

## SBS+ 法の定式化と改良

萩原 義裕<sup>†a)</sup> 萩原由香里<sup>††</sup> アデルジャン イミティ<sup>†††</sup> 三好 扶<sup>†</sup>  
高木 基樹<sup>†††</sup> 西川 尚宏<sup>†</sup>

### Formulation and Improvement of SBS+ Method

Yoshihiro HAGIHARA<sup>†a)</sup>, Yukari HAGIHARA<sup>††</sup>, Adiljan YIMITI<sup>†††</sup>, Tasuku MIYOSHI<sup>†</sup>,  
Motoki TAKAGI<sup>†††</sup>, and Naohiro NISHIKAWA<sup>†</sup>

あらまし SBS+ 法は、ひずみの少ないスキニアニメーションを実現する有力な方法である。この手法は、幾つかの主要な 3 次元スキニアニメーションソフトウェアにおいて選択肢の一つとして加えられ、これを部分的に利用した 3 次元モデルは主流の一角を担うに至っている。しかし、その概念と効果は示されているものの、アルゴリズムや具体的な実装手段は公知であるとはいえず、その挙動も不明な部分が多い。これらが明らかになれば 3 次元スキニアニメーションソフトウェア技術の更なる発展が期待できる。我々は、本論文で SBS+ を定式化し、幾つかの主要な 3 次元スキニアニメーションソフトウェアと同様な挙動をもつ実装を示すとともに、その挙動を解析して問題点を論じ、実験を通して明らかにする。更に、本論文では新しい実装例を提案し、従来のソフトウェアより自然な変形を実現できることを示す。本論文で用いたプログラムのソースコードの主要な部分は我々のサイトから入手可能である。

キーワード 3D アニメーション, モデリング, スキニング, 球面ブレンディング, SBS+

## 1. ま え が き

3 次元スキニアニメーションは、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もつ 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ニアニメーションにおいて、スキンが剛体である場合は、ボーンがもつアフィン変換行列で表面形状の変形を計算することができる。この行列をスキニング行列と呼び、人体の関節部分のような剛体とみなせない場所も幾つかのボーンを元に適切な変換行列を計算することにより剛体と同様に表面形状の変形をある程度表現することができ

る。幾つかのボーンを元に適切な変換行列を計算する手法の最も代表的かつシンプルなもの、線形ブレンディング (LBS : Linear Blend Skinning)、日本国内でボーンデフォーム (bdef)、などと呼ばれる方法 [2] で、各ボーンの変換行列の重み付き加算を用いる。この方法では曲げるに従って関節部分の「つぶれ (へこみ)」が大きくなるという欠点が指摘されている。この欠点の克服を目指して提案された手法が球面ブレンディング (SBS : Spherical Blend Skinning) などと呼ばれる手法 [3] である。この手法は、ボーンヘッドからボーン先への芯線を考え、スキンの頂点から芯線に直交する線分をおろし、線分と芯線の交点を中心点と定義し、スキンの頂点は中心点を中心とする球上に存在すると仮定する。中心点は LBS 同様に変形し、スキンの頂点はこの変形に加えて中心点を中心とした球状回転の影響を受ける。この操作により「つぶれ (へこみ)」が小さい変形を実現することができるが、変形結果が膨らむように見えるなど、適切でない変形になる欠点があった。同様にログマトリクスブレンディング (LMB : Log-Matrix Blend skinning) [4] や双対四元数ブレンディング (DLB : Dual quaternion Linear Blend skinning) [5], [6]、また、変換行列に用いる重

<sup>†</sup> 岩手大学工学部, 盛岡市  
Faculty of Engineering, Iwate University, 4-3-5 Ueda,  
Morioka-shi, 020-8551 Japan

<sup>††</sup> 岩手大学技術部, 盛岡市  
Technical division, Faculty of Engineering, Iwate University,  
4-3-5 Ueda, Morioka-shi, 020-8551 Japan

<sup>†††</sup> 岩手大学三陸水産研究センター, 盛岡市  
Organization of Revitalization for Sanriku-region, Iwate  
University, 4-3-5 Ueda, Morioka-shi, 020-8551 Japan

a) E-mail: dhag@iwate-u.ac.jp

み係数を最適化する方法 [7] など、様々なアプローチがあるが、やはり適切でない変形になる欠点は解消されたとは言い難いものであった。

一般に、3次元スキニングアニメーションソフトウェアで利用するモデルは幾つかの手法を組み合わせで構成される。例えば、一つのモデル内において、ある関節は LBS 法、また別の関節は SBS 法、顔の表情は全く別な手法でと、部位に適した手法を適用できる。多少の欠点があっても、部位に適した手法を選ぶことによって、近年の精細なアニメーションは成り立っているといえる。本論文のスキームはこれを踏まえたものである。

球面ブレンドングを改良し、不正な変形をできるだけ防ぐようにした SBS+, 日本国内でスフィリカルデフォーム (sdef) と呼ばれる手法は、姿勢の補間 [8] 効果を期待して、適切でない変形をできるだけ解消することを旨とした手法で、変形する関節に応じて中心点を関節の内側に移動させる補正を施す方法である [9], [10]。これにより、関節の外側への不正な湾曲が回避され、より適切な変形が実現されるため、幾つかの主要な 3次元スキニングアニメーションソフトウェアにおいて選択肢の一つとして加えられ、これを部分的に利用した 3次元モデルは主流の一角を担うに至った。しかし、その概念と効果は示されているものの、具体的な実装手段は公知であるとはいえず、その挙動も多くは明らかでない。これらが公知・明らかになれば、3次元スキニングアニメーションソフトウェアの更なる発展が期待される。

本論文は SBS+ を定式化し、幾つかの主要な 3次元スキニングアニメーションソフトウェアと同様な挙動をもつ実装を考えるとともに、その挙動を解析し問題点を論じる。更に、本論文では新しい実装例を提案し、従来のソフトウェアより自然な変形を実現できることを示す。

## 2. LBS 法, SBS 法によるスキニング

ここでは、SBS+ のベースとなる LBS 法と SBS 法について説明する。

### 2.1 LBS 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。

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

$$= \left( \sum_{i=0}^{n-1} w_i M_i \right) v \quad (1)$$

$M_i$  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次式のように 1 である。

$$\sum_{i=0}^{n-1} w_i = 1 \quad (2)$$

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。

$$v_b = \{t_v M_0 + (1 - t_v) M_1\} v \quad (3)$$

### 2.2 SBS 法

図 1 は、本論文で扱うボーンとスキンの一部を示したものである。人体モデルの例えば肩・肘・手首の関節と上腕・二の腕の骨及び皮膚のように、つながったモデルを考える。肘の関節位置は肩の関節の回転の影響を受け、手首の関節位置はこれに加えて肘の関節の回転の影響を受ける。これを親子関係と呼び上腕を親ボーン、二の腕の子ボーンと呼ぶ。影響を与える関節をボーンヘッド (bone head)、影響を与えられる関節をボーン先 (bone tip)、と呼ぶことにする。図 1 において楔型で示したものがボーンである。これは剛体であり変形しない。図 1 (a) において点線で示したも

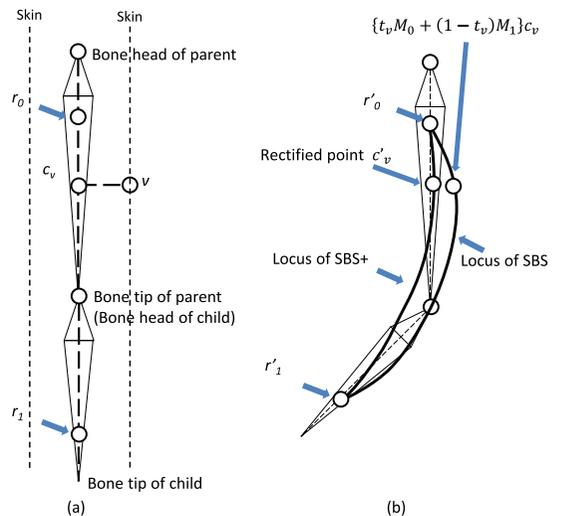


図 1 ボーンと中心点の軌跡。(a) 変形前 (b) 変形後  
Fig.1 Bones and locus. (a) Before transform  
(b) After transform.

のがスキンである。これはポリゴンで構成され、ポリゴンの頂点位置を移動させることによって柔軟に変形（しているように表示することが）できる。

関節周辺以外のスキンは剛体変換（一つのボーンのアフィン変換係数のみから影響を受ける変換）であり、関節周辺のスキンは二つ以上のボーンの影響を受け柔軟に変形する。図中、 $r_0$  及び  $r_1$  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）に応じてユーザが手動で与えることとする。

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、線分と芯線の交点を中心点  $c_v$  と定義する。中心点  $c_v$  を中心としてスキン上の頂点  $v$  を局所的に球状に回転させることにより潰れる現象（モデルの体積が減少するように変形＝パイプが折れるように変形する現象）を防ぐことができる。

なお、文献[3]における回転中心の定義は関係する複数の変換に対してもっとも動きが小さい点であること（親子二つのボーンの場合、子ボーンのボーンヘッド）であるのに対し、文献[9],[10]ではボーンヘッドからボーン先までの芯線上で定義されている。文献[3]では暗黙に円筒または球体スキンを想定し、関節の影響範囲は、これらの半径にほぼ等しいという仮定の下で成立するが、ボーンヘッドから半径より大きく離れた点は、不自然な動作となる。芯線上で定義することによりこの欠点はある程度補われる。二つのボーンの場合、この定義は文献[3]を拡張したもの（文献[3]の回転中心を含み、文献[3]では不正な動作をするボーンヘッドから離れた点が、不自然な動作をしないように補正された位置の集合）と考えることができる。本論文でも後者の考えをとるが、これ含めて SBS と呼ぶ。

ある頂点が  $n$  個のボーンから影響を受けるとき、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。

$$\begin{aligned} v_s &= Q(v - c_v) + \sum_{i=0}^{n-1} w_i M_i c_v \\ &= Q(v - c_v) + \left( \sum_{i=1}^{n-1} w_i M_i \right) c_v \end{aligned} \quad (4)$$

$Q$  はボーンヘッドの局所的な回転のみを表す変換である。

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。

$$v_s = Q(v - c_v) + \{t_v M_0 + (1 - t_v) M_1\} c_v \quad (5)$$

$Q$  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）[11] に基づく関数 Slerp を用いて次式により求められる。

$$\begin{aligned} Q &= \text{Slerp}(Q_0, Q_1, t_v) \\ &= (Q_1, Q_0^{-1})^{t_v} Q_0 \end{aligned} \quad (6)$$

$Q_0$  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。

$$Q_1 = \text{Rotation}(M_1 M_0^{-1}) \quad (7)$$

分解する手法には例えば polar decomposition [12] を用いればよい。

### 3. SBS+ 法（sdef 法）

#### 3.1 SBS+ 法 の概念

SBS+ 法は、適切でない変形をできるだけ解消することを目指した手法で、変形する関節に応じて中心点を関節の内側に移動させる補正を施す方法である。SBS+ 法には影響するボーンは二つまでという制限があるものの、より自然な変形を実現できるという長所がある。

適切でない変形とは、関節を曲げる際に曲げるのとは逆の方向、関節の外側に膨らむような変形になることである。

式(5)の  $\{t_v M_0 + (1 - t_v) M_1\} c_v$  は、変形後の中心点を表す式である。 $t_v$  及び  $c_v$  が  $v$  によって一意に決まり、 $t_v$  により  $c_v$  が自動的に求められるとき、変形後の中心点の集合（上記関数の軌跡）は LBS 法による変形と同じになる。この変形は滑らかで、かつ子ボーンのボーンヘッドを通る。すなわち、 $t$  に基づく関数の軌跡は、図1(b)のように、親ボーンの芯線上のある位置-境界点  $r'_0$  を始点として、子ボーンのボーンヘッドを通り、子ボーンの芯線上のある位置-境界点  $r'_1$  に至るなめらかなカーブを描く。必然的にこれら以外の点では関節の外側に移動し、関節の外側に膨

らむような不正な変形を引き起こすことになる。

$c_v$  に対して適切な修正を加えることにより、関節が曲がるに従って中心点の集合が外側に移動するのを防ぐのが SBS+ 法の概念である。

SBS 法は影響を受けるボーンの数には制限がないが、SBS+ 法には前述のように、影響するボーンは二つまでという制限がある。もっとも、3 個以上のボーンから影響を受ける方があるときは、他の手法例えば DLB などのスキニング手法を利用すればよい。

### 3.2 SBS+ 法の定式化

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。

$$v_{s+} = Q(v - c_v) + c'_v \quad (8)$$

ここで  $c'_v$  は次式のように、後述の条件を満たす任意の関数  $f$  によって移動された中心点である。

$$c'_v = f(c_v, t_v, M_0, M_1) \quad (9)$$

$r_0$  と  $r_1$  を変換させた  $r'_0$  と  $r'_1$  は次式で得られる。

$$r'_0 = M_0 r_0 \quad (10)$$

$$r'_1 = M_1 r_1 \quad (11)$$

ここで関数  $f$  は次式の境界条件を満たす必要がある

$$r'_0 = f(r_0, 1, M_0, M_1) \quad (12)$$

$$r'_1 = f(r_1, 0, M_0, M_1) \quad (13)$$

例えば以下に示す二つの関数  $f_1$  と関数  $f_2$  はいずれも上記の条件を満たす。

$$f_1(c_v, t_v, M_0, M_1) = \{t_v M_0 + (1 - t_v) M_1\} c_v \quad (14)$$

$$f_2(t_v, M_0, M_1) = t_v M_0 r_0 + (1 - t_v) M_1 r_1 \quad (15)$$

関数  $f_1$  は LBS 法の式であり、これを用いた場合式 (8) は一般的な SBS 法そのものとなる。また、関数  $f_2$  は単なる直線の補間である。

SBS 法で用いることができる関数には、もう一つの条件がある。ボーンが回転・移動・拡大しない場合には  $c'_v = c_v$  でなければならない。このようなスキニング行列 (= 単位行列) を  $M_e$  とすると、次式が成り立つことが必要となる。

$$c_v = f(c_v, t_v, M_e, M_e) \quad (16)$$

変換前のボーンヘッド及びボーン先が図 1 のように

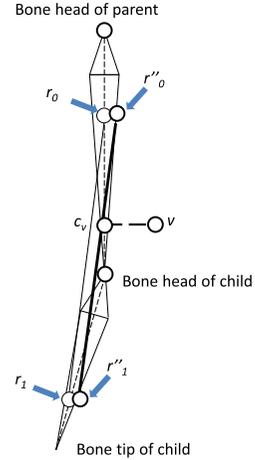


図 2 補正された境界点  
Fig. 2 The rectified boundary points.

直線上に並んでいれば前述の関数  $f_1$  と関数  $f_2$  はこの条件を満たすが、そうでない場合すなわち図 2 のような場合には関数  $f_2$  はこの条件を満たさない。これを回避するには  $r_0$  と  $r_1$  を直接用いるのではなく、線分  $r_0 r_1$  と平行で  $c_v$  を通るような線分  $r''_0 r''_1$  を図 2 のように定義し、これを  $r_0$  と  $r_1$  の代わりに用いればよい。

$$r''_0 = c_v + r_0 v \quad (17)$$

$$r''_1 = c_v + r_1 v \quad (18)$$

ここで  $r_0 v$  と  $r_1 v$  は  $c_v$  から  $r''_0$  及び  $r''_1$  への相対位置であり、次式で表される

$$r_0 v = r_0 - [\{t_v r_0 + (1 - t_v) r_1\} - c_v] \quad (19)$$

$$r_1 v = r_1 - [\{t_v r_0 + (1 - t_v) r_1\} - c_v] \quad (20)$$

関数  $f_2$  の代わりに関数  $f'_2$  がわずかな変更で次式のように定義できる。

$$\begin{aligned} f'_2(c_v, t_v, M_0, M_1) &= t_v M_0 r''_0 + (1 - t_v) M_1 r''_1 \\ &= t_v M_0 (c_v + r_0 v) + (1 - t_v) M_1 (c_v + r_1 v) \end{aligned} \quad (21)$$

関数  $f_1$  と、関数  $f'_2$  には、いずれも欠点がある。関数  $f_1$  は子ボーンのボーンヘッド、例えば肘関節を通るなめらかな関数である。必然的にその周辺は関節を曲げる方向とは逆、関節の外側に膨らみ不正な湾曲が生じる。腕自体が太くなることはないが、不自然に腕が湾曲した変形になってしまうのである。

一方、関数  $f'_2$  は子ボーンのボーンヘッドは通らず、子ボーンのボーンヘッドは関節が曲がるのに従って関

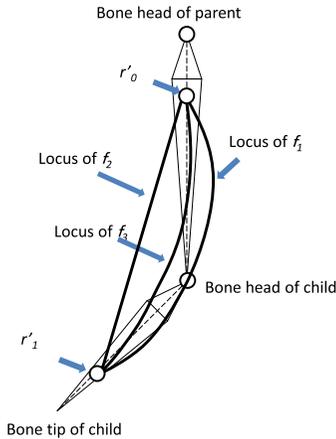


図3 各関数の軌跡  
Fig.3 Locus of the functions.

節の内側に移動する．そのため前述の関数  $f_1$  と異なり関節の外側に膨らむ不自然な湾曲は生じない．しかし関数  $f'_2$  は単なる直線の補間であるので中心点の集合も直線状に並ぶことになり，自然な曲線を構成することはできない．

ここで，図3のように，前述の条件を満たす関数を幾つかブレンドすることを考える．各関数の重み付き線形和は重みの総和が1であればやはり条件を満たす．いずれも問題がある関数  $f_1$  と関数  $f_2$  であるが，次式のようにブレンドすることにより両者の長所を併せ持つ可能性がある関数  $f_3$  を定義できる．

$$f_3(c_v, t_v, M_0, M_1) = s f_1(c_v, t_v, M_0, M_1) + (1 - s) f'_2(c_v, t_v, M_0, M_1) \tag{22}$$

$s$  はブレンドのための重み係数である．

なお，SBS+法を採用している複数の3次元スキニングアニメーション関連ソフトウェアは，アルゴリズムを公開していないため，これらの式と全く同じ方法を用いていることを示すことはできないが，これらのソフトウェアを利用して生成されたモデルやアニメーションの挙動と前述の式の間には後述の実験を通して定性的な矛盾は一切見つかっておらず，実質的に互換性があるものとして利用可能である．SBS+法は広義には後述の手法を含む概念であるが，以下では前述の関数に基づくSBS+法を狭義のSBS+法と定義し，これに基づいて論じる．

### 3.3 SBS+法の実装例

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  $r_{0v}$  及び  $r_{1v}$ ，重み係数  $t_v$  をもつとする．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路上，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路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) 事前に，式 (17)～(20) を用いて頂点ごとの境界位置  $r'_0$  及び  $r'_1$  を求めておく．
- (2) 各ボーンのスキニング行列  $M$  を求める
- (3) 以下の処理を全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  $r'_1$  すなわち式 (21) の  $M_0 r'_0$  と  $M_1 r'_1$  を求める．
  - (3-2) 式 (21) に基づき関数  $f'_2$  における中心点の移動後の位置  $c'_{v2}$  を求める．
  - (3-3) 式 (14) に基づき関数  $f_1$  における中心点の移動後の位置  $c'_{v1}$  を求める．
  - (3-4) 上記の結果を用いて式 (22) に基づき関数  $f_3$  における中心点の移動後の位置  $c'_v$  を求める．
  - (3-5) 式 (7) における子ボーンの局所変換である  $M_1 M_0^{-1}$  を求める．
  - (3-6)  $M_1 M_0^{-1}$  を分解し，局所回転  $Q_1$  を求める．
  - (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．
  - (3-9) 親ボーンのスキニング行列  $M_0$  を  $v'$  及び  $c_v$  に適用し，グローバル位置  $v''$  及び親ボーンのスキニング行列によってのみ移動させた中心位置  $c''_v$  を求める．
  - (3-10) 中心位置  $c''_v$  が  $c'_v$  へ移動する分だけ  $v''$  を移動させ  $v_{s+}$  を求める．すなわち， $v_{s+} = v'' + (c'_v - c''_v)$  である．

親子関係という制限事項は，(3) 以下の処理における入力データがスキニング行列だけであるとして局所回転を簡単に求めるためである．親子関係がない場合には別の方法で局所回転を求めればよいが，本論文では割愛する．後述の実験も全て親子関係があるという

制限の下で実施した。

### 3.4 実装された SBS+ 法の問題点

以上の条件を満たす SBS+ 法は、手軽にモデルを作成でき、不自然な変形も他の手法と比べ格段に少ない。しかし、全てのケースで万能というわけではない。例えば、期待しない場所での滑らかでない不連続な折れ曲がりや、他の手法より少ないものの関節の外側への湾曲である。

図 3 に基づいて問題点を説明する。不連続な折れ曲がりや、剛体変換と SBS+ による湾曲の境界面、具体的には  $r'_0$  及び  $r'_1$  付近で発生する。他の位置では関数  $f_3$  が連続であるため連続性が担保され折れ曲がりや発生しないが、境界面では  $f_3$  の軌跡の向きがボーンと一致する条件を満たさない。例えば  $r_0$  において  $f_1$  は子ボーンのボーン先の移動と同じ方向を向き、 $f_2$  は逆方向を向くため、他の手法と比べれば SBS+ による不連続な折れ曲がりや原理的に小さいが、連続性が担保されるわけではない。これが第 1 の問題点である。

第 2 の問題点は、関節外側への湾曲である。人体モデルのひじ付近では、ひじ関節の回転に応じて二の腕(肘から手首)は大きく回転し、二の腕と上腕(肩から肘)のひじ関節付近の部分がわずかに回転するのが LBS によるスキニングである。固定された肩の係数  $M_0$  とひじ関節の係数  $M_1$  をブレンドすると肘から下の部分は子ボーンのボーン先の移動方向(内側)に湾曲するが、肘から上では子ボーンのボーン先の移動方向と逆方向(外側)に回転する。回転方向は意図しない方向になってしまうが、滑らかに湾曲するという目的を達成するためのやむを得ない犠牲である。この問題はカーネル関数  $f$  が  $M_1$  を含むことに起因するため SBS+ でも解決し得ない。

次章ではこれらの問題が少ないモデルを考える。

## 4. 新しい手法の提案

### 4.1 欠点を克服した関数

前述の方法では境界付近で急激に折れ曲がる不連続が発生する可能性がある。それを防ぐためには  $r'_0$  及び  $r'_1$  関数の方向がボーンの芯線の向きに等しい必要があるので次式のような境界条件を満たす必要がある。

$$\frac{\partial f_v(1)}{\partial t} = u_0, \quad \frac{\partial f_v(0)}{\partial t} = u_1 \quad (23)$$

ここで  $u_0$  及び  $u_1$  は  $r'_0$  及び  $r'_1$  におけるボーンヘッドからボーン先へのベクトルである。

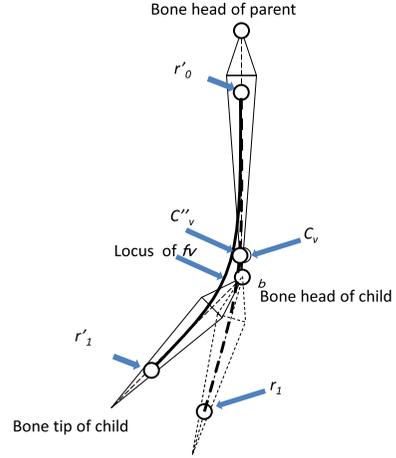


図 4 改良された関数  
Fig. 4 The improved function.

これらを満たす関数としてベジエ曲線を用いる。例えば変換後の子ボーンのボーンヘッドの位置  $b'$  を制御点とする次式及び図 4 のような 2 次のベジエ曲線が考えられる。

$$f_v(t) = t^2 r'_0 + 2t(1-t) b' + (1-t)^2 r'_1 \quad (24)$$

ただし、この方法では式 (16) の条件を満たさない。そこで  $c_v$  の代わりに  $c'''_v$  を次式のように定義し、これを局所球状回転の中心とする。

$$c'''_v = t^2 r_0 + 2t(1-t) b' + (1-t)^2 r_1 \quad (25)$$

3 次元モデルがパラメータとして位置  $r_0$  と位置  $r_1$  をもたない場合(既存のモデルを利用するなど、モデルの互換性を保つ必要がある場合)は距離  $r_{0v}$  及び  $r_{1v}$  から算出される次式のような値  $c'''_v$  を用いる。

$$c'''_v = t^2 r''_0 + 2t(1-t) b' + (1-t)^2 r''_1 \quad (26)$$

この場合、 $f_v(t)$  の軌跡は厳密にはベジエ曲線でなくなるが、ボーンヘッドが直線状に並んでいる場合はベジエ曲線、直線に近い場合もベジエ曲線に近い結果となる。

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く限界も高くないことが予想できる。対してベジエ曲線を用いれば、アフィン変換のブレンドと異なり外側への不正な湾曲を軽減する効果を期待できる。

## 4.2 提案手法の実装例

提案手法の実装例は前述の手法と比べむしろ単純である。計算量のオーダーは同じである。

- (1) 事前に、式 (17)~(20) 及び式 (26) を用いて頂点ごとの境界位置  $r'_0$  と  $r'_1$  及び  $c''''_v$  を求めておく。
- (2) 各ボーンのスキニング行列  $M$  を求める
- (3) 以下の処理を全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  $r'_1$  及び子ボーンの子ボーンヘッド位置  $b$  に適用し、変形後の位置  $r'_0$  と  $r'_1$  及び  $b'$  を求める。  $b'$  は例えば  $b' = M_0 b$  で求められる。
  - (3-2) 式 (24) に基づき関数  $f_v$  における中心点の移動後の位置  $c'_v$  を求める。
  - (3-3) 式 (7) における子ボーンの局所変換である  $M_1 M_0^{-1}$  を求める。
  - (3-4)  $M_1 M_0^{-1}$  を分解し、局所回転  $Q_1$  を求める。
  - (3-5) 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。
  - (3-6) 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。
  - (3-7) 親ボーンのスキニング行列  $M_0$  を  $v'$  及び  $c''''_v$  に適用し、グローバル位置  $v''$  及び親ボーンのスキニング行列によってのみ移動させた中心位置  $c''''_v$  を求める。
  - (3-8) 中心位置  $c''''_v$  が  $c'_v$  へ移動する分だけ  $v''$  を移動させ  $v_{s+}$  を求める。

## 5. 実験と考察

まず、基礎実験として SBS+ を利用している幾つかの既存ソフトウェアと本論文のアルゴリズムとの比較実験について述べ、次に LBS, SBS, SBS+, 提案方法の比較実験について述べる。DLB の挙動は関節の外側への大きな湾曲などの欠点がよく知られており、本論文のスキームのようなモデルには適さないため付録で簡単に述べる。また、文献 [7] は重み係数の割り振りが主眼であり、ひねりは DLB で曲げは LBS (後半 SBS) で行っているため比較しないが良い。

### 5.1 基礎実験

SBS+ を利用している幾つかの既存ソフトウェア及び本論文で記載した関数を用いて我々が開発したソフトウェアに対し、簡単なモデルを用いて挙動を調べ、既存ソフトウェアが前述のアルゴリズムと矛盾がないこと確認する。用いたモデルは 2 種類、親ボーンの子ボーンヘッドから子ボーンの子ボーン先まで線分状に小さな三角形ポリゴンが並んでいるスキンをもつモデル

と、子ボーンの子ボーンヘッドで折れ曲がったモデルである。いずれのモデルも、三角形の一部をボーンの子ボーンヘッドに沿って配置することにより  $v$  と  $c_v$  を一致させ、通常観測することができない  $c_v$  の振る舞いを可視化できるようにしたものである。SBS+ を利用している 4 種の既存ソフトウェアをそれぞれソフトウェア (A), ソフトウェア (B), ソフトウェア (C), ソフトウェア (D) と呼び、本論文で記載した関数を用いてオープンソースのライブラリ [13], [14] を用いて我々が開発したソフトウェアを我々のソフトウェアと呼ぶ。また、線分状に小さな三角形が並んでいるモデルをモデル 1, 子ボーンの子ボーンヘッドで折れ曲がったモデル 2 と呼ぶ。これらのモデルは、各手法の結果の相違が大きく検証が容易になるようになりかなり広い変形範囲をもったものである。変形範囲が物体の直径とほぼ同じひじやひざなどの関節とは異なり、例えば頭髮、アクセサリ、衣類、ソフトブーツ、肩、腰、背中など、変形する領域が広いものを想定している。式 (22) のブレンドのための重み係数  $s$  の値は、全ての実験で 0.5 とした。

ポリゴンを構成する各頂点には、頂点に固有で影響するボーン  $i$  ごとにもつスカラーな重み係数  $w_i$  が与えられる必要がある。本論文の実験に用いたモデルは全て、ソフトウェア (B) のプラグインを利用して自動的に割り振られた重み係数を使用したものである。頂点群をボーンに割り付けられた箱型のアンカーで包むことにより関連頂点を割り付ける。異なるボーンに割り付けられた二つの箱型アンカーに重複した頂点は重み係数が 1 以外の値をとり、かつ重複開始点が  $r_0$ , 終了点が  $r_1$  となり、剛体変換でない処理が行われる。これらの操作により、 $r_0$  から  $r_1$  まで親ボーンの影響度を 1~0, 子ボーンの影響度を 0~1 としておおむね線形に割り振られる。ただしボーンが平行でない場合には自動的に割り振り時に例外が不規則に生じた。

図 5 は、変形前のモデル 1, 図 6 は LBS による変形, 図 7 は SBS+ でない従来の SBS による変形, 図 8 は関数  $f_2$  のみによる変形である。図 5 において小さな 80 個の三角形ポリゴンの集合がモデル 1 のスキンであり、楔形で示されているのがボーンである。モデル 1 のポリゴンの右側はボーンの子ボーンヘッドに沿って配置されており、ここが  $c_v$  の位置を決める関数の軌跡と一致する。これにより、変形に用いられる関数の相違が確認できるように設計されている。図 6 と図 7 には大きな相違がみられないが、 $c'_v$  の軌跡は SBS も LBS と同じ関数が用いられるためである。変形後のモデルの

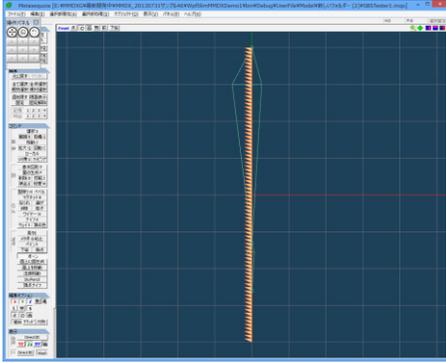


図 5 モデル 1 (変形前)  
Fig. 5 Model 1 (Before transform).

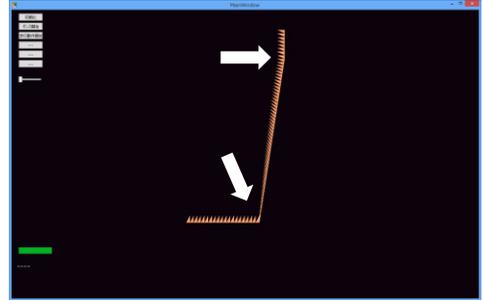


図 8 モデル 1 ( $r'_0 r'_1$  直線)  
Fig. 8 Model 1 (Line  $r'_0 r'_1$ ).

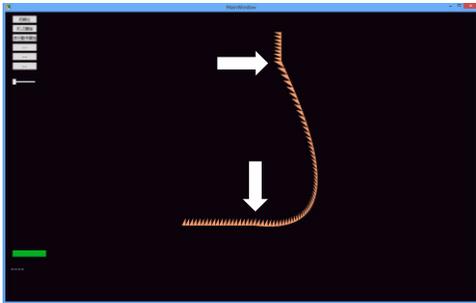


図 6 モデル 1 (LBS)  
Fig. 6 Model 1 (LBS).

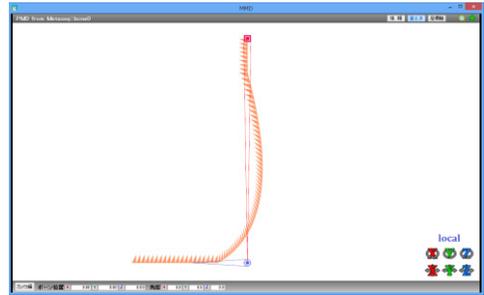


図 9 モデル 1 (ソフトウェア (A) SBS+)  
Fig. 9 Model 1 (software(A) SBS+).

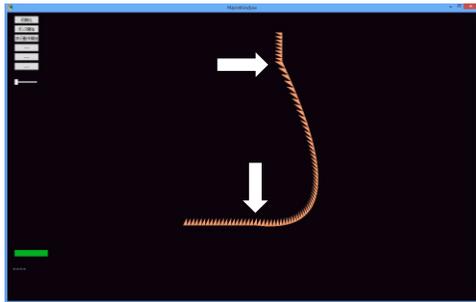


図 7 モデル 1 (SBS)  
Fig. 7 Model 1 (SBS).

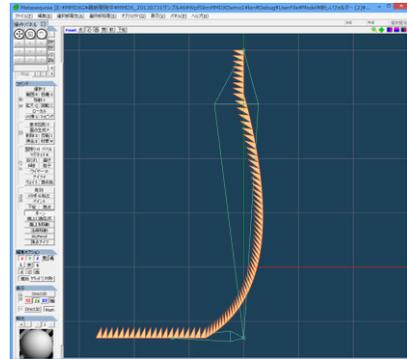


図 10 モデル 1 (ソフトウェア (B) SBS+)  
Fig. 10 Model 1 (software(B) SBS+).

幅は明瞭には表れていないが図 6 の方がわずかに細くなっている。これが LBS の欠点である。図 8 は参考のために関数  $f_2$  をそのまま適用したものである。当然の帰結として  $c'_v$  の軌跡は直線であり、そのまま利用するには不適切であることが明らかである。

図 9～図 12 はそれぞれソフトウェア (A), ソフトウェア (B), ソフトウェア (C), ソフトウェア (D) の SBS+ 法の結果で、図 13 は我々のソフトウェアの

SBS+ 法の結果である。図中矢印は境界位置  $r_0$  と  $r_1$  の位置である。ソフトウェアの表示上視点などが異なるが、従来の SBS と比べ、曲線の湾曲が小さいこと、子ボーンのボーンヘッドを通らないこと、曲線の開始点及び終了点で不連続な折れ曲がりが発生していることが共通しており、形状も極めて似通っていることがわかる。図 9～図 12 が同じものであるとして、レンダリング時に相違が見分けられるかという視点では定

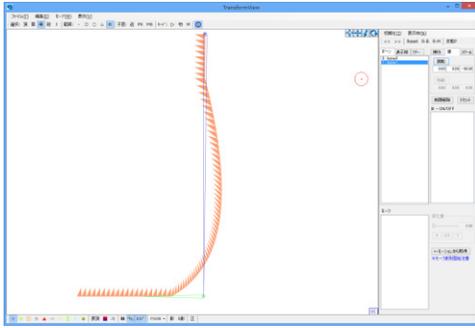


図 11 モデル 1 (ソフトウェア (C) SBS+)  
Fig. 11 Model 1 (software(C) SBS+).

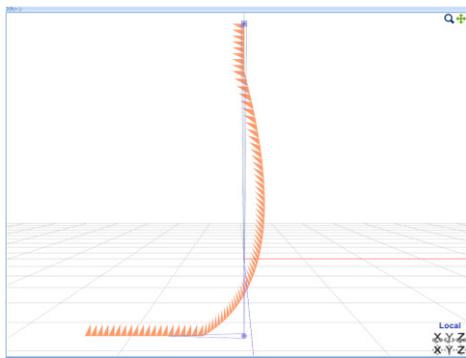


図 12 モデル 1 (ソフトウェア (D) SBS+)  
Fig. 12 Model 1 (software(D) SBS+).

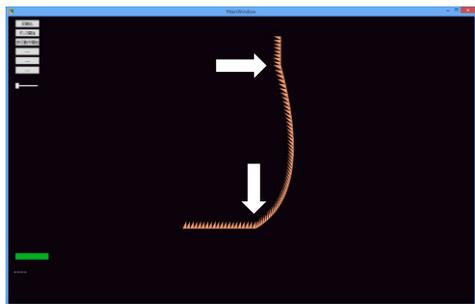


図 13 モデル 1 (我々のソフトウェア SBS+)  
Fig. 13 Model 1 (Our software, SBS+).

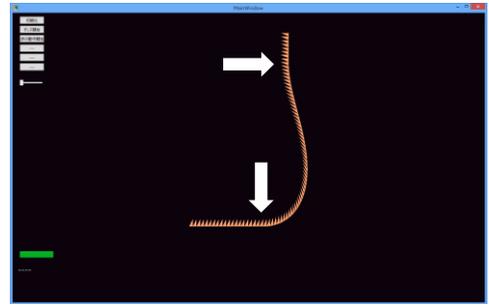


図 14 モデル 1 (提案手法)  
Fig. 14 Model 1 (Proposed).

SBSを規範としていることである。すなわち、式(15)を利用して式(8)の変形を行っていることを示しているが、そのままでは図8の結果が得られるだけで、スキニング手法としての価値はない。図9~図12のような実用的なスキニングを行うためには、非線形な関数を加える必要がある。SBS及びSBS+の思想は式(8)に集約されるが、同時にSBSではLBSの原理も継承した式(5)を用いる。式(5)から式(8)の考え方を取り除くと式(14)が残る。そこで、SBS+でも式(8)だけではなく、式(14)も利用していると解釈すれば、両者の統合に用いる演算は加算平均しかあり得ないので式(8)と式(14)の加算平均でブレンドする式(22)が導かれる。式(22)はパラメータsによって図7から図8まで変化し得るものであるが、パラメータsは、物理的な根拠がある値ではないので、好みの変形を実現する値を用意すればよい。我々は図13を得るためのパラメータとして0.5という値を用いたが、図9から図12の形状と矛盾しない変形を得るためには、式(22)を用い、かつ、パラメータsも既存のソフトウェアと大きく異なる値を用いる以外の手段はないのである。既存のソフトウェア同士の結果のばらつきを防ぐために、パラメータsの値も統一しなければならない。パラメータsは、物理的な根拠がある値ではないことを鑑みれば、(もちろん断定できるものではないが、)単純に式(14)と式(15)を足して2で割る形になる0.5という値が共通パラメータとして採用されても不合理ではない。以上より既存のソフトウェアに用いられているアルゴリズムと本論文で定式化したアルゴリズムの間に矛盾する相違はないとすることができる。図14は提案手法の結果である。曲線の開始点と終了点付近で不正な不連続点が発生せず、滑らかな曲線を描いていることがわかる。図13では矢印

性的な矛盾はないといえる。

既存のソフトウェアに実装されているSBS+に関する情報はわずかしかない[9],[10]。ここではその情報をもとに、本論文で定式化したアルゴリズムと既存のソフトウェアに実装されているアルゴリズムの間に矛盾がないことを確認する。前述のように、既存のソフトウェアに実装されているSBS+に関する情報はわずかしかない。r<sub>0</sub>とr<sub>1</sub>の線形補間を利用していることと、

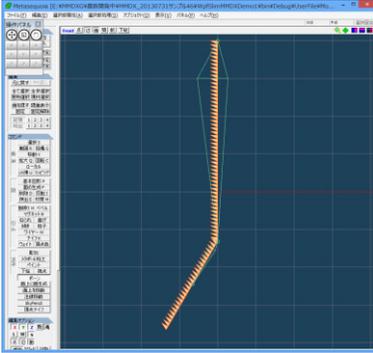


図 15 モデル 2 (変形前)  
Fig. 15 Model 2 (Before transform).

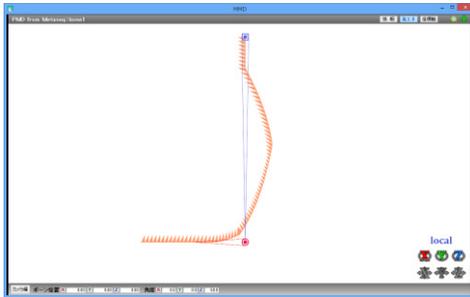


図 16 モデル 2 (ソフトウェア (A) SBS+)  
Fig. 16 Model 2 (software(A) SBS+).

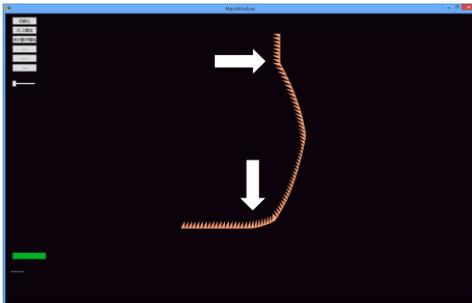


図 17 モデル 2 (我々のソフトウェア SBS+)  
Fig. 17 Model 2 (Our software, SBS+).

の位置で不連続点状の折れ曲がりが見え、一目で確認できるが図 14 では確認困難である。

図 15 は、変形前のモデル 2、図 16 はソフトウェア (A) の SBS+ 法の結果で、図 17 は我々のソフトウェアの SBS+ 法の結果である。図 9~図 12 同様、主な特徴は共通で、形状も極めて似通っていることがわかる。

以上、4 種の既存ソフトウェアは本論文に記載された関数を利用していると言い切ることはもちろん決し

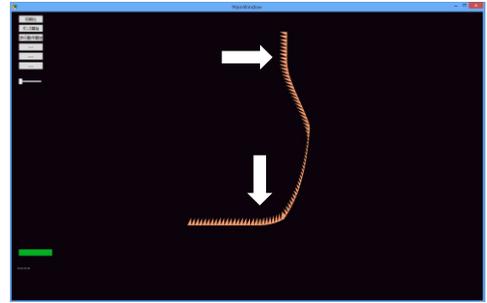


図 18 モデル 2 (提案手法)  
Fig. 18 Model 2 (Proposed).

てできないが、本論文に記載された関数を利用することによる矛盾は確認できない (= 実質的に互換性があるものとして取り扱うことが不可能ではない) ことが示された。

図 18 は提案手法の結果である。曲線の開始点と終了点付近で不正な不連続点が発生せず、滑らかな曲線を描いていることがわかる。ただし、図 16~図 18 に共通して、曲線の途中で不連続点状の折れ曲がりが存在する。重み係数  $t_v$  はモデル 2 のモデル作成時ソフトウェア (B) を使って自動的に割り振ったが、重み係数  $t_v$  の自動割り振りが適切でない場合にはこのような現象が発生する可能性がある。このような場合には重み係数  $t_v$  を手動で修正する必要がある。

図 17 と図 18 を比較すると、下方の矢印位置では大きな相違は確認できないが、上方の矢印位置では図 17 の SBS+ では不連続点状の折れ曲がり確認できるが図 18 では滑らかである。

### 5.2 平行でないボーンをもつモデルを用いた実験

基礎実験の結果から確認できるように、子ボーンのボーンヘッドで折れ曲がったモデル、すなわち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芯線と、子ボーンのボーンヘッドから子ボーン先までの芯線が平行でないモデルは往々にして不正な変形が生じる。そのようなモデル、かつ、基礎実験より複雑なモデルを用いて手法ごとの結果を比較する。図 19 はそのようなモデルである。これをモデル 3 と呼ぶ。

図 20~図 23 はそれぞれ、LBS, SBS, SBS+, 提案手法の結果である。LBS, SBS はいずれも矢印で指示したふくらはぎ部分でモデル 1 同様の不正な湾曲が比較的大きく生じている。SBS+ でも不正な湾曲が比較的大きく生じておりほとんど効果がないことが確認できる。ただし、厳密に比較すると不正な湾曲の度合い

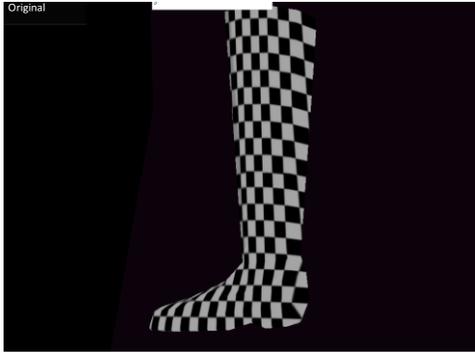


図 19 モデル 3 (変形前)  
Fig. 19 Model 3 (Before transform).

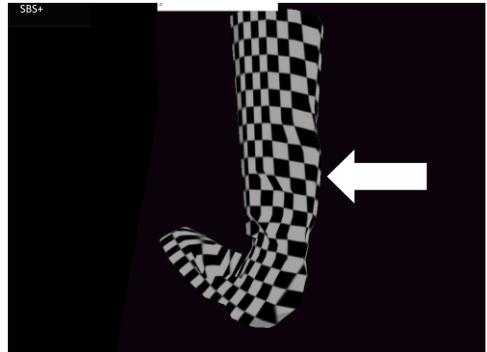


図 22 モデル 3 (SBS+)  
Fig. 22 Model 3 (SBS+).

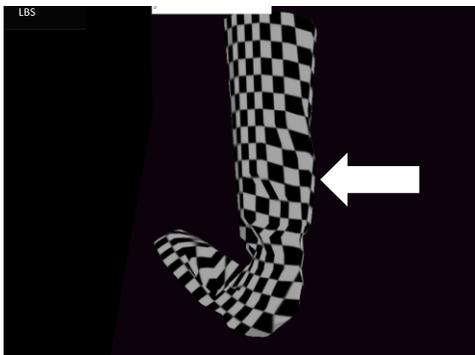


図 20 モデル 3 (LBS)  
Fig. 20 Model 3 (LBS).

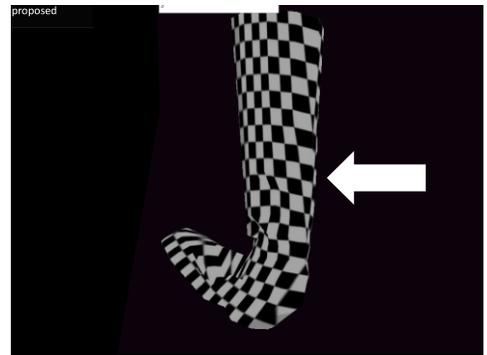


図 23 モデル 3 (提案手法)  
Fig. 23 Model 3 (Proposed).

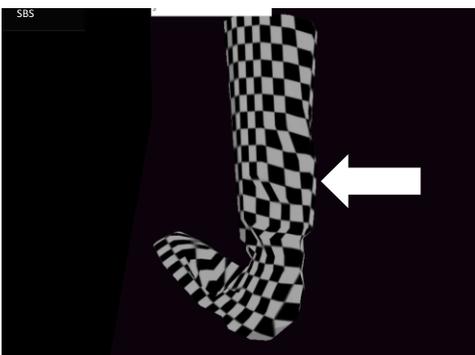


図 21 モデル 3 (SBS)  
Fig. 21 Model 3 (SBS).

はわずかながら小さく、全く効果がないというわけではなかった。提案手法は矢印で示した部分において不正な湾曲が明らかに小さいことが確認できる。なお、図から直接読み取ることは困難であるが、LBSは足首付近がごくわずかに細くなり、SBSは逆に太くなりかつ

湾曲が緩やかに大きくなるという問題も発生していた。

ふくらはぎ部分で生じた不正な湾曲は、重みの設定によっては目立たなくすることが可能であることは予想できる。例えばふくらはぎ部分を剛体変換にすれば不正な湾曲は発生しない。ただしその場合には足首周辺にひずみが集中するなど別の問題が発生することが予想される。提案手法はこういった問題を軽減するための選択肢の一つになり得ることを本実験の結果は示している。

### 5.3 曲線的なスキン

曲線的なスキンをもつモデルの場合、不正な不連続点があると不自然さが目立つ可能性がある。ここでは頭髪を模したモデルを用いて手法を検証する。これをモデル 4 と呼ぶ。図中矢印は境界面である。

図 24 はモデル 4 の変形前の形状で、図 25 の楔形はボーンである。このモデルは複数のボーンによって構成され、ひじやひざなど剛体と曲線で構成されるモデルと異なり自然な曲線の連続が要求されるものである。

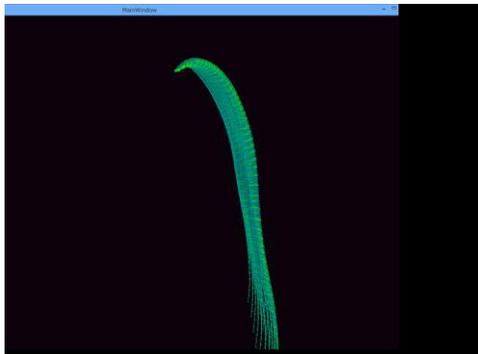


図 24 モデル 4 (変形前)  
Fig. 24 Model 4 (Before transform).

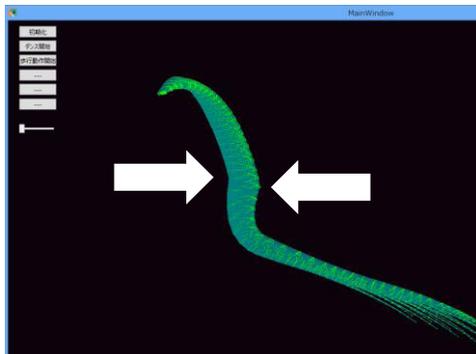


図 27 モデル 4 (SBS)  
Fig. 27 Model 4 (SBS).



図 25 モデル 4 及びボーン  
Fig. 25 Model 4 and the bones.

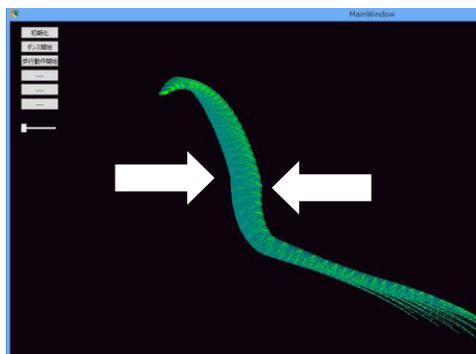


図 28 モデル 4 (SBS+)  
Fig. 28 Model 4 (SBS+).

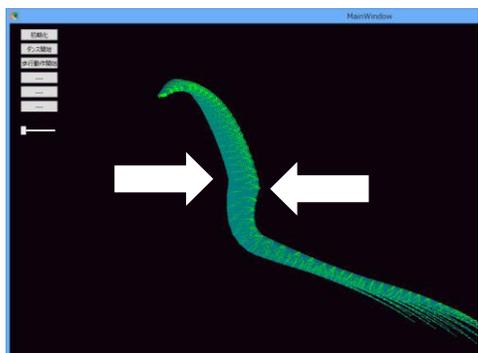


図 26 モデル 4 (LBS)  
Fig. 26 Model 4 (LBS).

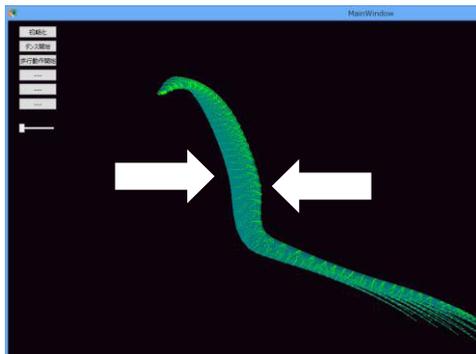


図 29 モデル 4 (提案手法)  
Fig. 29 Model 4 (Proposed).

図 26～図 29 はそれぞれ、LBS, SBS, SBS+, 提案手法の結果である。LBS と SBS は矢印位置で不連続点が明瞭に確認できるが、SBS+ は不正な湾曲が小さくなるため不連続点もそれほど目立たなくなる。提案手法では不連続点はほとんど観測されず、比較的滑ら

かな曲線を描いていることがわかる。もっとも、最終的には直線の集合で表示されるポリゴンモデルであるため、本質的には全て不連続ではあるが、予期せぬ目立った不連続は抑えられることが確認できる。

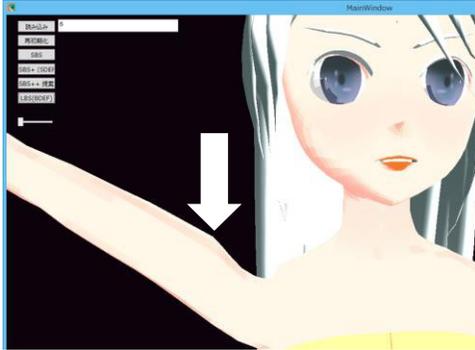


図 30 モデル 5 肩 (LBS)  
Fig. 30 Model 5, the shoulder (LBS).



図 33 モデル 5 肩 (提案手法)  
Fig. 33 Model 5, the shoulder (Proposed).

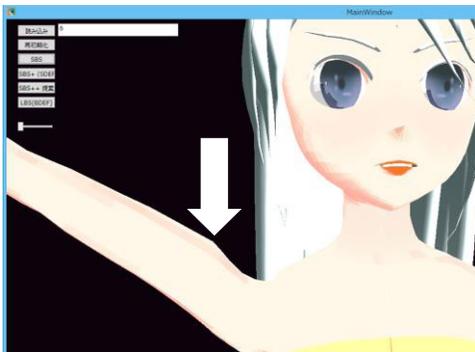


図 31 モデル 5 肩 (SBS)  
Fig. 31 Model 5, the shoulder (SBS).

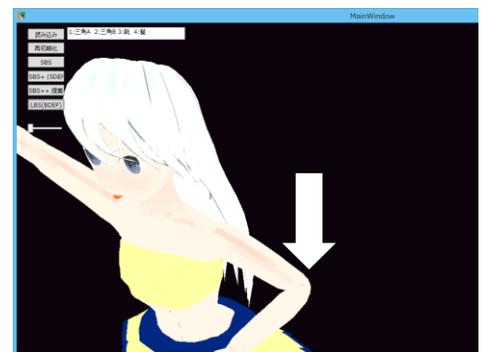


図 34 モデル 5 ひじ折り曲げ (LBS)  
Fig. 34 Model 5, an elbow, bending (LBS).

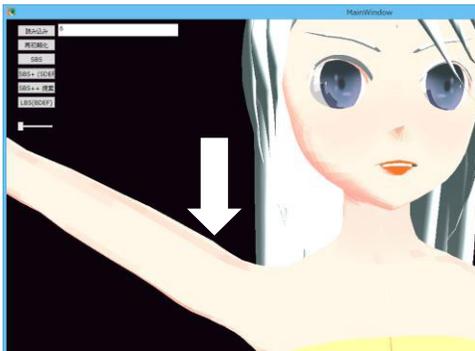


図 32 モデル 5 肩 (SBS+)  
Fig. 32 Model 5, the shoulder (SBS+).

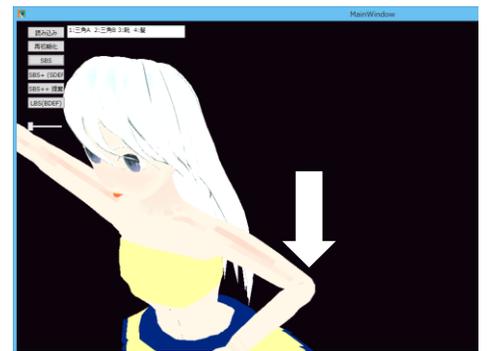


図 35 モデル 5 ひじ折り曲げ (SBS)  
Fig. 35 Model 5, an elbow, bending (SBS).

#### 5.4 一般的な関節

前述のようなスキーム以外の挙動を確認するために、人体モデルの典型的な関節に各手法を適用した。このモデルをモデル 5 と呼ぶ。肩関節及びひじ関節の「曲げ」に対して各手法を適用した結果を図 30～図 33 及び図 34～図 37 に示す。また、ひじ関節に対してねじ

り(ひねり)を加えた結果を図 38～図 41 に示す。LBS の結果である図 30 と、SBS の結果である図 31 は、肩の上部が凹むような湾曲になってしまっていることが顕著に確認できる。また、図中矢印の位置で滑らかな変形にならず、不連続点が生じていることが確認できる。一方、SBS+ の結果である図 32 では、これらの

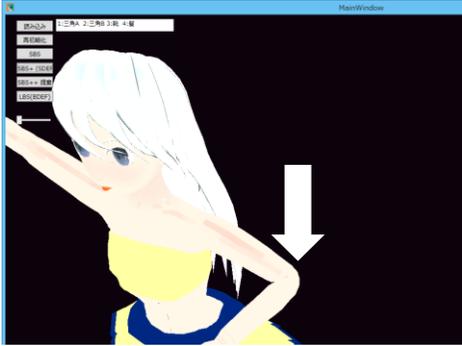


図 36 モデル 5 ひじ折り曲げ (SBS+)  
Fig. 36 Model 5, an elbow, bending (SBS+).

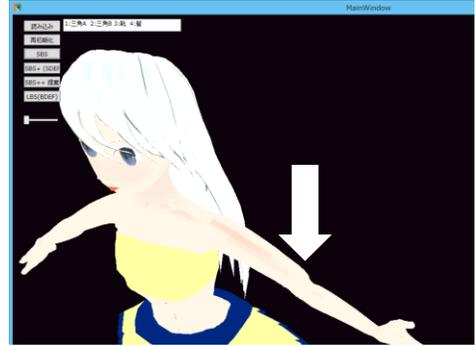


図 39 モデル 5 ひじねじり (SBS)  
Fig. 39 Model 5, an elbow, twisting (SBS).

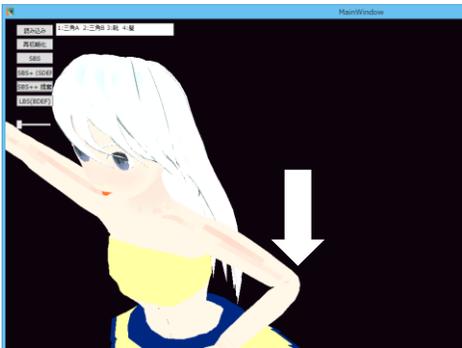


図 37 モデル 5 ひじ折り曲げ (提案手法)  
Fig. 37 Model 5, an elbow, bending (Proposed).

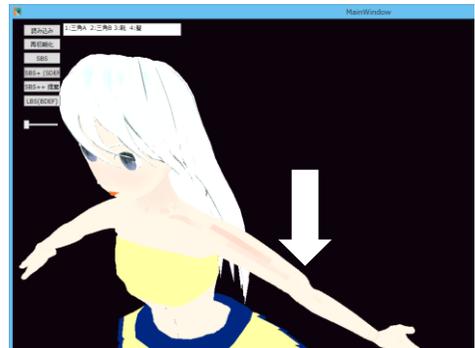


図 40 モデル 5 ひじねじり (SBS+)  
Fig. 40 Model 5, an elbow, twisting (SBS+).

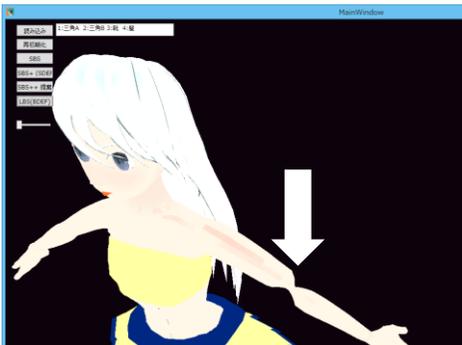


図 38 モデル 5 ひじねじり (LBS)  
Fig. 38 Model 5, an elbow, twisting (LBS).

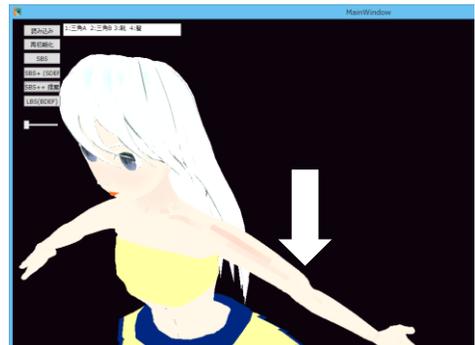


図 41 モデル 5 ひじねじり (提案手法)  
Fig. 41 Model 5, an elbow, twisting (Proposed).

欠点がほとんどないことが確認できる。ただし、提案手法の結果である図 33 と比較すると、肩の上部が凹むような湾曲は、わずかではあるが発生しており、かつ矢印付近での不連続点も完全な解消には至っていないことが確認できる。提案手法の結果である図 33 と SBS+ の結果の相違は極めてわずかであるが、全く無

視できるというわけではない相違は存在しているのである。

一方、ひじ関節を折り曲げた結果である図 34～図 37 の相違はほとんど確認できない。SBS の結果である図 35 において、矢印付近でわずかに膨らんでいることが確認できる以外、重ね合わせずに相違を見分ける

のは困難である．このような関節の変形は LBS が不利というのが一般的な認識であるが，ボーンの位置やスキンの頂点位置など，注意深く組み立てられたモデルでは LBS でも十分であることも多い．このモデルはそういったモデルの一つだったと考えられる．ただし，このモデルは決して特殊なものでなく，現在主流のごく普通の作成手順で作られたものである．LBS は重み係数の設定が簡単で，処理速度が速いという利点がある．3次元スキニングアニメーションでは，スキンやボーンの変形スキームに応じて様々な手法が使い分けられるべきであり，変形箇所や頂点数が多いモデルの場合は，簡便な LBS をベースに必要な部分だけ他の手法を用いるというのが合理的であるといえる．提案手法が特に有効なのはどのようなケースであるかということについて実験に基づいて検討した結果は次節で述べる．

ひじ関節に対してねじり(ひねり)を加えた結果が図 38～図 41 である．LBS はねじりに弱く，その結果が図 38 に顕著に表れている．ねじりに対する他の手法の結果は，原理的に同じであり凹みや潰れは生じないはずであるが，図 39～図 41 ではわずかな凹みが確認できる．これはモデルのボーンがスキンの中心からずれていること，ボーンに加えたねじりが，厳密にボーンと直交するものでなく，わずかな曲げ成分が加わること，に起因する．

なお，この結果をもって LBS が良くないとするのは早計である．現実の人体のひじ関節はねじれない．3次元モデルも同様に，上腕部に(手首もひじと同様に二の腕に)ねじれ専用のボーンを設置すれば多くのケースにおいて問題は生じない．この実験の結果は，SBS+ 及び提案手法を用いて敢えてねじれを生じさせた場合に SBS とほぼ同様の挙動となるということを示しているだけである．

### 5.5 円柱モデルを用いた提案手法の特性解析

2種類の円柱モデルに各手法を適用し，提案手法がどのような場合に有効であるかを確認した．利用したモデルは非剛体変形の範囲が異なる2種類の円柱モデルである．頭髪やホース・布・紙・軟体動物のように非剛体変形の範囲が大きい円筒モデルをモデル 6，人体の関節のように非剛体変形の範囲が小さいものをモデル 7 と呼ぶ．モデル 6 は(重みは工夫する必要があるものの)ソフトブーツや長袖衣類など，関節から比較的離れた頂点まで影響が及ぶ物体も想定している．

モデル 6 に各手法を適用した結果を図 42～図 45 に，

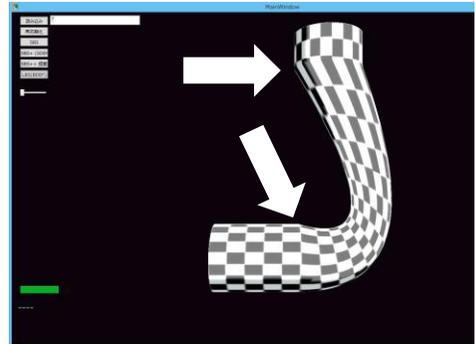


図 42 モデル 6 (LBS)  
Fig. 42 Model 6 (LBS).

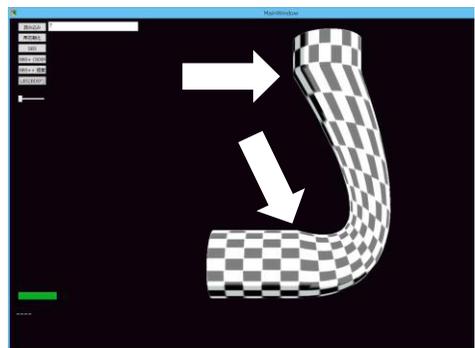


図 43 モデル 6 (SBS)  
Fig. 43 Model 6 (SBS).

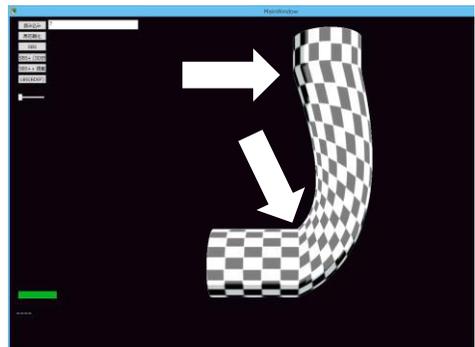


図 44 モデル 6 (SBS+)  
Fig. 44 Model 6 (SBS+).

モデル 7 に各手法を適用した結果を図 46～図 49 に示す．図 42～図 44 では変形に伴う不連続点が明瞭に表れているのに対し，提案手法の結果である図 45 には不連続点は確認できず，なめらかな変形が行われていることが明確に確認できる．これらは，図 26～図 29 頭髪を模したモデルの結果と同じ特徴をもち，より差

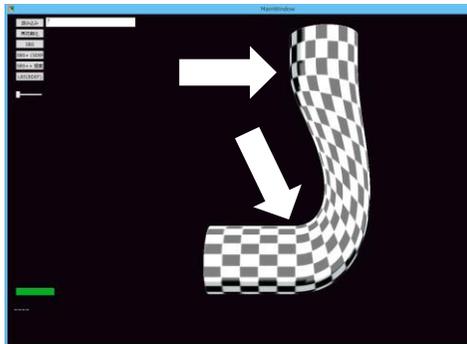


図 45 モデル 6 (提案手法)  
Fig. 45 Model 6 (Proposed).

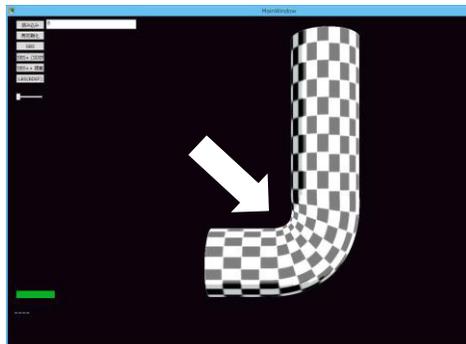


図 48 モデル 7 (SBS+)  
Fig. 48 Model 7 (SBS+).

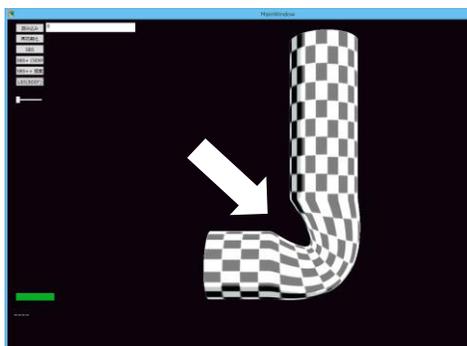


図 46 モデル 7 (LBS)  
Fig. 46 Model 7 (LBS).

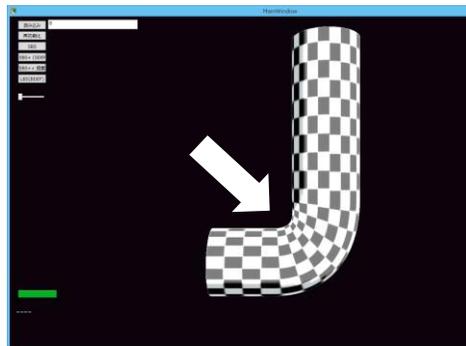


図 49 モデル 7 (提案手法)  
Fig. 49 Model 7 (Proposed).

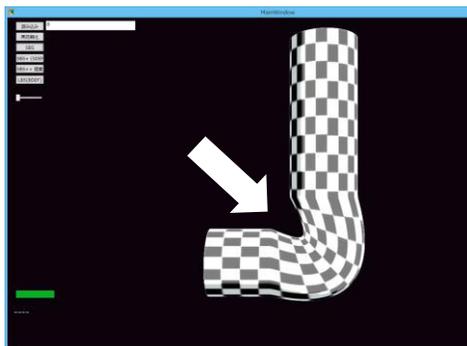


図 47 モデル 7 (SBS)  
Fig. 47 Model 7 (SBS).

異が明瞭である。提案手法は非剛体変形の範囲が大きいモデルにおいて、特に有用性を発揮できる可能性が高いといえる。

一方、人体の関節のように非剛体変形の範囲が小さいモデル 7 では、LBS の結果である図 46 と SBS の結果である図 47 ではそれぞれの欠点が明瞭に表れて

いるが、SBS+ の結果である図 48 と提案手法の結果である図 49 は明瞭な差は存在しない。差異が少ないという点では、人体モデルのひじ関節の結果と同様であり、非剛体変形の範囲が小さいモデルでは、提案手法の挙動は SBS+ の挙動とほぼ同じになることを示しているといえる。

以上、提案手法は非剛体変形の範囲が小さいモデルに対しても大きな欠点がなく適用が可能であるが、頭髮などのように、不連続点の抑制が必要で非剛体変形の範囲が大きいモデルにおいてその有用性をより大きく発揮できるということが出来る。一般に、アニメーションソフトウェアは、複数のベンディング手法を提供し、ユーザは必要に応じ、また、好みに応じて場所ごとに使い分けることができる。提案手法は唯一絶対の手法であるということではできないが、選択肢の一つとして提供することによって、3次元スキニングアニメーションの可能性を広げることができると考える。

## 6. む す び

SBS+ 法は、幾つかの主要な 3 次元スキニアニメーションソフトウェアにおいて選択肢の一つとして加えられ、これを部分的に利用した 3 次元モデルは主流の一角を担うに至っている。しかし、その概念と効果は示されているものの、具体的な実装手段は公知であるとはいえず、その挙動も多くは不明で、3 次元スキニアニメーションソフトウェアの発展の障害の一つとなっていた。

我々は、本論文で SBS+ を定式化し、幾つかの主要な 3 次元スキニアニメーションソフトウェアと同様な挙動をもつ実装を示すとともに、その挙動を解析して問題点を論じ、実験を通して明らかにした。更に、本論文では新しい実装例を提案し、幾つかのモデルに対して従来のソフトウェアより自然な変形を実現できることを示した。SBS+ または提案手法が、あらゆる場面において他の全ての手法より優れているということではできないが、3 次元モデル作成の上で有用な選択肢の一つを提示したと考える。本論文で用いたプログラムのソースコードの主要な部分は我々のサイト [15] から入手可能である。

現在、SBS+ 関節用にカスタマイズされたモデルは数多く流通し、今後ますます増えると考えられるが、それに対応している 3 次元スキニアニメーションソフトウェアは限られている。SBS+ を定式化することによりアニメーションソフトウェアのより一層の発展が期待できる。

また、提案手法は SBS+ 関節用にカスタマイズされたモデルとパラメータの互換性を保ちつつ、より適切な変形を実現できる。いかに素晴らしいアルゴリズムであっても、対応するモデルが存在しなければ実質的な有用性はほとんど期待できないことを鑑みると、本論文で明らかにしたものは相対的に大きな有用性をもつと考える。

モデル生成時の重み係数が不正な場合、提案手法でも不具合は発生する。今後の課題は、重み係数の校正方法、3 個以上のボーンから影響を受ける場合の検討である。

## 文 献

- [1] J.P. Lewis, M. Corder, and N. Fong, "Pose space deformations: A unified approach to shape interpolation and skeleton-driven deformation," Proc. 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, pp.9–16, 2005.
- [4] F. Cordier and N. Magnenat-Thalmann, "A data-driven approach for real-time clothes simulation," Computer Graphics Forum, vol.24, no.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), vol.J92-D, no.9, pp.1613–1620, Sept. 2009.
- [7] L. Kavan and O. Sorkine, "Elasticity-inspired deformers for character animation," ACM TOG – Proc. 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/20080423/1208958618>
- [11] K. Shoemake, "Animating rotation with quaternion curves," ACM SIGGRAPH, vol.19, Issue 3, pp.245–254, 1985.
- [12] K. Shoemake and T. Duff, "Matrix animation and polar decomposition," Proc. Graphics Interface '92, pp.258–264, 1992.
- [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, 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, vol.60, no.6, pp.66–71, 2012.
- [15] 盛岡虹のまち 地味技術部 White paper of Morioka Rainbow Town, <http://catfight.mech.iwate-u.ac.jp/whitepaper1j.html>

## 付 録

DLB 法は、本文記載の欠点を含めその特徴がよく知られているが、本論文で用いたモデルに対する結果を図 A・1 及び図 A・2 に示す。図 A・1 の 6 種類のモデルでは潰れて細くなるような結果とはならないが、外

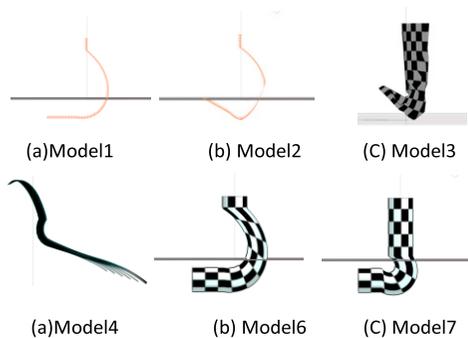


図 A-1 DLB  
Fig. A-1 DLB.

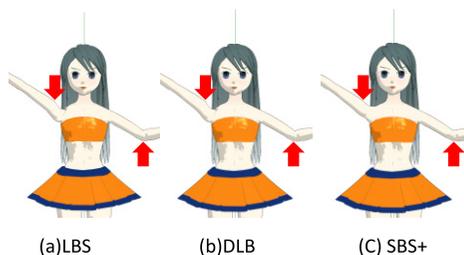


図 A-2 モデル 5 肩及びひじ  
Fig. A-2 Model 5, the shoulder and the elbow.

側に膨らむような変形となり、ともすれば LBS より不自然な湾曲が強調されてしまっている。曲線の軌跡は SBS などより LBS に近いものとなっており、本論文で用いたモデルに対しては、欠点により浮き彫りになっている。

図 A-2 のモデルでは、DLB の結果と LBS の相違を見出すことは困難である。特に右肩（下向き矢印付近）は LBS と同様の問題が生じていることが確認できる。本モデルに限らず、多くのモデル及びソフトウェアでは（多くは無意識のうちに伝統的なスキルとして）LBS でもある程度の品質を維持できるように作られている。このような場合には DLB の効果が十分発揮されない可能性があることを示している。

（平成 25 年 12 月 26 日受付，26 年 3 月 14 日再受付）



萩原 義裕（正員）

1990 東京農工大大学院修士了。1996 同大大学院博士後期了。博士（工学）。1993～1997（株）日立製作所システム開発研究所。1997～2002 東京農工大助手。2002～岩手大工学部講師・助教授をへて准教授。通信学会等。2013 日本工学教育協会工学教育

賞受賞。



萩原由香里（正員）

1993 東京農工大学工学部卒。1995 電気通信大学大学院情報通信学研究科博士前期課程了。同年東京農工大工学部電子情報工学科（現在電気電子工学科）技官。2002～岩手大学技官。神経回路網，パターン認識，ロボティクスの研究に従事。



アデルジャン イミティ

2004 年 7 月中国新疆大学情報科学・エンジニアリング学院卒。2007 年 9 月まで同大科学技術学院に指導員として勤務。2010 年 3 月岩手大学大学院機械工学専攻博士前期課程了。2013 年 3 月同大大学院機械・社会環境システム工学専攻博士後期課程了。

2013 年 4 月～岩手大学三陸水産研究センター特任研究員。画像処理，パターン認識の研究に従事。



三好 扶

2002 芝浦工業大学大学院工学研究科単位取得の上退学。博士（学術）。2002 国立身体障害者リハビリテーションセンター研究所流動研究員，長寿科学振興財団リサーチレジデント，芝浦工業大学大学院ポスドク研究員を経て，2008～岩手大学工学部准教授。リハビリテーション工学等の研究に従事。



高木 基樹

2002 芝浦工業大学大学院修士了。2007 同大大学院工学研究科博士（工学）。2007-2009 芝浦工業大学大学院ポスドク研究員。2010-2011 名古屋工業大特任研究員，2012 年～岩手大学三陸復興推進機構特任研究員。水中ロボット，医療工学等の研究に従事。



西川 尚宏

2001 岡山大・工学。2003 同大大学院修士了。2006 同大学院博士後期了。博士（工学，岡山大学）2006 岩手大学工学部機械工学科助手。2007 同助教（2008～機械システム工学科）。機械加工（切削・研削及び工作機械，環境調和型加工）の研究に従事。