

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

○Hiroshi Ichinohe, Yoshihiro Hagihara, Yukari Hagihara,

Adiljan Yimit, Tasuku Miyoshi, Motoki Takagi

岩手大学

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_b は, 次式で与えられる.

$$\begin{aligned} v_b &= \sum_{i=0}^{n-1} w_i M_i v \\ &= \left(\sum_{i=0}^{n-1} w_i M_i \right) v \end{aligned} \quad \dots(1)$$

M_i 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_i 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_v を用いて次式のようになる。

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

一方、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。

$$\begin{aligned} v_s &= Q(v - c_v) + \sum_{i=0}^{n-1} w_i M_i c_v \\ &= Q(v - c_v) + (\sum_{i=1}^{n-1} w_i M_i) c_v \quad \dots(3) \end{aligned}$$

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。 c_v 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 t_v を用いて次式のようになる。

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

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。

$$\begin{aligned} Q &= \text{Slerp}(Q_0, Q_1, t_v) \\ &= (Q_1, Q_0^{-1})^{t_v} Q_0 \quad \dots(5) \end{aligned}$$

Q_0 は無回転を表す変換、 Q_1 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 $\text{Rotation}(M)$ を用いて次式で求められる。

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

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。

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

ここで c'_v 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。

$$c'_v = f(c_v, t_v, M_0, M_1) \quad \dots(8)$$

ただし、関数 f は次式のような関数である。

$$\begin{aligned} f_1(c_v, t_v, M_0, M_1) \\ &= \{t_v M_0 + (1 - t_v) M_1\} c_v \quad \dots(9) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f_2(c_v, t_v, M_0, M_1) \\ &= t_v M_0 r_0'' + (1 - t_v) M_1 r_1'' \\ &= t_v M_0 (c_v + r_{0v}) + (1 - t_v) M_1 (c_v + r_{1v}) \quad \dots(10) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f(c_v, t_v, M_0, M_1) \\ &= s f_1(c_v, t_v, M_0, M_1) \\ &\quad + (1 - s) f_2(c_v, t_v, M_0, M_1) \quad \dots(11) \end{aligned}$$

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

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

r_0 および r_1 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。

$$c_v'' = t^2 r_0'' + 2t(1-t)b + (1-t)^2 r_1'' \dots(14)$$

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ることができる。

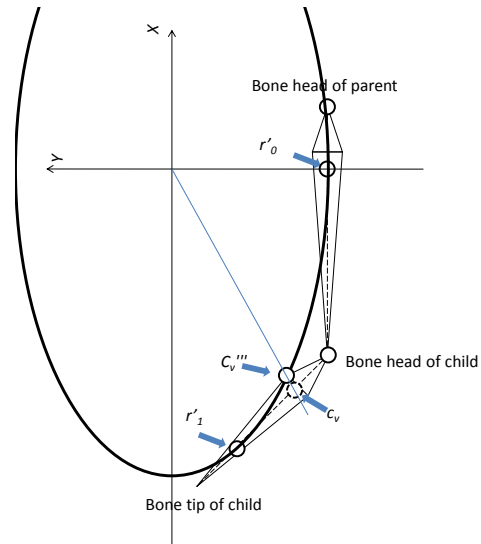


図1 楕円の軌跡。
Figure 1 Locus of the oval.

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_0' 、 r_1' とする。これらはいずれも剛体変形後の位置で、 r_0' は r_0 に、 r_1' は r_1 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_0' を通る芯線および子ボーンのボーンヘッドと r_1' 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_v 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_0' 、 r_1' 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。

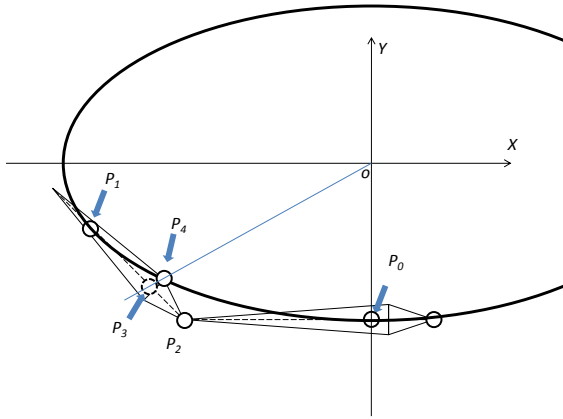


図 2 2次元座標系における楕円の軌跡.

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.

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

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

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.

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

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

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_v , そこから境界への距離 r_{0v} および r_{1v} , 重み係数 t_v 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_0 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_1 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_0 は親ボーンのスキニング行列, M_1 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 と r_1 に適用し, 変形後の位置 r'_0 と 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'_0 , r'_1 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_x とボーンに垂直な 3次元正規ベクトル A_y を求める. ベクトル A_x 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_y は楕円が存在する平面の法線ベクトルとベクトル A_x 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'_0 へのベクトルと b から r'_1 へのベクトル

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_0 , k_1 , k_2 , 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_3 , c を求めその値を用いて P_4 を求める。

(3-6) 移動させた中心位置 c_v''' を求める。遠い方の点の3次元上の位置に xA_x および $(y + b)A_y$ を加算することにより中心位置 c_v''' が算出できる。

(3-7) 式(6)に基づき、 c_v''' 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 c_v 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。

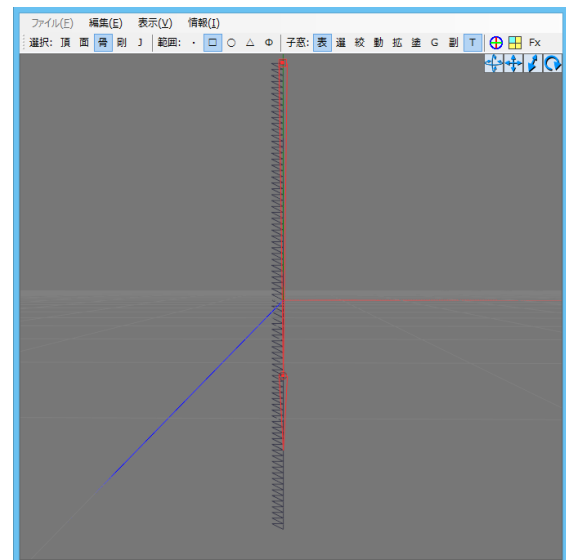


図3 シンプルなモデル。
Figure 3 A simple model.

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。

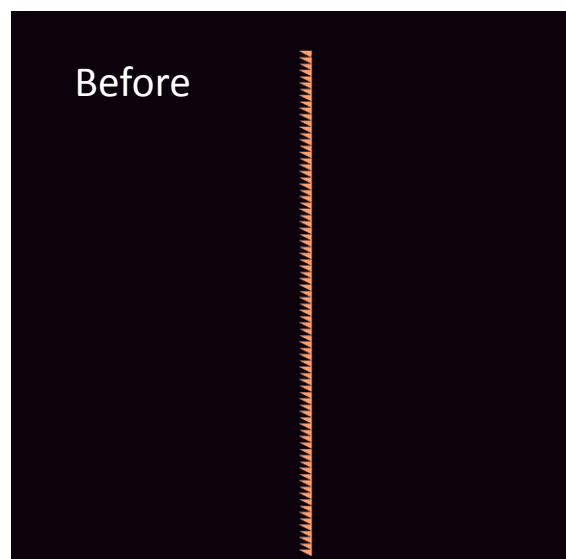


図4 変形前。
Figure 4 Before deform.

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.

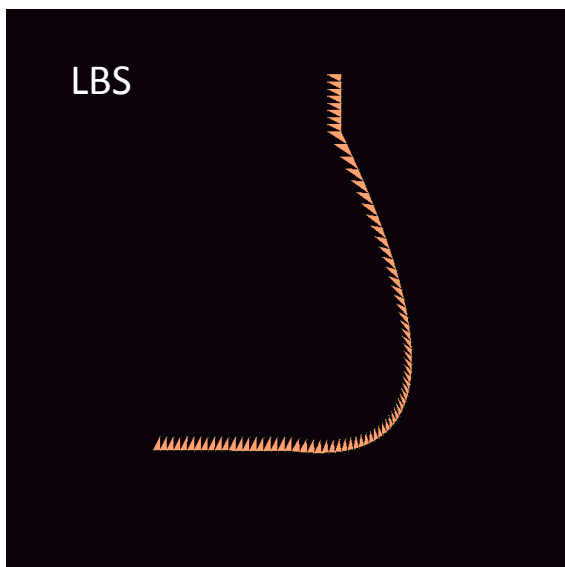


図 5 LBS による結果 .
Figure 5 Result by LBS.

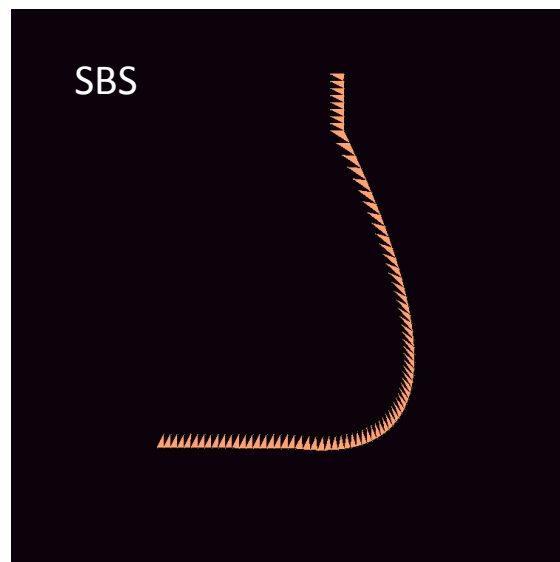


図 6 SBS による結果 .
Figure 6 Result by SBS.

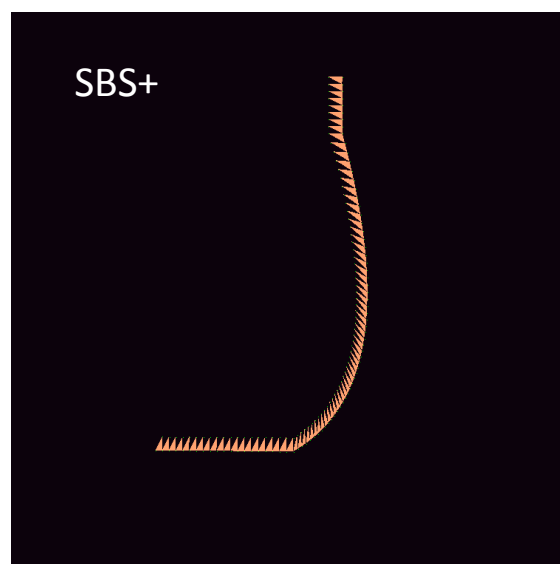


図 7 SBS+による結果 .
Figure 7 Result by SBS+.

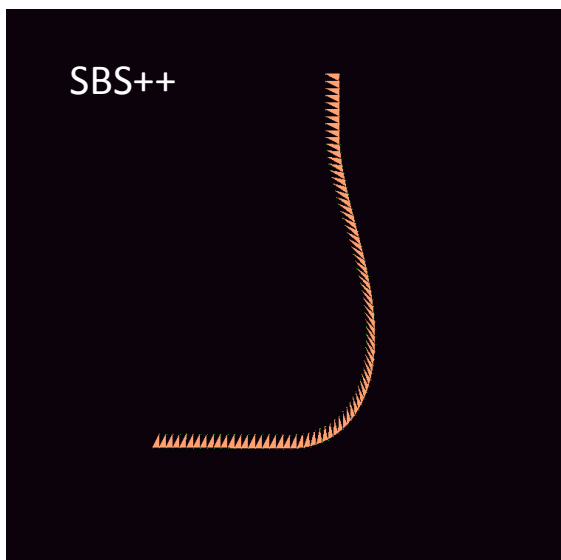


図8 SBS++による結果 .
Figure 8 Result by SBS++.

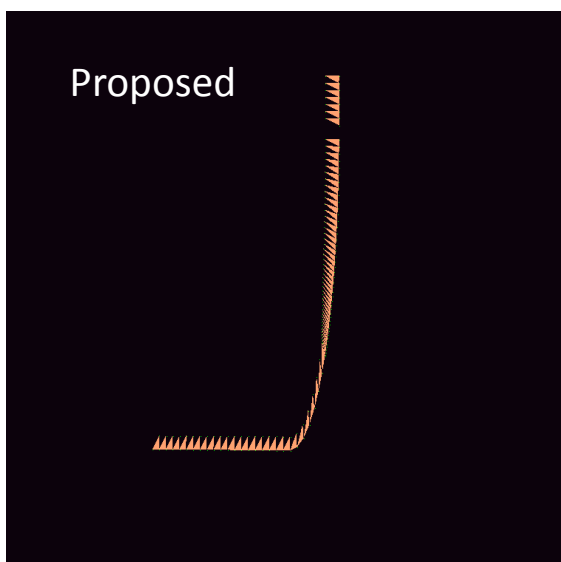


図9 提案手法による結果 .
Figure 9 Result by proposed method.

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 次元スキニング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、実験を通じた有用性の検証について述べた。従来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ニング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じた精度の向上である。

7. 参考文献

- 1) 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).
- 2) N. Magnenat-Thalmann, R. Laperrère and D. Thalmann: “Joint-dependent local deformations for hand animation and object grasping”, Graphics Interface’88, pp. 26–33 (1988).
- 3) 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).
- 4) F. Cordier and N. Magnenat-Thalmann: “A datadriven approach for real-time clothes simulation”, Computer Graphics Forum, 24, 2, pp. 173–184 (2005).
- 5) 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).
- 7) 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 キャラクター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/20080525/1211706244>
- 10) mqdl, 2008-04-23 スフィリカルデフォー ム, mqdl::Note <http://d.hatena.ne.jp/mqdl/20080525/1211706244>
- 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).