

# 四肢キャラクター間の衣装転写システムの提案

成田 史弥<sup>1,a)</sup> 齋藤 隼介<sup>1,b)</sup> 福里 司<sup>1,c)</sup> 森島 繁生<sup>2,d)</sup>

受付日 2015年6月30日, 採録日 2015年12月7日

**概要:** 本稿では, 1つのテンプレートとなる衣装モデルを任意のキャラクターに自動転写する手法を提案する. 衣装を自動モデリングする研究として, テンプレートとなる衣装モデルを基に, 任意のキャラクターの体型に合った衣装モデルを生成する衣装転写に関する手法が数多く提案されてきた. しかし, これまでの衣装転写手法は主に人間に類似した体型を持つキャラクターを対象とし, 人間と大きく異なる体型を持つキャラクターを対象とした手法はいまだに提案されてこなかった. そこで本稿では, スケール計測, 衣装転写, テクスチャ保存の3つの工程からなる総合的な衣装転写フレームワークを提案する. 現実世界における体型の測定方法に基づいた転写元と転写先のCGキャラクターのスケール測定という新しい概念の導入によって, 衣装のフィットリングを保存する. 同時に, 生成した衣装モデルの形状を利用し, テクスチャ情報を最適化する機能も提案する. 本技術は, 既存の衣装モデルを再利用することにより, ユーザが手軽に衣装モデリングをすることを可能にする.

**キーワード:** 衣装モデリング, スケール計測, フィットリング保存, テクスチャ保存

## Garment Transfer between Biped and Quadruped Characters

FUMIYA NARITA<sup>1,a)</sup> SHUNSUKE SAITO<sup>1,b)</sup> TSUKASA FUKUSATO<sup>1,c)</sup> SHIGEO MORISHIMA<sup>2,d)</sup>

Received: June 30, 2015, Accepted: December 7, 2015

**Abstract:** We propose a method to automatically generate a clothing model for various characters from a single template model. A number of methods have been proposed for automating these processes by generating clothing from a template, but their applications have mainly focused on dressing human body forms. There is a lack of methods for transferring clothing to characters with different poses and body shapes. In this paper, we propose a method to automatically generate a clothing model for various characters from a single template model. Our framework consists of three steps: scale measurement, clothing transformation, and texture preservation. By introducing a novel measurement of the scale deviation between two characters with different shapes and poses, our framework achieves pose-independent transfer of clothing even for quadrupeds (e.g., from human to horse). In addition to a plausible clothing transformation method based on the scale measurement, our method minimizes texture distortion resulting from large deformation. Our system makes it easier for users to model clothing by reusing existing models.

**Keywords:** Garment Modeling, Scale Calculation, Fitting Preservation, Texture Preservation

### 1. はじめに

近年, 映画やゲーム等における3Dコンピュータグラフィックス(CG)技術の飛躍的な進歩にとともに, CG上のアバタやキャラクターへの関心が高まっている. CGキャラクターは各々固有の体型を持ち, アーティストによって1つ1つ手作業で作成されている. 特にキャラクターの衣装モデリングは, (1) 衣装をデザインする, (2) キャラクター上に配置する, (3) テクスチャを張り付けるという工程に分け

<sup>1</sup> 早稲田大学  
Waseda University, Shinjuku, Tokyo 169-8555, Japan

<sup>2</sup> 早稲田大学理工学術院総合研究所  
Waseda Research Institute for Science and Engineering,  
Shinjuku, Tokyo 169-8555, Japan

a) fumiya.narita162@gmail.com

b) Shunsuke.Saito16@gmail.com

c) tsukasa@moegi.waseda.jp

d) shigeo@waseda.jp

られる。しかし、ユーザには衣装モデルの完成形 (3D) を想像しながら衣装の型紙 (2D) を作成および編集を行う専門的な技術が要求され、一般ユーザが衣装モデリングを行うことは困難であるといえる。このような背景から、衣装モデリングの労力を削減する技術が必要とされている。そこで、平面パターンをキャラクターの体型に縫い合わせて衣装モデリングをするのではなく、衣装モデルの型紙への展開性を考慮せずに 3D の形状を直接操作することで、効率的に衣装をモデリングする試みがなされてきた。その中でテンプレートとなる衣装モデルを基に、任意のキャラクターの体型に合った衣装モデルを生成する衣装転写に関する手法が登場した。しかし、多くの衣装転写手法は、人間に類似した体型を持つキャラクターを対象とし、人間と大きく異なる体型を持つキャラクター (例: 馬やラクダ等の四足動物) に衣装モデルを転写した場合、衣装モデルの形状が破綻してしまう。実際、衣装モデルを任意の CG キャラクターに転写する手法はこれまで十分に取組みられておらず、依然未解決の問題である。衣装モデルを CG 上のキャラクターに転写するうえで考慮する必要がある点を以下に示す。

**スケール:** 生成される衣装モデルは転写先の CG キャラクターのパーツごとの相対的な大きさを考慮すること。

**フィッティング:** 転写元と転写先キャラクターの姿勢が異なる場合においても、衣装のフィッティングは保存すること。たとえば、テンプレートとなる衣装モデルにおいて身体との間のゆとり量が十分に存在する場合、転写結果もゆとり量が十分に存在する衣装モデルであることが望ましい。

**テクスチャ:** テンプレートとなる衣装モデルのテクスチャと比較し、転写結果のテクスチャ情報が歪みなく保存されていること。

本稿では、1つのテンプレートとなる衣装モデルを任意のキャラクターに自動転写する手法を提案する。現実世界における体型の測定方法に基づいた転写元と転写先の CG キャラクターのスケール測定という新しい概念の導入によって衣装のフィッティングを保存する。同時に、生成した衣装モデルの形状を最大限利用し、テクスチャ情報を最適化する機能も提案する。本技術は、既存の衣装モデルを再利用することにより、ユーザが手軽に衣装モデリングすることを可能にする。また、様々な姿勢や体型の CG キャラクターに衣装を着せることで、CG コンテンツ制作に対するユーザの創造力を掻き立てることが期待される。

## 2. 関連研究

本研究の先行研究は主に (1) 効率的に衣装モデリングを行う研究 [1], [2], [3], [4], [5], (2) 衣装転写に関する研究 [6], [7], [8], [9], [10], (3) 2つのオブジェ間での情報の転写やサイズ変更に関する研究 [11], [12], [13], [14], [15] の3つの領域に大別される。

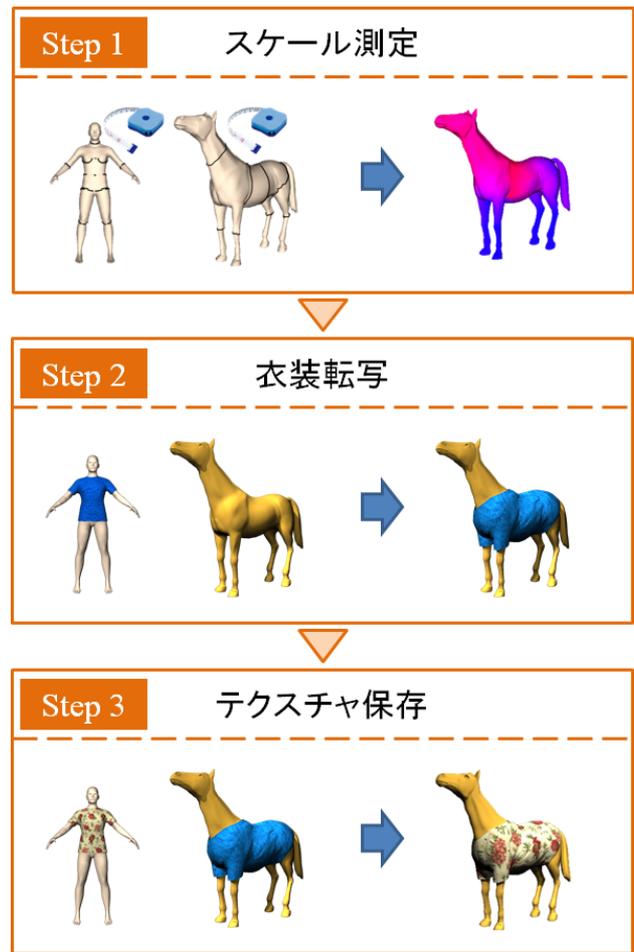


図 1 研究概要

Fig. 1 System overview.

まず、3DCG における衣装モデリングに関する研究について説明する。衣装モデリングは 2D 上の型紙を生成し、それを縫い合わせて 3D の形状を構成する。この形状に対し、物理シミュレーションを用いて最終的な形状を出力する。この手法は、物理シミュレーションを用いるため、CG キャラクターの着心地等といった衣装の変形結果を予測することができず、アーティストが微調整を繰り返す必要がある。特に、人体モデルと大きく異なる体型を持つ CG キャラクターに衣装を着せる場合、既存のパターングレーディングの原理が適用できないことから、型紙を制作することが非常に困難である。一方、Decaudin ら [1], Turquin ら [2], Robson ら [3] は、ユーザが衣装の 2D シルエットを入力することで、3D の衣装モデルを生成するスケッチベースの衣装モデリングの手法を提案した。この手法により、衣装モデリングの工程を簡素化し、作業時間の大幅な削減を実現した。しかし、この研究の出力結果は、型紙から生成した衣装モデルと比較すると、リアリティに欠けてしまい、多くのユーザ入力やパラメータの微調整を要する。インタラクティブに衣装モデリングを行うシステムとして、Umetani ら [4] はリアルタイム処理が可能な物理シミュレーション技術を基に、衣装の型紙の変形を瞬時に衣装モデルに反映

させることで、入力キャラクタに適した衣装生成を実現した。さらに Harmon ら [5] は衝突処理を考慮した形状の変形システムを開発した。しかし、これらのシステムは、入力キャラクタに適した衣装のモデリングを行うにあたり、ユーザに専門的な技術を要する。

次に衣装転写に関する研究について紹介する。あるキャラクタから別のキャラクタに衣装を転写する最も簡単な方法として、転写元の衣装を転写先のキャラクタに直接着せ、物理シミュレーションを適用することがあげられる。しかし、この手法は衣装モデルのサイズを考慮していないため、衣装を着用しているような結果が得られない。さらに、入力キャラクタどうしの体型が大きく異なる場合、衣装モデルを直接着せること自体が不可能な場合もある。そこで、あるキャラクタの着ている衣装を異なる体型のキャラクタに転写する衣装転写の手法が提案されてきた。Cordier ら [8] はユーザが体型の情報を入力することで、Web 上で仮想試着ができる衣装のオーダーメイドシステムを提案した。しかし、彼らの手法は数種類の体型の人体モデルデータベースを基に、入力した体型情報を再現する必要がある。つまりデータベースに大きく依存してしまい、様々な姿勢や体型を持つキャラクタに適用することは困難である。Wang ら [6], [7] はキャラクタの衣装モデルを、体パーツの対応関係を用いて、転写先のキャラクタの体型に合うようにサイズを変更する衣装転写の概念を導入した。本稿は、彼らの転写の概念を拡張したものである。しかし、彼らは転写元キャラクタと転写先キャラクタの体型が大きく異なる場合を想定していないため、身体の部位ごとに正しく衣装のフィッティングを保つことができない。また、衣装の大きな形状変形を想定していないため、転写結果に不自然な歪みが生じる可能性があるほか、衣装のテクスチャ情報を保持することができない。我々の研究では上記の問題に取り組む。また Meng ら [9] は衣装のデザインを保存するために、ユーザが衣装の輪郭を手入力でトレースすることで、Wang ら [6] の手法で生成した転写結果を編集するインタラクティブな衣装転写システムを導入した。一方、Brouet ら [10] は全自動で衣装のデザインを保持しつつ衣装モデルを転写する手法を提案した。しかし、彼らの手法の前提条件として、衣装のデザインを保持するために、転写元と転写先キャラクタの姿勢を一致させる必要がある。つまり、本稿の目的である人間から四足動物まで幅広いキャラクタに衣装を転写するために、彼らの手法を直接用いることはできない。

最後に、一般的な 2 つの 3D オブジェクト間のデータの転写やサイズ変更に関する研究を紹介する。CG 上のオブジェクトの作成を簡略化するために、様々なデータを対象とした転写やサイズ変更の技術が開発されてきた。Kraevoy ら [11] や Takayama ら [12] は 2 つのオブジェクトの間でテクスチャや幾何学的な形状を転写する手法を提案した。ま

た Sumner ら [13] や Kircher ら [14], Ben-Chen ら [15] は変形やアニメーション情報を転写する手法を提案した。このようにデータの転写やサイズ変更に関する研究は多数存在する中、我々は Sumner ら [13] の形状変形転写の手法を衣装転写の核になる技術として用いた。

以上をまとめると、衣装モデルを CG キャラクタに転写するためには、転写元キャラクタと転写先キャラクタの体型が大きく異なる場合や衣装の大きな形状変形に対応する手法が必要である。そこで本研究は、キャラクタ間の相対的な体型の変化を評価するためのスケール測定技術を提案する。また、転写先キャラクタの任意の姿勢や体型に頑健な衣装のフィッティングを保存するアルゴリズムを提案する。さらに転写した衣装モデルの形状を最大限活用し、テクスチャ情報の歪みを軽減させるテクスチャ情報の保存機能を提案する。

### 3. 研究概要

本研究は転写先キャラクタの体型を測定するスケール測定工程と、転写先キャラクタにフィットするように衣装モデルを変形する衣装転写の工程、衣装の柄を保存するテクスチャ保存の工程からなる (図 1)。

#### 3.1 転写元と転写先のスケール計測

身体と衣装との間のゆとりの分布状態は衣装のフィット性やサイズ適合性に関する重要な要素である [22], [23]。実際に身体と衣装との間のゆとり量はこれまでの衣装転写の手法においても考慮されてきた [6], [9], [10]。従来手法は人体モデル間の衣装転写であるため、身体と衣装の絶対距離を保存することで十分な結果が得られた。しかし、たとえば人間が着ている衣装を身体と衣装の絶対距離を基にラクダのように体が大きなキャラクタに転写する場合、転写結果がゆとり量の少ない衣装モデルとなる可能性がある (図 14)。このことから、任意の CG キャラクタにおいてフィッティングを保持した衣装転写を行うためには、転写元と転写先キャラクタのスケール比を考慮する必要がある。転写元と転写先のキャラクタ間におけるスケール比を求める最もシンプルな方法として、バウンディングボックスを用いる方法があげられる。具体的には転写元キャラクタと転写先キャラクタのバウンディングボックスをそれぞれ求め、これらの体積の比をスケール比とするものである。しかし、この手法はスケール比がキャラクタの姿勢によって大きく変化してしまうため、本稿の目的である姿勢に依存しない四肢キャラクタ間の衣装転写に沿わない。また、この手法で算出されたスケール比が身体全体で一様な結果となってしまうため、局所的に衣装のフィッティングを再現できない部分が生じる可能性がある (図 15)。様々な体型のキャラクタへフィッティングを保持した衣装転写を行うためには、身体全体のサイズの変化だけでなく、身体の各

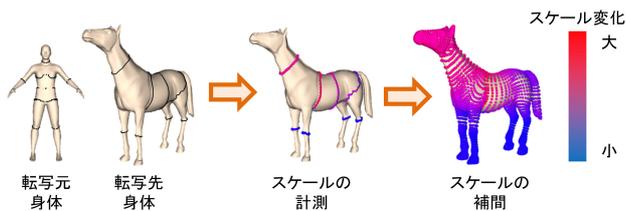


図 2 転写元と転写先のスケール計測

Fig. 2 Pipeline of the scale calculation.

部位の相対的なサイズの変化も考慮する必要がある。そこで本稿は、キャラクタ間の相対的な体型の変化を評価する手法を導入する。現実世界で衣装を制作する際、メジャーを体に当てて人間の体型の長さ（測地線）を計測する。そこで我々も同様に、身体部位（バスト、ウエスト、ヒップ等）の測地線を衣装のデザインにおいて重要な部位であると仮定し、キャラクタ間の測地線の長さの比を基に、各部位のスケール値を計算する。手順として、ユーザがキャラクタの頂点（胸回り、腹回り、腰回り等）をそれぞれ指定し、その頂点を基に各部位の測地線を取得する。本稿は測地線を取得するためにダイクストラ法を用いた。以上の手順で算出した測地線の長さの比をスケール比とする。次に測地線上のスケール値（測地線上の頂点）を基に、転写先キャラクタ全体（全頂点）のスケール値を求める。我々は、画像の色の補間に用いられる以下の式 [16] を参考に、転写先キャラクタのスケール値を補間する。

$$\min_{s_1, s_2, \dots, s_n} \sum_{i=1}^n \left( s_i - \frac{1}{d_i} \sum_{j \in N(\vec{v}_i)} s_j \right)^2 \quad (1)$$

$s_i$  は頂点  $\vec{v}_i$  に割り当てられたスケール値、 $\vec{v}_i$  は頂点  $\vec{v}_i$  に隣接する頂点、 $d_i$  は頂点  $\vec{v}_i$  に隣接する頂点数である。上記の線形最適化問題（式 (1)）を測地線上のスケール値（測地線上の頂点）を境界条件として解く。スケール値の計算結果を図 2 に示す。我々はこの値をフィッティングとデザインの保存（3.2.2 項）で用いる。

### 3.2 衣装の形状変形

人体モデルの衣装を CG キャラクタに転写するには、人体モデルと CG キャラクタの対応関係を求める必要がある。これまで、体型が大きく異なるキャラクタどうしを対応付けるための手法 [11], [17] が多数提案されているものの、任意のキャラクタどうしの正確な全単射を計算することはいまだに困難であるといえる。そこで本稿は Wang ら [7] の手法を参考に、キャラクタどうしのメッシュに対し 1 対 1 の写像を形成することが困難な場合にも適用可能な転写手法を提案する。ただし、本研究では、従来手法 [6], [7] のように衣装転写を 1 度に行うのではなく、衣装転写の工程を 2 段階に分ける。本稿における衣装の形状を転写する概要を図 3 に示す。はじめに、転写元キャラクタと転写先キャラクタのパーツごとの対応関係に基づき、衣装の大まかな

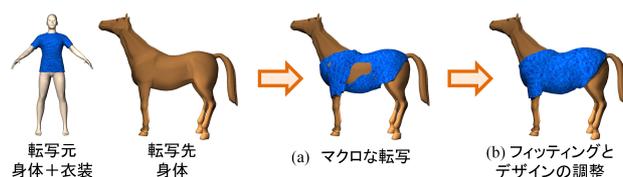


図 3 衣装転写のフロー

Fig. 3 Pipeline of our clothing transformation.

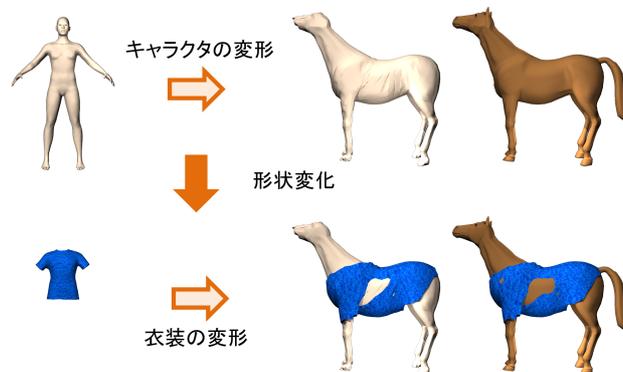


図 4 概形転写の概要

Fig. 4 Overview of our shape transfer.

形状を転写する（本稿では、この工程を概形転写と定義する）。次に身体への衣装のめり込みを除去しつつ、裾のデザインを保持するような誤差関数を定義し、衣装モデルの形状を調整する（本稿では、この工程をフィッティングとデザインの調整と定義する）。

#### 3.2.1 概形転写

Brouet ら [10] は転写元における衣装と身体のおフセットを利用することで衣装の概形を転写した。しかし本研究では転写元と転写先のキャラクタの間の対応関係を精度高く築くことができないため、単純におフセットを利用した場合、衣装モデルの裾の部分に大きく不自然な変形が生じるほか、衣装の形状が凸凹になってしまう結果となる。これは次項（3.2.2 項）でも取り除くことが困難である。そこで本研究では Wang ら [7] の身体の形状変化の情報を用いて衣装を転写するというアイデアに着想を得て、Sumner ら [13] の手法によって身体の形状変化の情報を衣装に適用することで、簡易的に転写先キャラクタの形状を反映した衣装モデルを得ることとする。

体型や姿勢が大きく異なるキャラクタへ衣装を転写する前処理として、Sumner ら [13] の対応付け手法を用いて転写元キャラクタと転写先キャラクタの形状合わせを行う。まず手で転写元キャラクタと転写先キャラクタの頂点間の対応関係を数点指定する。次に、転写元キャラクタの指定した頂点が転写先キャラクタの対応する頂点座標に近づくように平滑化と正規化を行いながら変形する。具体的には以下の最小化問題を反復的に解く。

$$\min_{\vec{v}_1, \vec{v}_2, \dots, \vec{v}_n} E = w_S E_S + w_I E_I + w_C E_C \quad (2)$$

subject to  $\vec{v}_{s_k} = \vec{m}_k, k \in 1, \dots, m$

$w_S, w_I, w_C$  は重み係数,  $s_k$  は転写元キャラクタ上の  $k$  番目のマーカの頂点番号,  $\vec{m}_k$  は転写先キャラクタ上の  $k$  番目のマーカの頂点座標,  $E_S$  は平滑化項,  $E_I$  は正規化項,  $E_C$  は転写元のメッシュの頂点を転写先のメッシュの頂点に近づける項,  $\vec{v}_1, \vec{v}_2, \dots, \vec{v}_n$  は変形した転写元の頂点である.

各項の算出方法について記述する. 平滑化項は, 以下のように表される.

$$E_S(\vec{v}_1, \vec{v}_2, \dots, \vec{v}_n) = \sum_{i=1}^{|T|} \sum_{j \in \text{adj}(i)} \|T_i - T_j\|_F^2 \quad (3)$$

$T$  は転写元キャラクタの面の数,  $T_i$  は  $i$  番目の三角形メッシュの変形勾配,  $\text{adj}(i)$  は  $i$  番目の三角形メッシュに隣接する三角形の集合,  $\vec{v}_1, \vec{v}_2, \dots, \vec{v}_n$  は転写元の頂点である. 平滑化項は隣接する三角形の変形を近づける働きをする.

次に正規化項は以下の式で表される.

$$E_I(\vec{v}_1, \vec{v}_2, \dots, \vec{v}_n) = \sum_{i=1}^{|T|} \|T_i - I\|_F^2 \quad (4)$$

$I$  は単位行列である. この項は平滑化項が最適化の過程においてメッシュモデルを過度に変形することを防ぐ働きをする.

$$E_C(\vec{v}_1, \vec{v}_2, \dots, \vec{v}_n, \vec{c}_1, \vec{c}_2, \dots, \vec{c}_n) = \sum_{i=1}^n \|\vec{v}_i - \vec{c}_i\|_F^2 \quad (5)$$

$\vec{c}_i$  は転写元キャラクタの  $i$  番目の頂点  $\vec{v}_i$  に対応する転写先キャラクタの頂点, 具体的には転写元キャラクタの  $i$  番目の頂点から最も距離の近い転写先キャラクタの頂点でかつ, 頂点の法線ベクトルの差が 90 度以下とする.

上記のエネルギー関数 (式 (2)) が最小となる  $\vec{v}_1, \vec{v}_2, \dots, \vec{v}_n$  を求めることで転写元キャラクタと三角形メッシュ数と頂点間の接続情報が同じでかつ, 転写先キャラクタに形状が近いメッシュモデルを得ることができる. Sumner ら [13] はこのメッシュモデルを用いて転写元と転写先の対応付けを行った後に変形勾配の転写を実現していたが, 本研究の目的は転写元キャラクタを転写先キャラクタの形状に合わせるように変形させた変形情報を用いて衣装モデルを変形させることであるから, このモデルを次の工程で直接用いることとする. 転写元キャラクタを転写先キャラクタの形状に変形させた結果を図 4 に示す.

次に, 上記の手順で得られた転写元キャラクタから転写先キャラクタへの変形情報 (変形勾配) を衣装モデルに作用させることで, 衣装モデルの転写を行う. 衣装モデル変形情報を適用するために転写元キャラクタと転写元衣装の対応関係を取得する. 具体的な手順として, 以下の評価関数を最小にする転写元キャラクタの三角形と転写元衣装の三角形の組合せを求める.

$$\left\| \vec{p}_i^s, \vec{p}_j^c \right\| \exp\left(-\frac{\vec{n}_i^s \cdot \vec{n}_j^c}{\sigma^2}\right) \quad (6)$$

$\|\cdot\|$  は L2 ノルム,  $\vec{p}_i^s, \vec{p}_j^c$  は転写元キャラクタの  $i$  番目の三角形の重心と転写元衣装の  $j$  番目の三角形の重心,  $\vec{n}_i^s, \vec{n}_j^c$  はそれぞれ転写元キャラクタの  $i$  番目の三角形の法線ベクトル, 転写元衣装の  $j$  番目の三角形の法線ベクトル,  $\sigma$  は定数である. 現在の実装では予備実験の結果,  $\sigma = 0.6$  としている.

これらの対応関係を用いて転写元キャラクタを転写先キャラクタの形状に合わせるように変形させた際の変形勾配を, 対応する転写元衣装のメッシュに作用させる. 具体的には転写元キャラクタと変形した転写元キャラクタの変形勾配を  $S_{s_j}$  衣装の変形勾配を  $T_{t_j}$  と定義し, キャラクタの変形と衣装の変形を最小化するため, 以下の最小化問題を解く.

$$\min_{\vec{y}_1, \vec{y}_2, \dots, \vec{y}_n} \sum_{j=1}^{|M|} \|S_{s_j} - T_{t_j}\|_F^2 \quad (7)$$

$M$  は衣装の面の数,  $\vec{y}_1, \vec{y}_2, \dots, \vec{y}_n$  は転写した衣装の頂点である.

これにより, 転写先キャラクタの体型を反映した衣装モデルが得られる. 衣装モデルの現在の位置から転写先キャラクタ上の最適な位置への平行移動ベクトルを  $\vec{a}$  とし, 以下の評価関数を最小にする  $\vec{a}$  を求める.

$$\sum_{i=1}^n \left\| \vec{b}_i - (\vec{y}_i + \vec{a}) \right\|^2 \quad (8)$$

$\vec{b}_i, \vec{y}_i$  は変形した転写元キャラクタの  $i$  番目の頂点と変形した衣装モデルの  $j$  番目の頂点,  $n$  は変形した衣装モデルの頂点数である. これを最小にする  $\vec{a}$  は以下のようになる.

$$\vec{a} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\vec{b}_i - \vec{y}_i) \quad (9)$$

以上の手順によって, 転写先キャラクタの体型を反映した衣装モデルが転写先キャラクタ上の最適な位置に配置される. 図 4 は概形転写の結果を示しているが, 衣装のめり込みや袖および裾における不自然な変形が生じていることが確認できる.

### 3.2.2 フィッティングとデザインの調整

前項の概形転写の際に生じた問題を解決するために, 本稿は誤差関数を導入する. Guan ら [18] は人体モデルの動きに合わせ, 衣装のめり込みを除去する方法を提案した. しかし, 彼らの手法は, 体型が大きく異なるキャラクタ間での衣装転写を想定していなかったため, 概形転写の際に発生した裾および袖の歪みを取り除くことは困難である. そこで本手法では Guan らのめり込み除去の式を拡張し, 以下の誤差関数を定義して反復的に解く.

$$E(Y) = f(Y) + \lambda_1 d(Y) + \lambda_2 h(Y) \quad (10)$$

$\lambda_1, \lambda_2$  は重み係数であり,  $f(Y)$  は衣装のフィッティング

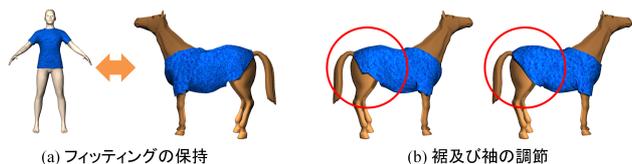


図 5 フィットニングとデザインの調整の概要  
 Fig. 5 Effects of fitting error minimization.

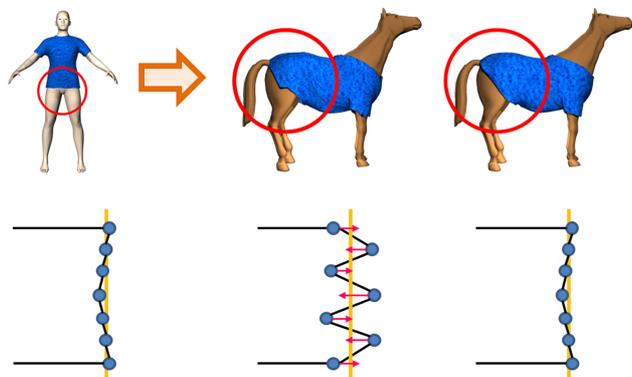


図 6 裾および袖の元のデザインを保持する項  $h(Y)$  の作用  
 Fig. 6 Effects of the hem adjustment term  $h(Y)$ .

を調節する項,  $d(Y)$  は正規化項,  $h(Y)$  は裾および袖の元のデザインを保持する項である.

各項の具体的な算出方法について記述する. フィットニングを調節する項は, 以下のように表される.

$$f(Y) = \sum_{(i,j) \in C} \left\| -s_i \epsilon_i + \vec{n}_{b_j}^T (\vec{y}_i - \vec{b}_j) \right\|^2 \quad (11)$$

$C$  は概形転写のときと同様の方法で求めた衣装の頂点  $\vec{y}_i$  と体の最近傍頂点  $\vec{b}_j$  の対応の集合,  $\vec{n}_{b_j}$  は身体の頂点  $\vec{b}_j$  の法線ベクトルである.  $s_i$  は前工程で導出した  $\vec{b}_j$  における転写元キャラクタと転写先キャラクタのスケール,  $\epsilon_i$  は転写元衣装の頂点  $v_i$  と転写元キャラクタの最近傍頂点との距離である. 第 1 項は Guan らの衣装のめり込み除去の式を拡張したもので, めり込みを除去しながら, 転写先キャラクタにフィットするように衣装モデルの形状を調節する (図 5(a)).

次に正規化項  $d(Y)$  の説明をする. 正規化項は以下の式で表される.

$$d(Y) = \sum_i \left\| \vec{y}_i - \vec{y}_i^* \right\|^2 \quad (12)$$

$\vec{y}_i^*$  は 1 回前の反復計算結果 (衣装モデルの頂点) である. 本稿では, 初期値は概形転写の際に得られた衣装モデルの頂点を用いた. さらに, 我々は静止状態において衣装モデルの裾および袖の頂点は, ある程度同一平面上に存在すると仮定することで, 裾および袖の元のデザインを保持する項  $h(Y)$  を以下の式のように算出した.

$$h(Y) = \sum_{j=1}^N \sum_{i \in H_j} \left\| \vec{y}_i - \left\{ \vec{y}_i + (s_i d_i^{src} - d_i^{trg}) \vec{n}_j \right\} \right\|^2 \quad (13)$$

$N$  は裾および袖の数,  $H_j$  は  $j$  番目の裾および袖の頂点の集合である.  $\vec{n}_j$  は  $H_j$  に対する最小二乗平面  $\alpha_j$  の法線ベクトル,  $d_i^{trg}$  は  $\alpha_j$  と  $\vec{y}_i$  の間の距離,  $d_i^{src}$  は転写元の衣装モデルに対して同様に定義される. この項によって, 転写元の衣装の裾および袖の頂点の同一平面上からのずれを, 転写した衣装モデルの裾および袖の頂点でも再現することが可能となる (図 6).

上記の誤差関数 (式 (10)) が最小となる  $\vec{y}_1, \vec{y}_2, \dots, \vec{y}_n$  を求めることでめり込みを除去しつつ裾および袖の元のデザインが保持された衣装の形状を得ることができる (図 3(b)). 現在の実装では  $\lambda_1 = 1.0$ ,  $\lambda_2 = 0.3$  とした. 反復回数に関しては, 予備実験の結果 5 回としている.

### 3.3 テクスチャの保存

前節の衣装転写の工程において, 衣装モデルに割り当てられたテクスチャ座標は固定しているため, 転写後の衣装のテクスチャ情報は大きく歪んでしまう. そこで, 入力となる衣装モデルを転写した際, テクスチャ座標も変形させる必要がある. 物体の変形に合わせてテクスチャを変形する研究として, Li ら [19] の手法があげられる. この手法を用いることで, メッシュモデルを筋肉・脂肪・腱等で構成される体 (メッシュ形状) と体を覆う薄い弾性膜である皮膚 (テクスチャ) に分離し, 体が動く際皮膚がどのように動くのかを表現することができる. しかし, この手法はテクスチャ情報を保存するのではなく, あくまでも体の動きに対する皮膚 (テクスチャ) の自然な変形を表現するものであり, 我々の目的である衣装モデルのテクスチャ情報の保持とは対象としているものが異なる. そこで本節では, spring-mass system を基に転写した衣装モデルの形状に合わせて, テクスチャ座標を変形する手法を提案する (図 7). 本稿では, 転写元の衣装モデルに付与されているテクスチャ座標を初期値とする. ただし, 転写元の衣装モデルにテクスチャ座標が割り当てられていない場合, 衣装モデルに対し平面展開を行うことで, テクスチャ座標の初期値を生成する. テクスチャ座標を変形させる方法として, 我々の手法は転写先の衣装上で一様にテクスチャ情報を保存するだけでなく, アプリケーションやロゴのような特定箇所のテクスチャ情報を保存するようにユーザ指定を行うこともできる.

#### 3.3.1 テクスチャ空間の変形

従来手法として 3D モデルを平面上に展開する方法が多数提案されているが, 本稿では平面展開の際, 3D モデルを構成するメッシュがなるべく剛体性を保持した変形を行う Igarashi ら [20], [21] の As-Rigid-As-Possible に基づく手法に着目した. しかし 3.2 節で生成した転写衣装モデルが, 平面展開が可能な条件を満たしているとは限らないため, 転写衣装モデルに Igarashi らの手法を直接適用した場合, 特に縫い目の部分に大きな歪みが生じ, 三角形メッシュが

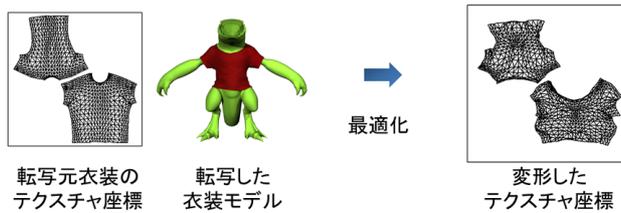


図 7 テクスチャ保存のフロー

Fig. 7 Overview of our texture preservation.

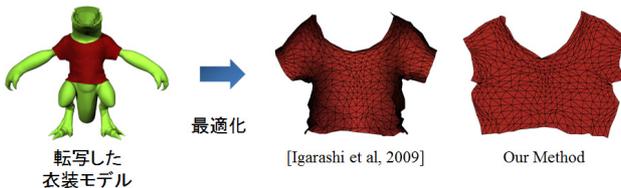


図 8 テクスチャ座標変形における従来手法と提案手法の比較

Fig. 8 Comparison of the effect of the texture deformation.

裏返ってしまうという問題があった (図 8)。そこで各メッシュではなく三角形メッシュを構成する 3つのエッジに注目し、テクスチャ情報の歪みを定義した。具体的には、以下のような最適化問題を反復的に解く。

$$E(V) = \alpha R(V) + \beta D(V) \quad (14)$$

$\alpha, \beta$  は重み係数であり、 $R(V)$  はテクスチャ空間上のメッシュのエッジの長さに対応する転写した衣装モデルのエッジの長さを近づけるように作用する項、 $D(V)$  は正規化項である。

以下に各項の算出方法について記述する。第 1 項目は、以下のように表される。

$$R(V) = \sum_{(i,j) \in E} w_{ij} \|(v'_j - v'_i) - T_{ij}(v_j - v_i)\|^2 \quad (15)$$

$w_{ij}$  はテクスチャ保存の優先度を表す重み係数であり、 $E$  はエッジの集合、 $v_i$  は現在のテクスチャ座標の頂点、 $v'_i$  は変形後のテクスチャ座標の頂点である。 $T_{ij}$  は現在のテクスチャ座標のエッジの長さに対応する転写後の衣装モデルのエッジの長さの比率を示す拡大縮小行列である。ただしテクスチャ座標と転写後の衣装モデルのスケールが異なるため、テクスチャ座標のエッジの長さの合計と衣装モデルのエッジの長さの合計の比率を用いて正規化を行った。反復のたびに  $v_i$  および  $T_{ij}$  の値が更新され、テクスチャ空間上のメッシュのエッジの長さに対応する転写した衣装モデルのエッジの長さが近づいていく。

第 2 項目は以下のように表される。

$$D(V) = \sum_i \|v'_i - v_i\|^2 \quad (16)$$

この項は正規化項であり、テクスチャ座標の急激な変形を抑える働きをする。正規化しながらテクスチャ空間のメッシュ形状を変形することで衣装の縫い目付近のメッシュの

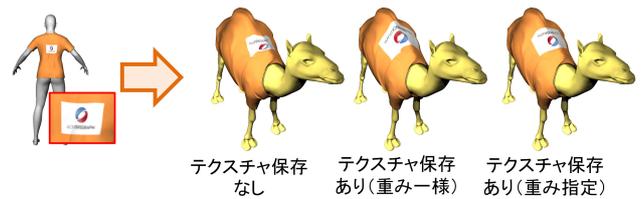


図 9 テクスチャ保存の結果 (重み指定)

Fig. 9 Results of texture preservation (user weight editing).

裏返りを防ぐことができる。現在の実装では  $\alpha = 1.0 \times 10^3$ ,  $\beta = 1.0 \times 10^{-1}$  とした。我々は、上記の線形最適化問題 (式 (1)) を反復的に算出する。反復回数に関しては、転写した衣装モデルの形状に依存するが、予備実験の結果 10 回程度で収束することが分かった。図 10 に示すように、重み係数を一様にするだけで、テクスチャを保持しつつ、総柄の衣装を転写することが可能になる。

### 3.3.2 ユーザ指定による部分的なテクスチャ保存機能

可展面制約を満たさない 3D モデルに対し、テクスチャ全体に歪みのない平面展開を行うことは困難である。そこで、我々は重み係数  $w_{ij}$  を調節することで、ユーザが保存したいテクスチャ部分を指定する機能を追加した。本稿では、ユーザ指定した個所の重み係数を  $w_{ij} = 1.0 \times 10^2$  とした。図 9 に示すように、重み係数を部分指定することによって、ラクダの衣装の背中のように曲率が大きい部分のテクスチャを保持した衣装転写を実現した。

## 4. 生成結果と評価

### 4.1 生成結果と評価

以上の手順によって生成した結果を図 10, 図 11 に示す。この結果から、本稿の衣装転写システムによって、総柄やアップリケを持つ衣装モデルを、様々な姿勢や体型のキャラクターに対し、衣装のフィッティングとテクスチャ情報を保持しつつ転写することが可能であることが確認できる。また本稿で定義した評価関数 (式 (7) と式 (11)) の収束の様子を図 13 に示す。処理速度に関しては、面の数が  $1.7 \times 10^4$  の CG キャラクタと面の数が  $1.4 \times 10^3$  の衣装モデルに対し、64 bit Windows PC (Intel®Core™ i7-3630QM CPU@2.40 GHz) を用いた場合スケール計算は約 10 秒、衣装転写には  $4.4 \times 10^{-1}$  秒、テクスチャ保存には  $2.5 \times 10^{-1}$  秒を要する。ただし、スケール測定の工程は、キャラクター間のスケール比を算出するにすぎず、事前計算することも可能である。つまり、本稿の衣装転写システムはユーザが早いフィードバックを得ながら、衣装モデリングをすることを可能にしたといえる (図 12)。

### 4.2 従来手法との比較

衣装転写の従来手法は、3D キャラクタの表面情報を利用した手法 [6], [7], [9] とボーンの情報を用いた手法 [10] に

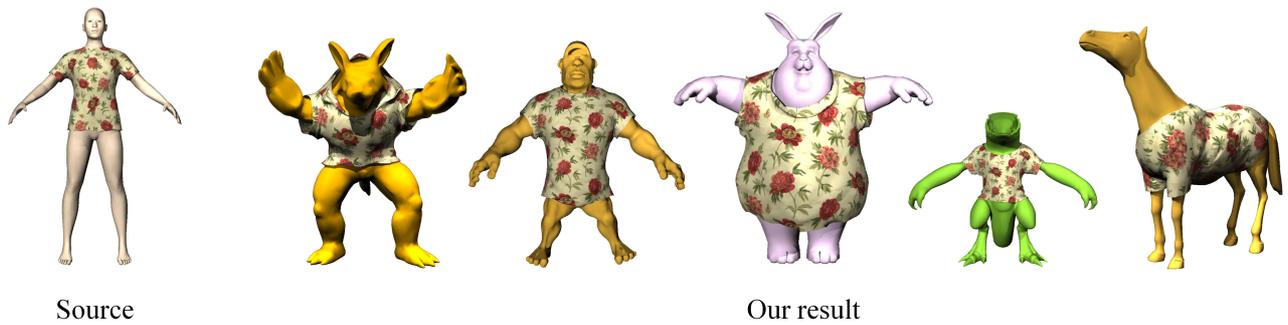


図 10 総柄の衣装の転写結果  
 Fig. 10 The result of Texture Preserving (constant weight).



図 11 複雑な衣装の転写結果  
 Fig. 11 The result of layered clothing.

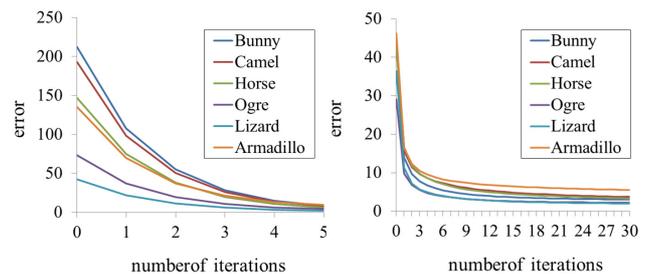


図 13 評価関数の収束  
 Fig. 13 Our optimization converges.



図 12 ユーザインタフェース  
 Fig. 12 Our prototype interface.

大別される。特に、ボーンの情報を用いる場合、前提条件として転写元キャラクターと転写先キャラクターに同じ構造のボーンを付与する必要がある。しかし、人体とウマやラクダ等の四足歩行動物は骨格自体が大きく異なるため、同じ構造のボーンを設定するのは現実的ではない。そこで本手法の有用性を検証するために、比較手法として人体モデルの表面情報を利用する Wang らの手法を用いる。

#### 4.2.1 フィットिंगの評価

提案手法で生成した衣装の形状の有効性を確認するために従来手法と比較検証を行った。比較手法として、Wang らの手法 [6]、バウンディングボックスを用いた手法および、絶対距離を用いた手法の 3 種類を用いた。バウンディングボックスを用いた手法とは、スケールを求める際に転写元キャラクターと転写先キャラクターのバウンディングボックスの体積比を用いたものである。実験に使用するデータ

として、衣装モデルは長袖 T シャツ、転写元は人体モデル、転写先はラクダの 3D モデルを用いた。それぞれの手法で生成した衣装モデルの結果を図 14 および、図 15 に示す。これらの結果から、提案手法は、人体モデルと衣装モデルのフィットिंगを保持した衣装転写を実現していることが確認できる。Wang らの手法は提案手法と比べ、衣装モデルのフィットिंगおよび裾の形状を保存できていないことが分かる。また、絶対距離を用いた場合、人体モデルと衣装モデルのフィットिंगを十分に再現していないことが確認できる。さらに、バウンディングボックスの体積比を用いた場合、キャラクターの局所的な部位をいっさい考慮せず、CG キャラクター全体の体積比をスケール比として算出する一方、提案手法は、キャラクターの局所的な部位を測定し、スケール比を算出する。それを基に衣装モデルの形状を最適化することで、フィットिंगを保持した衣装転写を実現した。

#### 4.2.2 テクスチャの評価

転写元の衣装モデルを半袖の T シャツ、転写先キャラクターをラクダとした場合の Wang らの手法 [6] と提案手法を図 16 に示す。この結果から、提案手法は転写した衣装モデルのテクスチャ情報の歪みを軽減できていることが確認できる。

### 5. まとめと今後の課題

本稿は 1 つのテンプレートとなる衣装モデルを基に様々なキャラクターに衣装モデルを生成する手法を提案した。具

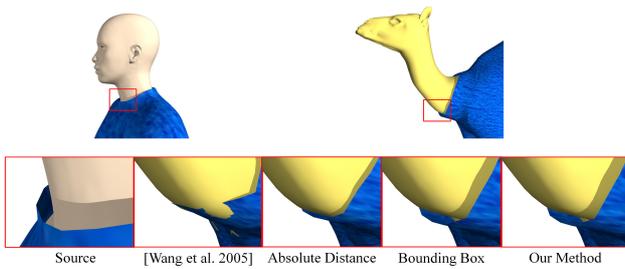


図 14 スケール測定に関する比較結果 (首元)

Fig. 14 Comparison of the effect of the scaling term (neck).

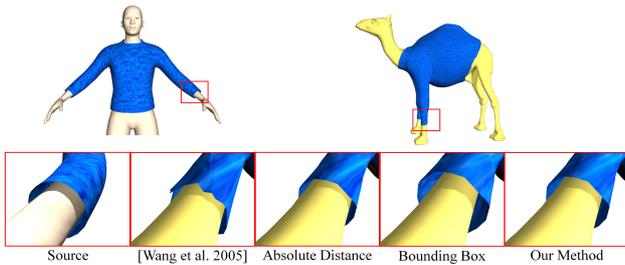


図 15 スケール測定に関する比較結果 (腕)

Fig. 15 Comparison of the effect of the scaling term (wrist).

体的には、衣装のフィッティングやデザイン（裾や袖の形状）を保存するための手法とテクスチャ保存技術も同時に提案し、その有用性も確認した。本手法により、様々なキャラクター間の衣装転写を可能とした。本稿の目的は、あくまでもキャラクター間のスケール比に基づく転写と、衣装のフィッティングやデザインを保持することである。つまり、スカートのように人体モデルと衣装モデル間における1対1の対応関係の取得が困難な場合を想定していない。今後はケーシングやボーン情報の利用した対応付けを想定し、より広い範囲の衣装モデルを転写する手法についても検討する。また、提案手法では細かい皺やたるみ等の体型に応じた物理的な特徴や、生成された衣装モデルの型紙への展開性が保障されていないことが課題となっている。今後、これらの課題を解決することで、CGキャラクターの衣装モデルを生成するだけでなく、現実世界のペットや人形用の衣装を生成するために、既存の衣装モデルを基に型紙を生成する衣装製造業界向けのシステムを目指したい。

### 参考文献

[1] Decaudin, P., Julius, D., Wither, J., Boissieux, L., Sheffer, A. and Cani, M.-P.: Virtual garments: A fully geometric approach for clothing design, *Computer Graphics Forum*, Vol.25, No.3, pp.625–634 (2006).  
 [2] Turquin, E., Wither, J., Boissieux, L., Cani, M.-P. and Hughes, J.F.: A sketch-based interface for clothing virtual characters, *IEEE Computer Graphics and Applications*, No.1, pp.72–81 (2007).  
 [3] Robson, C., Maharik, R., Sheffer, A. and Carr, N.: Context-aware garment modeling from sketches, *Computers & Graphics*, Vol.35, No.3, pp.604–613 (2011).  
 [4] Umetani, N., Kaufman, D.M., Igarashi, T. and



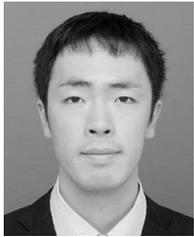
図 16 テクスチャ保存に関する比較結果

Fig. 16 Comparison of the effect of texture preservation.

Grinspun, E.: Sensitive couture for interactive garment modeling and editing, *ACM Trans. Graphics (TOG)*, Vol.30, No.4, p.90 (2011).  
 [5] Harmon, D., Panozzo, D., Sorkine, O. and Zorin, D.: Interference-aware geometric modeling, *ACM Trans. Graphics (TOG)*, Vol.30, No.6, p.137 (2011).  
 [6] Wang, C.C., Wang, Y. and Yuen, M.M.: Design automation for customized apparel products, *Computer-Aided Design*, Vol.37, No.7, pp.675–691 (2005).  
 [7] Wang, C.C., Hui, K.-C. and Tong, K.-M.: Volume parameterization for design automation of customized free-form products, *IEEE Trans. Automation Science and Engineering*, Vol.4, No.1, pp.11–21 (2007).  
 [8] Cordier, F., Seo, H. and Magnenat-Thalmann, N.: Made-to-measure technologies for an online clothing store, *IEEE Computer graphics and applications*, No.1, pp.38–48 (2003).  
 [9] Meng, Y., Wang, C.C. and Jin, X.: Flexible shape control for automatic resizing of apparel products, *Computer-Aided Design*, Vol.44, No.1, pp.68–76 (2012).  
 [10] Brouet, R., Sheffer, A., Boissieux, L. and Cani, M.-P.: Design preserving garment transfer, *ACM Trans. Graphics (TOG)*, Vol.31, No.4, p.36 (2012).  
 [11] Kraevoy, V. and Sheffer, A.: Cross-parameterization and compatible remeshing of 3D models, *ACM Trans. Graphics (TOG)*, Vol.23, No.3, pp.861–869 (2004).  
 [12] Takayama, K., Schmidt, R., Singh, K., Igarashi, T., Boubekeur, T. and Sorkine, O.: Geobrush: Interactive mesh geometry cloning, *Computer Graphics Forum*, Vol.30, No.2, pp.613–622 (2011).  
 [13] Summer, R.W. and Popovic, J.: Deformation transfer for triangle meshes, *ACM Trans. Graphics (TOG)*, Vol.23, No.3, pp.399–405 (2004).  
 [14] Kircher, S. and Garland, M.: Editing arbitrarily deforming surface animations, *ACM Trans. Graphics (TOG)*, Vol.25, No.3, pp.1098–1107 (2006).  
 [15] Ben-Chen, M., Weber, O. and Gotsman, C.: Spatial deformation transfer, *Proc. 2009 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation*, ACM, pp.67–74 (2009).  
 [16] Levin, A., Lischinski, D. and Weiss, Y.: Colorization using optimization, *ACM Trans. Graphics (TOG)*, Vol.23, No.3, pp.689–694 (2004).  
 [17] Aigerman, N., Poranne, R., Lipman, Y.: Lifted bijections for low distortion surface mappings, *ACM Trans. Graphics (TOG)*, Vol.33, No.4, p.69 (2014).  
 [18] Guan, P., Reiss, L., Hirshberg, D.A., Weiss, A. and Black, M.J.: DRAPE: DRessing Any PErson, *ACM Trans. Graphics (TOG)*, Vol.31, No.4, p.35 (2012).  
 [19] Li, D., Sueda, S., Neog, D.R. and Pai, D.K.: Thin skin elastodynamics, *ACM Trans. Graphics (TOG)*, Vol.32, No.4, p.49 (2013).  
 [20] Igarashi, T. and Igarashi, Y.: Implementing as-rigid-as-possible shape manipulation and surface flattening,

*Journal of Graphics, GPU, and Game Tools*, Vol.14, No.1, pp.17–30 (2009).

- [21] Igarashi, Y., Igarashi, T. and Suzuki, H.: Interactive cover design considering physical constraints, *Computer Graphics Forum*, Vol.28, No.7, pp.1965–1973 (2009).
- [22] 島崎恒蔵, 佐々井啓 (編): 衣服学 (シリーズ生活科学), 朝倉書店 (2000).
- [23] 佐々井啓 (編): 衣生活学 (シリーズ生活科学), 朝倉書店 (2000).



成田 史弥 (学生会員)

1991年生。2015年早稲田大学先進理工学部物理学科卒業。同年より同大学院修士課程に在学。2014年度より3Dコンピュータ・グラフィックスに関する研究に従事。2014年度IPA未踏クリエイター。ACM会員。



齋藤 隼介 (学生会員)

1991年生。2013年早稲田大学先進理工学部応用物理学科卒業。2014年同大学院修士課程修了。同年より同大学院博士後期課程に在学。2012年より動画処理、コンピュータグラフィックスに関する研究に従事。2014年よりペンシルバニア大学、2015年より南カリフォルニア大学にてResearch Scholarとして研究に従事。現在に至る。2014年度IPA未踏スーパークリエイター。ACM会員。



福里 司 (学生会員)

1990年生。2012年早稲田大学先進理工学部応用物理学科卒業。2014年同大学院修士課程修了。同年より同大学院博士後期課程に在学。2015年より日本学術振興会特別研究員(DC2)。コンピュータグラフィックス、動画処理に関する研究に従事。2015年米Adobe ResearchにてResearch Internとして研究に従事。2014年度IPA未踏クリエイター。2014年画像電子学会西田賞受賞。ACM会員。



森島 繁生 (正会員)

1959年生。1987年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。工学博士。同年成蹊大学工学部専任講師。1988年同助教授。2001年同電子工学科教授。2004年から早稲田大学理工学部応用物理学科教授、現在に至る。新潟大学非常勤講師を併任。1991年電子情報通信学会業績賞、2010年電気通信財団テレコムシステム技術賞受賞。画像電子学会副会長、芸術科学会理事、日本顔学会理事、日本音響学会、映像情報メディア学会、電子情報通信学会、日本心理学会、IEEE、ACM各会員。