

# ボーン位置合せとスケルトンを利用したシュリンクラップ

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>

## Shrink Wrap Using Bones Alignment and Skeletons

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

あらまし 複雑な形状の物体にシュリンクラップを用いる際に問題となるモデル同士の位置ずれの影響を軽減するために、三次元モデルの動作を規定するためのボーンを用いて位置合せした後にマセマティカルモフォロジーのスケルトンを用いてシュリンクラップを行う方法と、その手法を実際に用いる際にモデルの不適切な変形を軽減する具体的な手段を提案する。シュリンクラップは人物モデルに着用させる衣類の設計などによく用いられる有用な方法であるが、多くの従来の方法にはそれぞれ一長一短な面があり、目的によって使い分ける必要があった。これを解決する手段として、我々はモフォロジカルスケルトンを利用する方法を検討してきた。この手法は従来手法では不適切な収縮が起きる複雑な形状の物体でシュリンクラップが実現できるが、モデル同士の位置合せを手動で精密に行わなければならないという問題があった。本論文では位置合せを自動で行う手段を提案する。単純な位置合せでは、かえって不適切な収縮が発生するため、ボーンが密な部分から疎な部分に向かって順次位置合せを行っていく。疎な部分では「しわ寄せ」が発生しても目立たないため、モデルの不適切な変形を軽減することができる。これらの有効性を検証するため、実験を通して本手法と従来手法とを比較した結果、本手法は不適切な収縮が少なく有効であることが示された。

キーワード シュリンクラップ、スケルトン、マセマティカルモフォロジー、モーフィング、三次元グラフィックス

## 1. ま え が き

複雑な形状の物体にシュリンクラップを用いる際に問題となるモデル同士の位置ずれの影響を軽減するために、三次元モデルの動作を規定するためのボーンを用いて位置合せした後にマセマティカルモフォロジーのスケルトンを用いてシュリンクラップを行う方法と、その手法を実際に用いる際にモデルの不適切な変形を軽減する具体的な手段を提案する。

内部応力記憶能力がある熱可塑性樹脂を加熱により

縮退させ、物体に密着させることをシュリンクと称呼。この原理は電線を保護絶縁する熱収縮チューブや製品の保護・防錆用 [1] の脱気包装を行うシュリンクラップフィルムとして広く産業用に用いられている。

コンピュータグラフィックにおけるシュリンクラップ処理はこの方式を模したもので、メッシュの再構成 [2] やボリウムデータからメッシュを構成 [3] する手段としての有用性が示されている。

シュリンクラップは、モデルに着用させる衣類の設計・皮膚の再メッシュ化・局面モデルに直接印刷する効果を目指す場合のテクスチャマッピングなどによく用いられ、多くの三次元グラフィックスソフトウェアに搭載されている。シュリンクラップ処理の概要を図 1 に示す。人物モデルなど、貼り付ける先のターゲットモデルに向かって、貼り付けたいソースモデルを縮退させる。ソースモデルがテクスチャをもっていればターゲットモデルにソースモデルのテクスチャを張り付けるような効果が得られるし、例えばきめの

<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> 岩手大学三陸復興推進機構, 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

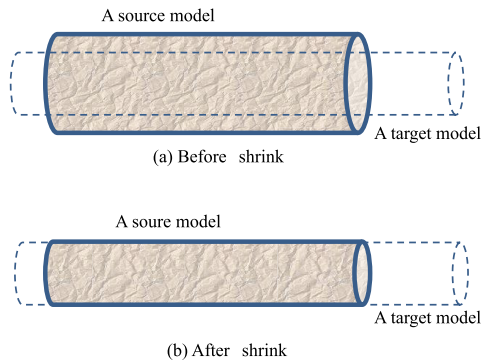


図1 シュリンクラッピング  
Fig. 1 The shrink wrapping.

粗いターゲットモデルのメッシュ構造を、より細かいソースモデルのメッシュ構造を置き換えるといったこともできる。人物モデルをターゲットとして衣類のモデルをソースとした場合、Tシャツのように密着した形状を得ることができるし、ターゲットの一部に密着した時点で縮退を止めれば、コートやドレスのようにゆったりしたソースモデルの形状をターゲットモデルにフィットさせるような効果も得られる。

シュリンクラップには様々なバリエーションがある。代表的なのは、中心へ向かって収縮する方法・特定の軸に向かって収縮する方法・特定の面に向かって収縮する方法・最近傍の頂点に向かって収縮する方法・面の法線方向に収縮する方法である。

これらの方法にはそれぞれ一長一短な面があり、目的によって使い分ける必要があった。例えば、面の法線方向に収縮する方法は物体の形状が紡錘形の場合には問題なくフィットするが、開いた袖口のような形状では太さが細くなるに従って長さが伸びてしまう。最近傍の頂点に向かって収縮する方法は物体同士の形状の相違が小さいときは極めて有効であるが、形状が大きく異なり距離が離れている場合は迷走してしまい適切なフィッティングは困難である。残りの3種は、フィットさせる対象の形状がそれぞれ、球状、柱状、面状であれば適切にフィットするが、そうでない場合には有用な動作は期待できない。

これらの問題を解決するため、我々は、マセマティカルモフォロジーによって得られるスケルトンを利用することにより、複雑な形状の物体に適したシュリンクラップ手法を提案し、そのシュリンクラップに適したスケルトン生成アルゴリズムを示した[4]。

マセマティカルモフォロジー [5], [6] は、ボリウム

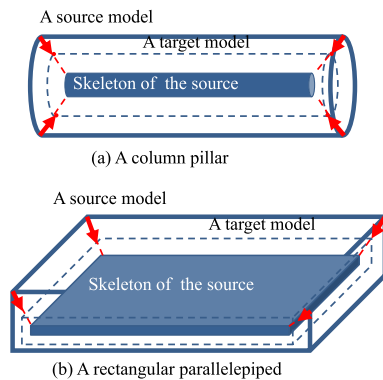


図2 スケルトンを用いたシュリンクラップ  
Fig. 2 The shrink wrapping with skeleton.

データを操作する手段であるが、簡単な操作の組合せで複雑な処理を実現できるため、プログラムへの実装や対象に応じたカスタマイズが容易で、様々な応用が提案されている。二次元及び三次元上で物体の曲面などの情報を損なわないフィルタリング [7], [8] や、三次元形状の類似度検索 [9] など多様な応用範囲があり、三次元モーフィング [10] や三次元形状表現 [11] にも利用されている。

ここでいうスケルトンとは、3D 2 値ボリウムデータを距離変換（物体の辺縁までの距離の集合に変換）し、かつできるだけ少ない要素数でボリウムデータを復元できるようにしたものであり、いわば物体の中心を通る曲線または曲面上に存在する距離値（スケルトン関数）の集合といえるものである。球体の主要なスケルトンは点、円筒の主要なスケルトンは線分、立方体の主要なスケルトンは平面に近い形状となるため、これをソースモデルが縮退し切った状態として用いることにより、図2に代表されるような様々なソースモデル、ひいてはこれらから構成される複雑な形状をもつソースモデルを適切に縮退させることができ、かつソースモデルとターゲットモデルの距離が比較的離れている場合にも有用で、先に述べた他の従来手法より優れた面があることが確認されている。

しかし、この手法ではソースモデルとターゲットモデルの相対的な位置関係が適切でない場合、シュリンクがうまく行われない例がある。図3はソースモデルとそのスケルトンに対してターゲットモデルが偏心しているケースとそうでないケースである。図3(a)は偏心していないケースであり、ソースモデルはターゲットモデルに対して均一に収縮する。しかし図3(b)の

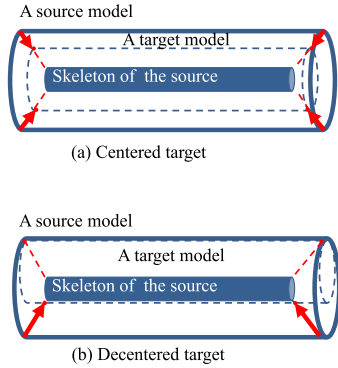


図 3 スケルトンを用いた手法の問題点  
Fig. 3 The problem of the method.

ように偏心している場合は、上方の収縮はすぐに停止してほとんど収縮しない一方、下方の収縮は偏心していない場合と比べても大きく収縮する。したがって上下で収縮の度合いが大きく異なる偏った収縮となってしまう。それを防ぐためには、ソースモデルとターゲットモデルとモデルの相対的な位置関係をあらかじめ手作業で丁寧に合わせておかなければならない。

提案手法はこういった手間をできるだけ少なくすることを目的とするものである。モデル同士の位置ずれの影響を軽減するために、三次元モデルの動作を規定するためのボーンを用いて位置合せをした後にマセマティカルモフォロジーのスケルトンを用いてシュリンクラップを行う。ただし、単純な位置合せのみではモデルが不適切に変形してしまうため、ボーンが密な部分から疎な部分に向かって順次位置合せを行っていくことによってこの問題を防ぐ。

ここでいうボーンとは、(可動 3D モデルならばほぼ全てのモデルがあらかじめもっているもので、) 可動 3D モデルの頂点群をグループ化したもののアフィン変換行列であり、静的な状態ではモデルの関節の位置ベクトルのデータ及び親関節へのリンク情報として 3D モデル内で保持されている。図 4 に一例を示す。図において丸または正方形で表示されている座標がボーンの座標である。

可動 3D モデルの各ボーンにはボーン名と呼ばれるインデックスが付いている。可動 3D モデルにモーションを付けるとき、別途用意されるモーションデータ(時系列の回転や移動などの係数)と可動 3D モデルのボーンを対応付けるために、可動 3D モデルのボーン名をディクショナリとしてモーションデータのボーン名と一致するものを探すという操作が行われる。変



図 4 可動 3D モデルとボーンの一例  
Fig. 4 An example of movable 3d human model and its bones.

換係数をモーションデータから、そのモーションデータと同じボーン名の可動 3D モデルのボーンに与える操作によって可動 3D モデルのモーションが発動する。

可動 3D モデルにおいて、ボーン名はもちろん、ボーンの木構造も本来任意であるが、実際には多くの可動 3D モデルが同じか似通ったボーン名とトリー構造をもつ。これは様々な可動 3D モデルに同じモーションデータを適用する場合に役立つ。トリー構造が多少異なる場合でもボーン名を頼りにデータの転送が行われるため、結果的に特定のボーンがない場合やデータがない場合は単純に無視されるだけであり、主要な動作は互換性が確保できるのである。以下では、主要なボーン構成とボーン名は全ての可動 3D モデルにおいて共通、補足的な動作を行わせる中間ボーンは可動 3D モデルごとに存在する可能性あるという条件下で論じ、ほとんどの可動 3D モデルがほぼ普遍的にもつボーン名は、「」を付けて、「センター」ボーン、「首」ボーンなどと表記する。また、頭髮などの不定形な部位や人間型でないモデルなど極端に形状が異なるモデルを対象から除外する。

## 2. 提案アルゴリズム

### 2.1 提案アルゴリズムの概要

提案するアルゴリズムは、ボーンを用いてソースモ

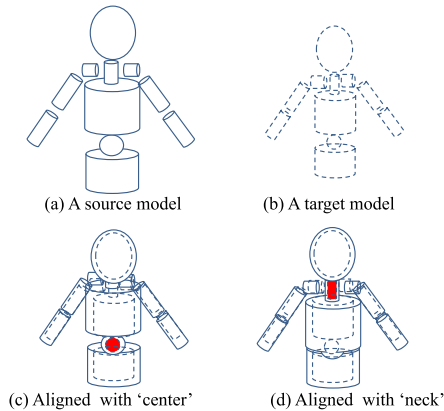


図5 ボーンによる変形概念と問題点

Fig. 5 The concept and problem of modification with bones.

デルとターゲットモデルとの相対的な位置関係を合わせた後にマセマティカルモフォロジーを用いてスケルトンを作成し、そのスケルトンに向かって面の頂点を移動することによって収縮するものである。これにより収縮の度合いが大きく異なる偏った収縮を防ぎつつ、形状を比較的損なわないシュリンクラップを実現できる。

ボーンの位置合せを行う際、ボーンによって動かされる頂点も移動する。頂点は必ずしも一つのボーンだけに属するわけではなく、複数のボーンに重み付きで属することができる。これにより、ボーンの位置合せの際、人物や衣類など柔軟なモデルは関節に相当する部分で、ある程度伸縮する。

原点に相当する「センター」ボーンから順次位置合せすると首や肩など複雑なボーン周辺に文字どおり「しわ寄せ」が集中し不適切な変形になる。そこでボーンが密な（一定距離以内にあるボーンの数が多い領域の重心に存在する）部分から疎な部分に向かって順次位置合せを行っていく。疎な部分では「しわ寄せ」が発生しても目立たないため、モデルの不適切な変形を軽減することができる。

図5(a)のソースモデルを図5(b)のターゲットモデルで位置合せするとき、舞台中のモデル位置を規定する「センター」ボーンに合わせた場合の概念図を図5(c)に、ボーンが密な「首」ボーンに合わせた場合の概念図を図5(d)に示す。図5(c)では首が上半身にかかってしまうが、図5(d)では比較的目立たない変形になる。

## 2.2 アルゴリズムの詳細

### (1) ボーン位置ずれの算出

モデルの制御パラメータはローカルな変換行列によって与えられることが多い。実際の3Dモデルではアフィン変換行列を用いるが、ここでは説明を簡単にするため移動ベクトルのみを用いて説明する。

ボーンの位置合せという着想を実現する手段は極めて簡単である。最も簡単な位置合せは、ソースモデルのローカルな移動ベクトルをターゲットモデルのローカルな移動ベクトルに置き換えるだけでよい。ただし、この方法はソースモデルのボーンとターゲットモデルのボーンの構成が全く同じである場合にしか適用できない。ここでは、ターゲットモデルのボーンの構成がソースモデルのボーンの構成より複雑であるという前提で考える。その理由は、動画生成の際、シュリンクさせたモデルはターゲットモデルのボーンの制御によって動作（モーション）されるので、ターゲットモデルにとって未知なボーンは想定する必要がない（仮に存在する場合動作不良となるのであらかじめ削除する必要がある）ためである。

とはいっても、アルゴリズムに本質的な相違はなく、ターゲットモデルのみに存在するボーンを無視した親子関係を使って、ローカルな移動ベクトルを求めるだけである。こういった親子関係を含め、ターゲットモデルとソースモデルのボーン同士は、ボーン構成が多少異なっている場合でもボーン名が同じものを探すことによって自動的に関係づけることができるので、手作業が増えることはなく、プログラム上の実装も容易である。なお、以下では簡単のために、ソースモデルにおいて注目するボーン  $i$  に対し、その親ボーンを  $i-1$  と表記する。

ボーン  $i$  の位置合せに用いるローカルな移動ベクトル  $v_{li}$  はターゲットモデルのボーンのワールド位置座標  $v_{twi}$  と親ボーン  $i-1$  のワールド位置座標  $v_{twi-1}$  を用いて

$$v_{li} = v_{twi} - v_{twi-1} \quad (1)$$

で簡単に求めることができる。ソースモデルのローカルな移動ベクトルをこの値で置き換えるだけで位置合せは実現できる。

前述のように、「しわ寄せ」を防ぐため、ボーンが密な部分から疎な部分に向かって順次位置合せを行っていく場合、例えば「首」ボーンを基準に位置合せを行う場合、その位置ずれ  $v_r$  を、ソースモデルの基準

ボーンのワールド位置座標  $v_{swr}$  とターゲットモデルの基準ボーンのワールド位置座標  $v_{twr}$  から次式で求めておく。

$$v_r = v_{twr} - v_{swr} \quad (2)$$

基準ボーンから全てのボーンの親である源流ボーン（トリー構造のルートとなるボーン，ほぼ「センター」ボーンと等価）までのボーンは，それ以外のボーンとは逆方向に動くが，ボーン同士の相対的な位置関係は変わらないため，ローカルな移動ベクトル  $v_{li}$  は式 (1) をそのまま適用できる。しかし，それに連結している子ボーンはワールド座標空間においてターゲットモデルの子ボーンと位置合せする必要があるので，ワールド座標空間で子ボーンが固定された状態を維持しなければならない。したがって，親ボーンが逆方向に動いた分だけ元に戻すための補正が子ボーンには必要である。補正係数  $v_{oi}$  は，源流ボーンを基準に親ボーンを位置合せさせたワールド座標上の位置から，「首」ボーンを基準に親ボーンを位置合せさせたワールド座標位置を差し引いた値であるが，源流ボーンを基準に親ボーンを位置合せさせた位置はターゲットモデルのワールド座標上の位置  $v_{twi-1}$  と等しく，「首」ボーンを基準に親ボーンを位置合せさせた位置は元の位置  $v_{swi-1}$  から  $v_r$  だけ移動するので  $v_{swi-1} + v_r$  となり，補正係数  $v_{oi}$  は次式で求められる。

$$v_{oi} = v_{twi-1} - (v_{swi-1} + v_r) \quad (3)$$

これをターゲットモデルの移動ベクトルに加算して係数  $v_{li'}$  を求めればよい。

$$v_{li'} = (v_{twi} - v_{twi-1}) + v_{oi} \quad (4)$$

最後に，源流ボーンの移動係数  $v_{li''}$  を求める。基準ボーンから源流ボーンへのリンクのうち，源流ボーン直近のボーンのワールド移動距離  $v_g$  は，ソースモデルのローカルな移動ベクトルとターゲットモデルのローカルな移動ベクトルの差で求められるので，

$$v_g = (v_{sw1} - v_{sw0}) - (v_{tw1} - v_{tw0}) \quad (5)$$

である。これを用いて源流ボーンの移動係数  $v_d$  は，

$$v_d = v_r + v_g \quad (6)$$

であり，移動ベクトル  $v_{li0}$  は

$$v_{li0} = v_{sw0} + v_d \quad (7)$$

となる。

## (2) ソースモデルの頂点位置算出

ターゲットモデルのポリゴンの各頂点について位置座標  $u_j$  を算出する。

$$u_j = u_0 + v_{swi} - v_{swi0} \quad (8)$$

$v_{swi0}$  はターゲットモデルのボーンがあらかじめもっているボーンのワールド位置座標である。柔軟に変形する関節付近など，複数のボーンから影響を受けるモデルの場合，

$$u_j = u_0 + \sum_i (v_{swi} - v_{swi0}) w_{ij} \quad (9)$$

のように，重み係数  $w_{ij}$  を用いた計算を行う。

## (3) ソースモデルのポリゴンのボクセル化

以降の処理は文献[4]と同じである。ボリウムデータにはあらかじめ全てのボクセルのボクセル値を 1 にしておく。

まず，ボリウムデータ内の全ての位置に対し，ワールド空間上の位置  $v_w$  を求める。

$$v_w = sv_i + v_o \quad (10)$$

ここで，ベクトル  $v_i$  はボリウムデータ配列のインデックスを要素とするベクトル， $s$  はスケールファクタ， $v_o$  はオフセットである。次に，ポリゴン  $p$  を構成する平面  $P_p$  と位置  $v_w$  の距離  $d_p$  と平面上への射影位置  $v_{pw}$  を求める。更に  $v_{pw}$  がポリゴンの内側にあるか調べる。ポリゴンの各頂点から  $v_{pw}$  へのベクトルと各頂点から次の頂点までのベクトルの外積を求め，これと平面  $P_p$  の法線ベクトルとの内積の符号が，全て負であるとき， $v_{pw}$  はポリゴンの内側にある。最後に，距離  $d_p$  がしきい値以下かつ  $v_{pw}$  がポリゴンの内側にあるときボクセル値を 0 とする。

## (4) スケルトン及びスケルトン関数算出

原点を中心としたごく小さな球体構造要素  $B$  を考え，半径  $n$ （ただし  $n$  は 0 以上の整数）の球体構造要素が  $nB$ （ $n=0$  のときは原点のみからなる構造要素）で表されるとする。構造要素  $nB$  を直接用いると計算効率が悪いため一般にモフォロジーによるスケルトン及びスケルトン関数算出は以下の手順で実現される。入力画像を  $I_0$  として，スケルトンのうちスケール  $n$  に関する部分集合  $SK_n(I)$  を次式の繰返し処理により得る。

$$I_{n+1} = I_n \ominus B^s \quad (11)$$

$$SK_n(I) = I_n - I_{n+1} \oplus B \quad (12)$$

$$\text{SKF}_n(I) = n \cdot \text{SK}_n(I) \quad (13)$$

ここで  $B^s$  は  $B$  の転置、演算記号  $\ominus$  は縮退 (Erosion)、演算記号  $\oplus$  は膨張 (ミンコフスキー和) であり、 $\text{SKF}_n(I)$  はスケール  $n$  に関するスケルトン関数の部分集合である。

ただし、ポリゴン群で区切られたソースモデルのスケルトンを求めるためには、ポリゴン内か外かを判定するためにラベル化が必要であるが、上記の方法ではポリゴンが完全に閉じていない「ほころびがある図形」の場合、ラベル化できないためソースモデルのスケルトンは算出できない。また、ポリゴン群に微小な凹凸がある場合、ポリゴン近傍に多数のノイズが生じる。以下の手順は、ポリゴンが完全に閉じていない場合や、ポリゴン群に微小な凹凸がある場合にもラベル化とスケルトンの算出が可能になるアルゴリズムである。詳細は文献 [4] を参照されたい。

以下の (a) から (c) までの演算をポリウムデータが空集合でない期間、 $n = 0$  から 1 ずつ増やしながら繰り返し行う。次第に縮退しながら必要な領域を取り出し、スケルトンを作成していく。

#### (a) 処理領域の抽出

閉じる必要があるほころびの短辺の最大サイズを  $n_1$  とする。 $n = n_1$  のとき、すなわち一度だけ以下に述べるラベル化処理を行う。これにより、ほころびが縮退し、ふさがれた後にラベル化が行われることになる。

その後、 $I_{n+1}$  に対しラベル化を行い、ラベルデータ  $L$  を得る。物体の内部であることが既知である位置  $p$  におけるラベル値  $Lf(p)$  を求め、ラベルデータの要素値が  $Lf(p)$  と等しい全ての位置の集合  $q$  に対しポリウムデータ  $I_{n+1}$  の要素値  $If_{n+1}(q) = 1$  とし、それ以外の位置の集合  $\bar{q}$  に対しては要素値  $If_{n+1}(\bar{q}) = 0$  とする。これにより、ほころびを除いた物体内部の領域が得られる。

#### (b) 縮退 (Erosion)

ボクセル値が 1 である領域を次式により縮退する。

$$I_{n+1} = I_n \ominus B^s \quad (14)$$

#### (c) ノイズ除去または部分集合の算出

$n$  の値に応じて以下の処理を行う。除去したい凸領域の最大サイズを  $n_2$  とする。

- $n < n_2$  のとき

$$\text{SKK}_n(I) = \text{SKK}_{n-1}(I) \quad (15)$$

$$\text{SKKF}_n(I) = \text{SKKF}_{n-1}(I) \quad (16)$$

プログラム実装上は何もしないでよい。この場合は繰り返し処理中 (b) の縮退のみが行われることになり、ポリゴン群の微小な凹凸が削除される。

- そうでないとき

スケール  $n$  に関する部分集合  $\text{SK}_n(I)$ 、 $\text{SKF}_n(I)$  を求める。またこれを利用して  $n_2$  から  $n$  までのスケルトンの部分集合  $\text{SKK}_n(I)$ 、スケルトン関数の部分集合  $\text{SKKF}_n(I)$  を求める。

$$\text{SK}_n(I) = I_n - I_{n+1} \oplus B \quad (17)$$

$$\text{SKF}_n(I) = n \cdot \text{SK}_n(I) \quad (18)$$

$$\text{SKK}_n(I) = \text{SKK}_{n-1}(I) \cup \text{SK}_n(I) \quad (19)$$

$$\text{SKKF}_n(I) = \text{SKKF}_{n-1}(I) \cup \text{SKF}_n(I) \quad (20)$$

(5) ソースモデルの頂点とスケルトンの対応点探索  
ソース頂点とスケルトンの対応点探索は以下の手順で実現される。

(a) 一つのポリゴンの頂点  $v_p$  とスケルトン上の全ての点  $v_s$  との距離をそれぞれ求める。この値を  $d_{ps}$  とする。

(b) 以下の評価値を最小にするスケルトン上の点  $v_{ps}$  をその頂点の対応点とする。

$$d_{ps} - w \cdot \text{SKF}_s \quad (21)$$

$\text{SKF}_s$  はスケルトン上の点  $s$  がもつスケルトン関数値であり  $w$  は重み係数であり、 $w$  が 1 より大きければ近傍で、より大きなスケルトン関数値をもつスケルトン位置が選択される。

(6) ソースモデルの頂点の移動とターゲットモデルへの密着

ソースモデルの頂点の移動後の位置  $v_{pm}$  は以下のよう求められる。

$$v_{pm} = (1 - t)v_p + tv_{ps} \quad (22)$$

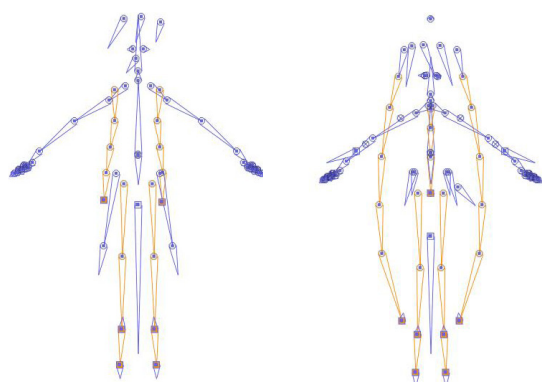
ただし  $t$  は通常 0 以上 1 以下の任意の実数値 ( $t$  が負の場合は膨張) である。

## 3. 実験と結果

### 3.1 実験試料及び方法

シュリンクを行う場合は、腕・胸部・スカートなどボディの部品ごとにモデルを分割することが多い [12]。そうでないとシュリンクに成功しないことが多いためである。本論文では、様々な部品の特徴を含む複雑な二つのソースモデル (男性モデル用のスーツと白衣) と、





(a) Bones of the source model (b) Bones of the target model

図 6 実験に用いたモデルのボーン

Fig. 6 The bones of the models for experiments.

二つのターゲットモデル（2種類の女性モデル）を用意し、これに対する評価を行った。図6に両者のボーンの一例を示す。モデルとして用いたのはポリゴン数が比較的少ないモデルで、一般的なパソコンでもリアルタイムアニメーションが可能なのである。ソースモデルは、あらかじめシュリンクに適用することを目的として作成したソースモデルでなく、ターゲットモデルである人体と大きく形状が異なりかつターゲットモデルに密着しない部分を含み、従来のシュリンクの枠組みでは必ずしも想定していないモデルである。このモデルは、様々な部品の特徴を持ち併せるため、これに基づくシュリンクの結果を評価することは、幾つかの部品を複数評価するのと等価であると考えることができる。

我々が開発した三次元データ処理環境[13],[14]のもとで、前述のパラメータ $t$ の値を変化させてシュリンクラップ処理を行った。この三次元データ処理環境は、広く入手できる三次元アニメーションモデルや、モデルを動かすモーションデータを利用することができるMMDXという三次元アニメーションライブラリ[15]をもとに、プログラミングの実習など短時間でゲームの開発が行えるようにするために、C言語とはほぼ同じでかつ極めて短いコードでソフトウェアが完成するような工夫をこらしたオープンソースライブラリである。

何らかの制限をかけない限りスーツは女性モデルに張り付くまで収縮してしまい、女性モデルにスーツのテクスチャを張り付けるのと同様であるので、特徴的な結果が得られた時点( $t=0.4$ )で収縮を停止させた。

比較対象として、位置合せを手動で行ったケース、

「センター」ボーンを基準に自動位置合せののち収縮させたケース、及び提案手法である「首」ボーン（密であるボーンを手動で設定）を基準に自動位置合せののち収縮させたケースについて実験を行った。

これらのうち、手動で位置合せを行ったケースと「首」ボーンを基準にしたケースについて、官能検査による主観評価値を求めた。具体的には収縮結果の画像について100点満点（良好なら高得点）でアンケートをとり、両者を比較した。手動位置合せはあらかじめ測定された厳密な位置合せ結果に基づきX軸（左右）、Z軸（前後軸）を完全に合わせ、Y軸（上下）のみソースモデルとターゲットモデルを見ながら（シュリンクの結果を確認せずに）手作業で位置合せを行うという手順で行った。位置合せの作業者は三次元モデリングソフトウェアを一通り使いこなせる中級程度のスキルをもったものであり、アンケートの調査対象とした被験者は、当該研究及び当該研究のモデリングに従事していない大学生及び大学院生でインターネットの動画サイトのある程度見慣れている男女計10名である。

なお、「センター」ボーンを基準にしたケースは明らかに収縮後の形状が保てないため（後述の図9及び3.2参照）アンケートから除外した。

### 3.2 実験結果

位置合せを手動で行ったもののうち比較的位置ずれが大きいものの結果の一例を図7に、位置ずれが小さいケースの結果の一例を図8に示す。また、「センター」ボーンを基準に収縮させたケースの結果を図9に、「首」ボーンを基準に収縮させたケースの結果の一例を図10に示す。これらの図において(a)は $t=-0.2$ としてやや膨張させた結果であり、以下(b)は $t=0.0$ 、(c)は $t=0.2$ 、(d)は $t=0.4$ の結果である。なお図7(b)及び図8(b)は、原理的に変形が全くないので変形前のモデルと同じである。いずれのケースも $t$ の値が大きくなるにつれてスーツの裾や袖が収縮し、細く小さくなっていることが確認できる。

それぞれのケースで特徴的な結果が確認できる部分を図中矢印で示す。位置ずれが大きいケースでは、図7(d)の矢印で示されているスーツの模様が、腕の軸に対して垂直でなく斜めに収縮していることが確認できる。これはスーツの袖に対して腕が偏心している位置にあり、腕の上部では収縮が早めに停止したため収縮が小さく、下部では収縮の停止が遅かったためより大きく収縮したためである。対して位置ずれが比較

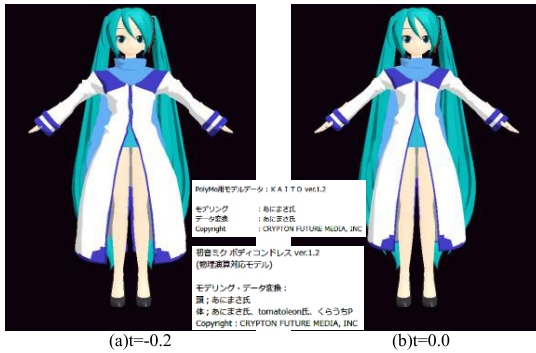
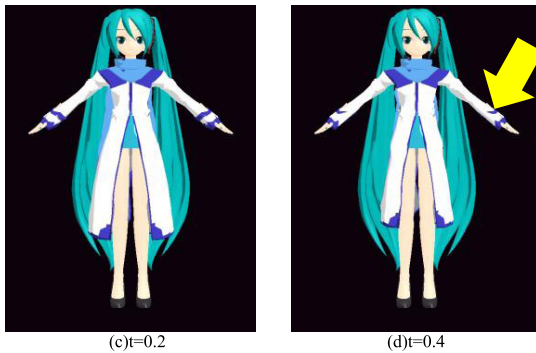
(a) $t=-0.2$ (b) $t=0.0$ (c) $t=0.2$ (d) $t=0.4$ 

図 7 実験結果 (粗い手動位置合せ)

Fig. 7 Results (careless manual alignment).

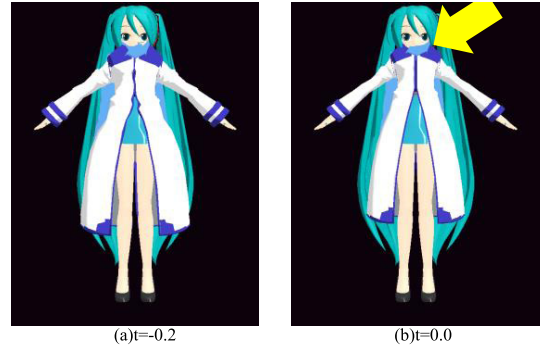
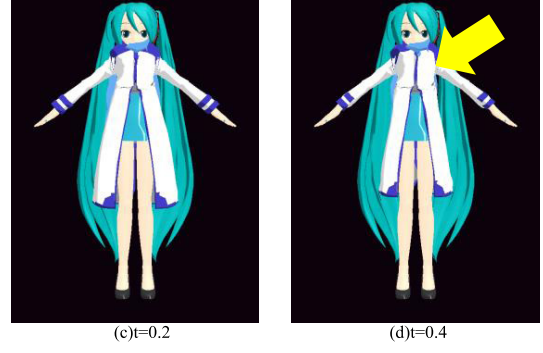
(a) $t=-0.2$ (b) $t=0.0$ (c) $t=0.2$ (d) $t=0.4$ 

図 9 実験結果 (「センター」による自動位置合せ)

Fig. 9 Results (automatic alignment with 'center' bone).

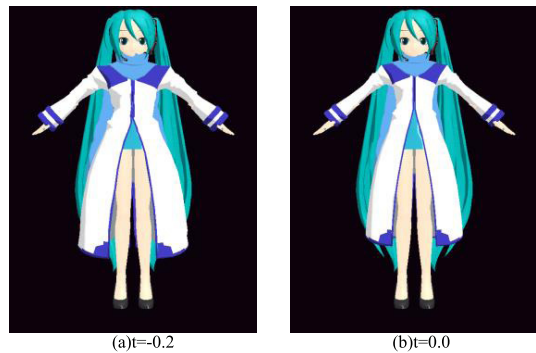
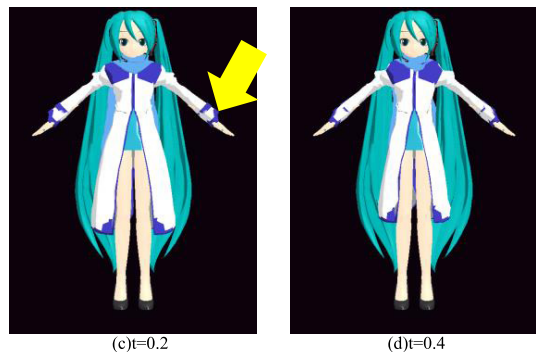
(a) $t=-0.2$ (b) $t=0.0$ (c) $t=0.2$ (d) $t=0.4$ 

図 8 実験結果 (適切な手動位置合せ)

Fig. 8 Results (careful manual alignment).

的小さいケースではこういった問題は顕著ではないが、図 8(c) の矢印で示されている部分は他の部分に比べやや不均一に収縮していることが確認できる。

「センター」ボーンを基準に収縮させたケースの結果ではこれらの問題は発生していない。しかし、図 9(b) の矢印で示されるように、収縮前の時点で首がスーツに埋もれたようになってしまっている。これは原点に相当する「センター」ボーンから順次位置合せした結果、首や肩など複雑なボーン周辺にしわ寄せが集中し、不適切な変形になったためである。この時点で不適切な変形が生じたため、収縮後の図 9(d) は極めて不自然な収縮結果となってしまっている。

提案手法である「首」ボーンを基準に収縮させたケースでは、これらの問題は生じることなく、袖周辺も首周辺も比較的自然的な収縮が行われていることが確認できる。

図 11 にシュリンクの計算過程で算出されたスケルトン関数の一例を示す。このスケルトン関数は、距離変換画像において対象を(ノイズ以外)完全に復元できる範囲で簡潔化(最簡化ではなく)されたものであ



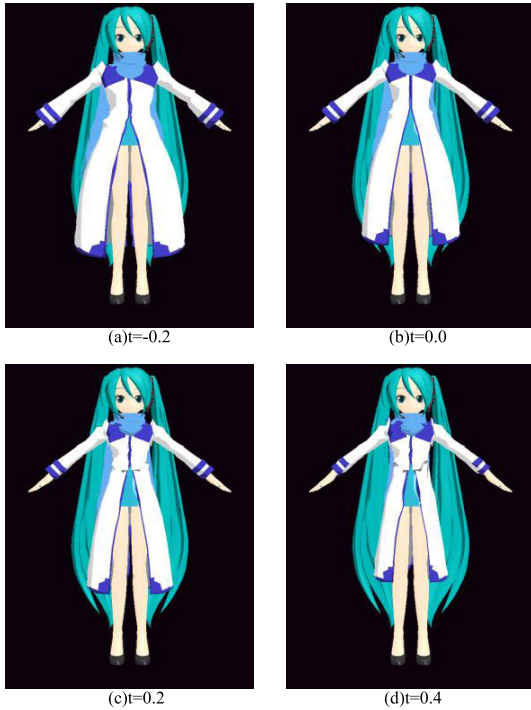


図 10 実験結果（「首」による自動位置合せ）

Fig.10 Results (automatic alignment with 'neck' bone).

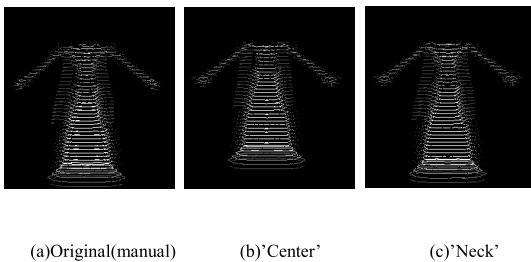


図 11 スケルトン関数

Fig.11 Skeleton functions.

り、模式図である図 2 と比べ冗長性が極めて大きい、体の厚みがやや薄面化されるなど、おおよその骨格が示されている。

位置合せを行うことによってスケルトン関数も変形するが、「センター」ボーンを基準に収縮させたケースではやや高さが低くなっていることが確認できる一方、「首」ボーンを基準に収縮させたケースでは目視で確認できる相違はなかった。

官能検査による主観評価値は、手動で位置合せを行ったケース 4 サンプルの平均は 64.5 で標準偏差は 12.6、

「首」ボーンを基準にしたケース 4 サンプルの平均は 78.8 で標準偏差 11.8 はであり、 $t$  検定の  $P(T \leq t)$  両側確率は  $1.54 \times 10^{-7}$  となり 5%水準で有意差ありと認められた。かつ、個人ごとの提案手法 4 サンプルの平均値は、手動位置合せ 4 サンプルの平均値を全ての被験者において上回る高得点となった。

#### 4. 考 察

手動で位置合せする場合、収縮させた結果を目視で確認しながら慎重に位置合せすれば、問題の発生はある程度防げる。しかし、形状が異なる複雑なモデル同士では、ある部分を位置合せしても別の部分に位置ずれが発生することは容易に想像できる。これは、いかに厳密に手動位置合せを行っても、完全足り得ない可能性は常に存在していることを示している。提案手法はボーンごとに位置合せを行うため、部品ごとに適切な位置合せをそれぞれ行うことと等価となるため、そういった問題は生じないという点で有効である。ただし、「センター」ボーンを基準に収縮させたケースから確認できるように、基準となる位置が適切でない場合には収縮も適切には行われない。特に首や顔の周辺は不適切な収縮の結果が人間にとって認識しやすいため、提案手法である、ボーンが集中している部分を基準にする方法の効果が明確に現れたといえる。

今回の実験では基準となるボーンは手動で選択した。これに要する作業は、ボーンが密なもののボーン名を選択するだけである。一方、手動で厳密に位置合せする場合の作業量は、慎重に三次元の各軸について位置合せを行った後、適切な形状まで収縮させ、その結果を目視で確認し、更に位置を修正、というプロセスを繰り返す必要がある。作業量の点でも本手法の有効性は高い。

官能検査の結果は、前述の有効性を鑑みれば、見た目においては同等以上であれば必要十分であるが、5%水準で有意差があったことは、提案手法の有用性を補足的に示しているといえる。

人物や洋服以外のモデルの場合は、基準位置を変更しなければならないケースも想定される。また、基準位置を複数定義しなければならないケースも予想される。その場合でも、ボーンが密な部分に基準を設定し、疎な部分でしわ寄せを吸収するという手法を一部利用できる可能性はあるが、本手法を単純に適用できると言い切ることはできない。

本実験で用いたソースモデルとターゲットモデルの

ボーンは、身長が異なる以外にも左右の肩や首の位置関係の相違が図 6 のように顕著である。「センター」ボーンを基準にした場合にはこの相違が不適切な収縮の主要因になったことが考えられる。一般に、ボーンが密な部分は、モデルの中でも特徴的な部分であることが多いことが考えられるので、こういった部分ではひずみが少なくなる提案手法の優位性が示唆される。また、「センター」ボーンを基準に収縮させたケースでは、収縮しない  $t = 0.0$  でも不適切な変形が生じているが、それに加えてスケルトンも変形していることが図 11 から確認できる。収縮後の結果では事前に発生した不適切な変形に加え、スケルトンも不適切な変形が生じたため、より不適切な結果になったものと考えられる。

なお、本手法はボーンで自動的に位置合せする場合、暗黙にボーンがモデルの頂点群の中心軸を通ることを想定している。ボーンがモデルの頂点群の中心軸にないケースとして、特殊な形状のロボットの関節などが考えられる。人間や洋服などは、可動関節がおおむね中心軸に沿っていることが自然な動きを実現する条件ともいえるため、この範囲では適用可能性があると考えられる。

## 5. む す び

複雑な形状の物体にシュリンクラップを用いる際に問題となるモデル同士の位置ずれの影響を軽減するために、三次元モデルの動作を規定するためのボーンを用いて位置合せした後にマセマティカルモフォロジーのスケルトンを用いてシュリンクラップを行う方法と、その手法を実際に用いる際にモデルの不適切な変形を軽減する具体的な手段を提案し、従来手法との比較を通して手法の有用性を示すとともに、適用範囲を考察した。

衣類のオーダーメイドに適用したり、個人の体型に合わせたパワーアシストスーツを設計に利用するなど、現実の世界で用いられるデータに関する検討が今後の課題である。

**謝辞** 本研究を行うにあたり、モフォロジーをはじめ画像処理に関して国立高等専門学校機構の小畑秀文理事長、九州大学芸術工学研究院の吉永幸靖助教、東京大学医学部附属病院放射線科の根本充貴特任研究員から多大なる御支援・御助言を賜った。また、ポリゴン操作ライブラリの開発に関し岩手大学工学部ものづくりエンジニアリングファクトリーからの援助を、モ

デル解析に科研費 80293009 の助成を、収縮システム開発にあたり岩手大学三陸復興推進機構の助成を受けた。関係各位に対しここに厚く御礼申し上げる。

## 文 献

- [1] 西川尚宏, 塚本真也, 大橋一仁, 三宅隆介, 井山俊郎, 水野雅裕, “エンドミル切削における電気防錆加工法の開発—切削加工における水のみを使用した環境調和型加工法,” 環境技術学会誌, vol.37, no.4, pp.274–281, 2008.
- [2] L. Kobbelt, J. Vorsatz, U. Labsik, and H. Seidel, “A shrink wrapping approach to remeshing polygonal surfaces,” Proc. Eurographics '99, vol.18, no.3, pp.119–129, Sept. 1999.
- [3] B.K. Koo, Y.K. Choi, C.W. Chu, J.C. Kim, and B.T. Choi, “Shrink-wrapped boundary face algorithm for mesh reconstruction from unorganized points,” ETRI J., vol.27, no.2, pp.235–238, April 2005.
- [4] 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, “スケルトンを利用したシュリンクラップとそれに適したモフォロジカルスケルトン,” 信学論 (D), vol.J96-D, no.1, pp.46–60, Jan. 2013.
- [5] 浅野 晃, “マセマティカルモフォロジーの思想,” IE-ICE Fundamentals Review, vol.4, no.2, pp.113–122, 2010.
- [6] 小畑秀文, “3次元画像とモフォロジー,” Medical Imaging Technology, vol.19, no.3, pp.168–173, 2001.
- [7] R.L. Stevenson and G.R. Arce, “Morphological filters; Statistics and further syntactic properties,” IEEE Trans. Circuits Syst., vol.34, no.11, pp.1292–1305, 1987.
- [8] 萩原義裕, 小畑秀文, “不定形微小凸領域抽出のための領域拡張を伴うモフォロジカルフィルタとその医用画像処理への応用,” 信学論 (D-II), vol.J83-D-II, no.1, pp.109–117, Jan. 2000.
- [9] 手島裕詞, 西尾孝治, 小堀研一, “モフォロジー演算を用いた3次元形状の類似度検索の一手法,” 映情学誌, vol.57, no.10, pp.1284–1291, 2003.
- [10] 手島裕詞, 小堀研一, “モフォロジー演算を用いた3次元モーフィングの一手法,” 映情学誌, vol.56, no.10, pp.1601–1606, Oct. 2002.
- [11] 丸岡 豊, 岩成英一, 岡田至弘, “モフォロジカルスケルトンによる3次元形状表現,” 2005 信学総大, D-11-100, March 2005.
- [12] Jaguarandi, “Shrinkwrap Modifier,” wiki.blender.org, <http://wiki.blender.org/index.php/User:Jaguarandi/SummerOfCode2008/ShrinkwrapModifier>. 参照 June., 2012.
- [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] wilfrem, “MMDX (MikuMikuDance for XNA/

SlimDX),” SourceForge.JP, <http://sourceforge.jp/projects/mmdx/> 参照 Feb., 2012.

『初音ミク』はクリプトン・フューチャー・メディア株式会社のキャラクターです。 [www.crypton.net](http://www.crypton.net)

(平成 25 年 1 月 21 日受付, 4 月 23 日再受付)



高木 基樹

2002 芝浦工業大学大学院修士了。2007 同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～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。

従事。



萩原 義裕 (正員)

1990 東京農工大学大学院修士了。1996 同大学院博士後期了。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～岩手大学工学部講師・助教授を経て准教授。



西川 尚宏

2001 岡山大・工学。2003 同大学院修士了。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。



萩原由香里 (正員)

1993 東京農工大・工学。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 中国新疆大学情報科学・エンジニアリング学院卒。～2007 同大科学技術学院指導員。2013 岩手大学大学院機械工学専攻博士後期課程了。2013～岩手大学三陸復興推進機構特任研究員。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。