

## 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

中野 誠士 藤本 忠博 千葉 則茂  
岩手大学

### 1. はじめに

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には、その運動の物理シミュレーションによるのが効率的である[1,2,3]。本研究では原理が解り易くインプリメントし易い多面体の運動シミュレーション法の開発を目的とし、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たペナルティ法を多面体に拡張し、衝突、接触、摩擦力を統一的に扱うことができる手法を開発した。

### 2. 剛体

剛体とは外力によって変形や破損をおこさない理想的な物体である。剛体の運動は重心点の並進運動と重心点まわりの回転運動の2つで考えることができ、Baraffらの示す方法[4]により扱うことができる。具体的には、離散時間系の各時刻において剛体に作用している外力を求め、運動の第2法則  $F=ma$  に基づく運動方程式を解くことにより運動状態を更新していく。

### 3. 粒子要素法

粒子要素法[5]は流動する粉体群の運動シミュレーション法であり、個々の粉体要素を球形の剛体として近似し、それら剛体間の作用力から運動軌跡を得る手法である。粒子要素法では剛体間接触力の算出モデルとして、物体の侵入距離に応じた抗力を生むバネと接触物体間の速度差に比例した力により運動エネルギーを減衰させるダンパーを用いており、接触点においてこれらを物体の跳ね返り方向である接触法線の方向と、それに垂直な摩擦方向の2方向に適用することで、垂直抗力と摩擦力を表現している。

### 4. 多面体剛体の運動シミュレーション

#### 4.1. 接触判定

本研究では取り扱う物体形状を、表面を複数の三角形面で構成された多面体とし、物体間の接触判定は、一方の物体の頂点が他方の物体の面に接する頂点-面接触と、2物体が辺同士で接触する辺-辺接触の2つに分けて考える。頂点-面接触では接触を起こしている面の法線を接触法線とし、辺-辺接触では2辺に垂直な方向向きのベクトルを接触法線とする。平らな地面の上に物体が静止している場合のように物体同士が広い面積を持った領域で接触しているような状態については、上記の2種類の接触が複数点で生じているものとして取り扱うこととする。

#### 4.2. 接触力

本研究では剛体に働く接触力は、粒子要素法の接触力算出モデルを用いることにより算出する。物体間作用力をバネモデルするのはペナルティ法における一般的な方法であるが、本研究では岩石のような硬い物体を対象としているので、接触点に設けられるバネの係数は非常に大きな値となる。本研究ではバネ係数  $K$  は、離散時間刻み幅  $t$  とバネ運動の運動周期の関係から得られる条件

$$K \ll \frac{m}{\Delta t^2} \quad (1)$$

を満たす範囲内で十分大きな値を用いている。

また、ダンパーのダンピング係数については、摩擦方向についてはバネの振動運動の臨界減衰条件の値を、法線方向については臨界減衰条件の値よりもやや小さな値を用いている。

#### 5. シミュレーション結果

図1～3に本手法によるシミュレーションの結果例を示す。図1は落石のシミュレーションであり左から順に全体像、中腹部、最下層の様子、図2は積み重なって静止している立方体群の側面から多面体を衝突させた様子、図3はドミノのシミュレーションである。

## 6. 結論

本研究では、落石や倒壊などのアニメーションをペナルティ法に基づく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によって作成することについて検討した。本手法を流体シミュレーションのための他の粒子法と組み合わせることで、剛体と流体が相互作用するより複雑な場面の表現が可能であると思われる。

今後の課題としては、物体の運動から重量感を感じるようなダンピング係数の決定方法を定めることなどがあげられる。また、複雑な形状を持つ物体は部分ごとに分けて交差判定を行うなど高速化のための工夫が必要である。

謝辞

本研究の一部は、通信・放送機構「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] H.Keller,H.Stolz,A.Ziegler : Virtual Mechanics: Simulation and Animation of Rigid Body Systems, <http://citeseer.nj.nec.com/keller94virtual.html>
- [2] D.Baraff : A analytical methods for dynamic simulation of non-penetrating rigid bodies, Computer Graphics Proceedings(SIGGRAPH 89) Vol.23,pp.223-232,1989.
- [3] B.Mirtich,J.Canny : Impulse-based Simulation of Rigid Bodies, Proceedings of 1995 Symposium on Interactive 3D Graphics,1995.
- [4] D.Baraff : An Introduction to Physically Based Modeling:Rigid Body Simulation I Unconstrained Rigid Body Dynamics,<http://www-2.cs.cmu.edu/baraff/>
- [5] 粉体シミュレーション入門, 粉体工学会編, 産業図書発行

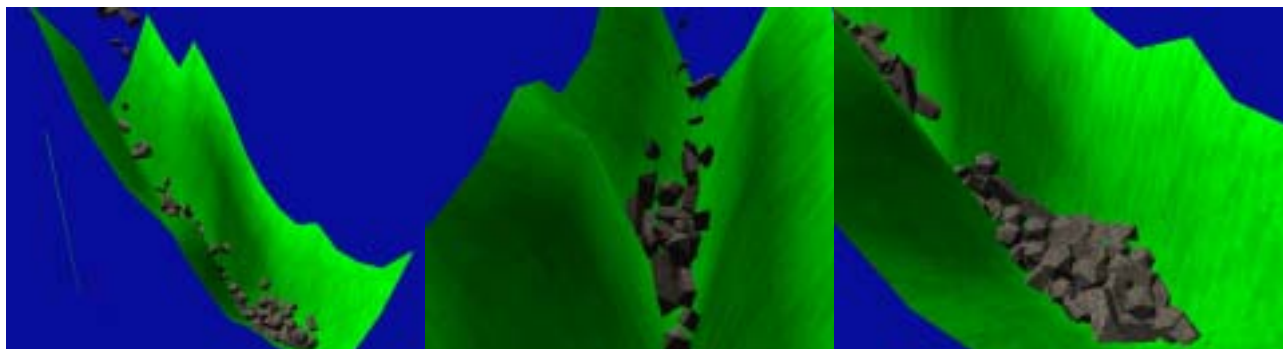


図1 落石シミュレーション

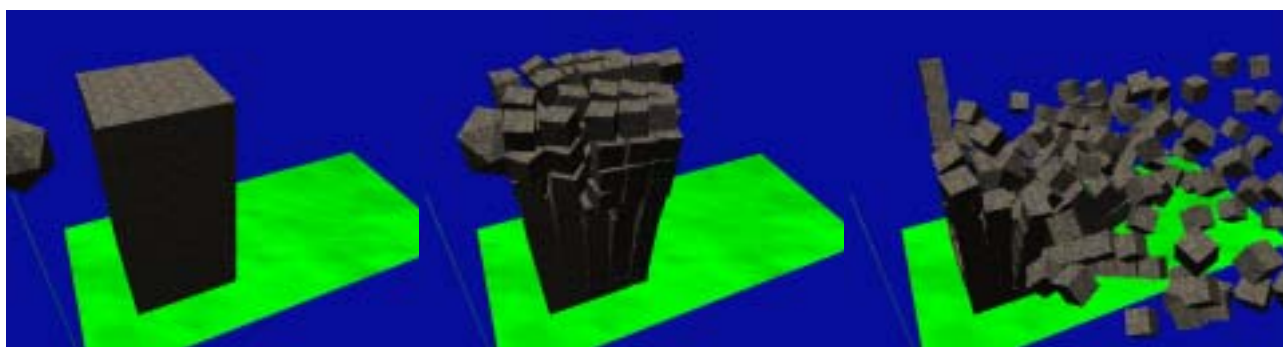


図2 四面体群の倒壊

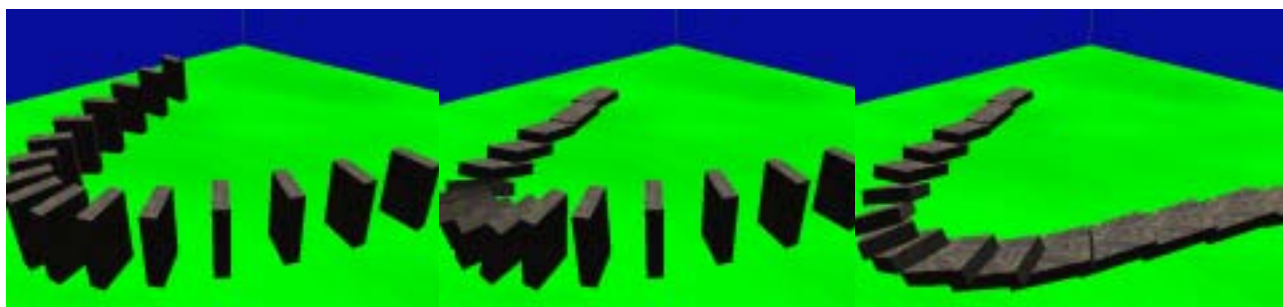


図3 ドミノ