

## 崩落岩塊の堆積を伴う岩場景観のシミュレーション

伊藤智也<sup>\*</sup>, 中野誠士<sup>\*\*</sup>, 藤本忠博<sup>\*\*</sup>, 千葉則茂<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup>八戸工業大学 <sup>\*\*</sup>岩手大学

tomoya@hi-tech.ac.jp, {mnakano, fujimoto, nchiba}@cis.iwate-u.ac.jp

### Visual Simulation of Rocky Scenery Including the Accumulation of Collapsed Rocks

Tomoya ITO<sup>\*</sup>, Masao NAKANO<sup>\*\*</sup>, Tadahiro FUJIMOTO<sup>\*\*</sup> and Norishige CHIBA<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup>Hachinohe Institute of Technology,

<sup>\*\*</sup>Iwate University

#### 論文概要

筆者等は、これまで方状節理と柱状節理の生成に基づく岩場景観のモデリング法と、粒子要素法的アプローチによる剛体の運動シミュレーション法を提案している。本論文では、これらの手法を併用することにより、岩塊の崩落による堆積を伴うより自然な岩場景観のビジュアルシミュレーションが可能となることを示す。

キーワード：物理シミュレーション，自然現象，地形，風化，岩

Keyword：physically-based simulation, natural phenomena, topography, weathering, rock

#### 1. はじめに

CGによる自然景観の表現手法の開発において、地形は基本的な景観構成要素として、重要な研究対象の一つである。しかしながら、地形の中でも岩場地形の表現法に関する研究の報告例は少ない。これまで、CGにおける架空の地形モデルの生成法としては、フラクタルノイズに基づく手法や侵食シミュレーションに基づく手法などがあげられる。前者では、かつて中点変位法やFFTによるノイズ生成法など統計的な手法に基づく架空の地形の表現法[1,2,3,4,5 など多数]として活発に研究された。一方、シミュレーションにより地形を生成する手法として、水による侵食、運搬、堆積、風化などのシミュレーションに基づくものが提案されてきている[6,7,8]。しかしながら、節理形状による特徴的な構造を持つ岩場景観の表現法に関する研究例としては、筆者等のもの[9,10]以外見あたらない。

筆者等は、これまで方状節理と柱状節理の生成に基づく岩場景観のモデリング法[9,10]と、粒子要素法的アプローチによる剛体の運動シミュレーション法[11]を提案している。本論文では、まず節理の生成に基づく岩場のモデリング法について、その概要と、さらに文献[9]では紙面の都合上、記述できなかった詳細についてまとめ、この手法と他の既提案の粒子要素法的アプローチによる剛体の運動シミュレ

ーション法[11]を統合することにより、岩塊の崩落による堆積を伴うより自然な岩場景観のビジュアルシミュレーションが可能となることを実験例により示す。

#### 2. 節理を考慮した岩場景観のモデリング法

##### 2.1 方状節理によるモデリング法

本提案手法では、地形を表現する基本的なデータ構造として、濃度値（存在密度とも呼ばれる）を記憶するボクセル空間を使用した。方状節理形状の生成法は、

- (1) 岩盤内部での節理のモデル化
- (2) 岩盤内部における節理分布の生成
- (3) 節理によって分断された岩塊の滑落

からなる。本手法による岩場景観の生成例を図2(a)に示す。

ここでは、文献[9]で記述できなかった、(3)の節理によって分割された岩盤の移動方向の探索法について述べる。本手法ではブロック理論[12]をベースとした移動可能ブロックの探索法を用いた。ブロック理論とは岩盤内部の節理形状の解析結果から、分割された岩盤の移動可能性を探索する手法である。

節理面に沿ったブロックの移動の種類には1面すべりと2面すべりがある。1面すべりは、面上を移動するすべりであり(図1(a))、2面すべりは、互い

に平行でない2つの面の交線と同一方向となるすべりである(図1(b)).ブロックの移動方向は上記の内のいずれか一つであり,入力された節理の方向から,あらかじめ算出しておくことができる.すべり方向に移動を妨げる物体がない場合は,移動対象のブロックと判定する.

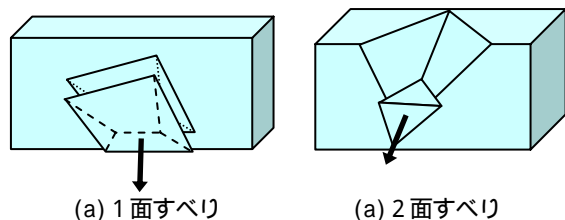


図1 ブロックのすべり方向

## 2.2 柱状節理によるモデリング法

本提案手法[10]は,

- (1)初期溶岩形状に対する熱伝導シミュレーションによる温度分布の生成
- (2)温度分布から収縮中心線の生成
- (3)収縮中心線を母線としたポロノイ領域分割
- (4)風化シミュレーション

のステップからなる.(4)での風化による柱状節理の崩落は,大きく分けて次の2つの段階でシミュレーションされる.

- (a)風化度に応じた柱状節理の分割
- (b)表面にある柱のそれぞれの連結成分についての崩落判定

本手法による岩場景観の生成例を図2(b)に示す.



図2 節理の生成による岩場景観

## 3. 粒子要素法的アプローチによる剛体の運動シミュレーション法

これまで,倒壊・崩壊による瓦礫の落下運動のように,相互作用しながら複雑な運動をする多数の物体のアニメーションを生成するための手法として,粒子要素法をベースとした多面体の運動シミュレーション法を提案している[11].本提案手法は,粒子要素法における,法線方向とせん断方向にフォークトモデルを用いるペナルティ法を多面体に拡張した

ものである.これにより,多面体の衝突,接触,摩擦力を統一的に扱うことが可能となっている.

ただし,この剛体の運動シミュレーションを適用しただけでは,わずかな外力により崩れ落ちてしまうような状態で堆積される場合も起こり得る.そこで,本手法では,地震や波の力による振動により,より安定した岩塊の堆積状態が得られるように,一度堆積した後に,重力方向をある範囲でランダムに与えることにより,崩れやすい岩塊の落下を促進させるという拡張を行った.

本手法での堆積処理は以下のようなものである.

Step1: 正常な方向の重力に対して,剛体のシミュレーションを適用し,初期堆積状態を求める.

Step2: 新たな重力方向を設定し,再び堆積が安定するまで剛体シミュレーションを行うことを適当な回数だけ繰り返す.新たな重力方向は下向き円錐の範囲内でランダムに選ぶ.

## 4. 岩塊の崩落と堆積を考慮した岩場景観のシミュレーション法

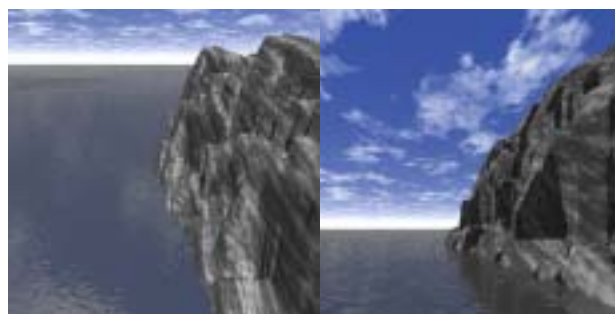
自然の岩場においては,方状節理により分断され滑落した岩塊や,柱状節理により分断され崩落した岩塊は,その付近に堆積し,印象的な岩場景観を構成している.これまでの手法[9,10]では,崩落した岩塊はシミュレーション空間から除去していた.ここでは,これらの岩塊に上述の落下シミュレーション法を適用し,岩塊の堆積を伴う岩場景観の生成を行った.生成例を図3に示す.図3(b)では,移動可能な岩塊を100個探索し,それらを崩落・堆積させた.図3(a)と比較し,より自然な岩場景観が生成されている.計算にはCPUはPentium4-3GHz,メモリ1GByteを用いた.また使用した地形のボクセルサイズは200×200×100である.計算時間は移動ブロックの探索は1211秒,堆積処理は411秒であった.

## 5. おわりに

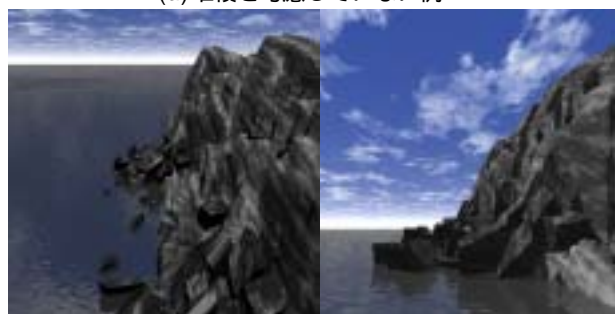
堆積した岩塊は自然な岩場景観の構成に重要である.本論文では,このような景観の自動生成には,節理に基づいた岩場形状のモデリング法と,その風化シミュレーションのステップで得られる崩落岩塊に,剛体の運動シミュレーションを適用し,堆積のモデリングを行う方法が,有効な手法の一つであることを示した.

今後の課題の一つとして,風化のシミュレーション

ンの詳細化による岩場の質感の表現力の向上があげられる。



(a)堆積を考慮していない例



(b)堆積を考慮した例  
図3 提案手法による効果

#### 謝辞

本研究の一部は、情報通信研究機構(NICT)「地域提案型研究制度」に係わる研究開発課題による。

#### 参考文献

- [1] Voss, R.F., *Random Fractal Forgeries, Fundamental Algorithms for Computer Graphics*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, pp.805-835, 1985.
- [2] K.Anjyo, A Simple Spectral Approach to Stochastic Modeling for Natural Objects, Proc. Eurogr. Aphics '88, pp.285-296, 1988.
- [3] 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, pp.20-1, 1986.
- [4] 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.
- [5] D. S. Ebert, F. K. Musgrave, D. Peachey, K. Perlin and S. Worley, *TEXTURING & MODELING - A Procedural Approach - Third Edition*, MORGAN KAUFMANN, pp.429-505, 2002.

- [6] Musgrave, F.K., Kolb, C.E. and Mace, R.S., *The Synthesis and Rendering of Eroded Fractal Terrains*, Computer Graphics, vol. 23, no.3, pp.41-50, 1989.
- [7] N. Chiba, K. Muraoka and K. Fujita, An Erosion Model Based on Velocity Fields for the Visual Simulation of Mountain Scenery, *The Journal of Visualization and Computer Animation*, vol. 9, pp.185-194, 1998.
- [8] P. Roudier and B. Peroche, Landscapes synthesis achieved trough erosion and deposition process simulation, *Eurographics*, 12(3), pp.375-383, 1993.
- [9] T.Ito, T.Fujimoto, K.Muraoka, N.Chiba, *Modeling Rocky Scenery Taking into Account Joints*, *Proceedings of CGI2003*, pp.244-247, 2003.7.
- [10] 伊藤智也, 藤本忠博, 千葉則茂, 柱状節理の形成過程を考慮した岩場形状モデリング, 芸術科学会論文誌, Vol.3, No.1, pp.86-95, 2004.
- [11] 中野 誠士, 藤本 忠博, 千葉 則茂, 倒壊・崩壊のアニメーション生成のための粒子要素法的シミュレーション手法, 芸術科学会論文誌, Vol.2, No.3, pp.85-86, 2003.
- [12] R.E グッドマン, G.H.シー 著, 吉中竜之進, 大西雄三 訳: “ブロック理論と岩盤工学への応用”, 土木工学社 .