

## 稜線の配置に制約を持つメッシュモデルの変形手法

小島恵 三谷純 西原清一 福井幸男

筑波大学大学院システム情報工学科 コンピュータサイエンス専攻

### 概要

CG の利用用途の拡大に伴い、メッシュモデルにおいてはモデルの形状そのものだけでなく、モデルの構成要素である稜線の配置が重要な意味をもつ場面が出てきた。そこで本研究では、稜線の配置に規則性のあるメッシュモデルに対し、稜線の配置に制約を与えつつ形状変形させる手法を提案する。本手法では、バネマスモデルに基づいた力学シミュレーションを適用することで、変形後も元のモデルの稜線の位置関係と隣り合う稜線同士の接続の滑らかさが保たれるようにしている。また、モデルの形状を表す上で重要な頂点と稜線集合をそれぞれ特徴点及び特徴線として扱い、適切な位置に配置されるようにしている。稜線の配置が重要視されるメッシュモデルの例として、服飾用の人台モデル及びテクスチャ用 UV 情報を持つメッシュモデルに本手法による変形を適用し、有効性を確認した。

## Mesh Model Deformation with Constraints of Edges Placements

Megumi Kojima, Jun Mitani, Seiichi Nishihara, Yukio Fukui

Department of Computer Science, University of Tsukuba

### abstract

As the expansion of the use of CG, some situations where it is necessary to maintain the structure and placement of edges have come to occur. In this paper, we propose a deformation method for mesh models which satisfies these demands. We apply dynamics simulation based on spring-mass model in order to preserve relative positions between edges and smoothness of edges while deformation. We regard important vertices and edges as feature points and feature lines, and force them to place suitable positions. We applied this method to human body models for garment design and mesh model which has UV information for texture, and confirmed the effectiveness of the method.

## 1 はじめに

3次元形状をCGで表現する手段として、頂点・稜線・面の3要素によって形状を表現するメッシュモデルが一般的に利用されている。従来、CGの用途といえばディスプレイ内での視覚情報提示が主であり、メッシュモデルは全体の形状自体が表現できれば十分であった。しかし、製品設計などCGの用途が広がるにつれ、頂点や稜線の配置など、形状の表現以外の部分でも制約が必要となる場面が出てきた。例えば人体形状を表す模型である服飾設計用の人台が挙げられる。人台には人体の特徴的部位を通る縦横のラインが引かれており、このラインを使って衣服のゆとり量設定や型紙の切開がなされる。よって人台のメッシュモデルには、これらのライン上に稜線が配置されている必要がある。上記の例のように、

制約をもつメッシュモデルが有益である場面はいくらか存在するが、このようなメッシュは単なるメッシュモデル以上に作成への手間がかかる。

一方で、3次元測定器の普及により、測定器から得られる3次元形状データを用いたメッシュモデル作成の研究が広がっている。その中で、人体形状モデルを作成する分野では、テンプレートのモデルを3次元形状データの形に近づくよう変形させる手法が多く取られている [1] [2]。テンプレートの変形によるモデル作成は自動的手法であるため手間がなく、各モデルを同一構造で表現できるという利点がある。

以上を踏まえ、本研究ではテンプレートモデルの形状変形により、稜線の配置に規則性のあるモデルを作成する手法を提案する。ここでは、構造化された稜線からなるメッシュモデルに対しバネマスモデルに基づく力学計算を施すことで、元のモデルの稜

線の位置関係と滑らかさを保つよう形状を変形してゆく。同時に、モデルの形状を表す上で特に重要な頂点と稜線集合を適切な位置に配置するための処理や制約を加える。

以下ではまず第2章で手法の概要に触れた後、第3章で人台を例に挙げながら手法の詳細を説明する。第4章では人台への手法の適用結果と、製品設計用途以外で稜線の配置に制約を持つモデルの変形が有益である例としてテクスチャ用 UV 情報を有するモデルへの手法の適用結果を記す。そして第5章でまとめと今後の課題を述べる。

## 2 手法の概要

本研究では稜線の配置に構造を持つモデルを source モデル、変形の際目標とする形状を target モデルとする。そして source モデルを target モデルの形状に近づけよう変形させることで新たなモデルの作成を行う。手法の概要を図1に示す。なお、モデルの存在する3次元空間は、左右方向をx軸、上下方向をy軸、前後方向をz軸としている。source モデルには、稜線がモデルに対し縦横に規則的に配置されているメッシュモデルを使用する。この稜線を大局的に捉えると、モデルに対して滑らかに張られた曲線の一部とみなせる。本研究では、この曲線を「構造線」と定義する。構造線の大半は、xz 平面に平行に張られる水平方向の構造線と、それに直交する垂直方向の構造線に分けられる。また、target モデルには 3DCG 表現で一般的な三角形メッシュモデルを使用する。

モデルを変形したとき、適切な位置に配置されるべき頂点と構造線をそれぞれ「特徴点」「特徴線」とする。特徴点は source モデル、target モデルの両方で対応付けして定める。一方、特徴線は source モデルにのみ定めている。各特徴線には必ずひとつ以上特徴点に乗るものとし、特徴点同士の対応により配置位置を決定する。特徴線には3次元空間の各断面に平行であるものとそうでないものがあり、うち前者は特徴点の位置から一意に配置されるべき位置を決定できる。

本研究で提案する手法では、まず source モデルと target モデルの頂点をユーザがマウスでクリックすることで特徴点を指定し、特徴点から source モデル上の特徴線を決定する。そして特徴点を用いて source モデルの位置合わせ及びスケールリングを行い、モデルの大まかな形状を合わせると共に各断面

に平行な特徴線が配置されるべき位置を決定する。その後、source モデルの各頂点に力学計算を加えることで変形を行う。

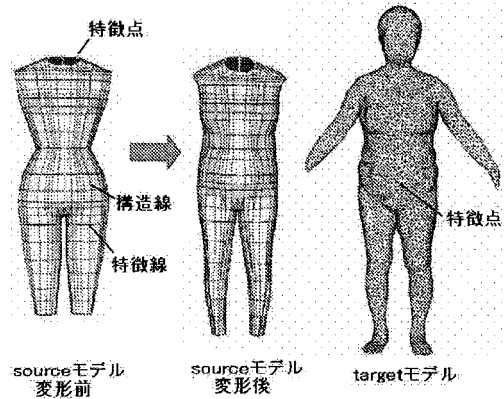


図1: 変形手法の概要。構造線を有する source モデルを target モデルの形状に合わせて変形する。このとき source モデルの特徴点及び特徴線の位置は target モデルの特徴点との対応によって定める。

## 3 変形手法詳細

### 3.1 服飾用人台について

以下では、稜線の配置に制約を持つモデルの具体例として、服飾設計用の人台を用いて変形手法の詳細を述べる。今回は、標準体型の人台のメッシュモデルを個人体型の3次元測定データにあわせて変形させることで、オーダーメイド服作成に使用する個人用の人台モデルを作成する場面を想定する。source モデルとなる標準体型の人台モデルを図2に示す。このモデルは人体の特徴的部位を通るよう設定された構造線で構成されている。本研究では [3] を参考に、人体測定学的に重要な頂点15点と構造線16本を、それぞれ特徴点及び特徴線として使用する。また、特徴線の決定と特徴線の配置されるべき位置の指定のみに必要な頂点4点を疑似特徴点として使用する。人台の特徴線には、モデルを左右対称に分割する特徴線(正中線)・水平方向の特徴線・その他の特徴線、の3種類が存在する。

### 3.2 特徴線の決定

人台の特徴線のうち、正中線と水平方向の特徴線はそれぞれ、yz 断面と xz 断面に対し平行である。よっ

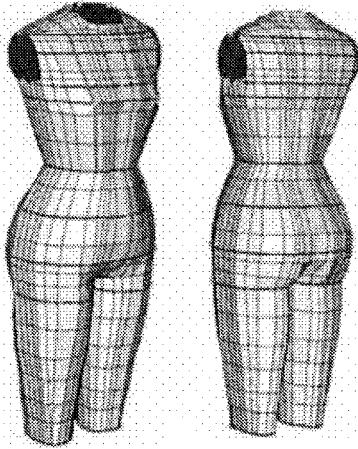


図 2: 図の左側が斜め前方から, 右側が斜め後方からみた標準体型の人台モデルである。水色の点が特徴点, 緑色の点が疑似特徴点である。正中線, 水平方向の特徴線, その他の特徴線はそれぞれ黄色, 紫色, 桃色で表している。

て正中線と水平方向の特徴線については, 各特徴線に対応する特徴点と同じ  $x$  値または  $y$  値を持つ頂点を抽出することで決定する。ただし, その他の特徴線に分類される首から肩にかけての特徴線 (肩線), 肩から胸にかけての特徴線 (胴丈線) は断面に平行でないの以上記方法では特徴線を決定できない。今回は, 肩線は首側部の特徴点から肩先の特徴点まで, 胴丈線は肩中央部の特徴点から胸の特徴点を通りウエスト部の特徴線, に至る稜線の最短経路上の頂点を抽出することで決定した。

### 3.3 位置合わせとスケーリング

位置合わせは  $xz$  方向,  $y$  方向に分けて行う。まず  $xz$  方向について target モデルとの対応する特徴点間の距離が最小となる位置に source モデルを動かす。その後,  $y$  値最大の特徴点同士が同じ値を取るよう  $y$  方向に source モデルを動かす。位置合わせにより, 正中線の配置されるべき位置が定められる。

この後, 配置を定めるべき各断面に平行な特徴線は水平方向の特徴線のみなので, スケーリングは  $y$  方向のみ行う。source モデルと target モデルでの各水平方向の特徴線間の  $y$  値が等しくなるよう, モデルの上部から下端に向かって source モデルの頂点を動かす。

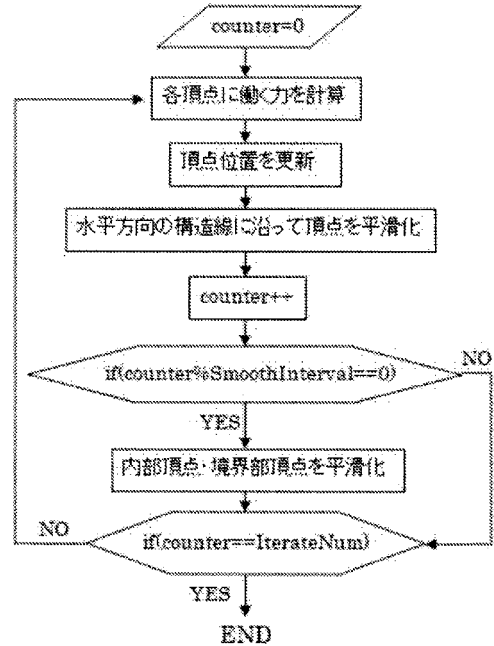


図 3: 変形処理の流れ

### 3.4 変形処理

変形処理は, source モデルの頂点に対し図 3 の処理を加えることでなされる。本研究では図 3 の「各頂点に働く力を計算」のステップにおいて, 変形時に稜線の位置関係を保つためバネマモデルを採用した [4] の手法を原型として用いる。

バネマモデルとは, 3 次元形状を構成する各頂点が仮想のばねとダンパで相互に接続されていると考え, 微小時間後のばねの歪みエネルギーの大きさから変形量を求める物理シミュレーション方法である [5]。ばねとダンパによって接続された頂点  $i$  にかかる力は式 (1) によって定式化される。

$$F_i = m_i g - \sum_j \left\{ k \left( 1 - \frac{L_{ij}}{|r_{ij}|} \right) r_{ij} + D v_{ij} \right\} \quad (1)$$

ここで,  $m_i$  は頂点  $i$  の質量,  $g$  は重力加速度,  $L_{ij}$  はばねの自然長,  $k$  はばね定数,  $D$  はダンパ定数,  $r_{ij}$  は頂点  $i$  からみた頂点  $j$  の相対位置,  $v_{ij}$  は頂点  $i$  からみた頂点  $j$  の相対速度である。

バネマモデルによるシミュレーションでは, 式 (1) をオイラー法により逐次計算してゆくことで,  $\Delta t$  時間後の頂点の位置が求められる。ここで  $v_i$  は頂点

$i$  の速度,  $r_i$  は頂点  $i$  の位置である.

$$v_i(t + \Delta t) = v_i(t) + \frac{F_i(t)}{m_i} \Delta t \quad (2)$$

$$r_i(t + \Delta t) = r_i(t) + v_i(t) \Delta t \quad (3)$$

[4] の手法では, モデルの稜線に沿って 1 近傍の頂点間を結ぶばねを張ることで頂点間に伸び方向の力を発生させ, 変形の際稜線の位置関係が崩れることを防いでいる. 変形処理ではこのばねから及ぼされる力  $F_{1i}$  の他に target モデルへ向かう力  $F_{2i}$  と水平方向の構造線を整える力  $F_{3i}$ , 垂直方向の構造線を整える力  $F_{4i}$  を頂点ごと計算する. 式 (4) から求めた 4 つの力の重み付き線形和から, 式 (2)(3) を計算することで各頂点の移動量と移動方向を求める. それぞれの力の関係を図 4 に示す.

$$F_i = w_1 F_{1i} + w_2 F_{2i} + w_3 F_{3i} + w_4 F_{4i} \quad (4)$$

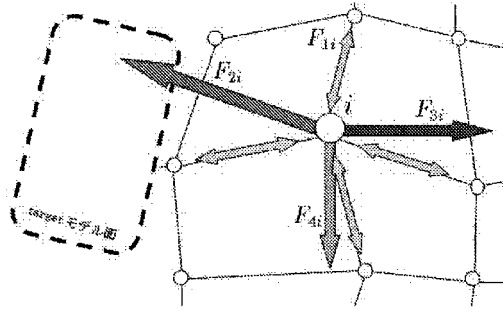


図 4: 頂点  $i$  に働く力の関係.  $F_{1i}, F_{2i}, F_{3i}, F_{4i}$  の重み付き線形和から頂点  $i$  の移動量と移動方向を求める

ばねから及ぼされる力  $F_{1i}$  は式 (1) によって計算する. 本研究では  $m_i=1, g=0, k=0.1, D=1$  として計算を行っている.

target モデルへ向かう力  $F_{2i}$  は, 変形時に source モデルの特徴点や特徴線上の頂点が target モデルの対応位置にのるよう, 力の向きと大きさを source モデルの頂点の性質に応じて表 1 のように求める. また, 前段階の位置合わせ及びスケールで定めた正中線と水平方向の特徴線の配置されるべき位置を崩さぬようにするため, A~D の頂点は式 (3) における移動方向成分を各特徴線と平行である断面の方向に限定する.

水平方向の構造線を整える力  $F_{3i}$ , 垂直方向の構造線を整える力  $F_{4i}$  は, 式 (5) の離散ラプラシアンによる平滑化の式から, 式 (6)(7) のように計算する. 離散ラプラシアンによる平滑化では, 構造線に沿っ

表 1: 頂点  $i$  に働く target モデルへ向かう力  $F_{2i}$  とその大きさ

	頂点 $i$	target モデルへ向かう力 $F_{2i}$	$F_{2i}$ の大きさ
A	正中線上の特徴点	target モデルの特徴点へ向かうベクトル $F_0$ の $yz$ 平面への射影ベクトル	頂点 $i$ から target モデルの特徴点までの $F_0$ の射影成分長
B	水平方向の特徴線上の特徴点	target モデルの特徴点へ向かうベクトル $F_0$ の $xz$ 平面への射影ベクトル	"
C	正中線上の頂点	頂点 $i$ の位置での $yz$ 断面上の, target モデルに最も近い方向のベクトル	頂点 $i$ から $F_{2i}$ と target モデルの面の交点までの長さ
D	水平方向の特徴線上の頂点	頂点 $i$ の位置での $xz$ 断面上の, target モデルに最も近い方向のベクトル	"
E	A・B 以外の特徴点	target モデルの特徴点へ向かうベクトル	頂点 $i$ から target モデルの特徴点までの長さ
F	A~E 以外の特徴点	target モデルの面に最も近い方向のベクトル	頂点 $i$ から $F_{2i}$ と target モデルの面の交点までの長さ

て隣り合う頂点との位置関係によって頂点の平滑化を行う. ここで  $p'_i = (x'_i, y'_i, z'_i)$  は平滑化後の頂点  $i$  の座標,  $p_i$  は平滑化前の頂点  $i$  の座標,  $p_{i-1}, p_{i+1}$  は頂点  $i$  の隣接頂点の座標である.

$$p'_i = \frac{1}{4} p_{i-1} + \frac{1}{2} p_i + \frac{1}{4} p_{i+1} \quad (5)$$

$$F_{3i} = (0, y'_i, 0) \quad (6)$$

$$F_{4i} = (x'_i, 0, z'_i) \quad (7)$$

図 3 の「水平方向の構造線に沿って頂点を平滑化」のステップでも, 式 (5)(6) を用いて平滑化を行う.

頂点に力を発生させ変形処理を行うにつれ, source モデルの面に凸凹が発生し構造線の位置関係が崩れるという問題があった. よって本研究では, 変形処理の反復中に一定の割合で表面の平滑化を施して上記問題を緩和する. 表面の平滑化には, 1 次のアンブレラオペレーターを用いる [6]. アンブレラオペレーターによる平滑化では, 近傍頂点との相対位置の平均から平滑化後の頂点位置  $p'$  を求める. ここで,  $p_i$  は頂点  $i$  の座標,  $U$  は 1 次アンブレラ値,  $p_j$  は頂点  $i$  の近傍頂点の座標,  $n$  は近傍頂点の個数である.

$$U(p_i) = \frac{1}{n} \sum_{j=0}^{n-1} p_j - p_i \quad (8)$$

$$p'_i = p_i + \lambda U(p_i) \quad (9)$$

また, 平滑化の度が強すぎると source モデルの形状そのものが損なわれるため, 本研究では式 (9) にお

いてアンブレラオペレーターへ平滑化係数  $\lambda(0.0 < \lambda \leq 1.0)$  を掛け、平滑化の影響を弱める。なおアンブレラオペレーターによる平滑化では、3次元形状が境界を有する場合に境界部から形状の縮退が生じる。よってここでは source モデルの内部頂点のみアンブレラオペレーターを適用し、境界部の頂点には式 (5) の離散ラプラシアンによる平滑化を施す。

## 4 変形の適用例

### 4.1 人台モデル

図 5 の標準体型の人台を source モデル、高齢女子体型の 3次元測定データを target モデルとして本手法を適用した。今回使用した測定データには、ユーザが特徴点を指定する際の基準とするため、人体の特徴的位置を示す橙色のラインが設定されている。また変形処理では、図 4 の SmoothInterval を 5, IterateNum を 50, 式 (4) の係数を  $w1 = 1, w2 = 1, w3 = 0, w4 = 1$ , 式 (9) の平滑化係数を肩・胸部で  $\lambda = 0.1$ , 脚部で  $\lambda = 0.4$  とした。これらの値は予備実験より経験的に定めた。変形後の人台を測定データ及び測定データの形状を元に衣服設計の専門家が CG 作成ソフトを使用して手作業で作成した人台と比較した結果を図 5 及び表 2 に示す。なお、表 2 における実行時間は CPU:3.00GHz Pentium(R), メモリ:512MB の PC で計測したものである。

本手法の適用により、測定データ及び専門家が作成した人台に近い形状で、全体的に構造線が滑らかな個人用人台を作成できた。また、正中線及び水平方向の特徴線が測定データ通りの位置に配置されている。ただし、肩線と胸丈線は、特徴線上の各特徴点に対応する特徴点に引き寄せられる力と、それに接続する稜線に張られるばねの力のみで配置を行っているため、部分的に歪みが生じている。また、変形時に平滑化処理を加えてもなお、曲率の高い脚部で表面の凹凸が発生している。

上記の歪みや凹凸に対する修正作業は要するものの、それ以外でユーザの作業を要する部分は特徴点の指定のみなので、手作業で作成する場合よりも少ない作業量で個人用人台を作成できるといえる。

### 4.2 頭部モデル

製品設計用途以外で稜線の配置に制約があるモデルの変形が有益である例として、テクスチャ用 UV

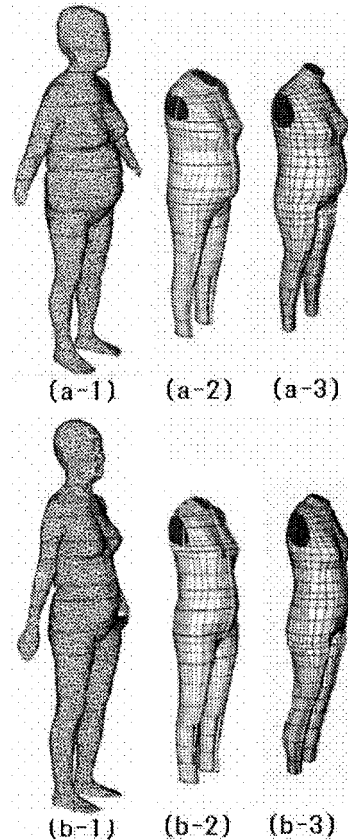


図 5: 人台モデル変形結果。(a-1)(b-1) が測定データ,(a-2)(b-2) が提案手法による変形後の人台,(a-3)(b-3) が専門家が手作業で作成した人台である。

表 2: 変形処理時の実行時間と測定データ及び専門家の作成した人台との比較。

体型		a	b
実行時間 (s)		131.5	130.3
測定データとの平均距離 (mm)	変形前	19.1	13.6
	変形後	1.9	1.7
測定データとの特徴点間平均距離 (mm)	変形前	21.5	14.2
	変形後	10.7	11.1
専門家の作成した人台との平均距離 (mm)	変形前	—	—
	変形後	7.8	6.5
専門家の作成した人台との特徴点間平均距離 (mm)	変形前	—	—
	変形後	19.6	17.6

情報を有するモデルを取り上げる。UV 情報はメッシュ内部の頂点に対応付けて定義されるため、形状変形時に頂点間を結ぶ稜線の配置に制約を持たせることで、モデルの UV 情報がある程度制御できると考えられる。

構造線から成る人体頭部モデルに顔画像を貼り

付けたものを source モデル, 他の人体頭部モデルを target モデルとして変形を行った結果を図 6 に示す. 眉・目・鼻・唇に位置する頂点 7 点を特徴点, モデルを左右対称に分割する構造線と各特徴点の乗る水平方向の構造線計 5 本を特徴線として定める. 変形処理では, 図 4 の SmoothInterval を 5, IterateNum を 50, 式 (4) の係数を  $w_1 = 1, w_2 = 1, w_3 = 0.5, w_4 = 0.5$ , 式 (9) の平滑化係数を  $\lambda = 0.1$  とした. 人台の変形時と同様, これらの値は予備実験より経験的に定めた. 図 6 の (b-2)(c-2) が提案手法による変形後の source モデルである. メッシュの稜線の構造が保たれることで, テクスチャの歪みを生じずに変形できている. また, 特徴線が適切な位置に配置されることで, 顔画像の各パーツがおおよそ正しい位置に配置されている. 図 6 の (b-3)(c-3) は稜線の配置に対する制約を加えずに形状変形した結果である. ここでは, 提案手法の場合と同様に位置合わせとスケールリングを行った後, source モデルの各頂点を target モデルの一番近い位置に動かした. 稜線の配置に制約を加えていないため, 目や口など形状に凹凸のある部分で稜線の配置が崩れ, 結果テクスチャに歪みが生じている.

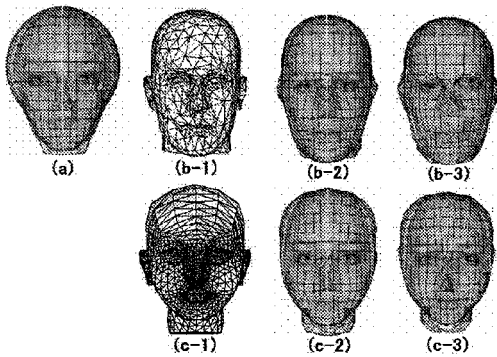


図 6: 頭部モデル変形結果. (a) が source モデル, (b-1)(c-1) が target モデル, (b-2)(c-2) が提案手法による変形後の source モデル, (b-3)(c-3) が稜線の配置に対する制約を加えずに変形した後の source モデルである.

## 5 まとめと今後の課題

構造化された稜線を有するメッシュモデルに対し, 全体の稜線の構造を保ち, かつ特に重要な稜線を適切な位置に配置する変形手法の提案を行った. そして, 提案手法を衣服設計用の人台モデル, UV 情報を持つモデルに適用し, 変形結果の評価を行った. 人

台モデルの場合は, 設計時に要求されるラインを有するモデルを作成できることが, UV 情報を有するモデルの場合は, テクスチャを歪めず, テクスチャ画像の有する意味論的位置を保ちながらモデルを変形できることが確認できた.

今後の課題としては, 3次元空間の各断面に平行でない特徴線への対応が挙げられる. このような特徴線は断面に平行な特徴線と違い, 特徴点から一意に適切な配置位置を決定できず, 現状ではその特徴線にのり特徴点同士が引き寄せられる力とばねの力によって配置を行っている. しかしこの方法では特徴点の位置や個数によって特徴線の配置位置の妥当性が左右され, また特徴線の滑らかさも崩れやすい. よってこのような特徴線に対して配置されるべき位置を適切に指定する方法について検討が必要である.

また, 今回提案した手法は, メッシュの構造線がモデルに対し水平・垂直に張られていることを前提とする. この前提以外の構造線からなるモデルを対象とした変形手法の考案も, 今後の課題である.

## 参考文献

- [1] Brett Allen, Brian Curless, Zoran Popović, "The Space of human body shapes: reconstruction and parameterization from range scans," SIGGRAPH, pp.584-594, July 2003
- [2] (財) 機械システム振興協会, (社) 人間生活工学研究センター, "精密な人台形状相同モデル化システムの開発と製品設計への適用に関するフィージビリティスタディ報告書" (財) 機械システム振興協会, 2006年3月
- [3] 埼玉県産業技術総合センター, "ITと熟練技能の融合による3D-2Dシステムの創成" 平成17年度彩の国コンソーシアム研究推進事業研究報告書, 2006年3月
- [4] 戸高 義隆, "測定データに基づく人台モデルの生成手法" 筑波大学情報学類卒業論文, 2007
- [5] 宮崎 慎也, 安田 孝美, 横井 茂樹, 鳥脇 純一郎, "仮想弾性物体の対話操作のためのモデル化と実現" 電子情報通信学会論文誌'96/11, vol.J79-A, no.11, pp.1919-1926, 1996年11月
- [6] L.Kobbelt, S.Campagna, J.Vorsatz, H.-P.Seidel, "Interactive Multi-Resolution Modeling on Arbitrary Meshes" SIGGRAPH, pp.105-114, 1998