

I-053

骨格制御可能な粒子ベースの弾性物体アニメーション  
Bone Animation of Elastic Object Using Particle-based Model

小宮 信吾†  
Shingo Komiya

床井 浩平†  
Kohe Tokoi

1. はじめに

弾性物体の変形アニメーションを生成するためには、物理シミュレーションなどの手法が用いられる。弾性物体の変形手法として代表的なものは、有限要素法によるモデルである[1]。有限要素法は、連続体を有限の要素の集合体として近似し、この集合体に対して運動方程式を連立して解き、変位を計算する方法である。他の手法として、境界要素法[2]、粒子ベースのモデル[3]などがあるが、いずれの研究も局所的な変形に着目したことが多い。

人間や動物なども局所的には弾性変形をし、さらに骨格を持っているため、骨格により制限された運動を行う。骨格を考慮した弾性物体の変形に関しては、解剖学的なモデルを用いた Inaba ら[4]や、有限要素法を用いた Capell ら[5]の研究がある。しかし、骨格モデルに適用させるために格子を分割する必要があるため、要素数が大幅に増える可能性がある[6]。

本研究では粒子ベースのモデルを用いて弾性物体を骨格で制御して変形する手法を提案する。ボーンによる変形の影響を、粒子に外力として与えることによって、骨格を持つ弾性物体の変形を行うことが可能となる。また、空間分割を行い計算量を低減し、シミュレーションの高速化を図る。

2. 粒子ベースの弾性物体モデル

粒子ベースのモデルでは、オブジェクト内に大きさが一定の小さい球状の物体を粒子として敷き詰める。粒子は最密構造となるように配置する(図1)。

弾性物体の挙動を、粒子間の距離に応じた作用力と、粒子間の相対速度に応じた減衰力を計算することで求める。粒子間の距離に応じた作用力  $f_d$  は、粒子の変位に応じて、図2のように斥力、引力として働き、式(1)で定義する。

$$f_d = \begin{cases} k_1((2r)^2 - d^2) & (0 < d < 2r) \\ 0 & (2r \leq d < a) \\ -k_2(a-d)(d-b) & (a \leq d < b) \\ 0 & (b \leq d) \end{cases} \quad (1)$$

$k_1, k_2$  はバネ定数、 $r$  は粒子の半径、 $d$  は粒子間の距離、 $a, b$  は任意定数である。

2つの粒子が接する距離(粒子の半径  $r$  の2倍)を基準の距離とし、粒子間の距離が基準の距離と等しい場合は安定状態で、このとき作用力は働かない。粒子間の距離が基準距離よりも小さい場合には斥力が働き、大きい場合には引力が働く。

粒子間の相対速度に応じた減衰力  $f_v$  は、周囲の影響を及

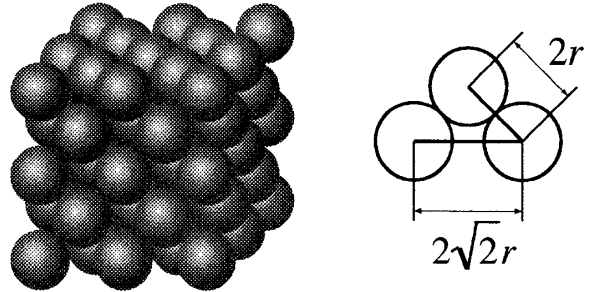


図1 最密となる粒子の配置

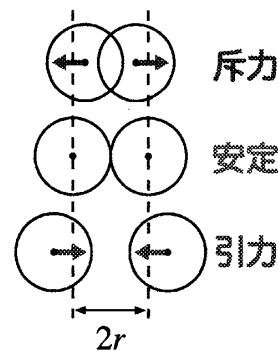


図2 粒子間の距離に応じた作用力

ぼす粒子の平均速度との相対速度を減少させるように働き、運動を収束させ、式(2)で定義する。

$$f_v = -C \left( v_i - \frac{1}{n} \sum_{i \neq j} v_j \right) \quad (2)$$

$C$  は減衰定数、 $v$  は粒子の速度、 $n$  は影響を及ぼす粒子の数である。

これらの粒子間に働く作用力は、隣接していると思なされる粒子間にだけ働くものとし、粒子間の距離で判定処理を行い、図1のように粒子が最密となるように配置された場合、 $2\sqrt{2}r$  以上離れている粒子間には働かないものとする。

粒子の運動は、式(3)で定義する運動方程式に従うものとする。

$$f_d + f_v + f_b = ma \quad (3)$$

$f_b$  はボーンによる力、 $m$  は粒子の質量、 $a$  は粒子の加速度である。

粒子に働く力をもとに、オイラー法による数値積分計算を行い、位置、速度、加速度を求める。

† 和歌山大学, Wakayama University

また、計算量を減らすために、粒子間に働く作用力の影響範囲の大きさのセルに空間を分割し、粒子が存在するセル及び近傍のセル内に存在する粒子とのみ作用力が働くかどうかの判定処理を行うことで高速化を図る。

### 3. ボーン制御

粒子をボーンで制御するために、粒子をボーンに対応付けて、各粒子が従属するボーン上に基準となる点を設定する(図3)。ボーン上の基準点からの粒子の変位に応じて斥力、引力を計算し、粒子がボーンに付着するようにする。

また、ねじれ変形に対応するために、ボーン回転角に応じて、粒子に回転方向の力を加える。

これらの力の和  $\mathbf{f}_b$  を粒子ベースのモデルに働く外力として与える。

### 4. 実験結果

本稿で提案する手法に基づいてボーン変形を行った結果を図4に示す。図4の下は変形時の粒子の様子を表している。実験は粒子を直方体の形状に並べて、ボーンを2本配置して行った。粒子の数は 2,965 個、頂点数は 1,062 個である。粒子間に接続関係がないため、変形は流動的なものとなる。

### 5. おわりに

粒子ベースの弾性物体をボーンで制御して変形する手法を提案し、これに基づいた変形例を示した。ボーンによって粒子に外力を与えることで、弾性物体としての局所的な変形に加えて、ユーザが任意の変形を行うことができた。

今後の課題として、本手法を任意の形状に適用させる。有限要素法などの場合は複雑な形状に対して格子を生成するのは困難であるが、粒子ベースのモデルでは、粒子を並べておいて、形状に対する内外判定だけで粒子の有無を決定すれば、簡単に粒子の発生を行うことができる[7]。

また、粒子間に働く作用力が小さい粒子の集合を、一つの大きな粒子と見なして、粒子を階層的なモデルにすることで計算する粒子の数を減らし、シミュレーションの高速化が可能となると考えられる。

### 参考文献

- [1] S. Cotin, H. Delingette, and N. Ayache, "Real-Time Elastic Deformations of Soft Tissues for Surgery Simulation," *IEEE Trans. Visualization and Computer Graphics*, Vol.5, No.1, pp.62-73, 1999.
- [2] 渡辺隆史, 大谷淳, 棚沢順, 徳永幸生, "2段階境界要素法を用いる三次元弾性物体の変形と移動の実時間アニメーション法," *電子情報通信学会論文誌 D-II* Vol. J88-D-II No.9, pp.1876-1888, Sep.2005.
- [3] 小田泰行, 村岡一信, 千葉則茂, "仮想粘土の粒子ベース・ビジュアルシミュレーション," *情報処理学会論文誌*, Vol.42, No.5, pp.1142-1150, May.2001.
- [4] H. Inaba, S. Miyazaki, and J. Hasegawa, "Muscle-Driven Motion Simulation Based on Deformable Human Model Constructed from Real Anatomical Slice Data," *Proc. AMDO2002*, pp.32-42, Palma de Mallorca, Spain, Nov.2002.
- [5] S. Capell, S. Green, B. Curless, T. Duchamp, and Z. Popović, "Interactive skeleton-driven dynamic deformations," In *Proc. SIGGRAPH '02*, pp.586-593, ACM Press, New York, 2002.
- [6] 近藤亮, 金井崇, "簡略化四面体メッシュを用いた詳細メッシュのインタラクティブな物理法則アニメーション," *Visual Computing グラフィックスとCAD 合同シンポジウム 2004*, pp.7-12, Jun.2004.
- [7] 塚越誠一, 日本計算工学会(編), p.3, 丸善株式会社, 東京, 2005.

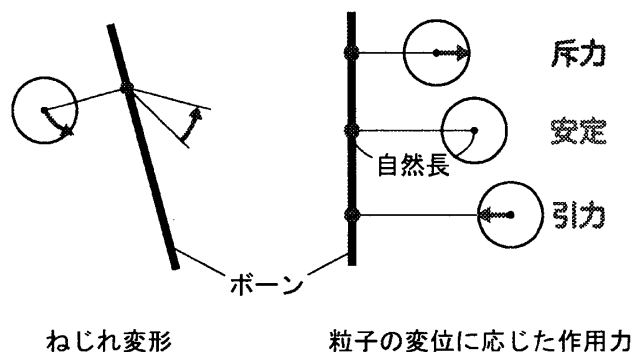


図3 粒子がボーンから受ける作用力

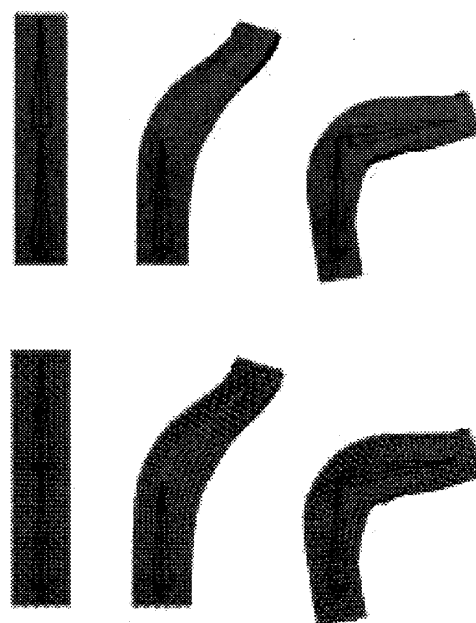


図4 ボーン変形の実行例