

山岳景観シミュレーションのための速度場による侵食モデル

藤田勝博[†] 村岡一信^{††} 千葉則茂^{†††}

nchiba@cis.iwate-u.ac.jp

[†]NTT

^{††}盛岡短大

^{†††}岩手大学

コンピュータグラフィックス(CG)による自然景観のビジュアルシミュレーションは、フライトシミュレーションや映画の特殊撮影効果などに応用をもつ興味深い研究課題の一つである。

これまで、架空の山岳形状の定義法としては、FFTや中点変位法で生成される $1/f$ ノイズを用いたフラクタル手法による研究が多くなされてきた。しかしながら、これらの手法は意外性のある山岳形状を生成するのには向いているが、実際の山々に見られるような尾根線や谷線をもつ侵食地形の形成には向かない。そのため、侵食地形の生成を目的とした手続き的形狀定義法もこれまでにいくつか提案されてきているが、いまだ満足いく結果は得られていない。

本論文では、架空の侵食地形の生成を目的とした水流の速度場に基づく地形の形成シミュレーション法を提案する。

An Erosion Model Based on Simulated Velocity Fields for Visually Simulating Mountain Scenery

Katunobu Fujita[†], Kazunobu Muraoka^{††} and Norishige Chiba^{†††}

[†]NTT

^{††}Morioka Junior College

^{†††}Iwate University

A great deal of effort has been dedicated mainly to developing procedural modeling methods based on $1/f$ noises for producing imaginary mountain scenery. These methods are suitable to create impressive imaginary forgeries. However, we cannot find any ridge-line on those created mountains, which is a notable geographical feature of mountains produced by erosion processes. On the other hand, although a few researchers presented modeling methods taking into account the erosion processes, developing the erosion model for simulating natural eroded mountains still remains a challenging problem.

In this paper, we will present an erosion model based on the simulated velocity field of "rain drops."

1. はじめに

コンピュータグラフィックス(CG)による自然景観のビジュアルシミュレーションは、フライトシミュレーションや映画の特殊撮影効果に応用を持つ興味深い研究課題の一つである。本論文では、自然景観の中でも最も基本となる山岳地形を取り上げ、その形状の定義法として架空の侵食地形の形成に向く水流の速度場に基づく地形の形成シミュレーション法を提案する。

これまでに提案されている架空の山岳形状の定義法としては、

- (1) フラクタル手法に基づくもの[1][2][3]
- (2) 等高線の自動生成によるもの[4]
- (3) 水系の生成に基づくもの[5]
- (4) 尾根線の生成に基づくもの[6]
- (5) フラクタル手法と侵食や風化の作用のシミュレーションによるもの[7]
- (6) 地形の地質的差異を考慮した侵食のシミュレーションによるもの[8]

などがある。

(1)の手法は簡便であり、これまでも多くの手法が提案されてきた。しかしながら、この手法は意外性のある山岳形状を生成するのに向くが、一部の手法を除き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、望みどおりの形状を生成するためには、 $1/f$ ノイズはテクスチャとして用い、概形は他の定義法による必要がある。

手法(2)-(6)は、ここで提案する方法と同様、尾根線や谷線をもつ侵食地形の生成を目的としたものである。

(2)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するものであり、尾根線や谷線をもつ山岳形状の生成に向く。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。

(3)(4)は、それぞれ侵食によるシミュレーションを水系の生成または尾根線の生成により近似的に行うものである。アルゴリズムの性質から生成される形状は、明らかに侵食地形特有の谷線や尾根線を明瞭にもつ地形となるが、地形の斜面部は

水系または尾根線からの補間によって求めるため、傾斜の自然な形状を得るのは困難である。

(5)(6)は、初期地形として何らかの形状(たとえば、フラクタル手法による山岳形状)を与え、その形状に対して侵食などの加工操作を施し、より自然な山岳形状を得ようとするものである。このアルゴリズムは、直観的であり非常に理解しやすいものであるが、その追試報告[9]によると、侵食の仕方が必ずしも自然のメカニズムを反映したものととはなっていないことが指摘されている。

本論文では、山岳地表面を流れる水流の速度場を“水粒子”の運動シミュレーションにより求め、その速度場に従って侵食のシミュレーションを行うという手法を提案する。

2. 速度場を用いたシミュレーション法

これまでも水の流れによる侵食モデルがいくつか提案されている[7][8]。しかしながら、これらのモデルでの水の流れは、その地点の傾斜のみによって決まるセルオートマトンモデルによっているため、上流方向からの水の勢いなどは考慮されていない。このため、実際の水の流れを反映したものとはなっておらず、侵食の仕方も不自然なものとなっている。

そこで、本モデルでは、水の流れを独立な水粒子の運動の積算値として求められるものと仮定し、その水粒子の運動シミュレーションを行い、水流の速度場を求めている。こうすることにより、水の流れがこれまでのモデルとは異なり、局所的な地形だけではなく、全域の地形を反映した流れとなり、より自然な侵食作用が行われることが期待できる。また、水粒子の動きを単なる“移動”としてではなく“運動”としてとらえているため、これまでのモデルにはない、各水粒子の地表面への衝突を考慮した侵食のシミュレーションも可能となる。以下にアルゴリズムの概要を示す。

侵食アルゴリズム：

STEP0: 以下の2次元配列を用意する。

T: 標高値保存用, W: 水量保存用,
V: 速度ベクトル保存用, E: 衝突エネルギー保存用

STEP1:配列Tに初期地形を読み込む。
 STEP2:以下のSTEPを適当な回数だけ繰り返す。
 STEP2-1:与えられた地形Tに対して速度場を求める。
 STEP2-2:速度場W, V, Eにより与えられた地形Tに侵食作用を施す。

2. 1 水流の速度場の生成法

速度場の生成法は、デジタル地形モデルの各格子点に“水粒子”を配置し、その水粒子の流れを独立に追跡することによって求める。水粒子の流れは基本的に運動方程式にしたがっており、以下の近似式で求めることとする。

$$\begin{aligned}\vec{x}(t+\Delta t) &= \vec{x}(t) + \vec{v}(t) \cdot \Delta t \\ \vec{v}(t+\Delta t) &= \vec{v}(t) + \vec{a}(t) \cdot \Delta t\end{aligned}$$

ここで、 $\vec{x}(t)$ 、 $\vec{v}(t)$ 、 $\vec{a}(t)$ は時刻 t における水粒子の位置、速度、加速度であり、 Δt は単位計算時間である。

・ $\vec{a}(t)$ の算出

本モデルでは、水の加速度はその地点より低所となる最大傾斜方向にのみ生じるものとしている。低所となる近傍との距離を len 、高低差を dh 、重力加速度を G とすると加速度ベクトルの大きさは以下のように表せる。

$$|\vec{a}| = \frac{dh}{\sqrt{len^2 + dh^2}} G$$

・ $\vec{v}(t+\Delta t)$ の修正

速度ベクトルの修正には、地表面との摩擦的要素を考慮した速度の減少と速度ベクトルの方向の修正がある。摩擦による速度減少の修正は次式によって行う。

$$|\vec{v}'| := \alpha \cdot |\vec{v}| + (1-\alpha) |\vec{v}| \cdot (1 - \exp(-\beta \cdot w \cdot |\vec{v}|))$$

$$0 \leq \alpha \leq 1, \quad \beta > 0$$

ここで、 w は水量である。

速度ベクトルが地表面の接線方向と同一の方向を向いていない時(図1)は次式で修正する。

$$\vec{v}' = (\vec{v}_{unit} \cdot \vec{v}) \vec{v}_{unit}$$

ここで、 \vec{v}_{unit} は地表面の接線方向の単位ベクトルである。このとき、 $\vec{v}'(t+\Delta t)$ が $\vec{v}(t)$ より上方を向いている(図1の状態A)ならば水粒子が地表面に衝突したものとみなし、このとき減少した速

度を Δv としてエネルギー e を以下の式で求める。これは侵食のために用いるため配列Eに保存される。

$$e = \frac{1}{2} m \Delta v^2 \quad m \propto w$$

2. 2 侵食・運搬・堆積作用

流水による物理的作用は侵食・運搬・堆積が基本となり行われる。ここでは、速度場に基づきこれらの作用を定義する。

本モデルでは、これらの作用は流量 Q_{ij} と衝突エネルギー e_{ij} によって定義されることとする。

ここで、流量とは単位時間に河川の単位断面を通過する水量であり、速度場を求めたことによって既に計算されている w_{ij} 、 v_{ij} および格子点の間隔を表す定数 C を用いて以下のように定義する。

$$Q_{ij} = C \cdot w_{ij} \cdot v_{ij}$$

v_{ij} 、 w_{ij} 、 e_{ij} はそれぞれ配列V, W, Eに格納されている (i, j) 点での値である。

・ 侵食作用

本モデルの侵食作用は2種類の作用から成り立っている。水の移動にともない地表面が削られる作用と水の衝突による侵食作用である。これらの作用による侵食量 S_q, S_e は K_q, K_e を係数とし

$$S_q = K_q Q$$

$$S_e = K_e e$$

と定義する。このとき、同時にその地点の標高地を S_q, S_e だけ減少させる。

・ 運搬・堆積作用

河川により運搬される浮遊土砂量 Q_s と流量 Q には一般に以下の関係がある [11]。

$$Q_s = \alpha Q^m$$

ここで、浮遊土砂量とは単位時間に河川の単位断面を通過する土砂の量である。これより本モデルでは侵食により削られた土砂の最大運搬可能量 S_{max} を

$$S_{max} = K_c Q^m$$

と定義する。ここで K_c は係数である。

侵食作用により削られた土砂の量は $S_q + S_e$ で

表される。また、運搬作用により近傍のある地点からその地点に運ばれている土砂の量を S_0' とすると、その地点の土砂の合計 S_i は、

$$S_i = S_q + S_e + \sum S_0'$$

と表される。もし、ここで $S_{max} \leq S_i$ ならば $S_i - S_{max}$ だけを堆積し(その地点の標高地を $S_i - S_{max}$ だけ増加させ)、 S_{max} をその速度ベクトルが向かう近傍へ運ぶ。そうでなければ、 S_i を速度ベクトルが向かう近傍へ運ぶ。

3. シミュレーション例

本手法にもとづいたシミュレーション例を示す。図2は、初期地形として(a)に示す中心部の標高値がやや高い地形に白色ノイズを付加したものを用い、50ステップ毎のシミュレーション結果を(b)~(d)に示したものである。ステップが進むにつれて谷線や尾根線が形成されていくのが確認できる。

これまでの水流のシミュレーションでは、流水による侵食作用のみ考慮されたが、本モデルでは、水流が地表面に衝突する場合の侵食も考慮している。この侵食作用の効果を明らかにするため、図3~5に係数 K_q , K_e を変化させた例を示す。図2の(a)と同じ初期地形で25ステップごとの地形の変化を示している。

図3では K_q を小さくして流量による侵食作用を抑え、図4では K_q を大きくして侵食作用がさかに行われるようにしている。形状の違いを観察すると、図3では尾根の裾野まではっきりした形状が形成されるが、図4では侵食作用が大きく働きすぎ、図3では裾野として表れた部分も侵食により削られ運搬されてしまうため、尾根の長さの短い形状が表れる。

図5に、図3と比較して衝突による侵食のパラメータ K_e を大きくし、衝突による侵食作用がさかに行われるように設定した場合を示す。図3に比べ、非常に細かい凹凸が形成されているのが確認できる。これは、初期地形に含まれる白色ノイズによるわずかな凹凸が水粒子が通過するとき、衝突による侵食作用を強く行い強調するためであ

る。

図6に、本手法で形成した山岳地形を利用した森林景観の生成画像を示す。この画像生成には文献[10]によるレイトレーシング法とポリリュームレンダリング法を応用した3次元テクスチャ法を用いた。山岳形状をはじめ樹木も架空のものであるが、リアルな自然景観の印象が得られている。

4. おわりに

本論文では、架空の山岳形状の定義法として、水流の速度場を用いた地形の形成シミュレーション法について提案し、それに基づくシミュレーション例を示した。今後のさらなる改良により良好な侵食地形の生成モデルとなる可能性を示せたものと思われる。

今後の課題としては、スケールの違う流れによる階層的凹凸構造の生成を可能とするモデルへの改良、地質の違いによる侵食の違いを実現するモデルへの改良、さらに任意の地形を意図的に生成する場合の初期地形の生成法の開発などがあげられる。

参考文献

- [1] A. Fournier, D. Fussell, L. Carpenter: "Computer Rendering of Stochastic Models", Commun. ACM, 25, 6, pp371-384, 1982
- [2] 安居院, 宮田, 中島: "3次元山岳形状の等高線からの自動生成", 電子情報通信学会論文誌, J69-D, 12, pp1905-1912, 1986
- [3] K. Anjyo: "A Sample Spectral Approach to Stochastic Modeling for Natural Objects", Proc. EUROGRAPHICS' 88, pp285-296, 1988
- [4] 三沢, 千葉, 斎藤: "自然の画像生成—山の手続き的形狀定義法—", 情報処理学会論文誌, 28, 1, pp35-45, 1987
- [5] A. D. Kelly, M. C. Malin, G. M. Nielson: "Terrain Simulation Using a Model of stream Erosion", Computer Graphics, 22, 4, pp. 263-269, 1988
- [6] 千葉, 村岡他: "尾根線の再帰生成による侵食作用によって形成された山岳形状の定義法", テレビジョン学会誌Vol145, No. 10, pp1240-1248, 19

[7] F. K. Musgrave, C. E. Kold, R. S. Mace: "The Synthesis and Rendering of Eroded Fractal Terrains", Computer Graphics, 22, 3, pp. 41-50, 1989

[8] P. Roudier, B. Peroche: "Landscapes Synthesis Achived through Erosion and Deposition Precess Simulation", EUROGRAPHICS, Vol. 12, No. 3, pp375-383, 1993

[9] 村岡, 千葉: "Musgraveの侵食モデルの詳細検討および山岳形状生成への適用", 盛岡短大研究報告第44号, pp17-25

[10] 細川, 村岡, 千葉: "3次元テクスチャによる森林景観のレンダリング法", 情報処理学会研究報告, 95-CG-74, pp29-34, 1995

[11] 高山: "理科年表読本-川の博物誌", 丸善株式会社, pp. 85-154, 1986

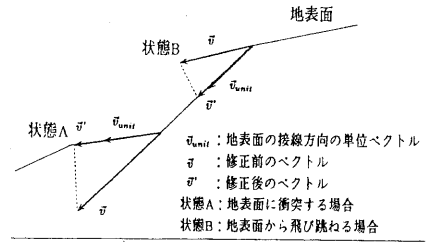


図1 速度ベクトルの修正

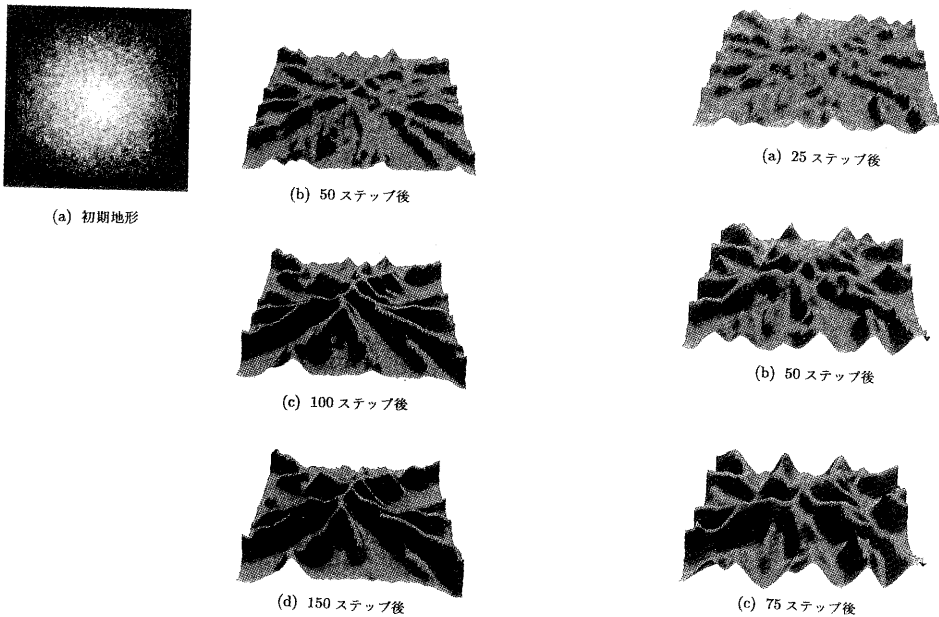
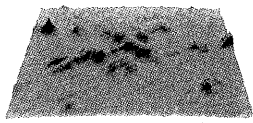


図2 シミュレーション過程

図3 パラメータによる侵食の違い (Kq :小, Ke :小)



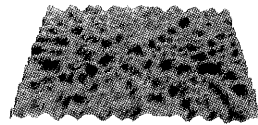
(a) 25 ステップ後



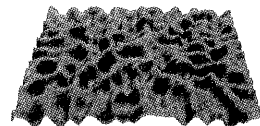
(b) 50 ステップ後



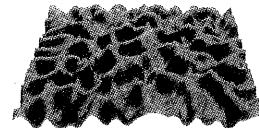
(c) 75 ステップ後



(a) 25 ステップ後



(b) 50 ステップ後



(c) 75 ステップ後

図4 パラメータによる侵食の違い (Kq :大, Ke :小)

図5 パラメータによる侵食の違い (Kq :小, Ke :大)



図6 森林景観のシミュレーション