

## 三次元自然形状の擬似符号化について

Quasi coding method for 3D natural shapes

中嶋 正之 宮田 一乗 安居院 猛

Masayuki NAKAJIMA Kazunori MIYATA Takeshi Agui

東京工業大学 像情報工学研究施設

(Imaging Science and Engineering Laboratory, Tokyo Institute of Technology)

We report a quasi coding method of 3D mountainous shapes applying fractal theory. We express the model of 3D mountainous shapes with feature points of contour lines and fractal dimensions.

At first, we extract feature points of contour lines, then measure fractal dimensions, and finally examine reconstructed shapes.

This method is useful for the data base of making scenes of computer animations.

### 1. まえがき

建築物、機械部品等の人工物体に比較して、自然形状を計算機を用いて表現することは困難である。また、表現に用いるデータ量も膨大となる。特に、対象が三次元になると、二次元の場合に比べてデータ量は極端に多くなる。

以上のようなことから、三次元の自然形状を計算機に効率良く記憶させる方法が必要となり、様々な符号化法が提案されてきた<sup>2)3)4)5)</sup>。例えば、樹木に対する手続き的定義法や<sup>2)</sup>、二次曲面を用いて近似する方法<sup>3)</sup>、等高線を自動生成して山岳を表現する方法<sup>4)</sup>等である。しかし、これらの方法は、オペレータ自身が計算機に対して種々のパラメータを経験的に入力するものがほとんどであった。

本報告では、この欠点を補うものとして、三次元山岳形状を例に、自然形状の擬似符号化手法の提案を行う。

この手法は、文献[1]のデジタル線図形に対する擬似符号化法を三次元に拡張させたもので、オリジナル・データには二次元の等高線を用いている。

本報告の手法により、オペレータが任意の等高線を入力するだけで、原形状との近似度が高い山岳形状の再生が行える擬似符号化が可能になった。また、専門家が苦心して描いているアニメーションの背景画にも適用できるので、アニメーション分野での応用が考えられる。

### 2. 特徴データの抽出法

本報告では、三次元山岳形状の符号化に対するオリジナル・データとして、二次元の等高線を用いた。

ここでは、等高線を用いた三次元山岳形状の特徴データの抽出法と、その抽出例について述べる。

#### 2.1 等高線の特徴データの抽出法

本研究の目的の一つとして、自然形状の符号量の圧縮があげられる。本報告では、オリジナル・データとして与えられる等高線の特徴点を抽出することにより符号量の圧縮を行った。

等高線の特徴データである、特徴点の抽出法とフラクタル次元の算出法は、文献[1]で述べられてい

る方法と同じである。

各等高線に対して、ベクトル・トレーサ<sup>6)</sup>を用いて、原図形の鋭角部と曲線部の特徴点を抽出し、フラクタル次元を計算する。ただし、山頂の部分は、データが1点だけなので、これらの手順は適用せず、そのまましておく。

等高線の特徴点を抽出した例を、図1に示す。図1(a)がオリジナル・データとして用いる等高線群である。この等高線群を構成する点の個数は2848である。図1(b)は図1(a)の各等高線の特徴点を直線で結んだ図形であり、特徴点の数は57である。

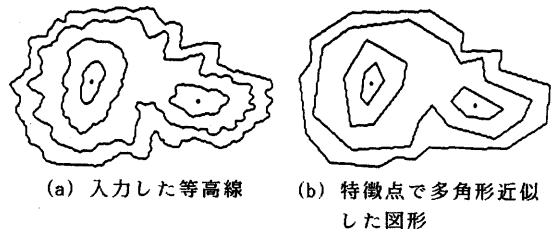


図1 等高線の特徴点の抽出例

#### 2.2 多角形近似された等高線の三角形パッチ法

与えられた等高線を多角形近似しただけでは、二次元のデータしか得られない。対象としている山岳形状の三次元の特徴データを抽出するには、多角形近似された等高線に対して、三角形パッチを施して三次元のデータを得る必要がある。三角形パッチの手法としてはDelaunayの三角形パッチ法<sup>7)</sup>等があげられるが、本研究では山岳形状の全体形状も重視するために、以下に示す三角形パッチ法を用いた。

##### (I) 等高線群の木構造化

三角形パッチの第1手順として、まず、与えられた等高線群を木構造の形で表現する。

例えば、図2のような等高線群に対する木構造は、図3のようなリストになる。ここで、木構造の末端である葉は山頂を、節は等高線を表す。リストは、根側の等高線が、葉側の等高線を包含しているということを意味している。図3のリストの場合で説明すると、その包含関係の一例として、式(1)-(3)に

示す関係が成り立つ。

- $C_2 \supseteq C_3 \quad \dots (1)$
- $C_2 \supseteq C_5 \quad \dots (2)$
- $C_3 \supseteq C_4 \quad \dots (3)$

このように、等高線群を木構造化することにより、以下で述べる手順が実行しやすくなる。なお、三角形パッチは、リストの葉から根に向かって実行してゆく。

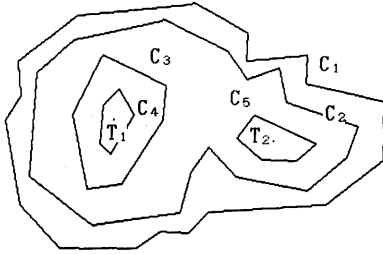


図2 等高線群の例

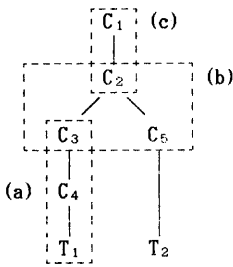


図3 等高線群の木構造化リスト

(II) 葉から分岐点までの三角形パッチ

リスト上の葉から分岐点までの三角形パッチ法について、図3のリストの(a)の部分为例に説明する。

まず、葉の親節に対応する等高線に対して三角形パッチを行う。これは、その葉に対応した山頂と各特徴点を直線で結ぶことにより行う。(a)の部分に相当する等高線に適用した例を、図4に示す。

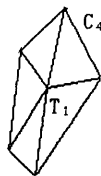


図4 葉の親節との三角形パッチ法

次に、分岐点までの各枝を構成する節に対応する、等高線間の特徴点の対応点を検索する。この検索は、図5のように、山頂と各特徴点とを結んだ直線に、子節に対応した等高線の特徴点のうちで一番近い点を対応させる。すなわち、図5では、 $AM < BN$  なの

で、PとAを対応させる。

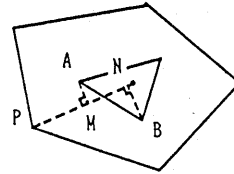


図5 各特徴点の対応点の探索

最後に、対応点の検索後、三角形を形成していない箇所を自動的に探索する。そして、図6(a)のように四角形を構成している場合は、対角線の短い方の点を対応させる。また、図6(b)のように五角形以上の場合には、それぞれ距離の短い方の点に対応させる。

以上の手順により、図7のような三角形パッチができる。

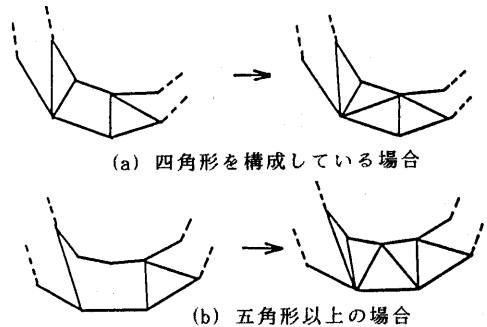


図6 三角形を構成していない箇所の三角形パッチ法

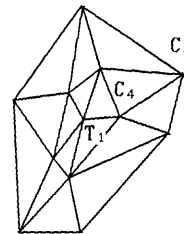


図7 葉から分岐点までの三角形パッチ法

(III) 分岐点から親節までの三角形パッチ

分岐点から分岐点の親節までの三角形パッチについて、図3のリストの(b)の部分为例に説明する。

まず、分岐点の節と、その親節に対応する等高線の特徴点の対応点を検索する。この検索法は、以下のとおりである。

手順1：内分点の算出

分岐点の枝に分岐点が含まれない場合、各葉に対応する山頂に隣接している山頂間を直線で結ぶ。そし

て、分岐点の子節に対応する等高線で囲まれた面積で重み付けをし、山頂間を結んだ線分を内分する。この内分する点を内分点と呼ぶことにする。

これを図8に示す。図8において、山頂 $T_1$ と山頂 $T_2$ を結び、おのおの等高線 $C_3$ 、 $C_5$ で囲まれた面積で重み付けをし、内分点を算出する。この例では、点 $A$ が内分点である。

分岐点の枝に、さらに分岐点が含まれる場合は、その含まれた分岐点において求められている内分点を山頂とみなして、分岐点が含まれない場合と同じ手順を実行する。

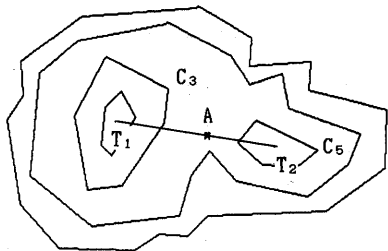


図8 内分点の算出

**手順2：ダミー等高線の作成**

次に、手順1で求めた内分点をもとに、ダミー等高線を作成する。ここで、ダミー等高線とは、手順3以降の手順の前処理として作成する、一時的な等高線である。

この作成法を、図9を例に説明する。図9において、点 $T_1$ 、 $T_2$ は山頂、点 $A$ は内分点、点 $P_1$ ~ $P_{16}$ は特徴点である。各特徴点に対して、各山頂との距離を計算し、その距離が最も短くなる山頂に対応させる。例えば、点 $P_8$ の場合は山頂 $T_2$ との距離が最も短くなるので山頂 $T_2$ に対応させる。

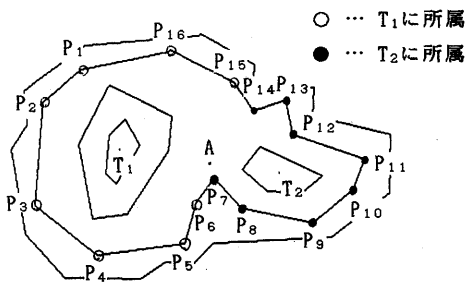


図9 ダミー等高線の対応点

次に、この対応関係と内分点を用いて、ダミー等高線を作成する。これは、同じ山頂に対応している特徴点と内分点を順に連結して求める。こうして求めたダミー等高線を、図10に示す。ここでは、 $D_1$ 、 $D_2$ がダミー等高線である。

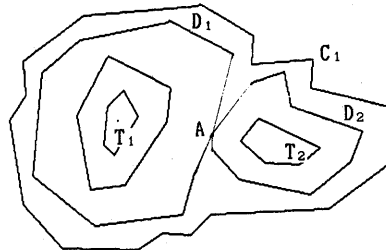


図10 ダミー等高線

**手順3：三角形パッチ**

以上で求められた各ダミー等高線を用いて、(II)と同じ手順を実行し、その後、隣接したダミー等高線間に残されている三角形をパッチすることにより、この三角形パッチは終了する。

この例を、図11に示す。図11において、三角形 $S_1$ 、 $S_2$ が隣接したダミー等高線間に残されている三角形である。これらの三角形をパッチすることにより、この三角形パッチは終了する。

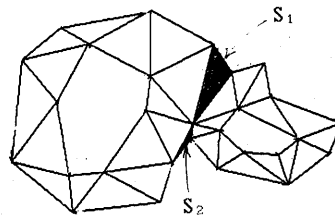


図11 分岐点から親節までの三角形パッチ法

**(IV) 分岐点の親節から次分岐点**

または根までの三角形パッチ

分岐点の親節から、次にいきあたる分岐点、または根までの三角形パッチの仕方を、図3のリストの(c)の部分为例に説明する。

まず、(III)における手順2と同様に、特徴点の対応関係を求める。その後、(II)で述べた手法と同様に、一番近い点を対応させ、三角形を構成するようにパッチを施せば、図12のように三角形パッチが行える。

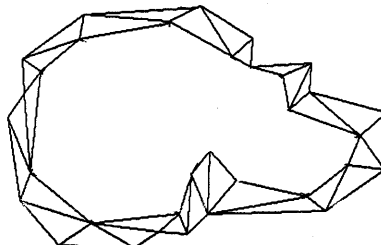


図12 根までの三角形パッチ法

以上(I)から(IV)までの手順を用い、それぞれの枝に対して各手順に従って、三角形パッチを施す。最終的に三角形パッチされた図形を、図13に示す。

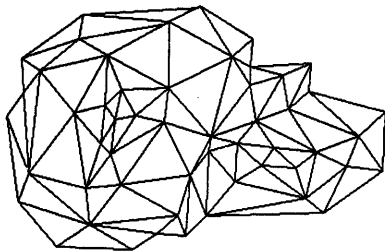


図13 三角形パッチ終了

### 3. 三次元山岳形状の再生法

ここでは、2章で得られた山岳形状に対するデータから、実際にその形状を再生する方法について述べる。

#### 3.1 三角形の三次元再帰分割法

山岳形状の三次元的な再生は、三角形パッチにより求められた各三角形を、三次元的に再帰分割することにより行う。

この再帰分割は、図14に示すように、与えられた三角形の各辺の中点にある変位量だけ変位させることを再帰的に行う。変位の方向は鉛直方向にとる。変位量は、測定されたフラクタル次元を用いて、節3.2で後述するように計算する。

分割に際してのデータ構造は、図15のように設定した。このようなデータ構造を用いることにより、プログラム上の変数領域の節約ができる。

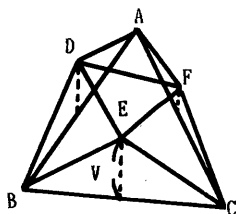


図14 三角形の再帰分割法

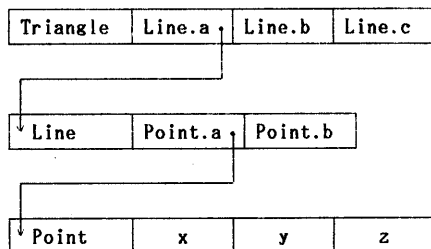


図15 データ構造

#### 3.2 変位量の計算法

再帰分割する場合の変位量  $v$  は、平均値 0、標準偏差 1 の正規分布乱数を用いて、以下のように設定する<sup>8)</sup>。

$$v = 2^{-(n+1)H} \times \text{Gauss} \quad \dots (4)$$

$$H = D - 1 \quad \dots (5)$$

D : 測定されたフラクタル次元

n : 分割の回数

Gauss : 正規分布乱数

この式で計算される変位量で再生される形状は、厳密なフラクタルではない。しかし、計算量の削減や後に示す再生形状から考慮し、コンピュータ・グラフィクスにおける計算法としては、式(4)は有効であると考えられる。

#### 3.3 重力の考慮

地球上に存在する山岳においては、垂直方向以上にそびえ立った山岳、つまりオーバーハングを持った箇所は極めて稀である。

本研究では、この点を考慮し、重力の作用を取り入れることで、実在する山岳に近い形状を再生することが可能となった。

図16を用いて、重力の考慮方法を説明する。図16において、ABはこれから分割する辺で、点A、Bの位置ベクトルを、それぞれ  $\vec{a}$ 、 $\vec{b}$  とする。また、 $\vec{v}$  は変位ベクトル、 $\vec{n}$  はZ軸の単位ベクトルである。これらのベクトルを用いて、 $\vec{p}$ 、 $\vec{q}$  を表すと式(6)~(9)のようになる。

$$\begin{aligned} \vec{p} &= (p_x, p_y, p_z) \\ &= \vec{v} + (\vec{b} - \vec{a}) / 2 \quad \dots (6) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \vec{q} &= (q_x, q_y, q_z) \\ &= \vec{v} - (\vec{b} - \vec{a}) / 2 \quad \dots (7) \end{aligned}$$

$$\vec{v} = (v_x, v_y, v_z) \quad \dots (8)$$

$$\vec{n} = (0, 0, 1) \quad \dots (9)$$

この二つのベクトルと  $\vec{n}$  とのなす角を、それぞれ  $\theta_p$ 、 $\theta_q$  とすると、 $\cos \theta_p$ 、 $\cos \theta_q$  は式(10)、(11)で与えられる。

$$\cos \theta_p = \frac{\vec{n} \cdot \vec{p}}{|\vec{p}|} = \frac{p_z}{|\vec{p}|} \quad \dots (10)$$

$$\cos \theta_q = \frac{\vec{n} \cdot \vec{q}}{|\vec{q}|} = \frac{q_z}{|\vec{q}|} \quad \dots (11)$$

オーバーハングの判定は、式(12)で表せる。再生の時には、この判定を行ない、オーバーハングを起こさないようにする。

$$\cos \theta \geq \text{Over}, \quad \cos \theta \leq -\text{Over} \quad \dots (12)$$

Over : オーバーハングの閾値

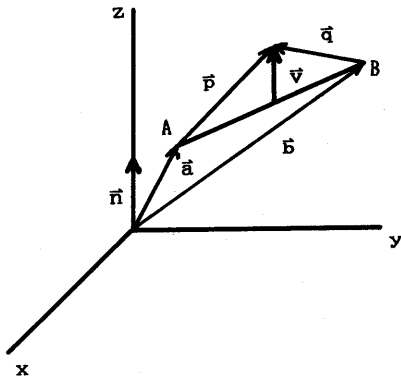


図16 重力の考慮

#### 4. 再生形状の近似度の評価法

##### およびパラメータの決定法

本研究の目的は、少ないデータ量で近似度の高い形状を再生することにある。そこで、与えられた等高線から想定される形状に近い山岳形状の再生が要求される。この近似度の評価方法としては、原データとして与えられているデータが等高線のみであるので、再生した山岳形状から等高線を抽出し、それらの等高線と、原データの等高線との近似度を評価する。そして、この近似度を考慮し、再生に用いるパラメータを決定する。

##### 4.1 等高線の抽出法

再生した山岳形状の等高線は、再生した山岳形状を、必要とされる高度で水平面と平行に切断して抽出する。

まず、必要とされる高度が  $h$  であるとして、 $Z = h$  の平面と交わる三角形を選び出す。この選出は、三角形の頂点の  $Z$  座標値の最大値  $Z_{max}$  と、最小値  $Z_{min}$  を求め、式(13)の関係を満たしている場合に、その三角形を選出する。

$$Z_{min} \leq h \leq Z_{max} \quad \dots (13)$$

次に、図17に示すように、選出された各三角形と  $Z = h$  の平面との交線の端点を、式(14)-(17)のよりに計算し、それらの点を結んで等高線とする。

$$x_1 = (x_b - x_a) \cdot (h - z_a) / (z_b - z_a) + x_a \quad \dots (14)$$

$$y_1 = (y_b - y_a) \cdot (h - z_a) / (z_b - z_a) + y_a \quad \dots (15)$$

$$x_2 = (x_c - x_b) \cdot (h - z_b) / (z_c - z_b) + x_b \quad \dots (16)$$

$$y_2 = (y_c - y_b) \cdot (h - z_b) / (z_c - z_b) + y_b \quad \dots (17)$$

図17において、 $\triangle ABC$  は  $Z = h$  の平面と交差する三角形で、点  $M$ 、 $N$  はその交線の端点である。

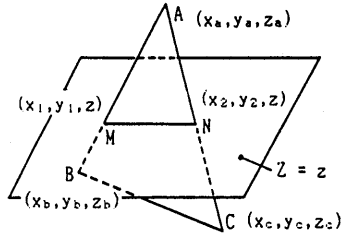
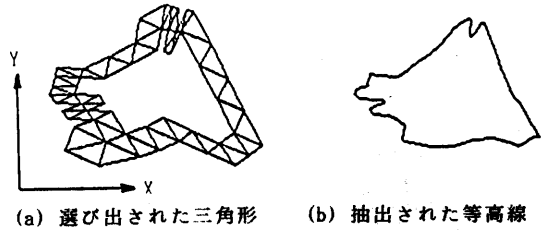


図17 等高線の抽出法

この手法により求められた等高線群の例を、図18に示す。図18(a)は、 $Z = h$  の平面と交差する三角形群であり、図18(b)はそれらの三角形群から抽出された等高線群である。



(a) 選び出された三角形 (b) 抽出された等高線

図18 抽出された等高線の例

##### 4.2 近似度の評価法

再生された山岳形状の近似度は、与えられた等高線と、節4.1で求められる等高線との近似度で評価する。

各等高線に対する近似度は、文献[1]の方法と同じ方法で計算する。これは、パラメータとして原等高線と再生形状の等高線に囲まれた面積、原等高線と再生形状の等高線との最大距離、原等高線と再生形状の等高線の曲率の符号を用いて計算する。そして、最終的な近似度  $K$  は、式(18)のように各等高線の初期直線の長さの和で重み付けをして計算する。

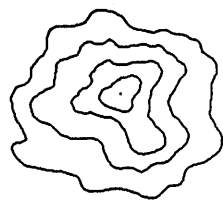
$$K = \frac{\sum_{i=1}^M (K_i \times L_i)}{\sum_{i=1}^M L_i} \quad \dots (18)$$

$K_i$  :  $i$  番目の等高線に対する近似度

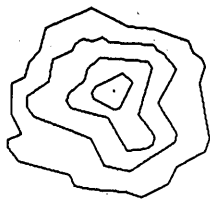
$M$  : 等高線の本数

$L_i$  :  $i$  番目の等高線の初期直線の長さの和

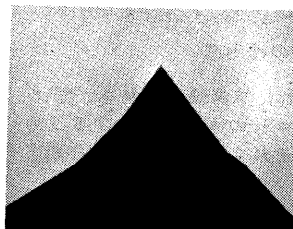
図19に、再生した山岳形状と抽出された等高線、および近似度を示す。



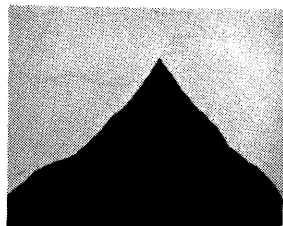
(a) 与えられた等高線



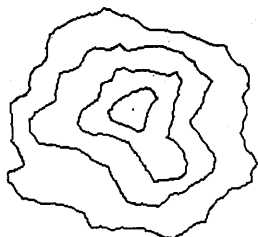
(b) 特徴点で多角形近似した図形



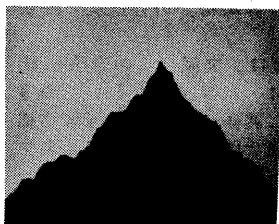
(c) 分割前の山岳形状



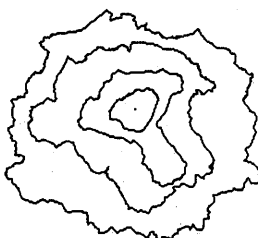
(d) 再生形状#1  
D=1.22



(e) (d) から抽出された等高線 (K = 0.862)



(f) 再生形状#2  
D=1.53



(g) (f) から抽出された等高線 (K = 0.793)

図19 近似度の評価例

#### 4.3 パラメータの決定法

以上述べた方法で近似度を評価し、特徴点およびフラクタル次元等の再生に用いるパラメータを決定する。

この手順を、図20に示す。ここでは、近似度の閾値 $Th_K$ は0.8に設定した。

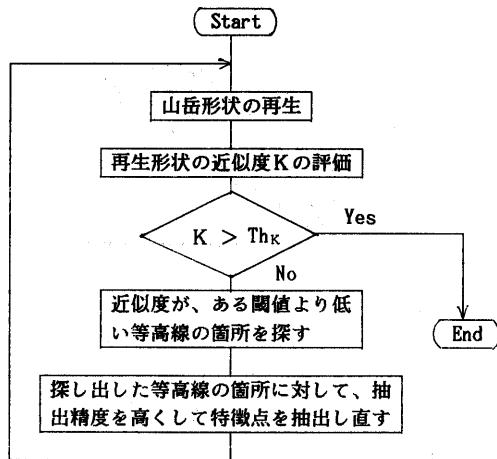


図20 パラメータの決定法

#### 5. 画面への表示法

次に、再生した三次元山岳形状のグラフィック・ディスプレイへの表示法について述べる。

この手順を、図21に示す。

データのソーティングにはクイック・ソートを用いた。

光源には点光源を用い、各面の輝度は、図22に示すように反射光のベクトルと面の単位法線ベクトルの内積値で決定した。式で表すと、式(19)のようになる。

$$I = (\vec{r} \cdot \vec{n}) \quad \dots (19)$$

I: 輝度  $\vec{r}$ : 反射光ベクトル

$\vec{n}$ : 法線ベクトル

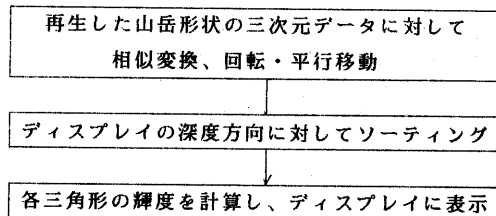


図21 画面への表示の流れ

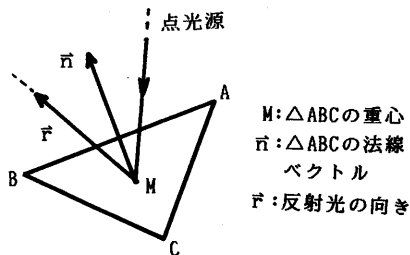


図22 三角形の輝度の計算法

## 6. 実験結果

次に、上に述べた手法を用いて種々の山岳形状に対して擬似符号化を行った例を示す。

各山岳形状の符号量Fは、特徴点は差分で表すので一点当り12ビット、特徴点の初期値に16ビット、フラクタル次元に8ビット、等高線の高度のデータに各16ビット用いるので、式(20)で表せる。

$$F = 12 \times (N - M) + 16M + 8 + 16M \\ = 12N + 20M + 8 \quad \dots (20)$$

N: 特徴点の数 M: 等高線の本数

ホストコンピュータにVAX11/750を、グラフィックディスプレイにNEXUS 6400を用いた。処理時間は平均約4時間である。

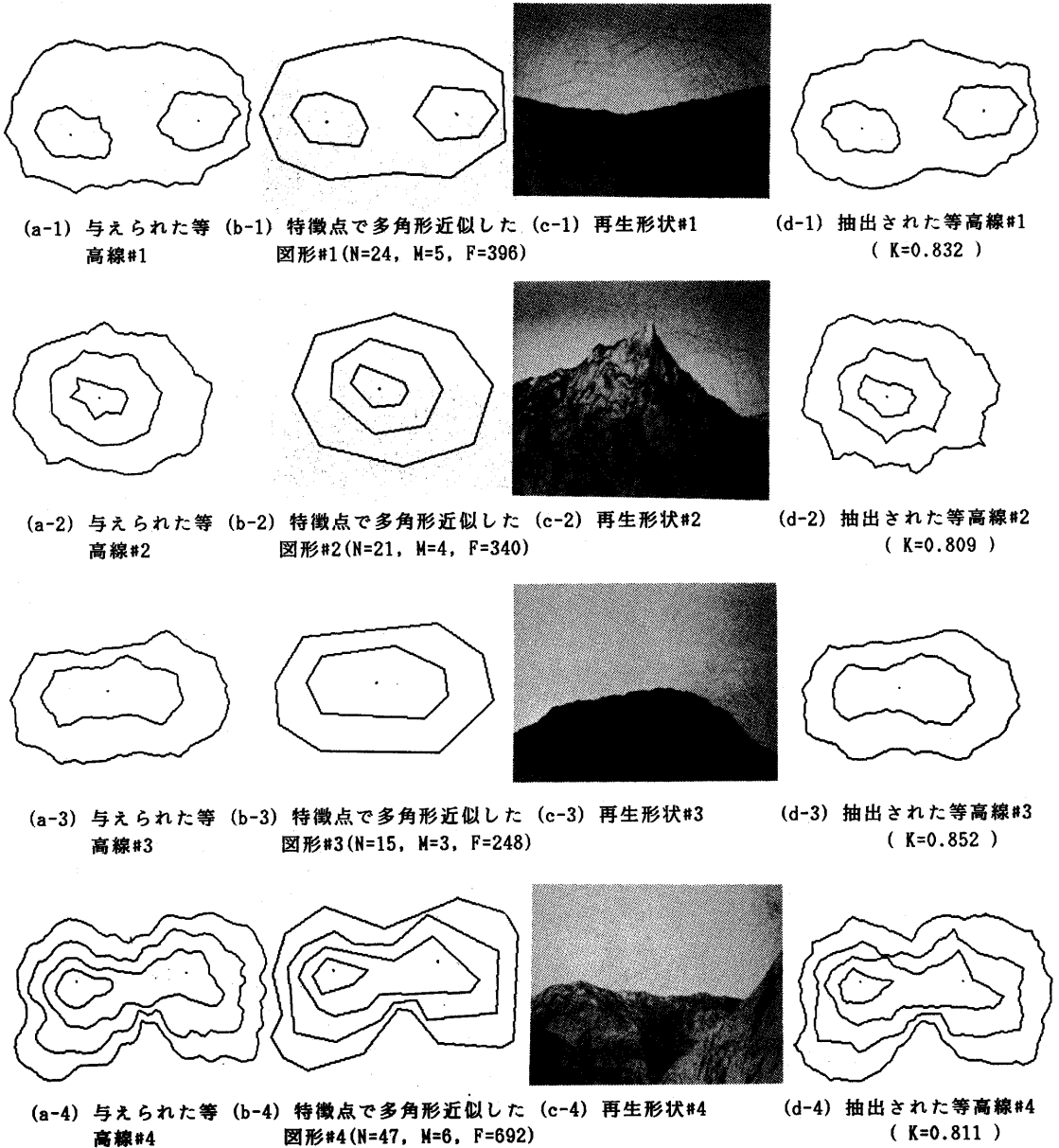


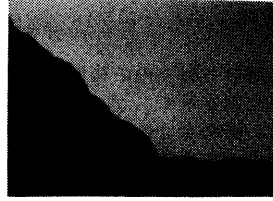
図23 実験例



(a-5) 与えられた等高線#5



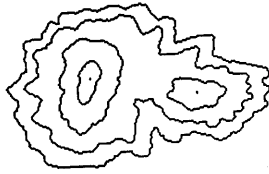
(b-5) 特徴点で多角形近似した図形#5 (N=24, M=4, F=376)



(c-5) 再生形状#5



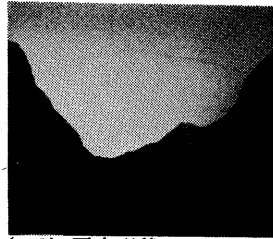
(d-5) 抽出された等高線#5 (K=0.874)



(a-6) 与えられた等高線#6



(b-6) 特徴点で多角形近似した図形#6 (N=57, M=7, F=832)



(c-6) 再生形状#6



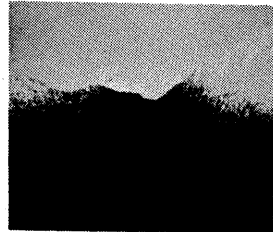
(d-6) 抽出された等高線#6 (K=0.801)



(a-7) 与えられた等高線#7



(b-7) 特徴点で多角形近似した図形#7 (N=39, M=7, F=616)



(c-7) 再生形状#7



(d-7) 抽出された等高線#7 (K=0.873)

図23 実験例(続き)

## 7. まとめ

本手法を用いることにより、三次元山岳形状の擬似符号化が可能になった。この方法では、入力された等高線のデータだけで符号化が可能であるので、従来の方法のように種々のパラメータを入力する必要がない。また、再生に用いるデータも100バイト前後と非常に少量である。したがって、コンピュータ・アニメーションの背景画等のデータベース化に対する一手法として、有効であると考えられる。

今後は、山岳形状だけでなく、雲や樹木等の擬似符号化に、本報告で用いた考え方を応用していきたい。

## 8. 参考文献

- [1] 安居院, 宮田, 中嶋: "フラクタル次元に基づいたデジタル図形の擬似符号化法", テレビジョン学会誌, Vol.39, No.10, pp.979-987, 1985
- [2] A.R.Smith: "Plants, Fractals, and Formal Languages", Computer Graphics, Vol.18, No.3, pp.1-10, 1982
- [3] G.Y.Gardner: "Simulation of Natural Scenes Using Textured Quadric Surfaces", Computer Graphics, Vol.18, No.3, pp.11-20, 1984
- [4] 三沢, 千葉, 斎藤: "自然の画像生成—山の手続き的形状定義法について", 情報全大第31回, 2K-8, 1985
- [5] 石川, 青木: "フラクタルによる図形の生成とその応用", 信学技法IE84-104, pp.49-54, 1984
- [6] 安居院, 飯塚, 中嶋: "ピラミッド階層構造データの位相変化情報を利用した市街地図の処理", 信学論(D), J65-D, No.10, pp.1243-1249, 1982
- [7] L.De Floriani, B.Falcidieno, and C.Pienovi: "Delaunay-based Representation of Surfaces Defined over Arbitrarily Shaped Domains", Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 32, pp.127-140, 1985
- [8] A.Fournier, D.Fussel, and L.Carpenter: "Computer Rendering of Stochastic Models", Communication of ACM, 25-6, pp.371-384, 1982