

粒子系モデルによる衣服圧推定に関する研究

信州大学繊維学部 堀場洋輔・乾 滋・高寺政行・清水義雄

Study on Prediction of Clothing Pressure by using Particle Model

Yosuke Horiba, Shigeru Inui, Masayuki Takatera, and Yoshio Shimizu

Faculty of Textile Science & Technology, Shinshu University, 3-15-1 Tokida, Ueda, Nagano 386-8567,
Japan

Abstract: In this paper, we discussed the particle based mechanical model for numerical simulation of clothing pressure. Human body and clothing were represented as an elastic body by particle system, collision between human body and clothing was represented by impulse force based model. The two simulations were conducted to evaluate the validity of the suggested model. In the first simulation, clothing pressure on the elastic cylinder covered with cloth was predicted to evaluate the precision of static clothing pressure prediction. As a result, it was confirmed that it had the accuracy of 0.08 kPa, but there was a room for improvement to predict on the edge of cloth. Although it is considered that the mesh resolution (particle distance) caused the problem, it is important to decide a suitable mesh resolution for purpose because it is directly with calculation time. In the second simulation, we conducted the simulation that winding elbow with sleeve to evaluate the precision of dynamic clothing pressure prediction. As a result, it was observed that clothing pressure changed with elbow flexion. However it was not able to obtain the accurate result caused by numerical instability in the case of fast elbow flexion. It is considered that time step and collision model between clothing and human body on the simulation caused numerical instability. Improvement and implementation of the simulation considering whole body motion for dynamic clothing pressure prediction are our future work.

(Received 14 June, 2010 ; Accepted 7 October, 2010)

1. 緒 言

着衣時に衣服と人体との間に生じる衣服圧は、その発生原因として、(Ⅰ)衣服重量、(Ⅱ)衣服の緊迫(hoop tension)、(Ⅲ)動作に伴う人体形状の変形等が知られている[1]。数多くの先行研究から衣服圧は衣服の着心地と密接に関係していることが明らかになっており、そのため衣服設計において衣服圧を考慮することが非常に重要と考えられている[2-7]。

衣服圧を適切に考慮した設計を行なう場合、衣服圧の計測は不可欠であり、現在のところ計測方法として、直接方式と間接方式が提案されている。直接方式は、エアパックと呼ばれる小さな袋状のセンサにひずみゲージを接続し、ひずみゲージの抵抗変化から衣服圧を計測する方法である[8]。この方式は小型で高感度のセンサが多数開発されているため、容易に衣服圧を計測することが可能であるが、計測誤差が少なくないことや、有線のため動作や計測部位が制約されることなどの問題点が考えられる。一方、間接方式は、Kirk らによって提案された、衣服の張力と対象部位の曲率半径から間接的に衣服圧を求める方法である[9]。この方法は対象部位にセンサを装

着する必要はないものの、人体のような複雑な形状に対しては近似的な値になることや、上記(Ⅲ)のような動作に伴い経時的に変化する衣服圧の計測には不向きであること等が問題点として挙げられる。

そこで本研究では、コンピュータシミュレーションにより衣服圧を推定することを目的とする。シミュレーションによる衣服圧の推定が有利な点として、センサを装着する必要がないため、あらゆる条件・部位で推定が可能なことや、CAD 技術と連携させることによって設計段階での衣服圧の予測が可能になることが予想される。

これまでに発表された関連研究としては、有限要素法による衣服圧の予測が知られている[10-13]。たとえば庭屋らは、衣服を多数の弾性三角形要素で近似し、人体形状を拘束条件として衣服のポテンシャルエネルギーの平衡状態を求め、その時の接触抗力から衣服圧を推定している。翻って本研究では、有限要素モデルの代わりに粒子系モデルを用いる。粒子系モデルはコンピュータグラフィックスの分野で炎や水など複雑な挙動を示す流体を表現するために提案された手法であり、粒子間の相互関係を対象に応じて定義することにより様々な現象のモデル化が可能である[14-16]。筆者らは先行研究において布

に粒子系モデルを適用し、布の変形挙動を精密に予測している[17-19]。有限要素モデルと粒子系モデルの比較については、文献[20]で詳細に報告されているため本稿では割愛するが、粒子系モデルの利点として、実装が容易なことと、計算時間が比較的短いことを強調しておく。

人体モデルもまた、本研究が上記の先行研究と異なる点である。庭屋らは前述のように、人体形状を境界条件として扱っており、衣服圧算出の際には人体の弾性係数を考慮しているものの、人体の変形については考慮していない。同様に石丸、Zhangらのモデルも人体は剛体として扱われている。したがって、仮に高い衣服圧が人体に加わった場合でも人体が変形することがないため、衣服の種類や部位によっては衣服圧の推定精度が十分でない可能性がある。それに対して本研究では、人体に対しても粒子系モデルを適用し、外力による人体の変形を表現する。そのため、衣服圧を高い精度で推定することが可能と考えられる。

以上の理由から本研究では衣服と人体を粒子系モデルで表現し、衣服圧を推定する手法を提案する。本稿では、粒子系モデルによる衣服圧の推定方法について示し、精度の検証、さらに応用例として屈曲動作に伴う人体腕部の動的服装圧変化を推定した結果について報告する。

2. 理 論

シミュレーションにより衣服圧を推定するためには、布および人体の力学モデル、さらに布と人体との間のインタラクションを表現する衝突・反発・摩擦モデルが必要になる。ここではそれらの数理モデル、および衣服圧の推定方法について記述する。

2.1 布の力学モデル[17]

本研究では粒子系モデルにより布の力学挙動を表現する。粒子系モデルではFig. 1のように格子状に配置された粒子(質点)において、隣接する粒子間に重力等の外力と、伸張応力、曲げ応力、せん断応力の内力に相当する

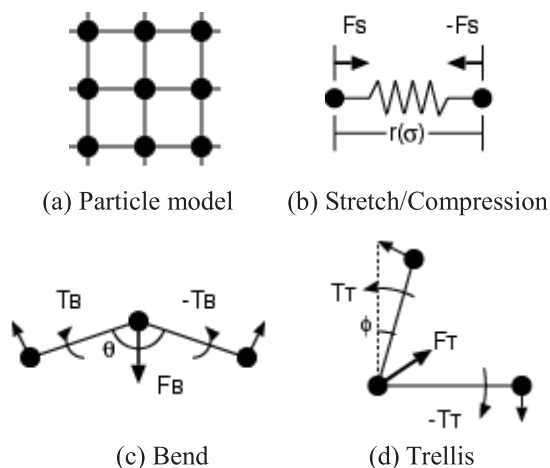


Fig. 1 Representation of cloth using particle model.

相互作用力を定義し、質点ごとに式(1)の運動方程式を解くことによって布の変形挙動を表現する。

$$m_i \frac{d\mathbf{v}(t)}{dt} + c\mathbf{v}_i(t) = \mathbf{F}_i^{in}(t) + \mathbf{F}_i^{ex}(t) \quad (1)$$

ここで、 m_i は粒子 i の質量、 $\mathbf{v}_i(t)$ は時刻 t における粒子 i の速度、 c は粘性係数、 \mathbf{F}_i^{in} 、 \mathbf{F}_i^{ex} はそれぞれ粒子 i に働く内力、外力である。また、KES試験から求めた布の力学特性を変形回復応力関数として定義し、式(1)の内力 \mathbf{F}_i^{in} に反映させることにより、素材による変形挙動の違いを再現した。

2.2 人体の力学モデル

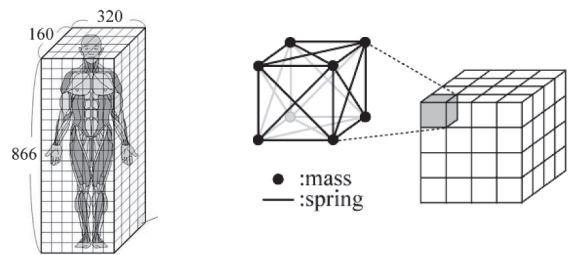
近年では計測技術の発展に伴い、距離画像データによる人体形状の取得[21]、モーションキャプチャによる動作の取得[22]が容易に行なえる状況にある。しかしながら、人体の力学挙動を正確に再現するためには、人体の表面形状・動作に加え、骨格や皮下組織などの幾何形状、さらに軟部組織の硬さ等の生体力学特性を知る必要がある。そこで本研究では、ボクセルで表現された数値人体モデルを利用し、ボクセルの頂点に粒子を配置し、布モデルと同様に隣接する粒子間に相互作用力を定義することにより人体の変形挙動を表現する。

Fig. 2(a)は独立行政法人通信情報研究機構を中心としたグループによって開発された数値人体モデルである[23]。モデルは全身が約4434万個のボクセルにより構成されており、さらに各ボクセルには人体組織ごとに組織番号が割り振られている。本研究ではFig. 2(b)のようにボクセルの頂点に粒子を配置し、ボクセルの稜線および対角線上で隣接する粒子間に式(2)の弾性力を定義することにより人体の力学挙動を表現する。

$$\mathbf{F}_i^e(t) = \sum_{j=1}^n k_{ij} (\|\mathbf{x}_i(t) - \mathbf{x}_j(t)\| - l_{ij}) \frac{\mathbf{x}_i(t) - \mathbf{x}_j(t)}{\|\mathbf{x}_i(t) - \mathbf{x}_j(t)\|} \quad (2)$$

ここで、 \mathbf{F}_i^e は粒子 i に作用する弾性力、 \mathbf{x}_i は粒子 i の位置、 \mathbf{x}_j は隣接する粒子 j の位置、 k_{ij} は粒子 $i \cdot j$ 間の弾性定数、 l_{ij} は粒子 $i \cdot j$ 間の初期長、 n は隣接する粒子 j の個数である。

なお、 k_{ij} は人体軟組織の硬さに相当する定数であり、接触インピーダンス式硬度計測[24,25]等から決定することが可能である。また、骨部については剛体として近似



(a) Whole-Body voxel model (b) Particles arrangement

Fig. 2 Representation of human body using voxel model [23].

し、該当するボクセルにおける粒子の相対位置を不変とする。

2.3 衝突・反発・摩擦モデル

本研究では、粒子(質点)を頂点とする三角形要素を用いて布および人体の形状を離散近似している。そのため、布同士の自己衝突、および布と人体の衝突は、三角形要素同士の衝突・反発・摩擦現象として考えることが可能である。筆者らは既にこれらのモデルについて提案を行っており[26]、本研究においても同様の衝突・反発・摩擦モデルを用いる。衝突モデルの実装に当たっては衝突の瞬間のみ物体表面を連続体(三角形要素)と近似し、三角形要素同士の衝突判定・衝突点検出を行ない、衝突点における相対速度の法線方向成分から衝突力(撃力)を計算する。反発モデルでは衝突力が加わった際の三角形要素の速度・角速度から反発力を算出する。また、摩擦モデルでは衝突点における相対速度の接線方向成分からクーロン摩擦力を算出する。以上の処理により算出された反発力と摩擦力は、式(1)における外力 \mathbf{F}^e の一部として各質点に反映される。

一般に衝突・接触のモデルとしては、ペナルティ法[27,28]、撃力ベース法[29]、制約ベース法[30,31]等が知られており、本研究のモデルは撃力ベース法に分類される。撃力ベース法は、衝突を撃力により表現しているため、ペナルティ法等に比べ正確なシミュレーションが可能である。

2.4 衣服圧の推定方法

本研究では布モデルと人体モデルが接触した際の人体モデル表面の法線方向に作用する力(内力 \mathbf{F}_i^m と外力 \mathbf{F}_i^e の法線方向成分)から衣服圧を推定する。シミュレーションへの実装では、布モデルおよび人体モデルの表面を三角形要素によって表現しているため、接触状態にある三角形要素を特定し、布モデルの三角形要素から人体モデルの三角形要素へ加わる力を求める必要がある。三角形要素同士の接触では、Fig. 3 のように点と面(以下、点/面接触と略す)、あるいは辺と辺(以下、辺/辺接触と略す)が接触する可能性があることから、ここでは点/面接触および辺/辺接触における圧力の算出方法について述べる。さらに、撃力ベースのシミュレーションにおいて発生する数値振動の影響を考慮した圧力の補正方法についても提案する。

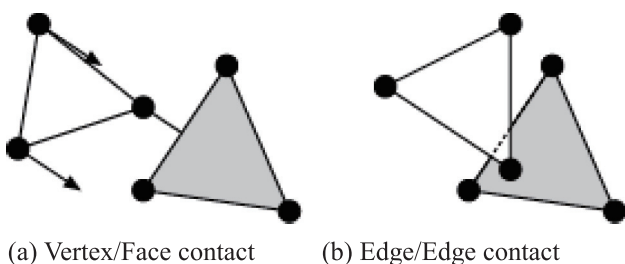


Fig. 3 Contact type between two triangular faces.

2.4.1 点/面接触における圧力の算出

点/面接触の場合、Fig. 4 のように接触状態によって2つの状態が考えられる。1つはFig. 4(a)のように、布モデルの三角形要素(白)の頂点が人体モデルの三角形要素(黒)の面に接触する状態であり、もう1つはFig. 4(b)のように布モデルの三角形要素の面が人体モデルの三角形要素の頂点に接触する状態である。

Fig. 4(a)の場合は、時刻 t における布モデルの三角形要素 A の頂点 $\mathbf{X}_i(t)$ と人体モデルの三角形要素 B の面との接触を考える。三角形要素 A の頂点 $\mathbf{X}_i(t)$ に作用している力を $\mathbf{F}_i(t)$ 、三角形要素 B の単位法線ベクトルを $\hat{\mathbf{n}}(t)$ 、三角形要素 B の面積を S とすると、三角形要素 B に作用する圧力 P は以下のように計算する。

$$P(t) = \frac{\mathbf{F}_i(t) \cdot \hat{\mathbf{n}}(t)}{S} \quad (3)$$

Fig. 4(b)の場合は、三角形要素 A の面と三角形要素 B の頂点パティクルとの接触を考える。三角形要素 A の各頂点 $\mathbf{X}_i(t)$, $\mathbf{X}_j(t)$, $\mathbf{X}_k(t)$ に作用している力をそれぞれ $\mathbf{F}_i(t)$, $\mathbf{F}_j(t)$, $\mathbf{F}_k(t)$ とし、三角形要素 A における接触点を $\mathbf{P}(t)$ とする。この接触点 $\mathbf{XX}(t)$ における力 $\mathbf{F}(t)$ は、有限要素法における1次三角形要素の物理量近似と同様に形状関数(N_1 , N_2 , N_3)を用いて式(4)から求め、三角形要素 B に作用する圧力はFig. 4(a)の場合と同様に式(3)により計算する。

$$\mathbf{F}(t) = N_1 \mathbf{F}_i(t) + N_2 \mathbf{F}_j(t) + N_3 \mathbf{F}_k(t) \quad (4)$$

2.4.2 辺/辺接触における圧力の算出

辺/辺接触は、Fig. 5 に示すような頂点の接触を伴わない三角形要素の接触である。辺/辺接触では三角形要素 A の辺と三角形要素 B の辺を考え、三角形要素 A が三角形要素 B に接触している辺上の接触点 $\mathbf{XX}(t)$ における力は、有限要素法における1次要素と同様に両端の粒子 $\mathbf{X}_i(t)$ と $\mathbf{X}_j(t)$ に加わる力から式(5)の直線補間により求め、式(3)より三角形要素 B に作用する圧力を算出する。

$$\mathbf{F}(t) = N_1 \mathbf{F}_i + N_2 \mathbf{F}_j \quad (5)$$

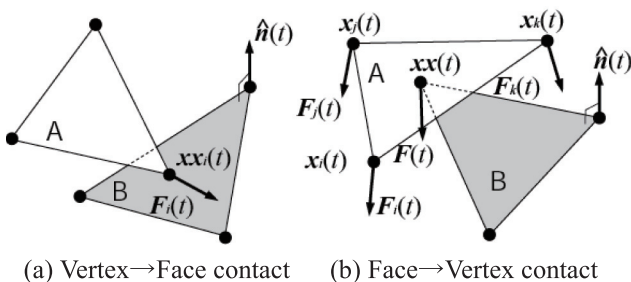


Fig. 4 Cases on Vertex/Face contact.

2.4.3 数値振動を考慮した圧力の推定

本研究では衝突処理を撃力ベースで行なっているため、実際には布と人体が接触している場合であっても、シミュレーションでは数値振動により断続的に非接触状態が生じ、正確な圧力推定ができない場合がある。そこで、シミュレーションで得られたある時刻における圧力をそれ以前の圧力の単純移動平均により補正を行なう。時刻 t 以前の一定時間内の接触状態において算出された圧力を $P(t_1), P(t_2), \dots, P(t_n)$ とすると、時刻 t における $P(t)$ は次式より算出する。

$$P(t) = \frac{\sum_{i=1}^n P(t_i)}{n} \quad (6)$$

単純移動平均で圧力を補正することにより、Fig. 6 のような非接触と見なされる時間においても圧力を推定することが可能になり、また、数値的不安定により極端に高い圧力、あるいは低い圧力が算出された場合でもその影響を軽減する効果がある。なお、数値振動による非接触状態と真の非接触状態は、一定時間内の接触の時間間隔の分散を確認することで判別が可能である。すなわち、数値振動が生じている場合は時間間隔の分散が小さくなり、その場合は式(6)の圧力補正を行なう必要がある。

3. 実験

提案したモデルを用い、布と人体を想定した弾性体との間に働く圧力をシミュレーションにより推定した。まず、シミュレーションの妥当性を検証するために、プリミティブな形状の弾性体と布の間に働く圧力をシミュレーションにより推定し、同一条件における実測値との

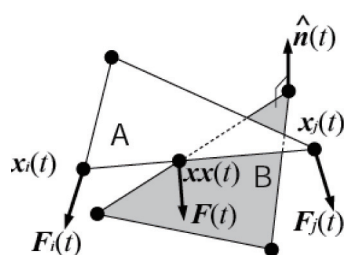


Fig. 5 Cases on Edge/Edge contact.

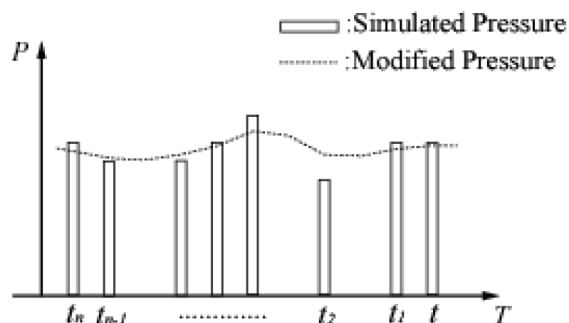


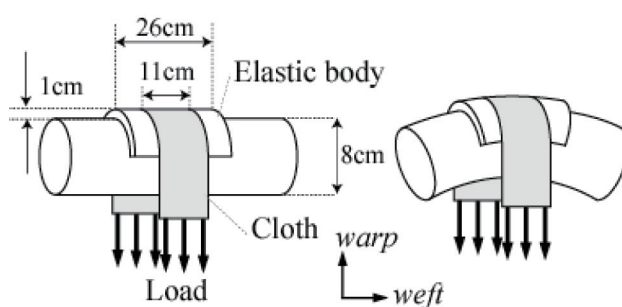
Fig. 6 Numerical oscillation and Pressure.

比較を行なった。その後、検証実験の結果を踏まえ、動作による動的な衣服圧変化をシミュレーションにより推定した。なお、数値計算法には陽解法(4次のルンゲ・クッタ法)を用い、シミュレーションは Microsoft Visual C++ 2008 Express Edition により実装し、Intel Pentium4 3.06GHz, RAM1024MB 搭載の WindowsXP PC 上で実行した。

3.1 布と弾性物体の接触シミュレーション

3.1.1 シミュレーション条件

Fig. 7 のように弾性体(ニトリル発砲ゴム)で被覆された円柱(アルミ製蛇腹パイプ)をポリエステル製織布で覆い、曲率の異なる円柱表面の圧力および布の形状を推定するシミュレーションを行なった。円柱の直径は 8.3[cm]、円柱を被覆している弾性物体は 26[cm]×15[cm]×1[cm]、布は 11[cm]×30[cm]とし、円柱の側面の曲率は 0(円柱)、0.043, 0.072[1/cm]の3条件とした。また、検証実験で用いる圧力センサの感度を考慮し、布の両端にそれぞれ 266[gf]の荷重を加えた。Table 1 にシミュレーションにおける各パラメータを、Table 2 に布モデルの面積密度および力学特性の近似式を、Table 3 に弾性体モデルの体積密度および力学特性を示す。なお、Table 1 の粘性係数、反発係数、時間刻み幅については、数値的不安定と、接触処理における「抜け(弾性物体への布の食い込み)」を避けるように経験的に決定し、摩擦係数については、実験で用いた弾性物体と織布の間の動摩擦係数の計測値を与えた。また、Table 2 の布モデルの力学パラメータは、検証実験で用いる試料の KES 試験(カトーテック社製 KES-FBI, KES-FBII)結果を多項式近似し、それらを変形回復応力関数とした。また、Table 3 の弾性体モデルの力学パラメータは、硬度計測(アクシム社製ビーナストロン)により得られるセンサの押し込み荷重、押し込み深さ、接



(a) Curvature: 0 (b) Curvature: 0.043, 0.072[1/cm]

Fig. 7 Simulation condition.

Table 1 Parameter for the simulation.

Parameter	
Viscosity coefficient	8.2
Repulsion coefficient	0.05
Friction coefficient	0.3
Time step[s]	10×10^{-5}

触半径の結果に弾性体モデルが一致するようにパラメータを最適化した。

3.1.2 検証方法

検証実験では、シミュレーションと同一条件で布形状および円柱表面の圧力を計測した。布形状は画像による定性的な比較と、三次元形状計測によりによる定量的な比較を行なった。三次元計測では布形状を対称と見なし、Fig. 8(a)に示すように布片面に3 cm間隔で30個の基準点を定義し、ミノルタ社製非接触3次元デジタイザVIVID 700を用いて位置を計測した。一方、圧力計測ではエアパック式接触圧計(エイエムアイ・テクノ社製A0101-G35KG 100K, センサ直径:2cm)を用い、円柱を被覆している弾性物体表面の圧力を求めた。計測箇所は形状の対称性を考慮し、Fig. 8(b)に示すように左半分における3つの断面(A, B, C)上の各7点とした。また、圧力の計測は各条件で5回ずつ計測し、その平均値を実測値とした。

3.2 布と人体腕部の接触シミュレーション

着衣の動作拘束性・追従性と衣服圧の関係に着目すると、被服設計においては静的な状態での衣服圧だけではな

く、動作等に伴う動的な圧力変化も重要な要因であることが知られている[32]。また、粒子系モデルは動的現象を比較的容易にシミュレートできることから、ここでは屈曲動作に伴う衣服圧の動的変化について予測を行なった。

3.2.1 シミュレーション条件

袖に腕を通した状態をシミュレートし、肘関節の屈曲に伴う動的な衣服圧変化を推定した(Fig. 9(a))。袖のサイズは長さが30[cm]、周囲長が32[cm]とし、人体は2.2節で述べた数値人体モデルとした。Fig. 9(b)は構築した腕部モデルの表面形状であり、Fig. 9(c)は腕内部の骨格に相当する粒子を黒丸で示したものである。肘の屈曲動作を再現する際には、上腕に相当する粒子を固定し、肘を中心に前腕に相当する粒子を回転させる。シミュレー

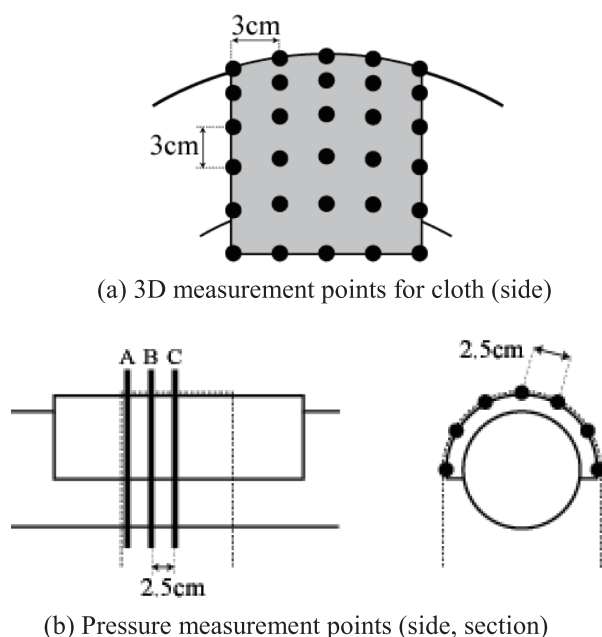
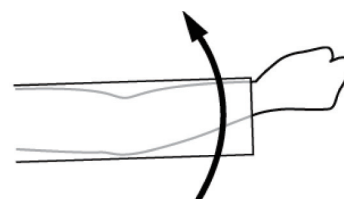


Fig. 8 Comparison experiment.



(a) Elbow flexion with clothing



(b) Surface model



(c) Skelton model

Fig. 9 Simulation for elbow flexion.

Table 2 Parameters and approximation of function denoting mechanical properties for the cloth.

Parameter		
Separation force $F_s(\epsilon)$ [gf/cm]	warp	$-9.3758\epsilon + 9.7826\epsilon^2$
	weft	$-0.6392\epsilon + 1.0630\epsilon^2$
$\therefore \epsilon$: strain [%]		
Bending moment $M(K)$ [gf·cm/cm]	warp	$0.0128K^{1/2} + 0.0375K + 0.0191K^2$
	weft	$0.0097K^{1/2} + 0.0246K + 0.0192K^2$
$\therefore K$: Curvature [1/cm]		
Trellising force $F_t(\phi)$ [gf/cm]	warp	$0.392\phi^{1/2} + 0.3075\phi + 0.0365\phi^2$
	weft	$0.324\phi^{1/2} + 0.288\phi + 0.0254\phi^2$
$\therefore \phi$: Trellising angle [°]		
Density [g/cm ²]		0.01675
Initial particle distance [cm]		1.0

Table 3 Parameter for the elastic body.

Parameter	
Spring constant for edge [gf/cm]	7.2×10^3
Spring constant for diagonal [gf/cm]	2.5×10^3
Viscosity coefficient	6.0
Density [g/cm ³]	0.1037
Initial particle distance [cm]	1.0

ションでは角速度を $45[^\circ/\text{s}]$ とし、肘を伸ばした状態から肘関節角度が 60° になるまで回転させた。Table 4 に弾性人体モデルの力学特性を示す。人体モデルのパネ定数は、身長 174.5cm、体重 60 kg、23 歳男性の人体腕部を前節と同様に硬度計測して求めた。シミュレーションパラメータおよび布モデルの力学特性は前節と同一である。

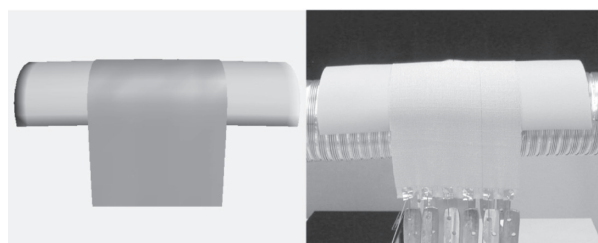
4. 結果および考察

4.1 布と弾性物体の接触シミュレーション

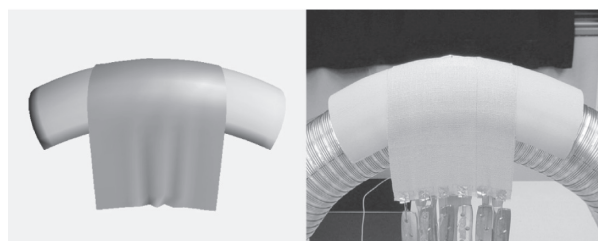
曲率の異なる各条件における布(灰色)と円柱を被覆する弾性体(黄色)の形状を Fig. 10 に示す。左右の図はそれぞれ、シミュレーションおよび計測の結果であり、シミュレーション結果については円柱を表示せず、布と弾性物体のみを示している。計測結果から曲率の増加に伴い、

Table 4 Parameter for the human body.

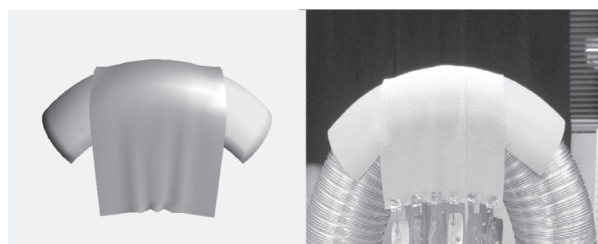
Parameter	
Spring constant for edge [gf/cm]	1.6×10^3
Spring constant for diagonal [gf/cm]	0.9×10^3
Viscosity coefficient	2.0
Density [g/cm^3]	1.0156
Initial particle distance [cm]	0.8



(a) Curvature: 0[1/cm]



(b) Curvature: 0.043[1/cm]



(c) Curvature: 0.072[1/cm]

Fig. 10 Comparison of shape between simulation (left) and measurement (right).

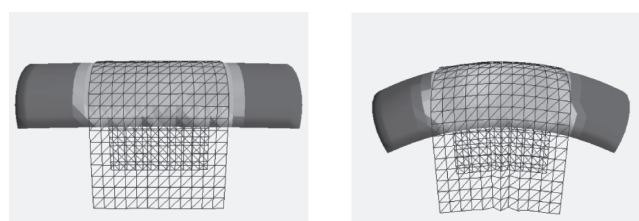
布の垂直方向に皺が生じ、さらに布の左右両端の中央部では弾性物体との間に空隙が形成されることが観察された。これらの現象はシミュレーションにおいても同様に確認された。さらに曲率 $0.072[1/\text{cm}]$ において三次元計測から得られた布表面上の基準点座標と、シミュレーションにより推定された対応する位置座標の差をウィルクスの Λ により有意水準 5% で検定を行なった結果、有意差が認められないことが確認された(Table 5)。したがって、シミュレーションにより予測された形状は十分な精度を有することが明らかになった。

次に衣服圧推定結果について検証する。Fig. 11 はシミュレーションにより推定した弾性物体に作用している圧力分布を曲率ごとに示したものである。図より、曲率 $0[1/\text{cm}]$ では比較的均一であった圧力分布が曲率の増加に伴い中央部に集中し、その部分の圧力が増加する傾向が見られた。これは弾性物体が凸状になるにしたがい、弾性体の左右両端において空隙が形成されることにより接触面積が減少し、結果として圧力が増加したためと考えられる。

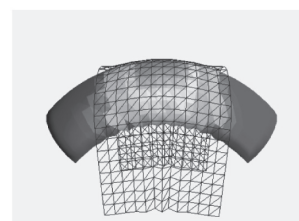
Fig. 12 は、Fig. 11 に示した円柱中央から左側の 3 つの断面(A, B, C)における 7 つの位置($-\pi/2$, $-\pi/3$, $-\pi/6$, 0 ,

Table 5 Analysis of differences in coordinate between simulation and measurement.

Statistics	
df1	3
df2	56
F value	0.046
P value	0.9865



(a) Curvature: 0[1/cm] (b) Curvature: 0.043[1/cm]



(c) Curvature: 0.072[1/cm]

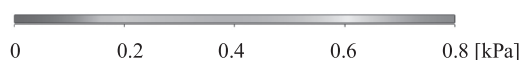
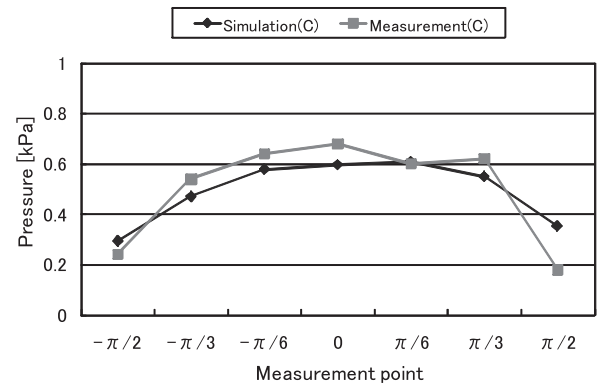


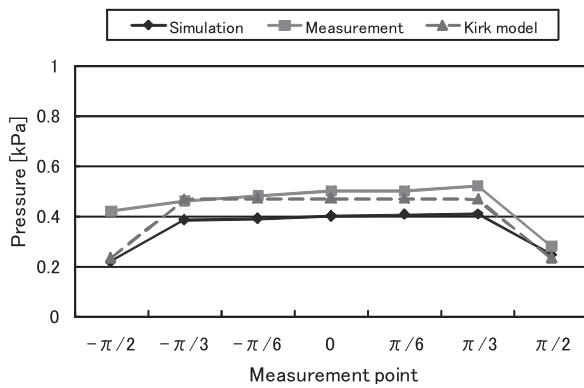
Fig. 11 Pressure distribution predicted by simulation.

$\pi/6, \pi/3, \pi/2$)での圧力を, シミュレーションと計測で比較したものである。なお, 曲率 $0[1/cm]$ においては3つの断面で圧力分布が同一であるため, 断面Cにおける結果のみ示しており, さらに衣服圧のモデルとして知られている Kirk らのモデル[9]による予測結果についてもシミュレーションの妥当性の目安として付記した。

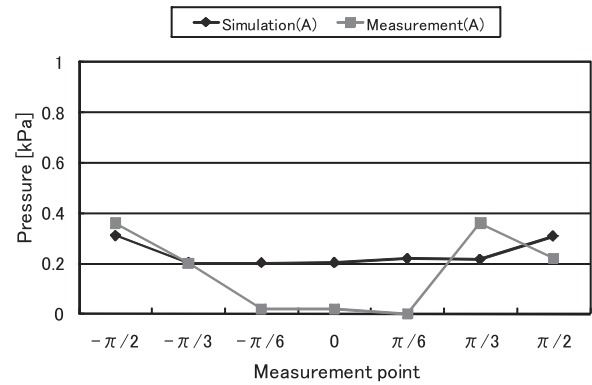
曲率 $0[1/cm]$ の場合, 円柱の中心から $\pm\pi/3$ の範囲ではシミュレーション, 計測ともに圧力はほぼ均一であり, シミュレーションでは平均 $0.40[kPa]$, 計測では平均 $0.51[kPa]$ であった。また, Kirk らのモデルによると圧力は $0.46[kPa]$ であった。中心から $\pm\pi/2$ の位置においては, シミュ



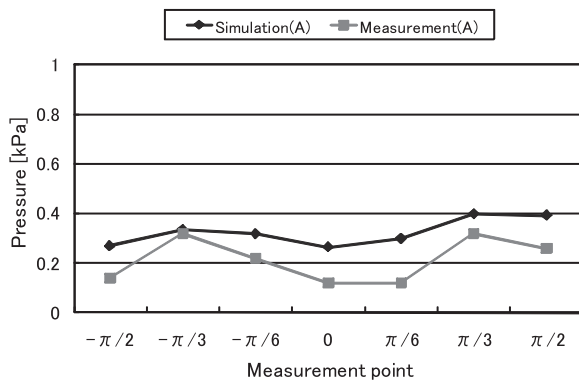
(d) Section C at Curvature: 0.042[1/cm]



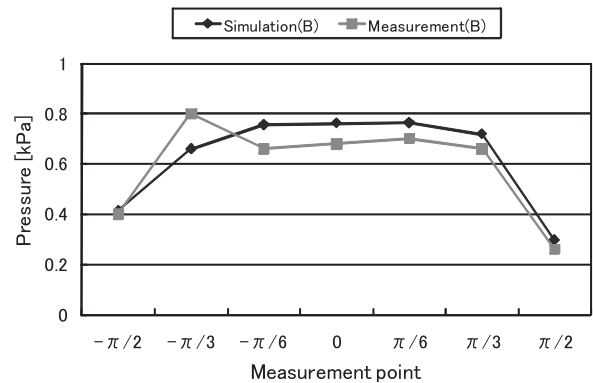
(a) Curvature: 0[1/cm]



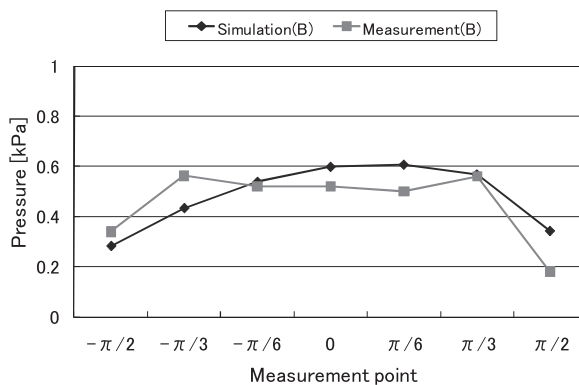
(e) Section A at Curvature: 0.072[1/cm]



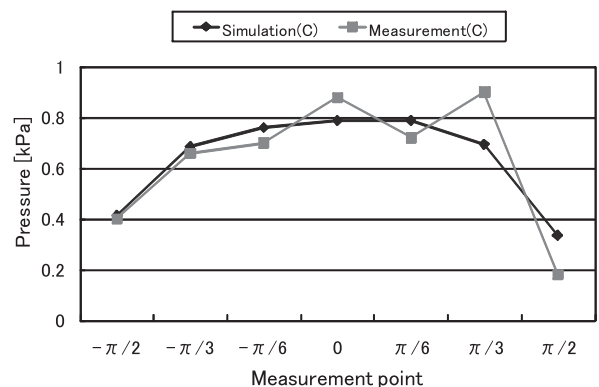
(b) Section A at Curvature: 0.042[1/cm]



(f) Section B at Curvature: 0.072[1/cm]



(c) Section B at Curvature: 0.042[1/cm]



(g) Section C at Curvature: 0.072[1/cm]

Fig. 12 Comparison of pressure distribution between simulation and measurement.

レーション、計測ともに周辺に比べ圧力が低いことが確認された。曲率 $0.042[1/\text{cm}]$ の場合は、弾性物体が凸状になるため、シミュレーション、計測ともに断面ごとに異なる圧力分布となった。Fig. 12(b)～(d)から、相対的に布中央部の断面 C の圧力が高く、逆に端部の断面 A の圧力は低い結果となった。シミュレーションと計測結果を比較してみると、断面 A においておよそ $0.11[\text{kPa}]$ の誤差が認められるものの、断面 B、C においては比較的一致していることが確認された。

曲率 $0.072[1/\text{cm}]$ の場合は、曲率 $0.042[1/\text{cm}]$ の場合と同様に中央部の断面 C の圧力が相対的に高く、端部に近づくにしたがって圧力が低下する傾向が見られた。特に計測の場合は、端部の断面 A の $\pm\pi/6$ の範囲では圧力はほぼ 0 となっていることが確認された。シミュレーションと計測結果を比較してみると、曲率 $0.042[1/\text{cm}]$ のと同様に布端部の断面 A において比較的大きな誤差が確認されているものの、断面 B、C においてはシミュレーションの誤差が少ないことが明らかになった。

以上の結果について定量的に検証するために、シミュレーションと計測結果について対応のある t 検定(両側検定)を行なった(Table 6)。検定の結果、曲率を問わず布端部の断面 A においては、シミュレーションと計測結果の間で有意な差があることが明らかになった。つまり、布の境界部分においてはシミュレーション結果が十分な精度を有していないことが示唆された。一方、断面 B、C においては両者に有意な差が認められなかったことから、十分に布で被覆されている部分においてはシミュレーションの精度が保証されることが示唆された。

次にシミュレーション結果について考察する。シミュレーションでは多くの条件において、推定された圧力が計測値よりも低い傾向が見られた。この理由として、シミュレーションにおける布および弾性物体の幾何形状の影響が考えられる。本シミュレーションでは、布および弾性物体表面を三角形要素で表現し、圧力推定の際には接触状態にある三角形要素を特定し、式(6)に基づき計算を行なっている。式(6)の分母に当たる接触面積はシミュレーションでは弾性物体表面の三角形要素の面積に相当し、このため三角形要素を構成する粒子間距離(メッシュの解像度:本研究では、布、人体モデルともに 1.0 cm)により推定値が影響される。Fig. 13 は、メッシュ解像度が異なる場合の接触状態を示したものである。三角形要素のサイズが大き(メッシュ解像度が低い)場合、推定される圧力はその領域(三角形要素)の平均値となり、結果的に計測値よりも低くなることが予想される。

同様に曲率 $0.042, 0.072[1/\text{cm}]$ の断面 A におけるシミュレーション結果の誤差についてもメッシュの解像度が原因として考えられる。シミュレーションではこれらの位置において布と弾性物体の間に空隙が確認されるものの、圧力推定位置に該当する三角形要素はある程度の大きさを有しているため、一部でも接触が検出されると結果的

にその領域の圧力は 0 以上となる。

上記の問題を改良する方法として、メッシュ解像度を高めることが考えられるが、メッシュ解像度は計算コストとトレードオフの関係にあるため、一様に解像度を高めることは現実的ではない。したがって、衣服圧推定の用途に応じて解像度を決定することが重要であると考えられる。

4.2 布と人体腕部の接触シミュレーション

袖に腕を通した状態で肘関節を屈曲した際の、形状および衣服圧の推定結果を Fig. 14 示す。図左段の形状変化から、腕の屈曲に伴い肘窩の周辺で布皺が顕著になっていく様子が確認できる。また、図右段の衣服圧変化より、布と人体が接触している部分で圧力が生じている様子が観察され、屈曲の初期には前腕内側に圧力が生じ、屈曲が進むにつれて前腕内側に加え肘頭周辺にも相対的に高い圧力が生じている様子が確認できる。屈曲動作を通して最も高い圧力を示したのは、肘関節角度が 60° における肘頭部であり、その値は $0.53[\text{kPa}]$ であった。前節の実験では圧力推定誤差がおよそ $0.08[\text{kPa}]$ であったことから、大まかな目安として肘頭部に加わる圧力は $0.45\sim0.61[\text{kPa}]$ の範囲であることが推測される。

なお、シミュレーションでは肘関節の角速度を $45[^\circ/\text{s}]$ としたが、角速度がそれ以上に速い場合は計算が数値的不安定になり、結果を得ることができなかった。動作に伴う姿勢変化の速度は、布の粘弾性的性質や人体と衣服の衝突に深く関連し、ひいては動作時の快適性にも影響

Table 6 Analysis of differences in pressure between simulation and measurement (○: No significant difference, ×: Significant difference at $P<0.01$ between simulation and measurement).

Section/ Curvature $[1/\text{cm}]$	A	B	C
0		—	×
0.042	×	○	○
0.072	×	○	○

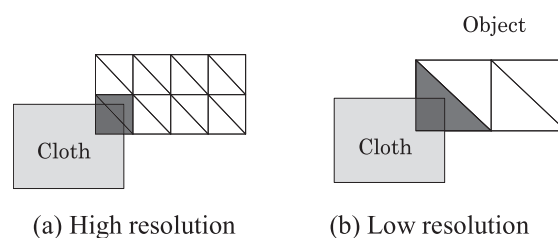


Fig. 13 Influence of mesh resolution on pressure calculation; A contact area (red) detected in the low mesh resolution (b) is larger than the high mesh resolution (a). As a result, the pressure calculated in the low mesh resolution is lower than the high resolution.

を及ぼすと考えられる。本研究のシミュレーションにおける数値不安定性の問題は、数値計算における時間刻み幅や布と人体の間の衝突処理が原因として考えられる。また、数値解法で用いたルンゲ・クッタ法をはじめとする陽解法は、解が不安定になりやすいことが知られている。したがって、前述の計算コストの問題に加え、陰解法の適用、衝突モデルの修正を今後の課題としていきたい。

5. 結 言

本研究では粒子系モデルで表現された布および人体モデルを用いたシミュレーションによる衣服圧推定について検討した。まず静的な状態で、曲率の異なる弾性物体に布を懸垂させた場合の圧力をシミュレーションにより推定したところ、曲率の大きい場合には十分な精度を有するものの、曲率が0の場合や布端部(断面A)においては改善の余地があることが明らかになった。この原因についてはモデルのメッシュ解像度(粒子間距離)の影響が考えられるが、計算コストに直結する問題であるため用途に応じた慎重な対応が必要であることが示唆された。次に動的な状態で衣服圧を推定するために、袖を通した状態で肘を屈曲させるシミュレーションを行なった。その結果、肘の屈曲が進むにしたがい衣服圧が発生する部位と大きさが変化していく様子を鮮明に観察できた。ただし、屈曲動作がある速度以上になると数値的不安定のために正しい結果を得ることができなかった。この原因としては、数値計算における時間刻み幅や撃力・反発力等の衝突処理、ならびに数値計算に用いた陽解法の影響が考えられる。今後は上記の問題点を改善することに加え、シミュレーションの対象を全身に拡大し運動時の動的な衣服圧変化等の推定についても取り組む予定である。

謝 辞

本研究を遂行する上で不可欠な数値人体モデルデータベースの使用を許可して頂いた独立行政法人情報通信研究機構、ならびにシミュレーションの実装において協力して頂いた本学大学院修士の佐藤賢二郎君に感謝の意を表す。また、本研究の一部は文部科学省グローバルCOEプログラム「国際ファイバー工学教育研究拠点」、ならびに財団法人上田繊維科学振興会 平成20年度研究助成による支援を受けた。

文 献

1. T. Nakajima, E. Kaneko, H. Shimizu, H. Gocho, and M. Muta, "Gaisetsu Hifukuzairiyogaku", Tokyo, Koseikan, p.182 (1986).
2. N. Ito and M. Takeuchi, *Kaseigaku Zasshi*, **45**, 311 (1994).
3. K. Sasaki, K. Miyashita, M. Edamura, T. Furukawa, Y. Shimizu, and H. Shimizu, *Sen'i Seihin Shohi Kagaku*, **38**, 53 (1997).

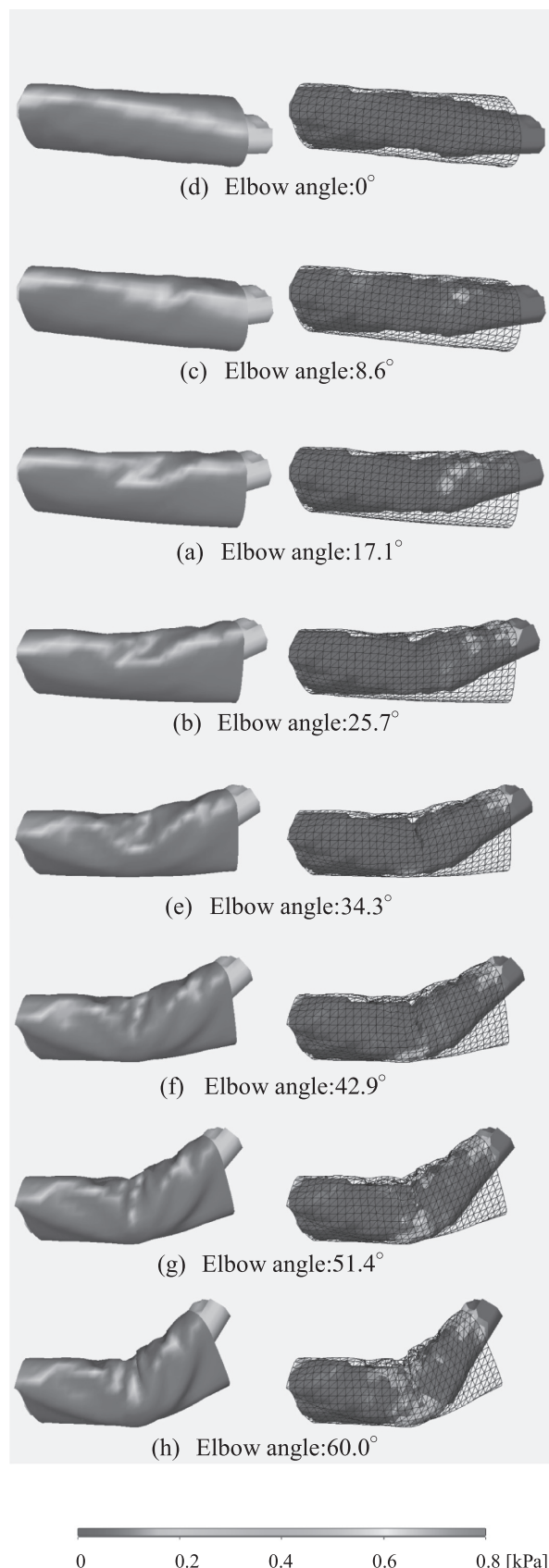


Fig. 14 Results of Simulation for elbow flexion : (left) shape, (right) pressure.

4. H. Morooka, R. Fukuda, H. Sasaki, and H. Morooka, *Sen'i Gakkaishi*, **62**, 287 (2006).
5. T. Mitsuno, *Sen'i Gakkaishi*, **64**, 419 (2008).
6. C. Shimosaka, I. Nakada, M. Ishigaki, and M. Inomata, *Kaseigaku Zasshi*, **59**, 29 (2008).
7. H. Kanai, H. Tsuji, M. Kamijo, Y. Matsumoto, and T. Nishimatsu, *Sen'i Gakkaishi*, **63**, 159 (2007).
8. N. Ito, *Kaseigaku Zasshi*, **44**, 291 (1993).
9. Wm. Kirk and S. M. Ibrahim, *Text. Res. J.*, **36**, 37 (1966).
10. H. Niwaya, H. Imaoka, and A. Shibuya, *Sen'i Seihin Shohi Kagaku*, **52**, 99 (1996).
11. H. Niwaya, H. Imaoka, and A. Shibuya, *Sen'i Seihin Shohi Kagaku*, **52**, 248 (1996).
12. S. Ishimaru, Y. Isogai, M. Matsui, K. Negishi, C. Nonomura, and A. Yokoyama, *J. Tex. Eng.*, **55**, 179 (2009).
13. X. Zhang, KW. Yeung, and Y. Li, *Text. Res. J.*, **72**, 245 (2002).
14. SG. Liu, QG. Liu, T. An, JZ. Sun, and QS. Peng, *Visual Computer*, **25**, 687 (2009).
15. A. Paiva, F. Petronetto, T. Lewiner, and G. Tavares, *Computer-Aided Design*, **41**, 306 (2009).
16. A. Nealen, M. Muller, R. Keiser, E. Boxerman, and M. Carlson, *Computer Graphics Forum*, **25**, 809 (2006).
17. S. Mitsui, D. Komai, X. Dai, T. Furukawa, M. Takatera, Y. Shimizu, and M. Hashimoto, *J. Image Information and Television Engineers*, **54**, 1762 (2000).
18. S. Mitsui, S. Murakami, X. Dai, T. Furukawa, M. Takatera, Y. Shimizu, and M. Hashimoto, *Technical Report of Image Information and Television Engineer*, **23**, 21 (1999).
19. S. Mitsui, D. Komai, X. Dai, T. Furukawa, M. Takatera, Y. Shimizu, and M. Hashimoto, *Technical Report of IEICE HCS*, **99**, 21 (1999).
20. D. House and D. Breen, "Cloth Modeling and Animation", A K Peters, Massachusetts, p.79 (2000).
21. H. Oka and T. Irie, *IEICE Trans D*, **J88-D-II**, 1564 (2005).
22. S. Ishikawa, JK. Tan, and T. Sone, *Technical Report of IEICE MI*, **109**, 19 (2009).
23. T. Nagaoka, K. Sakurai, E. Kunieda, S. Watanabe, H. Honma, T. Suzuki, M. Kawai, K. Sakamoto, K. Ogawa, K. Konokawa, K. Kubota, B. Kim, M. Taki, Y. Yamanaka, and S. Watanabe, *Trans. Japanese Society for Medical and Biological Eng.*, **40**, 239 (2002).
(Fig. 2 reprinted with permission from National Institute of Information and Communications Technology)
24. R. Aoyagi and T. Yoshida, *Technical Report of IEICE US*, **63**, 67 (2003).
25. H. Oka and T. Irie, *Biomechanisms*, **12**, 15 (1994).
26. D. Komai, S. Murakami, M. Takatera, M. Hashimoto, and Y. Shimizu, *NICOGRAPH Trans.*, **17**, 81 (2001).
27. M. Moor and J. Wilhelms, *Computer Graphics*, **22**, 289 (1988).
28. M. McKenna and D. Zeltzer, *Computer Graphics*, **24**, 29 (1990).
29. E. Guendelman, R. Bridson, and R. Fedkiw, *ACM Tansaction on Graphics*, **22**, Issue 3 (2003).
30. D. Baraff, *SIGGRAPH'97 Course Notes*, D3 (1997).
31. D. Baraff, *IEEE Computer Graphics and Applications*, **15**, 63 (1995).
32. H. Kawabata, A. Yamagata, N. Suda, and K. Ishikawa, *J. home economics of Japan*, **44**, 1033 (1993).