

粒子ベースのスキニング法

小宮 信吾† 床井 浩平‡

† 和歌山大学 大学院 システム工学研究科

‡ 和歌山大学 システム工学部

E-mail: {s075024, tokoi}@sys.wakayama-u.ac.jp

キャラクタアニメーションにおいてスキニングによる形状の変形を行う場合、表面の陥没やモデルの収縮などの意図しない結果が得られる場合がある。そこで本稿では、相互作用力の働く粒子群を用いたモデルにより、変形の前後で体積を維持し、モデルの収縮を防ぐ手法を提案する。本手法では、粒子間に働く相互作用力によって、粒子は互いに一定の距離を保つように振る舞い、変形の前後で粒子の数の増減がなければ体積が保存されていると見なす。骨格による粒子の制御は、粒子と骨格を対応付けして、粒子が骨格から作用力を受け骨格に付着するように移動することで行う。本手法による変形結果と頂点ブレンディングによるスキニングの変形結果を比較し、本手法の有効性を示す。

Particle-based Skinning

Shingo Komiya† and Kohe Tokoi‡

† Graduate School of Systems Engineering, Wakayama University

‡ Faculty of Systems Engineering, Wakayama University

E-mail: {s075024, tokoi}@sys.wakayama-u.ac.jp

When we deform objects by using skinning for character animation, there are cases that cause the joint collapse and shrinkage of the objects. Therefore, in this paper, we maintain a volume of objects during deformation by the model using the particle group that receives mutual forces each other and propose technique to prevent the shrinkage of the objects. In this method, particles maintain constant distance each other by the mutual forces that a particle receives. And we consider that a volume of objects is maintained without the increase and decrease of the number of the particles during deformation. As for The control of particles by skeleton, a bone gives particles force and particles move close to skeleton. We compare a deformation result of our method with vertex blending's and we show that our technique is efficient.

1. はじめに

キャラクタアニメーションでは、仮想的な骨格を形状内部に定義し、この骨格を制御することにより表面形状を変形するスキニングと呼ばれる手法が用いられる。この手法において変形後の頂点位置を決定する方法として、頂点ブレンディングという手法が用いられる。頂点ブレンディングでは、複数の骨格からの影響力の重み付け和によって表面の頂点位置を決定し、これにより、滑らかな表面を保った変形が可能となる。しかし、一般的な頂点ブレンディングでは、変形の際に関節部分において、表面形状の

陥没やモデルの収縮などの意図しない結果が得られるという問題がある。この問題を解決するために、解剖学的なモデルを用いた方法[1]や、双対四元数を用いたスキニング手法[2]、実例ベースの方法[3]などが提案された。

また、物理シミュレーションを用いた方法では、Capellら[4]が有限要素法を用いた弾性物体を骨格で制御する方法を提案した。しかし、格子の生成には、多大な時間と労力、経験を要し、格子を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[5]、要素数が大幅に増える可能性がある[5]。

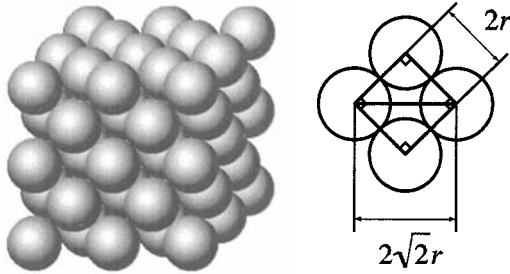


図1 最密となる粒子の配置と粒子間の相互作用力が働く範囲

本稿では、相互作用力の働く粒子群を用いたモデルにより、変形の前後も体積を維持し、モデルの収縮や表面形状の陥没を防ぐ手法を提案する。粒子は相互作用力によって互いに一定の距離を保つように振る舞い、これにより、体積を近似的に保存して変形を行うことができる。そして、粒子を骨格で制御するために粒子と骨格を対応付けして、骨格からの影響を粒子に外力として与えて、粒子は骨格に付着するように振る舞う。提案手法により、体積をほぼ一定に保つことができ、表面形状がつぶれることなく骨格による変形を行うことが可能である。

また、形状に対して粒子の内外判定を行うだけで粒子群のモデルを得ることができ、簡単に任意の形状へ適用させることができる[7]。

2. 粒子ベースのモデル

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剛体を相互作用力の働く粒子として敷き詰める。粒子は粒子間に働く相互作用力によって、互いに一定の距離を保つように振る舞い、変形の前後も粒子の数の増減がなければ体積が保存されていると見なす。粒子間に働く相互作用力は、隣接していると思なされる粒子間にだけ働くものとし、粒子が最密構造となるように配置された場合、粒子の半径を r とし、粒子間距離が $2\sqrt{2}r$ 以上離れている粒子間には働かないものとする (図1)。

また、粒子を骨格で制御するために、各粒子を最も近い距離にある骨格と対応付けする。粒子は、骨格が剛体変換によって変換されることに伴い、骨格からの距離に応じて作用力を受け、骨格に付着するように移動する。

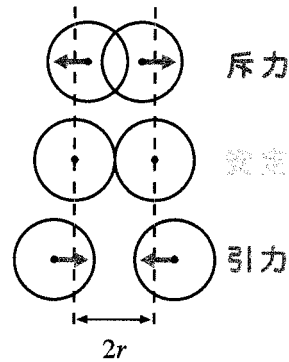


図2 粒子間の距離に応じた作用力

2.1 粒子間に働く相互作用力

各粒子には、粒子間の距離に応じた作用力 \mathbf{f}_d と、粒子間の相対速度に応じた減衰力 \mathbf{f}_v が働く [6]。

粒子間の距離に応じた作用力 \mathbf{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、次式で定義する。

$$\mathbf{f}_d = \begin{cases} k_1((2r)^2 - d_1^2) & (0 < d_1 < 2r) \\ 0 & (2r \leq d_1 < a_1) \\ -k_2(a_1 - d_1)(d_1 - 2\sqrt{2}r) & (a_1 \leq d_1 < 2\sqrt{2}r) \\ 0 & (2\sqrt{2}r \leq d_1) \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 k_1, k_2 はバネ定数、 r は粒子の半径、 d_1 は粒子間の距離、 a_1 は任意定数である。二つの粒子が接する距離 (粒子の半径 r の二倍) 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き、互いに隣接していないと思なされる粒子間では作用力は働かない。また、斥力の範囲と引力の範囲の間で粒子の振動が起こるのを抑制するために、安定状態に一定の幅を持たせる。

粒子間の相対速度に応じた減衰力 \mathbf{f}_v は、粒子間に働く摩擦力であり、粒子間の相対的な運動を減少させるように働き、次式で定義する。

$$\mathbf{f}_v = -C \left(\mathbf{v}_i - \frac{1}{n} \sum_{i \neq j} \mathbf{v}_j \right) \quad (2)$$

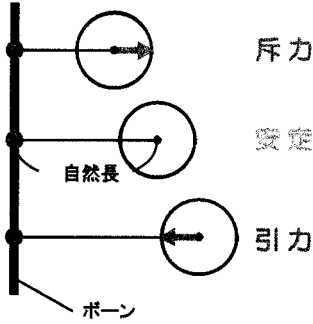


図3 粒子が骨格から受ける作用力

ここで、 C は減衰定数、 v_i は減衰力が働く粒子の速度、 v_j は減衰力が働く粒子と接触している粒子の速度、 n は接触している粒子の数である。

2.2 粒子が骨格から受ける力

粒子を骨格で制御するために、粒子を骨格に対応付けて、各粒子が従属する骨格上に基準となる点を設定する(図3)。粒子は、骨格上の基準点からの変位に応じて斥力、引力を受け、骨格から一定の距離を保つように振る舞う。粒子が骨格から受ける力 \mathbf{f}_b を以下のように定義する。

$$\mathbf{f}_b = \begin{cases} k_3(d_2 - L)^2 & (0 < d_2 < L) \\ 0 & (L \leq d_2 < a_2) \\ -k_4(d_2 - L)^2 & (a_2 \leq d_2) \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 k_3 、 k_4 はバネ定数、 L はバネの自然長であり、粒子と骨格の初期位置から定義する。 d_2 は粒子間の距離、 a_2 は任意定数である。粒子間の距離に応じた作用力と同様に、斥力の範囲と引力の範囲の間で粒子の振動が起こるのを抑制するために、安定状態に一定の幅を持たせる。

また、骨格の軸周りの回転に対応するために、粒子に骨格の回転方向の力 \mathbf{f}_t を加える。この力のかかる方向は、骨格の軸のベクトルと、骨格上の基準点から粒子の座標へ向かうベクトルの外積を計算して決定する(図4)。力の大きさは、骨格の回転角と粒子と骨格の距離に応じて決定し、以下のように定義する。

$$\mathbf{f}_t = \theta(\mathbf{b} \times \mathbf{a})/|\mathbf{a}| \quad (4)$$

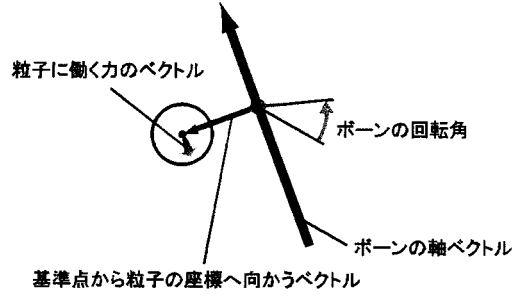


図4 粒子が骨格の軸周りの回転から受ける力

ここで、 θ は骨格の回転角、 \mathbf{a} は骨格上の基準点から粒子の座標へ向かうベクトル、 \mathbf{b} は骨格の軸のベクトルである。

3. 粒子の運動

粒子に働く力 \mathbf{f} は前節で定義された各力の総和で表され、以下のように定義する。

$$\mathbf{f} = \mathbf{f}_d + \mathbf{f}_v + \mathbf{f}_b + \mathbf{f}_t \quad (5)$$

粒子の運動は、以下に示す運動方程式に従うものとする。

$$\mathbf{f}(t) = m\mathbf{a}(t) \quad (6)$$

ここで、 $\mathbf{f}(t)$ は時刻 t における粒子に働く力、 m は粒子の質量、 $\mathbf{a}(t)$ は時刻 t における粒子の加速度である。そして、以下に示す式を用いて、改良オイラー法による数値積分計算を行い、位置、速度、加速度を求めます。

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(t + \Delta t) &= \mathbf{x}(t) + \Delta t(\mathbf{v}(t) + \hat{\mathbf{v}}(t + \Delta t))/2 \\ \hat{\mathbf{v}}(t + \Delta t) &= \mathbf{v}(t) + \Delta t \cdot \mathbf{a}(t) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\mathbf{a}(t + \Delta t) = \mathbf{f}(t + \Delta t)/m \quad (8)$$

$$\mathbf{v}(t + \Delta t) = \mathbf{v}(t) + \Delta t(\mathbf{a}(t) + \mathbf{a}(t + \Delta t))/2 \quad (9)$$

ここで、 Δt は時間増分、 $\mathbf{x}(t)$ は時刻 t における粒子の位置、 $\mathbf{v}(t)$ は時刻 t における粒子の速度である。

計算手順は、粒子に働く力を式(5)により求め、式(8)および式(9)により次の計算ステップでの加速度および速度を求め、式(7)により粒子の位置を求めます。

また、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

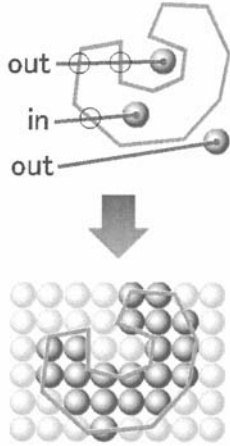


図5 粒子モデルの任意形状への適用方法

と隣接している 3^3 個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処理の高速化を図る。

4. 任意の形状への適用

形状に対する粒子の内外判定を行い、粒子ベースのモデルを任意の形状へ適用させる。まず、形状を包むように粒子を整然と並べ、粒子から任意の方向へレイを飛ばし、形状を構成する面との交差判定を行う。レイと面との交差回数が奇数であるならば、粒子は形状内部に存在するとし、偶数であるならば粒子は形状の外部に存在するものとして粒子の有無を決定する。この交差判定の処理をすべての粒子について行うことで形状内部に存在する粒子群のモデルを得ることができる。2次元での例を図5に示す。レイが頂点や稜線を通過する場合は、交差回数の数え方が複雑になるため、再び任意の方向へレイを飛ばし交差判定を行う。

また、粒子群の変形に伴う形状の頂点の変形後の位置は、頂点が粒子から受ける作用力と、頂点と頂点の間に働く作用力から粒子の場合と同様に数値積分計算を行い決定する。頂点が粒子から受ける作用力は、形状変形前の状態で最も近い位置にある粒子から受ける力であり、頂点と粒子が接する距離（粒子の半径 r ）を基準の距離とし、式(1)において粒子の半径の項を1/2倍した式を用いて計算する。頂点と頂点の間に働く作用力は、式(3)において、変形前の頂点間の距離を自然長として計算する。そして、粒子の場合と同様に数値積分計算を行い、形状変

表1 各パラメータの値

時間増分	$\Delta t = 0.02$	
減衰定数	$C = 12.0$	
式(1)のバネ定数	$k_1 = 100.0$	$k_2 = 50.0$
式(3)のバネ定数	$k_3 = 1.0$	$k_4 = 2.0$
頂点が粒子から受ける力のバネ定数	$k_1 = 1.0$	$k_2 = 0.5$
頂点間にはたらく力のバネ定数	$k_3 = 1.0$	$k_4 = 2.0$

形後の頂点位置を求める。粒子と頂点の対応は一对多となり、一つの粒子が複数の頂点の座標に影響を与えるものとなる。

5. 実験結果

本稿で提案する手法に基づいて形状変形を行った結果を図6、図7に示す。

図6で用いたモデルは、形状のバウンディングボックスのサイズが $1 \times 4 \times 1$ で、粒子の半径が0.1、頂点数194、骨格の数4、粒子数711の直方体のモデルである。図7で用いたモデルは、形状のバウンディングボックスのサイズが $0.6986 \times 2.2426 \times 0.6658$ で、粒子の半径が0.03、頂点数98、骨格の数3、粒子数2643の腕のモデルである。力の計算及び積分計算で用いたパラメータを表1に示す。

図6(b)は直方体のモデルを中心から折り曲げた変形結果の例であり、体積があまり変化せずに変形を行うことができ、関節部分における表面形状の陥没も見られない。しかし、形状の表面に凹凸が現れている。また、骨格の端点部分では、元の形状から大きく変化したものとなっている。

図6(c)は直方体のモデルに対して骨格の軸周りに回転を施し、ねじれ変形を行った変形結果の例である。変形後の粒子群は、体積があまり変化せずに変形を行うことができているように見えるが、表面形状では、回転を施した骨格に対応する箇所が細くなっている。

図7は腕のモデルに提案手法を適用させた変形結果と頂点ブレンディングでの変形結果との比較である。提案手法では、頂点ブレンディングで見られるような関節部分の内側での表面の陥没は発生していない。しかし、図6(b)の変形結果と同様に、骨格の端点部分では、変形前の形状の特徴が失われてしまっている。

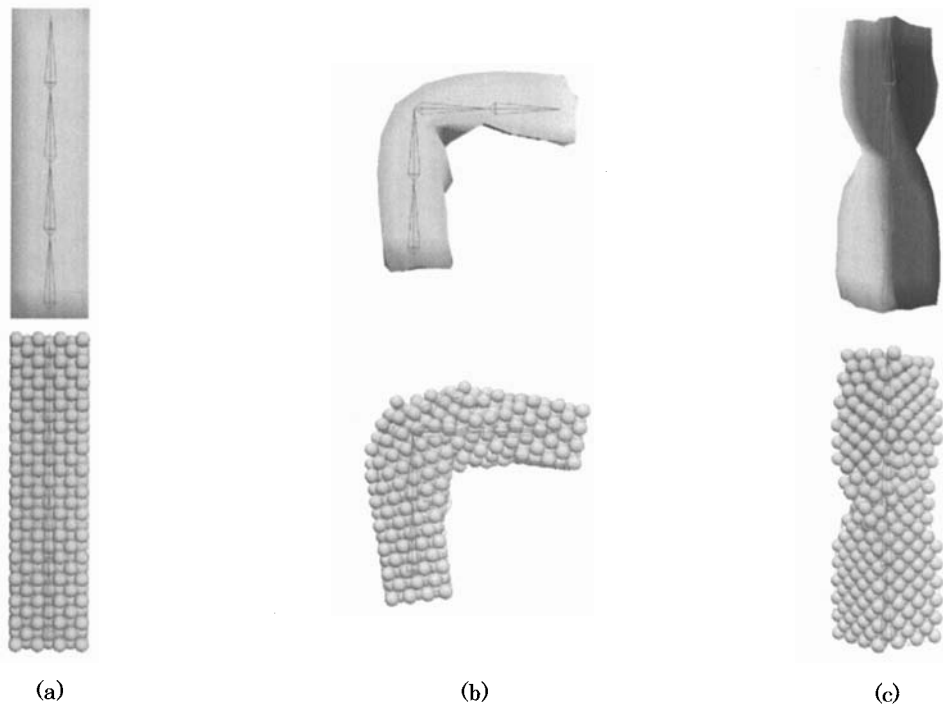


図6 提案手法を用いた実行結果. (a) 変形前の直方体のモデルとその粒子モデル. (b) 曲げ変形の実行結果とその粒子モデルの状態. (c) ねじれ変形の実行結果とその粒子モデルの状態.

また、粒子間に接続関係がないため、粒子は流動的であり、すべての変形結果で、粒子が初期配置から大きく移動している様子が見られる。

図6 (c) のねじれ変形の際の先細りが発生する現象は、粒子の変形結果から頂点位置を求める方法に問題があるため起こるものであると考えられる。粒子を形状の頂点と同じ座標に配置し、粒子の変形結果が頂点の座標へと直接反映するモデルとすることで改善される可能性があり、形状の表面に現れる凹凸も解消することができると考えられる。

本手法では、一定の大きさの粒子群を用いているため、図8に示すような部位によって体積の差が大きい形状に対して、粒子の内外判定を行い、生成した粒子群のモデルでは、それぞれの部位で変形に適さない粒子のモデルが生成されてしまう場合がある。例えば、図8のモデルの胴体部では、形状に対して粒子が小さすぎて、粒子数が必要以上に増えてしまい、計算コストが増大してしまう。

実験では、描画の度に時間増分を1つ進めて計算を行った。実行速度は、図6で用いたモデ

ルでは284 fps、図7で用いたモデルでは81 fpsであった。なお、実験に用いた計算機は、Pentium(R) 4 3.40GHz、メモリ1GBで、画面の解像度は640×480である。

6. おわりに

相互作用力の働く粒子群を用いたモデルにより、変形の前後で体積を維持し、モデルの収縮を防ぐ手法を提案した。提案手法を簡単な形状へ適用し、関節部分における表面形状の陥没が発生することがなく変形を行うことができた。また、骨格による変形を行った後の粒子群のモデルは、変形前と比較し体積があまり変化することがないことを確認した。

粒子ベースのモデルの任意形状への適用は、形状に対する粒子の内外判定を行うことで簡単に行うことができた。

しかし、形状の特徴を保持した精密な変形を行うためには、形状に対して粒子の大きさを十分に小さくする必要がある、これにより粒子数が増大してしまう。

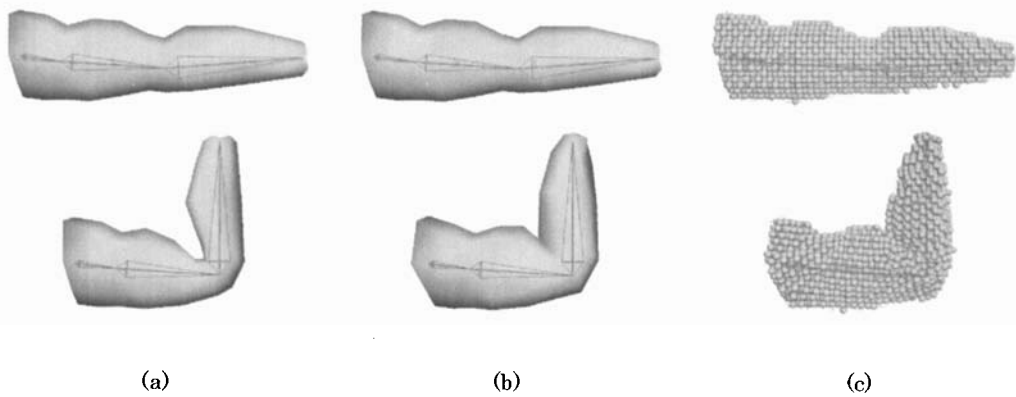


図7 腕のモデルの変形結果. (a) 頂点ブレンド. (b) 提案手法による実行結果. (c) 提案手法における粒子の状態.

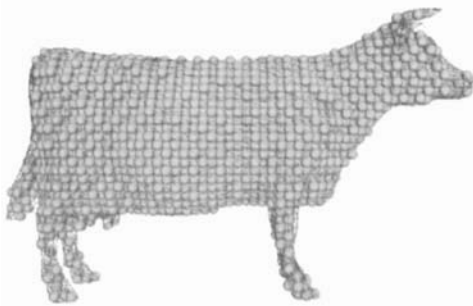


図8 部位によって体積の差が大きい形状の粒子モデル

今後の課題として、粒子と形状の頂点との対応方法を改善し、粒子の変形結果が頂点の変形結果へ直接反映するモデルに変更したいと考えている。

また、改良オイラー法による数値積分計算を、陰解法を用いた計算方法に置き換えることによって、時間差分を大きくとり、粒子の運動を高速に収束させることが可能となると考えられる。

さらに、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、処理の高速化を図りたい。

参考文献

- [1] 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.
- [2] Kavan, L., Collins, S., Zára, J. and O'Sullivan, C., "Skinning with Dual Quaternions", in 2007 ACM SIGGRAPH Symposium on Interactive 3D Graphics and Games, pp.39-46, ACM Press, 2007.
- [3] Mohr, A., and Gleicher, M., "Building Efficient, Accurate Character Skins from Examples", In Proc. SIGGRAPH '03, ACM Transactions on Graphics, ACM Press, vol. 22, pp.562-568, 2003.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 塚越誠一, "計算力学レクチャーシリーズ 5 粒子法", 日本計算工学会(編), p.3,丸善株式会社, 東京, 2005.