

尾根線にもとづく山岳形状の定義法

A Ridgeline-Based Digital Terrain Modeling

八重樫 一仁 千葉 則茂

Kazuhito YAEHASHI Norishige CHIBA

岩手大学工学部

Faculty of Engineering, Iwate University

あらまし 本論文では、まず、尾根線にもとづく山岳形状の定義法について報告する。すなわち、尾根線の3次元線分データから格子点型デジタル地形モデルを得る方法、尾根線の更新方法、尾根線の2次元線分データへの標高値自動割当て法、尾根線の自動生成法についてのアイデアについて述べる。次に、季節感ある山岳景観のシミュレーション、すなわち、植生や積雪・融雪の表現を可能とするために必要とされる、尾根部、谷部の識別法、日光照射量の計算法について述べる。

Abstract This paper first presents a ridgeline-based modeling for CG simulation of terrain, and then presents the algorithms needed for simulating landscape giving a sense of the season, such as tinted autumnal leaves or snow-capped mountains. In Chapter 2, we discuss the following topics: an algorithm for generating a digital terrain model from 3D-ridgelines, fast algorithms for updating the generated digital terrain model, an algorithm for assigning elevations to the nodes of 2D-ridgelines, an algorithm for recursively generating ridgelines from a simple initiator. In Chapter 3, we describe an algorithm for detecting ridge-valley areas from digital terrain models and for determining the insolation of the terrain surface.

1. はじめに

本論文では、まず、尾根線にもとづく山岳形状の定義法について報告する。すなわち、

- ・尾根線の3次元線分データから格子点型デジタル地形モデルを得る方法、
 - ・尾根線の更新方法、
 - ・尾根線の2次元線分データへの標高値自動割当て法、
 - ・尾根線の自動生成法についてのアイデア、
- について述べる。次に、季節感ある山岳景観のシミュレーション、すなわち、植生や積雪・融雪の表現を可能とするために必要とされる
- ・尾根部、谷部の識別法、
 - ・日光照射量の計算法
- について述べる。

これまでに提案されている山岳形状の定義法としては、

(1)フラクタル手法による生成法

([FFC82] など多数)

(2)流れ作用にもとづく地形の生成法 [KMN88]

(3)等高線生成法 [三沢87]

(4)種々の山岳形状データに対する補間法 [千葉87] などがあ

る。(1)の手法は、簡便であり、意外性のある架空の山岳形状を生成するのには向く。しかしながら、生成される形状は等方的であり、尾根線や谷線をもつような山岳形状の生成は期待できない。そのため、望みど通りの山岳形状を生成しようとする、概形を与える他の形状定義法が必要となる。したがって、このような目的にとっては、ランダムなテクスチャの生成法であるとしておいたほうがよい。(2)は侵食による山岳の形成シミュレーションを近似的に行うものであり、尾根線や谷線をもつ山岳形状に向く。ただし、意図した形状の生成が容易にできるのかどうかについては疑問がある。(3)は1本の種子等高線から他の等高線を自動生成しようというものであり、尾根線や谷線をもつ山岳形状に向く。しかしながら、架空の山の等高線形状を想像するのは容易ではない。(4)は、与えられた形状データに対する補間法であり、他の定義法と併用されるも

のである。

多くの山岳地形では、その特徴として、尾根線や谷線が確認される。実在の山であれば、尾根線や谷線は、航空写真などからも容易に得ることが可能であり、等高線地図からでも、少しなれるだけで容易に読み取ることができる。さらに、架空の山岳形状でも、稜線や尾根線・谷線でイメージを描く方が、標高値や等高線の形状を想像するよりも自然であろう。したがって、尾根線にもとづく形状の定義法が開発されれば、非常に有効なものとなろう。

2. 尾根線による山岳形状の定義法

2. 1. 尾根線入力による山岳形状の定義法

山岳形状の特徴は、その尾根線や谷線として認識される。地形図も、等高線地図より“毛羽図(図2.1)”の方が形状を認識しやすいといえよう。架空の山岳を想像し、表現する場合でも、稜線や尾根線・谷線により表現することが自然に行われている。したがって、もし、尾根線のスケッチから形状が定義できれば非常に有効なものとなろう。

以下に、尾根線の3次元線分データより、格子点型デジタル地形モデルを得るアルゴリズムを示す。

アルゴリズム2.1:

- ステップ0. デジタル地形モデルのための2次元配列Mを用意する。
- ステップ1. 尾根線の3次元線分データを入力する。
- ステップ2. 尾根線を構成する各線分に対して、与えられた傾斜角をもつような裾野を構成する四角形面を2枚生成する。さらに、隣合う線分に対する四角形面の隙間を埋めるための三角形面も生成する。
- ステップ3. 標高値をZとするZバッファ法により、ステップ2で生成した多角形面すべてを、標高値の大きい部分がMに残るように書き込む。
- ステップ5. Mにローパスフィルタをかけ平滑化する。

手法の有効性を検討するために、実在の山についてこのアルゴリズムを適用した。比較のために、測量点データに対する補間法であるボロノイ領域分割とローパスフィルタを用いる方法[千葉87]で“本物の山”を作った。図2.2(a)に早池峰山(岩手県)を(b)に岩手山(岩手県)を示す。測量点データ(任意測量点における標高値データ)は、地形図より、デジタイザにより採取した。図2.3(a)と(b)に早池峰山と岩手山の地形図か

ら読み取った尾根線を示す。図2.4(a)と(b)に本アルゴリズムにより生成した形状を示す。(本物の山と生成した山では、少し、データの採取位置に違いがあるので、注意されたい。)いずれも、良好な近似となっていることが確認されよう。

2. 2. 尾根線の更新アルゴリズム

生成される山岳形状を観察しながら、期待される山岳形状が得られるまで、尾根線の追加・削除が行えることが望ましい。そのためには、尾根線を構成する線分の追加・削除が高速に行えることが望ましい。もちろん、上で示したアルゴリズムを、線分の追加・削除のつど実行しなせば、形状の更新は行える。

ここでは、高速に行うための部分更新アルゴリズムを示す。追加については自明であるので、以下に、削除のアルゴリズムを2つ示す。ひとつは、記憶領域が多量に使えるときのもので、もうひとつは、そうでないときのためのものである。

アルゴリズム2.2(記憶領域が多量に使えるとき):

{上のアルゴリズムのZバッファ(配列M)の各ピクセルを、多角形面の識別番号とその標高値の対をセルとする線形リストとする。そして、Zバッファ法を実行する際には、リスト中の並びが標高値の大きい順に並ぶようにセルをリストにそう入しておく。このデータ構造を用いれば、線分の削除は次のように容易に行える。}

- ステップ1. 削除する線分に対応する多角形面を定める。
- ステップ2. 求めた多角形について、Zバッファへの投影を求め、関連するピクセルのリストの中からその多角形の識別番号をもつセルを削除する。

アルゴリズム2.3:

{Zバッファと同じサイズの配列をもう1枚用意し、Zバッファ法を実行する際に、この配列には、対応するピクセルで勝つ残っている多角形面の番号を記憶しておく。線分の削除は以下のように行う。}

- ステップ1. 削除する線分に対応する多角形面を定める。
- ステップ2. 求めた多角形について、Zバッファへの投影を求め、関連するピクセルを走査し、Zバッファに貢献している部分があるかどうかを調べる。なければ、その多角形については何もしない。あれば、その部分に關係する多角形を探索し、その多角形について、Zバッファをやり直す。もしくは、関連する部分のみについて、標高値を求めZバッファ

を更新する。

もちろん、これらの中間的なアルゴリズムも考えられる。すなわち、Zバッファとアルゴリズム2.2のような線形リストを使い、アルゴリズム2.3の多角形の探索を高速化する方法である。線形リストの解像度を低くし、すなわち、1つの線形リストで複数のピクセルを担当するようにし、セルは識別番号のみをもつようにすればよい。

2. 3. 尾根線への標高値自動割当て法

できるならば、尾根線を3次元データとして入力させるのではなく、標高値をもたない2次元データとして入力させるだけで、3次元山岳形状が生成できることが望ましい。少なくとも、対話入力の初期解が提示できるだけでも有効であろう。ここでは、2次元尾根線データに標高値を割り当てる、単純な方法を示す。

尾根線は木構造を成していることが多いので、ここでは、尾根線は木であると仮定する。

ある解像度（粗視化の程度）で尾根線を取り出すと、その解像度に応じた特徴的な傾斜角が観察される。これより、もし、尾根線（木）の端点（次数（その点に接続する辺の本数）が1の点）の標高値が一定であるとして与えられているとすれば、他の各点の標高値は、その点から次数1の点への最短経路長で定まるとして、近似できる。ただし、距離は、2次元平面上での線分長である。各点の最短経路長は、次のようにして求められる。

アルゴリズム2.4（図2.5参照）：

{尾根線の木を、任意の点を根とする根付き木とみなす。根以外の次数1の点を葉と呼ぶ。根をつまんで木を“ぶら下げた”イメージで、辺を介して隣接する2点のうち、下の点を子、上の点を親と呼ぶ。}

ステップ1. すべての葉の点に距離0を割り当てる。
以下のことを、根の距離が定まるまで、繰り返す。

ステップ1.1. すべての葉について、以下のことを行う。葉からその親までの距離を葉の距離に加えて、親のもとに書いておく。

ステップ1.2. 葉のすべての親の点について、以下のことを行う。その点のもとに書いてある距離のうち最小のものをその点の距離としておく。

ステップ1.3. すべての葉とそれに接続する辺を消す。実際は、消したと思えばよい。

ステップ2. {根の距離は正しい最短経路長となっていることは、容易に確認できよう。}

根の点に以下のことを適用する。

ステップ2.1. その点のすべての子について以下のことを行う。その点から子までの距離とその点の距離を加え、子の距離と比べる。子の距離より大きい時は何もしない（その子の距離は最短経路長となっている）。子の距離より小さいときには、子の距離をその距離で書き換える。この子について、再帰的にステップ2.1.を適用する。

図2.6(a)に、宮城県泣面山の“本物の山”を、(b)に、採出した尾根線を、(c)に、標高値を自動割当てしたものを、(d)に、デジタル地形モデルを示す。単純な標高値割当てに関わらず良好な結果が得られているといえよう。(e)に、3点の標高値を手直して得られた形状を示す。対話処理の初期形状を与える手法として、有効であることが確認できた。

2. 4. 尾根線生成法

もし、生成する山岳形状に精度がさほど要求されないときには、概形を与えるような主要な尾根線のみを入力として、派生的な尾根線は自動生成するというアルゴリズムが開発できれば非常に便利である。

現在、詳細な検討を行っているところであるが、大筋、次のような方法でよいと考えている。

アルゴリズム2.5：

ステップ1. 主要な尾根線を入力し、標高値を自動割当てする。

ステップ2. 以下のことを必要な回数だけ繰り返す。
ただし、繰り返す毎に、傾斜角 α は増加させ、間隔 d は減少させる。

ステップ2.1. 傾斜角 α でデジタル地形モデルを得る。

ステップ2.2. 尾根線を構成する線分のいずれかの側をランダムに選び、間隔 d で“水滴”を垂らし、その流れの軌跡を新しい尾根線として加える（谷線とする方が違和感がないかもしれないが）

図2.7に、アルゴリズムが尾根線を生成していくようすを示す。“ゆらぎ”などを加えれば、有効な生成法となると思われる。

3. 季節感ある山岳景観のシミュレーション

季節感ある山岳景観のシミュレーションに関する課

題としては、以下のことがあげられる。

積雪・融雪や新緑・紅葉の表現法の開発。
そのためには、

植生の自動生成

が重要となる。山岳の尾根部や谷部にはそれぞれにふさわしい植物が生育するため、

尾根部・谷部の検出

が必要となる。また、

日射量の高速計算法

も重要となる。

ここでは、尾根部、谷部の検出法と日射量の高速計算法のアルゴリズムについて述べる。

3. 1. 尾根部、谷部の検出法

尾根線、谷線は2次元一価関数の特徴をよく表しているため、画像やデジタル地形モデルのような格子点型モデルにおける尾根線・谷線の抽出法がいくつか提案されている。しかしながら、分水嶺や、集水線と呼ばれるように、物理的には明確であるにもかかわらず、数学的に明確に定義することは困難なようである。

幸いなことに、この目的からすれば、尾根線、谷線を求めるよりは、尾根部・谷部を検出する方が大切であり、これならば、次のような簡便なアルゴリズムが考えられる。アイデアは、分水嶺、集水線という物理的な意味にしたがうことである。すなわち、デジタル地形モデルに均等に雨を降らせ、雨の流れを追跡し、よく水が通るところを谷部、ほとんど通らないところを尾根部とするのである。流れの方向は、地形の勾配によればよい。たとえば、画像処理で使われるソーベルの微分オペレータが使える。

図3.1に、早池峰山について計算した例を示す。(a)は雨水の流れの通過頻度を濃淡表示したものであり、(b)はそれを山岳形状にマッピングしたものである。うまく、尾根部、谷部が検出されているのがわかる。

3. 2. 日射量の高速計算法

積雪・融雪のシミュレーションのための地表温度を決定するためには日射量計算を行わなければならない。日射光には、直達光と散乱光によるものがある。もし、直達光だけであれば、太陽に視点をのいた平行投影による隠面消去計算とランバーの法則により、ある時点での日射量が計算できる。したがって、1日の日射量は太陽の経路について積分を行えばよいが、これは膨大な時間を要する。したがって、なんらかの高速計算法が期待される。

隠面消去計算により、直達光と散乱光を考慮した日射量を計算するためには、以下のような方法が考えられる。

アルゴリズム： デジタル地形モデル ($n \times n$) を覆う天球を光源と考え、それからの日射量を計算する。そのために、天球上に m 個の視点を選び、各視点について、天球中央を見た隠面消去計算を行い、日射量の総和を取る。(どのように、視点の位置を決めるかは問題であり、その個数 m により、計算精度が決まる。)

このアルゴリズムの時間計算量は、以下のようになる。1つの視点に対する隠面消去法 (min-max法) は $O(n^2)$ の手間を必要とするので、全体で、 $O(mn^2)$ の手間を要する。

これに対して、以下のような隠面消去法を用いないアルゴリズムを考案しており、現在、インプリメント中である。

アルゴリズム3.1： 以下のことを、 k 個の方向について、繰り返し、各地点での天球の見える範囲を近似的に定める。

図3.2のように、デジタル地形モデルを、一定方向の断面に分解し、その断面がつくる平面上で各地点からみえる天球の範囲を定める。(アルゴリズムの詳細は下に示す。)

断面上での天球の見える範囲を決定するアルゴリズムを次に示す。1つの方向について、1つの断面について、天球の左半分についての角度を求めている。

procedure 1つの断面についての計算;

```
var height, shadow: array[1..n] of integer;  
{height: 地形の断面の標高値を格納  
shadow: 影(天球の見える)角度を格納};
```

procedure 角度計算

```
(p, inf: integer; var k: integer);  
var j: integer;
```

```
begin  
k:=inf; [前進インデックス]  
for j:=inf downto p do  
begin  
shadow[j]:=j点での接線の角度;  
while j点での接線の角度<  
線分(height[j], height[k])の角度 do  
begin  
shadow[k]:=影の角度;  
if k点での接線の角度  
>線分(height[j], height[k])  
の角度  
then begin  
角度計算(k, 次の変曲点, k)
```

```

end;
    k:=k+1
end
end;
end;
begin [of main]
    height[*]に地形の断面を取り込む;
    k:=0;
    for i:=1 to 最初のピークの地点
        do shadow[i]:=影の角度(0度);
    p:=最初のピークの地点;
    inf:=ピーク以降の最初の変曲点の位置;
    while k≤n do
        begin
            角度計算(p,inf,k);
            for i:=k to 次のピーク地点
                do shadow[i]:=影の角度(0度);
            p:=i; inf:=次の変曲点の位置
        end
    end [of main];

```

このアルゴリズムは、明らかに $O(n)$ で実行できる。したがって、一定の方向のすべての断面についての計算は $O(n^2)$ 必要とする。全体では、 k 方向であるので、 $O(kn^2)$ となる。また、隠面消去法にもとづく計算法と同等の精度とすると、 m は $O(k^2)$ 程度必要とするので、 $O(\sqrt{m}n^2)$ となる。したがって、オーダ評価では $\sqrt{m}$ 倍に比例する程度の高速である。

実際に取り扱うデジタル地形モデルについて、どの程度効率的かは、インプリメントして確認するつもりである。

4. まとめ

尾根線にもとづく形状定義法について、すなわち、

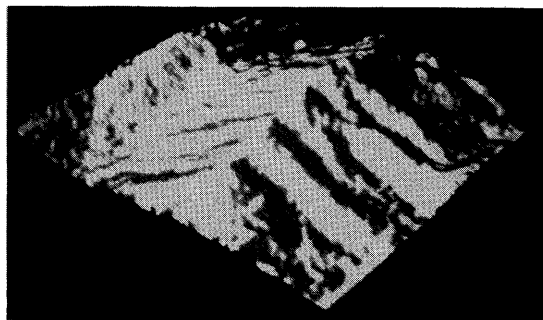
- ・尾根線の3次元線分データから格子点型デジタル地形モデルを得る方法、
 - ・尾根線の更新方法、
 - ・尾根線の2次元線分データへの標高値自動割当て法、
 - ・尾根線の自動生成法についてのアイデア、
- について、実行例とともに述べた。さらに、季節感ある山岳景観のシミュレーション、すなわち、植生や積雪・融雪の表現を可能とするために必要とされる
- ・尾根部、谷部の識別法、
 - ・日光照射量の計算法
- について述べた。

参考文献

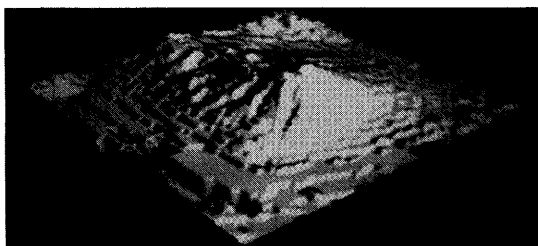
- [FFC82] A.Fournier, D.Fussell, L.Carpenter: Computer Rendering of Stochastic Models, Commun.ACM, 25, 6, p371-384, 1982.
- [KMN88] A.Kelley, M.Malin, G.Nielson: Terrain Simulation Using a Model of Stream Erosion, Computer Graphics 22, 4, pp263-268, 1988
- [三沢, 千葉, 斎藤87] 三沢雅一, 千葉則茂, 斎藤伸自, 自然の画像生成-山の手続き的形状定義法-, 情報処理学会論文誌, 28(1), pp35-45, 1987.
- [千葉, 村岡, 三沢, 斎藤87] 千葉則茂, 村岡一信, 三沢雅一, 斎藤伸自, 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, 28(11), pp1121-1133, 1987.



図2.1 毛羽図の例

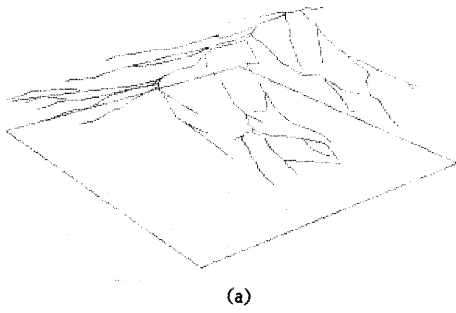


(a)



(b)

図2.2 (a) “本物”の早池峰山, (b) “本物”の岩手山

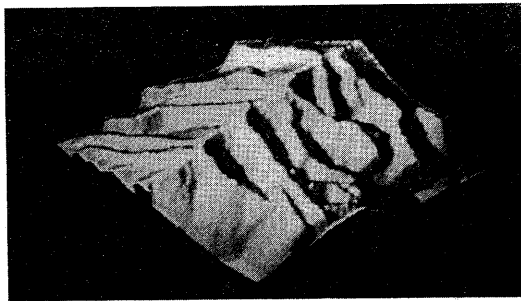


(a)

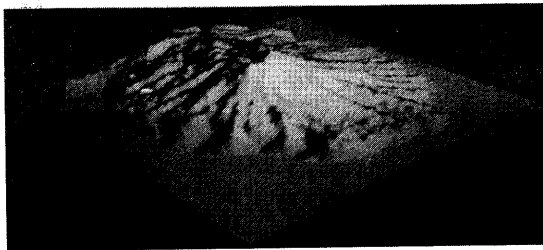


(b)

図2.3 (a)早池峰山と(b)岩手山の尾根線



(a)



(b)

図2.4 (a)早池峰山と(b)岩手山の生成形状

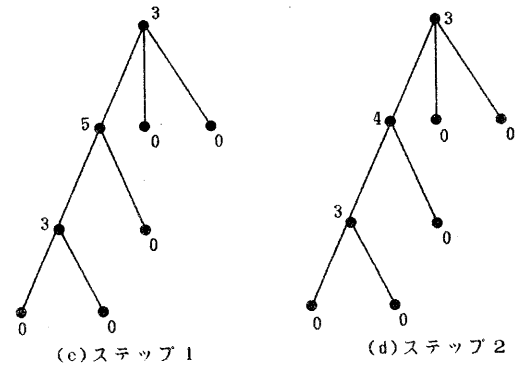
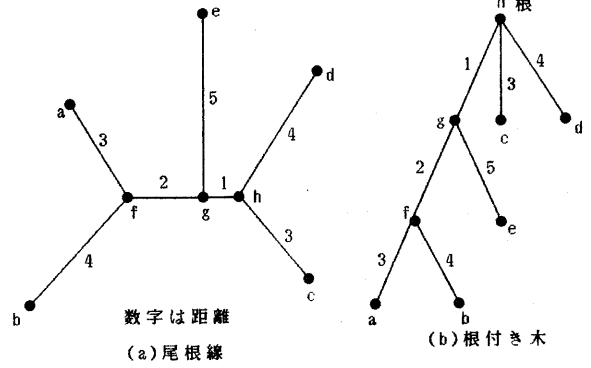


図2.5 アルゴリズム2.4の説明



(a)



(b)

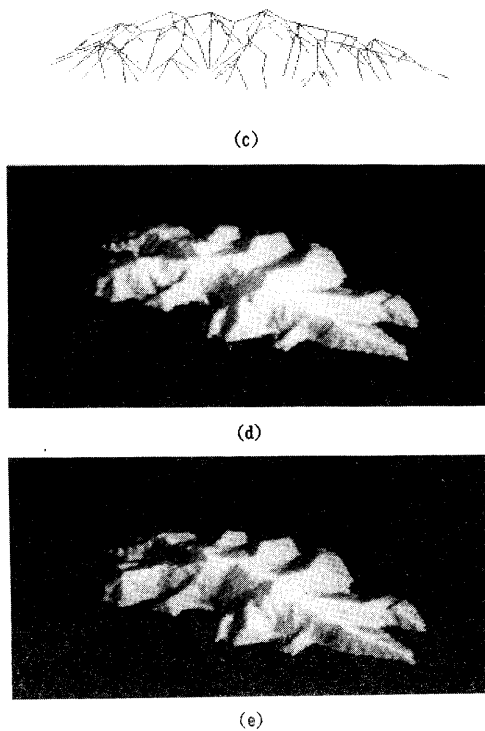


図2.6 アルゴリズム2.4

- (a) “本物”の泣面山,
 (b) 2次元尾根線,
 (c) 標高値自動割当後の尾根線
 (d) 生成された形状
 (e) 手直し後の形状

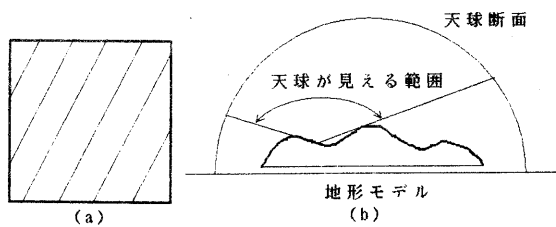


図3.1 尾根部, 谷部の検出

- (a) 濃淡表示, (b) 地形モデルのマッピング

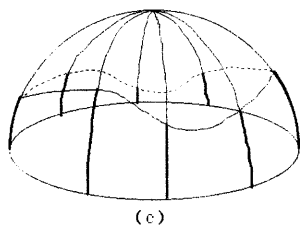


図3.2 日射量高速計算法

- (a) 一定方向の断面,
 (b) 1つの断面,
 (c) k個の断面による近似

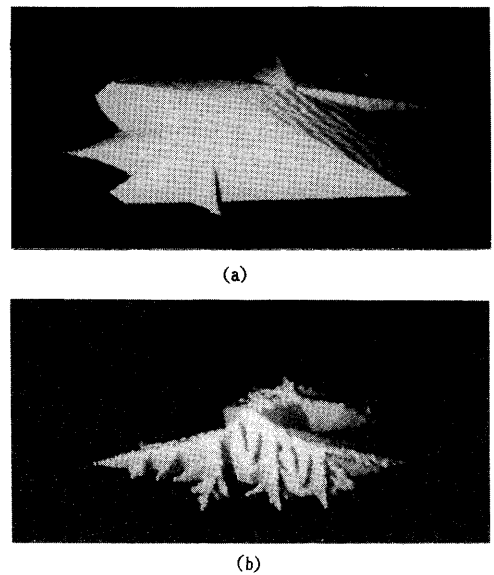


図2.7 アルゴリズム2.5の実行例

- (a) 初期尾根線から生成した形状
 (b) 2段階の派生尾根線生成による形状

