# 計測自動制御学会東北支部 第 288 回研究集会(2014.5.19) 資料番号 288-2

滑らかな3次元スキンアニメーションを実現する手法の検討

An implementation method for smooth 3D skin animation

○一戸浩志,萩原義裕,萩原由香里,アデルジャンイミティ,三好扶,高木基樹

OHiroshi Ichinohe, Yoshihiro Hagihara, Yukari Hagihara,

Adiljan Yimit, Tasuku Miyoshi, Motoki Takagi

Iwate University

**キーワード**: 3D アニメーション(3D animation), モデリング(modeling), スキニング(skinning), 球面ブレンディング(Spherical Blend Skinning), SBS+(Spherical Blend Skinning Plus)

連絡先:〒020-5881 岩手県盛岡市上田 4-3-5 国立大学法人 岩手大学工学部 機械システム工学科 萩原義裕,

TEL: (019) 621-6400, FAX.: (019) 621-6400, E-mail: dhag@iwate-u.ac.jp

#### 1. はじめに

3次元スキンアニメーションは、モデルの 表面形状であるスキンとそれを制御するため の表情データベースや骨格情報であるボーン を持つ3次元モデルを利用し、表情ハンドル やボーンの姿勢の更新を通して表面形状を間 接的に制御するアニメーション生成方法であ る[1]. ボーンを用いたスキンアニメーション の代表的なものは、線形ブレンディング (LBS:Linear Blend Skinning) [2]、球面ブレ ンディング(SBS:Spherical Blend Skinning)

[3], ログマトリクスブレンディング(LMB: Log - Matrix Blend skinning)[4], 双対四元数 ブレンディング(DLB: Dual quaternion Linear Blend skinning)[5, 6], SBS+法(SBS+: Spherical Blend Skinning Plus) など[7-11]がある. なかで も SBS+法は, 歪みの少ないスキンアニメーシ ョンを実現する有力な方法である. 我々は, SBS+を定式化し,実装を示すとともに,その 挙動を解析して問題点を論じた上で,さらに, 新しい実装例を提案し,より自然な変形を実 現できることを示した[8,11].

本論文では、これに対してさらに改良を加 え、歪みがほとんど生じない手法を提案し、 アルゴリズムを説明するとともに実験を通し て挙動を明らかにする.

#### 2. 従来手法

ある頂点が n 個のボーンから影響を受ける とき、LBS 法による変形後の頂点の位置ベク トル $v_h$ は、次式で与えられる.

$$v_b = \sum_{i=0}^{n-1} w_i M_i v$$
  
=  $(\sum_{i=0}^{n-1} w_i M_i) v$  ...(1)

-1 -

岩手大学

*M<sub>i</sub>*はスキニング行列と呼ばれるアフィン変換 係数,*v*は変形前の頂点の位置ベクトル,*w<sub>i</sub>*は 頂点に固有で影響するボーンごとにもつスカ ラーな重み係数でその総和は1である. 肘関 節のように,二つのボーンから影響を受ける 場合,頂点に固有の重み係数*t<sub>v</sub>*を用いて次式 のようになる.

$$v_b = \{t_v M_0 + (1 - t_v) M_1\}v \qquad \dots (2)$$

一方, SBS 法による変形後の頂点の位置ベク トルv<sub>s</sub>は, 次式で与えられる.

$$v_{s} = Q(v - c_{v}) + \sum_{i=0}^{n-1} w_{i} M_{i} c_{v}$$
  
=  $Q(v - c_{v}) + (\sum_{i=1}^{n-1} w_{i} M_{i}) c_{v}$  ...(3)

Qはボーンヘッドの局所的な回転のみを表す 変換である. cvは局所回転の中心となる位置 で、ボーンヘッドからボーン先への芯線に対 し、スキン上の頂点から芯線に直交する線分 をおろしたときの線分と芯線の交点である. 肘関節のように、親子関係がある二つのボー ンから影響を受ける場合、頂点に固有の重み 係数tvを用いて次式のようになる.

$$v_s = Q(v - c_v) + \{t_v M_0 + (1 - t_v) M_1\} c_v$$
...(4)

Qは例えば極座標で回転を補間して球面上を
線形に移動する Spherical Linear
Interpolation(球面線形補間)[12]に基づく関数
Slerpを用いて次式により求められる.

$$Q = Slerp(Q_0, Q_1, t_v) = (Q_1, Q_0^{-1})^{t_v} Q_0 \qquad \dots (5)$$

Q<sub>0</sub>は無回転を表す変換, Q<sub>1</sub>は子ボーンのボー

ンヘッドの局所回転である.  $M_0$ が親ボーン のボーンヘッドの,  $M_1$ が子ボーンのボーンヘ ッドのスキニング行列であるとき,  $Q_1$ はアフ ィン変換係数Mを分解して回転行列を取り出 す関数Rotation(M)を用いて次式で求められ る.

$$Q_1 = Rotation(M_1 M_0^{-1}) \qquad \dots (6)$$

SBS+法による変形後の頂点の位置ベクトル $v_{s+}$ は,次式で与えられる.

$$v_{s+} = Q(v - c_v) + c'_v$$
 ...(7)

ここで*c*<sub>v</sub>は次式のように,関数*f*によって移動された中心点である.

$$c'_{v} = f(c_{v}, t_{v}, M_{0}, M_{1}) \qquad \dots (8)$$

$$f_1(c_v, t_v, M_0, M_1) = \{t_v M_0 + (1 - t_v) M_1\} c_v \qquad \dots (9)$$

$$f_{2}(c_{v}, t_{v}, M_{0}, M_{1})$$

$$= t_{v}M_{0}r_{0}'' + (1 - t_{v})M_{1}r_{1}''$$

$$= t_{v}M_{0}(c_{v} + r_{0v}) + (1 - t_{v})M_{1}(c_{v} + r_{1v})$$
...(10)

$$f(c_{\nu}, t_{\nu}, M_0, M_1)$$
  
=  $sf_1(c_{\nu}, t_{\nu}, M_0, M_1)$   
+ $(1-s)f_2(c_{\nu}, t_{\nu}, M_0, M_1)$  ...(11)

$$r_0'' = c_v + r_0 - [\{t_v r_0 + (1 - t_v)r_1\} - c_v]$$
...(12)

$$r_1'' = c_v + r_1 - [\{t_v r_0 + (1 - t_v)r_1\} - c_v]$$
...(13)

-2 -

r<sub>0</sub>およびr<sub>1</sub>は,両者の境界点(境界面とボ ーンヘッドからボーン先への芯線上の交点) である.この位置はモデリング対象の物体の 柔軟性(例えば皮膚や脂肪の柔らかさ)に応 じてユーザーが手動で与える.また,sは0以 上1以下の任意の値である.

SBS+法をさらに改良させた手法はベジエ 曲線を用いて滑らかな変形を実現する.移動 後の回転中心は子ボーンのボーンヘッドの位 置bを用いて次式で求められる.

 $c_{\nu}^{\prime\prime} = t^2 r_0^{\prime\prime} + 2t(1-t) b + (1-t)^2 r_1^{\prime\prime}$ ...(14)

SBS+法は,アフィン変換のブレンドによる 外側への不正な湾曲を薄める効果は期待でき るものの,本質的に解決するものではない. 一方.ベジエ曲線を用いれば,急激に折れ曲 がる不連続を回避できる上,外側への不正な 湾曲を軽減する効果が得られる.

#### 3. 提案手法

## 3.1. 提案の概要

ベジエ曲線を用いれば、急激に折れ曲がる 不連続を回避できる上、外側への不正な湾曲 を軽減する効果が得られるが、湾曲が全くな くなるものではない.提案手法は、湾曲を図 1のような楕円弧で表現することにより、急 激に折れ曲がる不連続を回避しつつ外側への 不正な湾曲を理論的には全てなくすことがで きる.



区 1 作户 9 轧助. Figure 1 Locus of the oval.

僅かな角度がある関節を考える.2つの変 形境界をおき,その位置をr<sub>0</sub>',r<sub>1</sub>'とする.こ れらはいずれも剛体変形後の位置で,r<sub>0</sub>'はr<sub>0</sub> に,r<sub>1</sub>'はr<sub>1</sub>に対してアフィン変換を施した結 果である.子ボーンのボーンヘッドとr<sub>0</sub>'を通 る芯線および子ボーンのボーンヘッドとr<sub>1</sub>'を 通る芯線とについて,両者に接する楕円を考 える.局所回転の中心となる位置c<sub>v</sub>をこの楕 円上に動かすことにより,提案手法が実現さ れる.楕円を一意に決定するため,子ボーン のボーンヘッドからr<sub>0</sub>',r<sub>1</sub>'までの距離のうち, 遠い方の点が属するボーンに対して楕円は平 行であるとする.



図 2 2 次元座標系における楕円の軌跡. Figure 2 Locus of the oval on 2D space. 図 2 のような 2 次 元座標系を考え,  $P_0 = (x_0, y_0), P_1 = (x_1, y_1), P_2 = (x_2, y_2)$ から楕円のx軸方向の長半径aとy軸方向の短 半径bを求める.

 $k_0 = y_0 - y_1$ ,  $k_1 = x_1 - x_0$ ,  $k_2 = x_2 - x_0$ , とおいて, 楕円の接線の方程式を解くと次式 が得られる.

$$a = k_2 \sqrt{\frac{k_1}{2k_2 - k_1}}$$
 ...(15)

$$b = \frac{k_0 k_2}{k_1 - 2k_2} \qquad \dots (16)$$

次に、原点oと芯線上の $P_3 = (x_3, y_3)$ を通る 直線と楕円との交点 $P_4 = (x, y)$ を求める.  $k_3 = x_3 - x_0$ ,  $c = y_3 - y_2$ と置いて方程式を 解くと次式の値が得られる.

$$x = \frac{abk_3}{\sqrt{k_3^2 b^2 + a^2 (c-b)^2}} \qquad \dots (17)$$

$$y = \frac{(c-b)}{k_3} x \qquad \dots (18)$$

こうして求めた $P_4$ を 3 次元座標系に戻した ものが楕円弧上に移動された回転中心 $c''_v$ で ある.

#### 3.2. 提案の実装

3次元モデルは、頂点ごとに変換前の位置v, 中心点の位置c<sub>v</sub>, そこから境界への距離r<sub>0v</sub>お よびr<sub>1v</sub>, 重み係数t<sub>v</sub>を持つとする. 肘関節の ように,親子関係がある二つのボーンから影 響を受けるものとし,境界位置r<sub>0</sub>は親ボーン のボーンヘッドから子ボーンのボーンヘッド への線分上,境界位置r<sub>1</sub>は子ボーンのボーン ヘッドから子ボーン先への線分上に存在する ものとする(以下のアルゴリズムにおいて親 子関係の存在は制限事項である). M<sub>0</sub>は親ボー ンのスキニング行列, M<sub>1</sub>は子ボーンのスキニ ング行列である.

- (1) 各ボーンのスキニング行列Mを求める.
- (2) 以下の処理をすべての対象頂点に適用 する.

(3-1)ボーンによる変換を $r_0 \ge r_1$ に適用し、変 形後の位置 $r'_0 \ge r'_1$ を求める. 子ボーンのボー ンヘッドの位置bを求める.

(3-2) 子ボーンのボーンヘッドの位置bから r<sub>0</sub>', r<sub>1</sub>'までの距離のうち,遠い方の点が属 するボーンに平行な3次元正規ベクトルA<sub>x</sub> とボーンに垂直な3次元正規ベクトルA<sub>y</sub>を 求める.ベクトルA<sub>x</sub>は遠い方の点へのベク トルを正規化したものである.ベクトルA<sub>y</sub> は楕円が存在する平面の法線ベクトルとベ クトルA<sub>x</sub>との外積を正規化したものである. 楕円が存在する平面の法線ベクトルは,bか らr<sub>0</sub>'へのベクトルとbからr<sub>1</sub>'へのベクトル

— 4 —

との外積から求められる.

(3-3) ベクトル $A_x$ ,  $A_y$ からなる2次元の座 標空間上の $P_0$ ,  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$ , を求める. こ れらの値(X, Y)はそれぞれ対応する3次元 空間上の位置と各軸の内積で求められる.

なお,ここでは仮の原点として $P_0 = (0, 0)$ となるようにしておく.

(3-4) k<sub>0</sub>, k<sub>1</sub>, k<sub>2</sub>, を求め, その値を用い
 て長半径aとy軸方向の短半径bを求める.

(3-5) k<sub>3</sub>, cを求めその値を用いてP<sub>4</sub>を求める.

 (3-6) 移動させた中心位置*c*<sup>''</sup><sub>v</sub>を求める.遠い方の点の3次元上の位置に*xA<sub>x</sub>*および(*y*+*b*)*A<sub>y</sub>を加算することにより中心位置 <i>c*<sup>'''</sup>が算出できる.

(3-7) 式(6)に基づき, *c*<sup>*''*</sup>を中心に頂点*v*を局 所球状回転させる*Q*を求める.

(3-8)頂点*v*を*Q*に基づき局所回転させ,局所 回転後の頂点位置*v*′を求める.

## 4. 実験と考察

## 4.1. 実験の概要

提案手法の挙動を調べるため簡単なモデル を用いて折り曲げた結果をいくつかの従来手 法と比較する.

## 4.2. 実験試料

実験試料は図 3 のようなシンプルなモデル である.二つのボーンを持ち,その芯線に接 する 79 個の三角ポリゴンを並べたもので,通 常不可視な*cv*の位置が観測できる.図 3 にお いて楔形で表示されているのがボーンで,小 さな三角形で表示されているのが三角ポリゴ ンである.



図 3 シンプルなモデル. Figure 3 A simple model.

#### 4.3. 実験方法

子ボーンを左に 90 度折り曲げ,提案手法の 結果と従来の各手法の結果とを比較する.比 較対象の手法は,もっとも基本的な LBS,海 外のソフトウェアによく搭載されている SBS, 国内の主要なソフトウェア[13,14]に搭載され ている SBS+,これを改良した手法(以下 SBS++),および本稿で提案した手法である.

## 4.4. 実験結果

変形前の形状を図4に示す.



図4変形前. Figure 4 Before deform.

— 5 —

LBS による結果を図5に,SBS による結果 を図6に, SBS+による結果を図7に, SBS++ による結果を図8に,提案手法による結果を 図9に示す.従来の5つの手法の結果は、折 り曲げに対して外側(折り曲げと反対の方向) に湾曲している. LBS による結果と, SBS に よる結果は特に顕著である.SBS+による結果 と、SBS++による結果は比較的その度合いは 軽減されているが、外側への湾曲がなくなっ たわけではない. また, SBS++以外の4つの 手法は、湾曲の開始点において曲率の不連続 が生じていることが観測できる. 湾曲の終了 点ではその度合いはわずかであるが、同様な 問題が生じていることがわかる.提案手法の 結果は外側への湾曲は確認できず、かつ湾曲 の開始、終了点において曲率の不連続も生じ ていない.



図5 LBS による結果. Figure 5 Result by LBS.



図6 SBS による結果. Figure 6 Result by SBS.



図7 SBS+による結果. Figure 7 Result by SBS+.



図8 SBS++による結果. Figure 8 Result by SBS++.



図9 提案手法による結果 . Figure 9 Result by proposed method.

提案手法は従来手法と比べ湾曲が非常に小 さいが,外側への湾曲がない曲線をスムーズ に描くにはこれが最も自然な形状といえる.

なお、本実験で用いたモデルでは、LBS に よる結果と、SBS による結果とはよく似てい る.これは、モデルの三角ポリゴンが芯線付 近に並んでいるためである.SBS は原理的に  $c_v$ の移動はLBS と同じである.そのため、芯 線付近にある三角ポリゴンの挙動も同様の挙 動を示したものである.

#### 4.5. 考察

現実の物体を折り曲げた場合,その材質が 均一であるなら曲率の不連続は生じない.そ の点で従来の4手法は自然な変形を提供する とは言えない.ゴムホースのような材質なら 外側への湾曲が発生することはあり得るので, そういった物体に限ってはSBS++も選択枝の ひとつとして利用できるだろう.しかし多く の物体は外側に湾曲すると不自然であること が容易に予想できる.こういった現象を原理 的に完全に解消するという意味で提案手法は 極めて有効性が高いといえる.

ただし, 楕円に基づく変形は長半径と短半 径の比率が極端に異なる場合など精度が落ち ることが予想できる. 図9 では三角ポリゴン が欠落しているように見える部分がある. 実 際には, 位置がずれているためにこのように 見えるのであるが, その原因はそういった誤 差によるものと考えられる.

## 5. おわりに

本論文では歪みの少ない3次元スキンアニ メーションを実現するために楕円の軌跡を用 いる手法を提案し,その実装方法,実験を通 した有用性の検証について述べた.従来の手 法と比較した結果,折り曲げに対して外側へ の湾曲が全くないこと,曲率の不連続が生じ ないことを確認した.こういった変形を実現 する手法は従来存在せず,ボーンを用いたス キンアニメーションの可能性を大きく広げる ことができるという点で極めて有用性が高い といえる.

今後の課題は実装の工夫を通した精度の向 上である.

## 7. 参考文献

- J.P. Lewis., M. Cordner and N. Fong: "Pose space deformations: A unified approach to shape interpolation and skeleton-driven deformation", Proc. of ACM SIGGRAPH 2000, Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series , pp. 165-172(2000).
- N. Magnenat-Thalmann, R. Laperri`ere and D. Thalmann: "Joint-dependent local deformations for hand animation and object grasping", Graphics Interface' 88, pp. 26– 33 (1988).
- L. Kavan and J. Z'ara: "Spherical blend skinning: a real-time deformation of articulated models", 2005 ACM SIGGRAPH Symposium on Interactive 3D Graphics and Games, ACM Press, pp. 9– 16 (2005).
- F. Cordier and N. Magnenat-Thalmann: "A datadriven approach for real-time clothes simulation", Computer Graphics Forum, 24, 2, pp. 173–184 (2005).
- L. Kavan, S. Collins, J. Z'ara and C. O'Sullivan: "Skinning with dual quaternions", 2007 ACM SIGGRAPH Symposium on Interactive 3D Graphics and Games, ACM Press, pp. 39–46 (2007).
- 6) 栗原 恒弥, 西田 友是, "拡大・縮小 を考慮した双対四元数によるスキニン グ方法,"信学論 D, J92-D(9), pp.1613-1620 (2009).
- L. Kavan and O. Sorkine , "Elasticity-Inspired Deformers for Character Animation", ACM TOG – Proc. of ACM SIGGRAPH Asia 2012, Vol.31, Issue 6, pp. 1-8(2012).

- 8) 佐々木 優理, "Web3D キャラクタエージェント構築アプリケーションの開発,"
  IPA 2002 年度未踏ソフトウェア創造事業 未踏ユース成果報告(2002).
- 9) mqdl, 2008-05-25 スフィリカルデフォー ム , mqdl::Note , http://d.hatena.ne.jp/mqdl/20080525/121170 6244
- 10) mqdl, 2008-04-23 スフィリカルデフォー ム , mqdl::Note http://d.hatena.ne.jp/mqdl/20080525/121170 6244
- 11) 萩原 義裕, 萩原 由香里, アデルジャン イミティ, 三好 扶, 高木 基樹, 西川 尚宏 SBS+法の定式化と改良北野宏明, 信学論(印刷中)
- 12) Ken Shoemake, "Animating rotation with quaternion curves", ACM SIGGRAPH, vol. 19, Issue 3, pp. 245-254(1985).
- 13) 萩原 義裕, 萩原 由香里, アデルジャン イミティ,三好 扶, 西川 尚宏,
  "教育用に適した3次元ゲームライブラリとそれによる創生教育,"工業教育(J.of JSEE), Vol.60, No.6,
  pp.59-65(2012).
- 14) 萩原 義裕, 萩原 由香里, アデルジャン イミティ, 三好 扶, 西川 尚宏:教育用に適した3次元ゲームライブラリの評価・検証,"工業教育(J.of JSEE), Vol.60, No.6, pp.66-71(2012).