、ここでは、採用していない。

また、図8に示すように、図5(b)と上述の多角形での置き換えによる方法では、凹部を構成する二つの線分の長さや凹部の角度との関係により閉曲線とならない場合が起こりうる。これらの不都合を検出し、除去する完全な方法は、筆者らには不明である。しかしながら、この不都合が起こるのは、ほとんどの場合、非常に短い線分や鋭い鋭角部分であり、前もってこれらの部分を除去するという簡便な方法により、すなわち、線分のいずれか一方の点を、また鋭角となる点を除去することにより不都合は避けられている。また、上述の多角形での置き換えの際、円弧を包含する多角

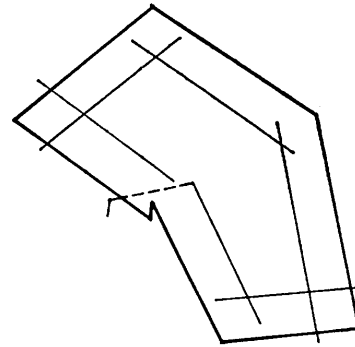


図8 閉曲線とならない例

Fig. 8 A case in which one can not get a closed curve.

形で置き換えれば、この不都合は起きないことはわかっているが、実際上は、上述の方法で問題はないため、簡便な方法によっている。

多角形の拡大、すなわち、等高線の山の裾野方向への生成は、ステップ1での線分を右まわりに定義することにより、同様に行えるので、以下では縮小についてのみ考えることにする。

3. 単純等高線生成法

前述の多角形縮小アルゴリズムにより、次のような単純な等高線生成法が得られる(これを単純等高線生成法と呼ぶことにする)。

単純等高線生成法:

ステップ0. 種子等高線を入力し、多角形の集合 P の唯一の元とする。

ステップ1. P が空でない限り、その一つの元を p とし、ステップ1.1, ステップ1.2を繰り返す。

ステップ1.1. “多角形縮小アルゴリズム”を p に適用する。

ステップ1.2. P より p を除去し、ステップ1.1で得られた閉路(多角形領域)を P に加える。

図5(a), (b), と図7で示す3種類の定義による生成結果を、各々図9(a), (b), (c)に示す。図9(d)に実際の地形図(宮城県, 泣面山)を示す。図9(a)に示したものは、凹部(谷)の切込みがきつく、図9(b)のものは、凹部が内側に入るほど点の数が増え極端に丸みをおびてしまう。また、どれも凸部(尾根)では、切込みがきつくなっている。谷部での切込みの仕方から見ると、この3種類の結果の中では、図9(c)が比較的良好い。

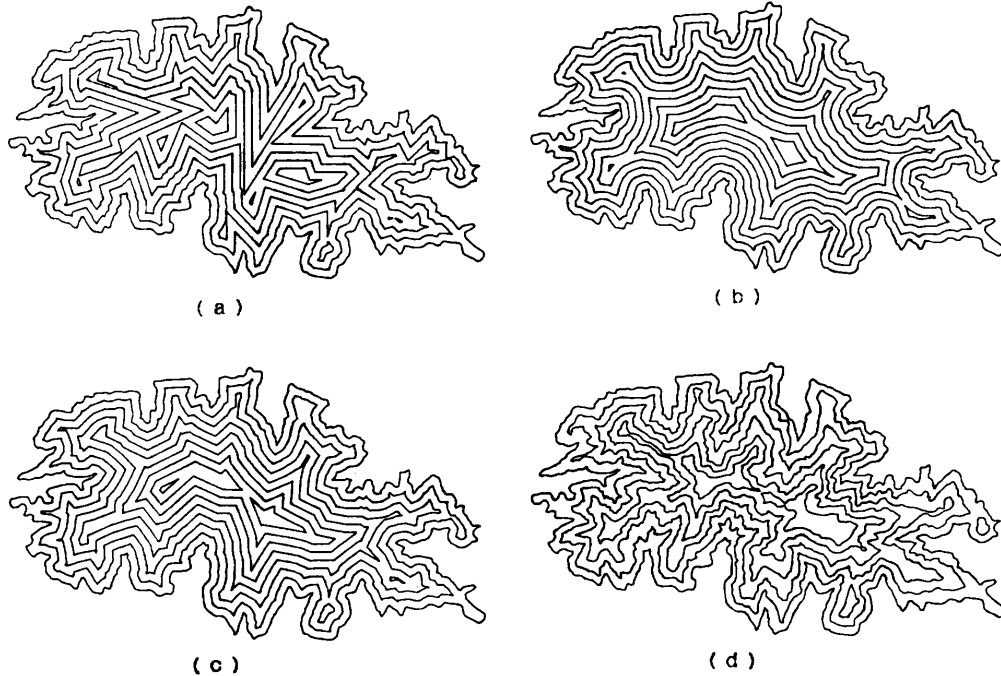


図 9 (a), (b), (c): 単純生成法による生成例, (d): 実際の地形図
 Fig. 9 (a), (b), (c): Examples generated by the simple contour generation method.
 (d): A real contour map.

図 10 に d' の値を $1.4d$, $1.6d$ とした場合の生成例を示す。 $d'=1.4d$ のものが、ほぼ実際のものと、その切込み度合が近い。この d' は地質等によって定まる、浸食の仕方を表す値と考えられる。しかしながら、いずれにせよ、内側（標高の高い）の等高線になるほど、その形状は単純化する傾向にあり、等高線生成法としては不十分であると言わざるを得ない。形状が単純化するの、尾根部の生成での点の減少、島化することによる点の減少のためである。

このように、形状の単純化が生じるが、これほど単純な方法でも、それらしい山の近似は得られるということに注意したい。したがって、このままの生成アルゴリズムでも、得られた等高線に三角形面を張り^{12)~14)}、図 11 に示すような中点変位法^{3),5)}を適用し、形状に“ゆらぎ”を与えることでも、それらしい山の形状定義は得られるものと考えられる（ただし、図 9 を見てもわかるとおり、等高線間をそのまま三角形板で張りめぐらすと、不都合な面が生成されてしまう場合が多いので、工夫が必要となる。この点については、再度、5 章でふれる。）。しかしながら、流れるような自然な尾根線を実現するためには、等高線自体リアルなものを生成しておく方が有効である。

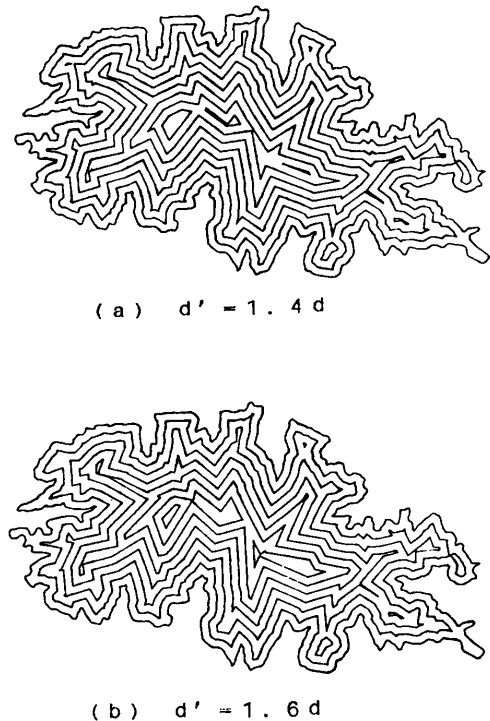


図 10 d' のちがいによる生成例
 Fig. 10 Examples for different d' 's.

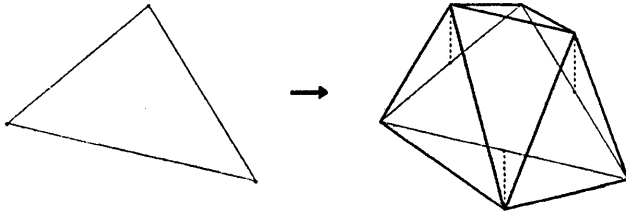


図 11 三角形面への中点変位法

Fig. 11 Random midpoint displacement for triangle surfaces.

4. 改良等高線生成法

4.1 中点変位による等高線生成法

3章で示した実験結果を見た場合、比較的良好とした図9の(c)でも、凸部(尾根)凹部(谷)の変化の流れ、すなわち、尾根線や谷線の直線的な流れだけがめだち、不自然な印象を与える。これは生成過程において、生成された多角形に“ゆらぎ”を与えることにより解決されると考えられる。“ゆらぎ”を与える簡便な方法としては、線分に対する中点変位法が考えられる。等高線の生成過程で、生成された多角形の辺となる線分のうち、長さが $2d_0$ 以上のものについて、すべての線分の長さが $2d_0$ 以下となるまで、線分に対する中点変位法を適用する。ただし、 d_0 は種子等高線の平均線分長であり、変位は、線分長を $2l$ とし、図12で示される θ を一様乱数として、 $\min\{d'', |\tan \theta|\}$ で定め、変位の方向はランダムに定めている。したがって、ここでは、フラクタル理論にもとづいた中点変位法⁴⁾ではなく、単に“中点をランダムに変位させる”という意味で、中点変位法という用語を使っていることを断っておく。図13に、 $d'=1.4d$ 、 $d''=0.3d$ とし、 θ をパラメータとした場合の生成例を示す。 $0^\circ < \theta < 20^\circ$ の場合が最も“それらしく”なっているが、凸部、凹部の“直線的”変化は保存されてしまっている。これは、中点変位法の特徴である、“一度定まった点は固定されてしまう”，ということによって⁴⁾。これは、以下に示すように、閉曲線を

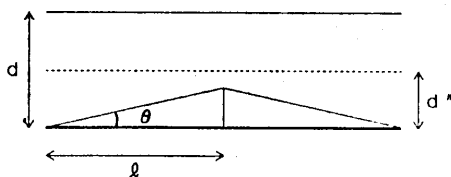


図 12 中点変位法の適用例

Fig. 12 Employing a random midpoint displacement for line segments.

“周波数領域において操作する”ことによっても、解決できる。

4.2 フーリエ記述子の操作による等高線生成法

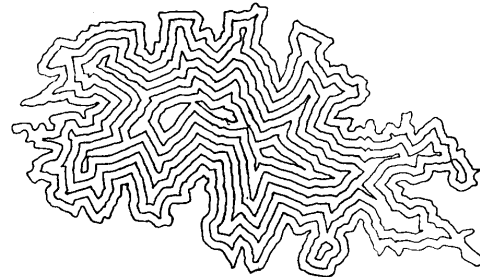
平面上の閉曲線を周波数領域で記述するフーリエ記述子がいくつか提案されているが、ここでは、P形記述子¹⁵⁾と呼ばれるものを用いる。P形記述子の定義は次のようである。

いま、等しい長さ h をもつ線分からなる n 角形があるとす。その複素平面上での頂点列を $z(j)$ とする。すなわち、

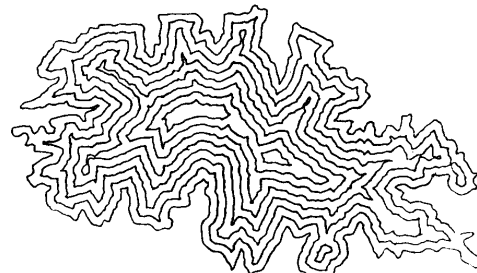
$$z(j) = x(j) + iy(j),$$

$$(j=0, 1, \dots, n, i^2 = -1).$$

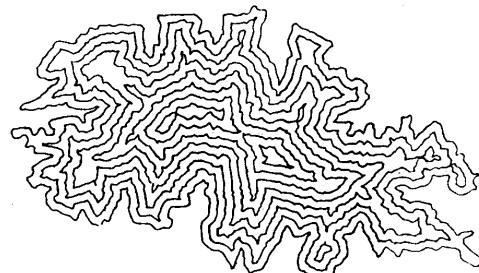
とする。すると、各線分が表すベクトル $z(j+1) -$



(a) $0^\circ < \theta < 10^\circ$



(b) $0^\circ < \theta < 20^\circ$



(c) $0^\circ < \theta < 30^\circ$

図 13 線分への中点変位法

Fig. 13 Random midpoint displacement for line segments.

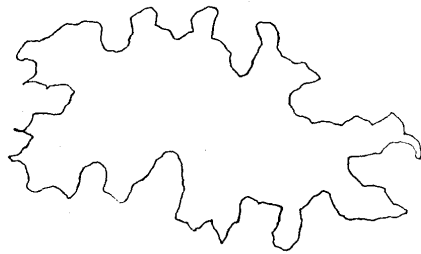
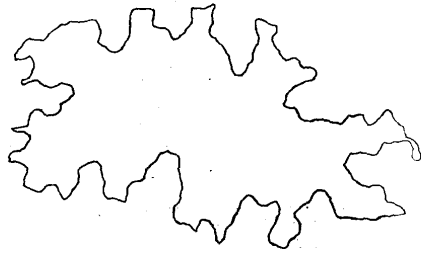
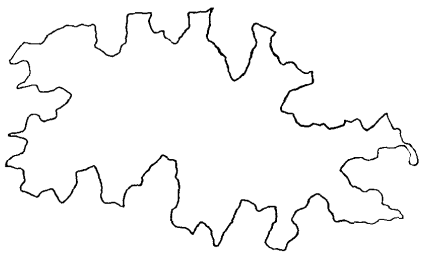
(a) $f_0 = 64$ (b) $f_0 = 128$ (c) $f_0 = 256$

図 14 フーリエ記述子の位相のランダム化
Fig. 14 Randomizing phases of Fourier descriptors.

$z(j)$ に対し, それが x 方向, y 方向にどれだけ変化するかを示すベクトル $w(j)$ が h を用いて,

$$w(j) = (z(j+1) - z(j))/h$$

と表される. この w から定まる w の離散フーリエ変換

$$c(k) = \left(\frac{1}{n}\right) \sum_{j=0}^{n-1} w(j) \exp\left(-2\pi i \frac{jk}{n}\right)$$

を P 形記述子と呼ぶ. これを用いれば, 等高線を周波数領域で記述することができる.

実際の地形図からの等高線と, 生成した等高線, 各々のパワースペクトルを調べると, 両者にそれほど違いは見られなかった. そこで, ここでは, f_0 番目以上の高周波成分のフーリエ記述子の位相 ϕ を一様乱数で“ふらせ”て, 直線的な形状にゆらぎを与えること

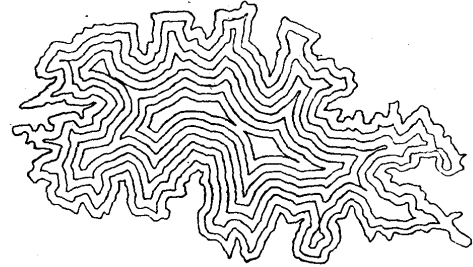


図 15 フーリエ記述子の操作による等高線生成法
Fig. 15 Contour generation method employing modifications of Fourier descriptors.

にした. すなわち, 再生図形の頂点列 z' は次のように定義される.

$$w(j) = \sum_{|k| < f_0} c(k) \exp\left(2\pi i \frac{jk}{n}\right) + \sum_{|k| \geq f_0} |c(k)| \exp(i\phi) \exp\left(2\pi i \frac{jk}{n}\right),$$

$$z'(m) = z(0) + h \sum_{j=0}^{m-1} w(j).$$

図 14 に, 単純等高線生成法により生成された等高線に対する z' の例を示す (ただし, FFT におけるサンプル数は 1,024 である). 図 15 に, 次に示すようなフーリエ記述子による等高線生成法を用いて生成した等高線を示す. 多角形の縮小は, 図 7 に示した連続の仕方によっており, $d' = 1.4d$, $f_0 = 256$ としている. 形状が極端にくずれずに, かつ, 頂点位置にゆらぎを与えるためには, この例では, $f_0 = 256$ の場合が良好であった.

フーリエ記述子の操作による等高線生成法:

ステップ 0. 種子等高線を入力し, 多角形の集合 P の唯一の元とする.

ステップ 1. P が空でない限り, その一つの元を p とし, ステップ 1.1~1.3 を繰り返す.

ステップ 1.1. “多角形縮小アルゴリズム”を p に適用する.

ステップ 1.2. ステップ 1.1 で得られた図形に対し, FFT により P 形フーリエ記述子を求める. f_0 以上の高周波成分の位相をランダムに“ふらせ”, 逆フーリエ変換により縮小した等高線を求める.

ステップ 1.3. P より p を除去し, ステップ 1.2 で得られた閉路を P に加える.

しかしながら, 生成例を見ると, ただ位相を変えただけでは内側にいくにしたがいが, 丸みができてしまうことがわかる. 解決策としては, 次節で示すように,

中点変位との組合せが自然に考えられよう。

4.3 改良等高線生成法

以下に、多角形縮小アルゴリズムで生成された多角形に、前述の線分に対する中点変位法をほどこすことにより、ランダム性を“注入”しながら、等高線を生成するという、改良等高線生成法を示す。

改良等高線生成法：

ステップ0. 種子等高線を入力し、多角形の集合 P の唯一の元とする。

ステップ1. P が空でない限り、その一つの元を p とし、ステップ 1.1~1.4 を繰り返す。

ステップ 1.1. “多角形縮小アルゴリズム” を p に適用する。

ステップ 1.2. ステップ 1.1 で得られた図形に対し、4.1 節で述べた中点変位を行う。

ステップ 1.3. ステップ 1.2 で得られた図形に

対し、FFT により P 形フーリエ記述子を求める。 f_0 以上の高周波成分の位相をランダムに“ふらせ”，逆にフーリエ変換により縮小した等高線を求める。ほぼ、一直線上にある点を除去し、線分の数を減らしておく。（これはステ

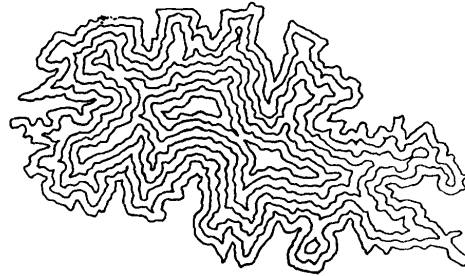


図 16 改良等高線生成法による生成例
Fig. 16 An example generated by the revised contour generation method.

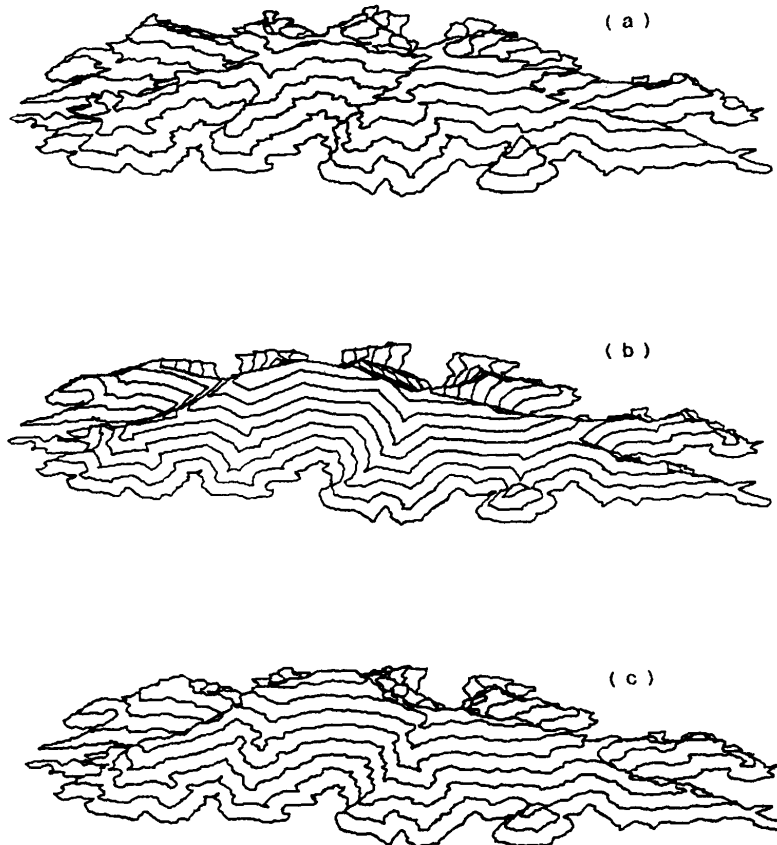


図 17 (a) 地形図からの鳥瞰図, (b) 単純等高線生成法による鳥瞰図, (c) 改良等高線生成法による鳥瞰図
Fig. 17 Birds-eye views constructed from (a) a real contour map, (b) the contour map of Fig. 9(c), and (c) the contour map of Fig. 16.

ップ 1.2 での中点変位の対象となる, 長さ $2d_0$ 以上の線分の減少を防ぐために行う. ここでは, $2d_0$ 以上となる線分を全体の 20% 程度になるようにしている.)

ステップ 1.4. P より p を除去し, ステップ 1.3 で得られた閉路を P に加える.

$d'=3d, d''=0.5d, 20^\circ < \theta < 40^\circ, f_0=256$ とした場合が最もそれらしくなった. d', d'', θ をただの中点変位法を適用した場合より大きくとっているのは, 位相のランダム化によりやや形状が丸みをおびることから, ゆらぎを強く与えるためである. ただし, これらのパラメータの値は, どのような山に対しても, 良好な形状を与えるものではないことを断っておく. 図 16 に, 等高線の生成例を示す. 図 17 には各生成法による鳥瞰図を示す.

これまでのうちで, 最も“それらしい”山の形状が得られているといえよう. 峰(頂上)の位置もよく似ており, 尾根線や谷線の流れも自然な印象を受ける.

4.4 注 意

中点変位や, フーリエ記述子の操作を行うと, 閉曲線自身に図 18 のようなねじれが発生することがある. したがって, これを取り除かなければならないが, 完全な方法は, 現在のところ, 筆者らにはわかっていない. しかしながら, ほとんどの場合は, 次のような除去法を適用することにより解決されている.

方法 1: 多角形縮小アルゴリズムのように, グラフをつくり, 線分数がある閾値より少ない面(多角形領域)を見つけ, 除去する. 例えば, 図 18 では, 4 より大きい適当な閾値を採用すれば面 B, C, D が除去される.

方法 2: 閉曲線を構成する点列に交点を加え新たな点列とする. 交点間の点数がある閾値以上の部分点列上の点を出発点として, 交点が見つかるまで, この点

列をたどり, 見つけた交点から, 同一交点の, もう一方の交点の手前の点まで除去することを繰り返す. 例えば, 図 18 では, 点列は $\dots-1-2-3-4-5-6-7-8-9-10-11-12-13-14-15-16-17\dots$ となり(○印のついた点はねじれによる線分どうしの交点), ⑤~④, 15~⑭の部分の点列が除去され, $\dots-1-2-3-4-10-11-12-13-14-17\dots$ と求まる.

5. む す び

いくつかの等高線生成法を示し, 山の尾根線や谷線の自然な流れを実現する山の形状定義法として, 改良等高線生成法が最も優れていることを示した. ここでは, さらに, 今後の課題についてまとめておく.

与えられた種子等高線の形状には, その山地の浸食の度合いが反映されていると考えられるので, 山の形状にも自然に反映される生成法が望まれる. そのためには, 次のようなことが大切となろう.

改良等高線生成法の中での定数, d', d'', θ, f_0 , を種子等高線の形状により定めることが大切である. θ については, フラクタル次元にもとづく方法¹⁶⁾も有効であろう. 等高線の生成は, 一定距離を基本としているが, もちろん実際には一定ではなく, 同一等高線内でも場所によって異なる. 前述の定数とともに, この点についても地形学的な考察が必要であろう. さらに, ここではすべての等高線の生成について, d を一定値としたが, 生成する等高線の標高値により d を変化させるか, 一定値 d で生成した等高線への標高値の割当てを等間隔とせずに変化させることにより, 山の形状は異なったものとなる. いずれにせよ, 山の傾斜の具合を定めることが必要である. この点については, 簡便な方法としては地形学でいう高度-面積曲線のような特徴パラメータを与えることが考えられるが, この傾斜の具合も, 種子等高線の形状に反映されていることが十分に予想されるので, 種子等高線より自動的に傾斜の具合を定めることも考えられ興味深い.

等高線に面を張る方法も, いくつか提案されているが^{6), 12)-14)}, 山の等高線には向かない. 筆者らは, 面を張るとすれば, 格子点モデル(例えば, 参考文献 17))を経由するのが最も現実的であると考えている. また, 筆者らは, 自然物の形状定義には, 3次元フレー

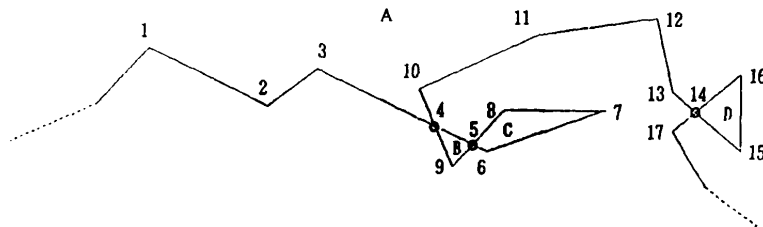


図 18 閉曲線のねじれの例
Fig. 18 An example of loops in a contour.

ムバッファが有効である^{18),19)}と考えているので、これを用いた面の生成アルゴリズムも検討に値する。形状定義のデータ構造が異なるので、“面を張る”という図形処理的アルゴリズムによらない可能性もある。

生成した山から、傾斜量を求め、水系を定めたり、日射量を求めたりし、地方や季節を反映させた、樹木を中心とした、植物の分布を求めるアルゴリズムの開発も、広大な景観を生成するためには重要である。さらに、さまざまなスケールでの景観を構成する、樹木や川や岩石などの“大道具”や、草、こけ、落葉や石ころなどの“小道具”の形状定義に対する研究が期待される。筆者らは、この点で、フラクタルブラウン運動で、すべてのスケールでの山を定義しようとする自己相似性の立場をとっていないことを記しておきたい。山を遠くに見れば、フラクタルブラウン運動に見えるかもしれないが、近くに見れば、樹木や草や川や、岩が見え、さらに近くに見れば、石ころやこけなどが見えてくるという自然な立場をとる。

謝辞 日頃、御討論いただく東北大学西関隆夫助教授に感謝いたします。

なお、本研究の一部は文部省科研費（奨励研究(A) 61750313)の補助による。

参 考 文 献

- 1) Gardner, G. Y.: Simulation of Natural Scenes Using Textured Quadric Surfaces, *Comput. Gr.*, Vol. 18, No. 3, pp. 11-20 (1984).
- 2) Mandelbrot, B. B.: *The Fractal Geometry of Nature*, W.H. Freeman and Company, New York (1983).
- 3) Fournier, A., Fussell, D. and Carpenter, L.: Computer Rendering of Stochastic Models, *Comm. ACM*, Vol. 25, No. 6, pp. 371-384 (1982).
- 4) Voss, R. F.: Random Fractal Forgeries, in *Fundamental Algorithms for Computer Graphics*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg (1985).
- 5) 中嶋正之, 宮田一乗, 安居院猛: 三次元自然形状の疑似符号化について, 情報処理学会研究会資料, グラフィクスと CAD, 20-1 (1986).
- 6) 佐藤政生, 橘 昌良, 大附辰夫: 図形整形アルゴリズムと LSI パターンへの応用, 電子通信学会論文誌, Vol. J66-C, No. 12, pp. 1132-1139 (1983).
- 7) Tiller, W. and Hanson, E. G.: Offsets of Two-dimensional Profiles, *IEEE CG & A*, Vol. 4, September, pp. 36-46 (1984).
- 8) Hoschek, J.: Offset Curves in the Plane,

- CAD*, Vol. 17, No. 2, pp. 77-82 (1985).
- 9) 浅野孝夫: 計算幾何学とその応用, 情報処理, Vol. 25, No. 3, pp. 208-221 (1984).
- 10) Lee, D. T.: Medial Axis Transformation of a Planar Shape, *IEEE TOPAMI*, Vol. PAMI-4, No. 4, pp. 363-369 (1982).
- 11) 小久保岩生: 一般化 Voronoi 線図の構成算法の研究, 東京大学工学部修士論文 (1985).
- 12) Fuchs, H., Kedem, Z. M. and Uselton, S. P.: Optimal Surface Reconstruction from Planar Contours, *Comm. ACM*, Vol. 20, No. 10, pp. 693-702 (1977).
- 13) Christiansen, H. N. and Sederberg, T. W.: Conversion of Complex Contour Line Definitions into Polygonal Element Mosaics, *Comput. Gr.*, Vol. 12, No. 3, pp. 187-192 (1978).
- 14) Ganapathy, S. and Dennehy, T. G.: A New General Triangulation Method for Planar Contours, *Comput. Gr.*, Vol. 16, No. 3, pp. 69-75 (1982).
- 15) 上坂吉則: 開曲線にも適用できる新しいフーリエ記述子, 電子通信学会論文誌, Vol. J67-A, No. 3, pp. 166-173 (1984).
- 16) 中嶋正之, 宮田一乗, 安居院猛: フラクタル次元に基づくデジタル図形の疑似符号化について, 信学技報, IE85-13 (1985).
- 17) 程 康, 出澤正徳, 相馬 嵩: 等高線形状モデルから格子点モデルへの変換, 情報処理学会研究会資料, グラフィクスと CAD, 21-4 (1986).
- 18) 青木富雄: 3次元フレームバッファによる形状定義に関する研究, 東北大学工学部卒業研究 (1986).
- 19) 新保賀津雄: 3次元フレームバッファによる画像生成に関する研究, 東北大学工学部卒業研究 (1986).

(昭和 61 年 6 月 19 日受付)

(昭和 61 年 10 月 8 日採録)



三沢 雅一 (学生会員)

昭和 37 年生。昭和 60 年東北大学工学部通信工学科卒業。同年同大学院修士課程入学。現在、同課程在学中。コンピュータグラフィクスに興味を持つ。



千葉 則茂 (正会員)

昭和 26 年生。昭和 50 年岩手大学工学部電気工学科卒業。同年より昭和 53 年まで(株)日本ビジネスコンサルタントに勤務。昭和 59 年東北大学大学院博士後期課程修了。工学博士。同年同大学工学部助手。昭和 61 年仙台電波工業高等専門学校助教授。現在に至る。アルゴリズム、コンピュータグラフィクス、画像処理に興味を持つ。電子通信学会、ACM 各会員。



斎藤 伸自

昭和 3 年生。昭和 26 年東北大学工学部電気工学科卒業。同大通信工学科教授。工学博士。超短波帯雑音、分布定数回路、帯域制限パルス波形、グラフ理論とその応用などの研究に従事。著書「回路論」、訳書「グラフ理論入門」など。電子通信学会会員。