

# 布の力学特性における非線形性と異方性を反映したパーティクルモデルとその衝突・反発メカニズム

## Particle Model Reflecting Non-linearity and Anisotropy of the Mechanical Properties of Cloth and Its Collision and Repulsion Mechanism

三ッ井 茂<sup>†</sup>, 駒井太樹<sup>†</sup>, 戴 暁群<sup>†</sup>, 古川貴雄<sup>†</sup>,  
正会員 高寺政行<sup>†</sup>, 清水義雄<sup>†</sup>, 橋本 稔<sup>†</sup>

Shigeru Mitsui<sup>†</sup>, Daiju Komai<sup>†</sup>, Xiaoqun Dai<sup>†</sup>, Takao Furuakawa<sup>†</sup>, Masayuki Takatera<sup>†</sup>, Yoshio Shimizu<sup>†</sup> and Minoru Hashimoto<sup>†</sup>

**Abstract** Particle models have been used for computer animation of cloth fabrication, although the relation with the mechanical properties of cloth is not clear. In particular, the non-linearity and anisotropy of the mechanical properties are important. A particle model reflecting these properties is described. The precise collision and repulsion mechanism is represented in the particle model by integrating the rigid body model and the particle model. The proposed model was shown to be valid by comparing the results of experiments and simulation using different cloth materials.

キーワード：布，パーティクルモデル，非線形性，異方性，衝突・反発処理

### 1. ま え が き

物理的なモデルに基づくコンピュータアニメーション<sup>3)</sup>はリアルな物体の運動を生成する上で重要な手法となっている。剛体の運動を記述するモデルについては正確な数理モデル<sup>2)</sup>が示されているが、物体が並進・回転運動するだけでなく形状が変化する弾性体の挙動を記述するのは依然としてモデル化が容易ではない。構造解析など数値シミュレーションの分野では、有限要素法や境界要素法が一般的であり、これらの手法では連続体理論から離散近似モデルが明確に導出される。そのため、弾性体の力学特性と離散近似モデルとの対応付けが理論的に示されているという利点がある。しかし、弾性体の衝突・反発などの現象を記述する数理モデルが明確でないために、境界条件が複雑な問題への適用が困難である。一方、有限要素法や境界要素法に対して、パーティクルモデル<sup>18)</sup>を用いた手法が提案されている。パーティクルモデルでは、独立したパーティクル間に局所的な相互作用を与えて全体として集合体の複雑な挙動を表現している<sup>19)</sup>。

弾性体のひとつである布の変形挙動を表現する手法と

しても、有限要素法に基づくモデル<sup>10)13)17)</sup>や離散的なスプリングモデル<sup>7)20)23)26)</sup>やパーティクルモデル<sup>5)6)12)</sup>が提案されている。布の変形シミュレーションでは、(1)衝突判定の計算量、(2)数値的不安定性と計算効率、(3)素材のもつ複雑な力学特性の反映などが問題となっている。衝突判定の効率化<sup>22)26)</sup>と数値不安定性と計算効率の改善<sup>1)9)11)27)</sup>についてはいくつかの方法が示されている。しかし、布の力学特性の問題に関してはBreenらのパーティクルモデル<sup>5)6)12)</sup>を除いて明確な記述が示されていない。また、布の特徴的な変形挙動は力学特性における非線形性と異方性によるので、これらの性質を考慮したモデルの構築が不可欠である。

本稿ではBreenらのパーティクルモデルを基に、布の力学特性における非線形性と異方性を反映したモデルへの拡張方法を示す。さらに、パーティクルモデルと正確な剛体の衝突・反発モデルとを組合せ、衝突の瞬間に生じる反発力と回転モーメントを考慮したモデルを提案する。ドレープ試験とテーブルクロスとについて実験結果と提案するモデルを用いたシミュレーション結果を比較し、提案する手法が従来の手法よりもリアルな布の変形を表現できることを示す。また、提案する衝突・反発モデルの効果をリボンの自由落下のシミュレーションにより確認した結果についても述べる。

2000年5月31日受付、2000年9月4日再受付、2000年10月12日採録  
†信州大学 繊維学部 感性工学科

(〒386-8567 上田市常田 3-15-1, TEL 0268-21-5536)

†Faculty of Textile Science and Technology, Shinshu University  
(3-15-1, Tokida, Ueda-shi, Nagano, 386-8567, Japan)

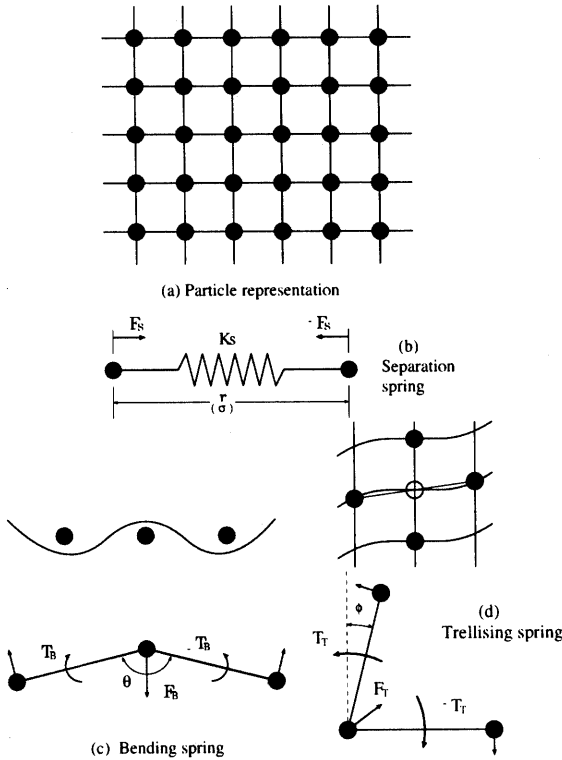


図1 Breen らのパーティクルモデル  
The particle model proposed by Breen et al.

## 2. Breen らのパーティクルモデル

布の変形メカニズムとしては伸長・圧縮、曲げ、剪断変形が重要であり、Breen らのパーティクルモデルでもこれらの変形メカニズムがモデル化されている。図1のように布の伸長・圧縮、曲げ、剪断変形は各パーティクをスプリングで接続したモデルを用いて表現できる。ここで、 $K_S$  は伸長・圧縮変形に対応するスプリングであり、図1(b)はスプリングが伸長された場合に伸長を打ち消そうとする圧縮応力  $F_S$  が作用することを示している。図1(c)は曲げ変形を表し、布面に対して曲げ変形が生じた場合に曲げ回復トルク  $T_B$  および曲げ回復力  $F_B$  が発生する。一方、図1(d)は布面内の剪断変形を表し、この場合にも変形を打ち消そうとする剪断回復トルク  $T_T$  および剪断回復力  $F_T$  が発生する。

以下、Breen らのモデル<sup>12)</sup>で用いられている回復トルクと回復力の導出について簡単に述べる。パーティクル間隔  $\sigma$  が布の伸長・圧縮変形によって  $r$  に変化した場合、パーティクルに作用する力  $F_S(r)$  は

$$F_S(r) = \begin{cases} -C_0(4r + \sigma)(r - \sigma)^4/\sigma^2 & r \leq \sigma \\ 5C_0(r - \sigma)^4/\sigma^5 & r > \sigma \end{cases} \quad (1)$$

とされている。ここで、伸長と圧縮の対称性はなく、それぞれ独立した関数で  $F_S(r)$  が与えられ、変位  $r - \sigma$  の4次関数が用いられている。なお、 $C_0$  は素材の力学特性に対応する係数である。曲げ変形時に発生するトルク

$T_B(\theta)$  については、基本的に曲げ角度の正弦  $\sin(\theta/2)$  に比例するモデルとなっている。曲げモーメント  $M(K)$  および曲げ剛性  $M(K)/K$  の和が係数に含まれているので、曲げ剛性の高い素材では微小な曲げ変形でも発生するトルクが大きくなる。ここで、曲げ剛性は曲げモーメントと曲率の比で与えられている。

$$\begin{cases} T_B(\theta) = -\frac{987.8\sigma}{2} \left( M(K) + \frac{\partial M(K)}{\partial K} \right) \sin(\theta/2) \\ K(\theta) = \begin{cases} \frac{2}{\sigma} \cos(\theta/2) & \pi/4 < \theta \leq \pi \\ -(\frac{\pi}{4})^2 \beta/\theta + \alpha + \frac{\pi}{4} \beta & 0 \leq \theta \leq \pi/4 \end{cases} \\ (\alpha = \frac{2}{\sigma} \cos(\pi/8); \beta = \frac{1}{\sigma} \sin(\pi/8)) \end{cases}$$

さらに、剪断トルク  $T_T(\phi)$  については、剪断応力  $F(\phi)$  および剪断角度の余弦 ( $\cos \phi$ ) の積で与えられている。

$$T_T(\phi) = \frac{195.76\sigma^3}{4} F(\phi) \cos \phi \quad (3)$$

曲げトルクと剪断トルクはそれぞれ曲げ回復力  $F_B$  と剪断回復力  $F_T$  に変換される。空気抵抗については、パーティクルの相対速度  $u$  と、布面に対する法線方向の単位ベクトルを  $n$  に比例する力が設定されている。

$$\begin{cases} F_A = C_1 \sigma^2 (n \cdot u) u \\ u = v - w \end{cases} \quad (4)$$

ここで、 $v$  はパーティクルの速度、 $w$  は風速、 $C_1$  は素材の空気抵抗に対応する係数である。最終的にパーティクルに作用する力は重力項を加えた

$$F = mg + F_A + F_S + F_B + F_T \quad (5)$$

となる。各パーティクルの位置ベクトルを  $p_{ij}^t$ 、質量を  $m_{ij}(g)$ 、粘性係数を  $c(g/sec)$  とすると基本的には以下の運動方程式が求まる。

$$F_{ij}^t = m_{ij} \dot{p}_{ij}^t + c p_{ij}^t \quad (6)$$

## 3. 力学特性の非線形・異方性を考慮したパーティクルモデル

布の力学特性を計測する装置としては KES 試験機<sup>15)</sup>が一般的であり、計測には 20 cm × 20 cm の試料が用いられる。図2に KES 試験機を用いて wool 素材の布の伸長、曲げ、剪断特性を計測した結果を示す。KES 試験機によって計測した cotton と wool 素材の力学特性の近似を表1にまとめる。cotton 素材の布は厚みがあり、そのため質量が大きな値となっている。また、各種剛性についても wool よりも cotton が大きな値となっている。また、cotton でも wool についても経糸と緯糸方向で特性が大きく異なることがわかる。

### 3.1 伸長特性

図2(a)は試料に 500 gf/cm までの伸長応力を与えた場合の伸長特性であり、ひずみ  $\epsilon$  (%) と 応力  $F$  (gf/cm)

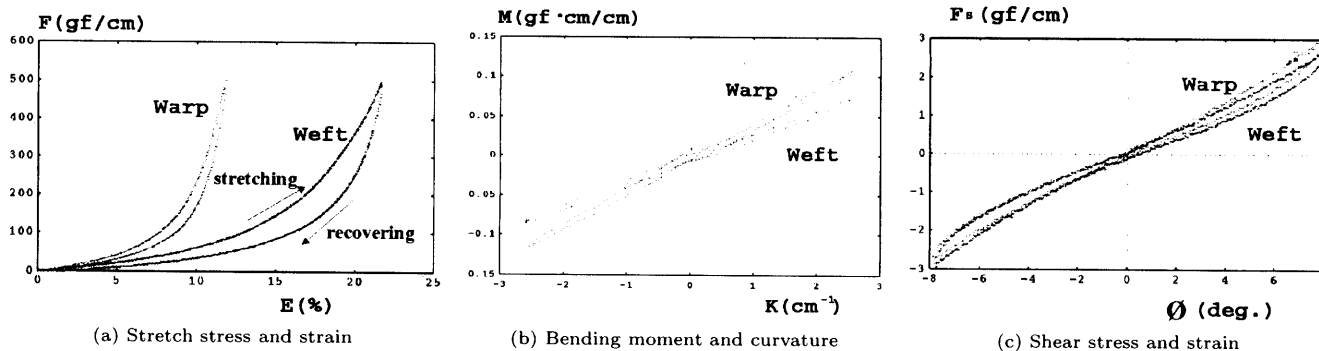


図 2 Wool 素材の布の力学特性  
Mechanical properties of the woven cloth made by thin wool.

表 1 cotton と wool 素材の力学特性の近似  
Approximation of function denoting mechanical properties of thick cotton and thin wool.

Parameters	Thick cotton	Thin wool
$m$ (g/cm <sup>2</sup> )	0.01576	0.01343
$F(\epsilon)$ (gf/cm)	経糸 (warp) $36.77\epsilon + 38.38\epsilon^2$ 緯糸 (weft) $35.37\epsilon + 6.71\epsilon^2$	$4.93\epsilon + 0.77\epsilon^2$ $3.21\epsilon + 0.23\epsilon^2$
$M(K)$ (gf·cm/cm)	経糸 (warp) $0.097K^{\frac{1}{2}} + 0.082K + 0.0008K^2$ 緯糸 (weft) $0.064K^{\frac{1}{2}} + 0.041K + 0.006K^2$	$0.038K + 0.002K^2$ $0.026K + 0.001K^2$
$F(\phi)$ (gf/cm)	経糸 (warp) $1.1\phi^{\frac{1}{2}} + 0.49\phi + 0.04\phi^2$ 緯糸 (weft) $1.0\phi^{\frac{1}{2}} + 0.46\phi + 0.62\phi^2$	$0.001\phi^{\frac{1}{2}} + 0.197\phi + 0.0135\phi^2$ $0.157\phi^{\frac{1}{2}} + 0.18\phi + 0.014\phi^2$

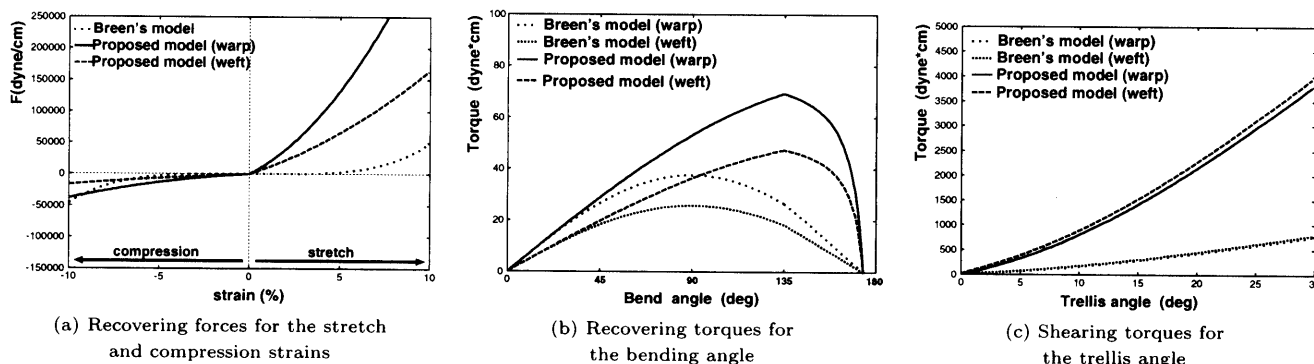


図 3 パーティクルに作用する回復力と回復トルクの比較  
The comparison between the forces and torques acting on particle.

の関係を示している。ここで、warp と weft はそれぞれ緯糸と経糸方向の特性を表し、伸長方向によって特性が大きく異なることがわかる。同一の糸であっても織物では方向によって糸密度が異なるため、このような異方性の顕著な結果が得られる。また、ヒステリシス効果があるため、ひずみを増加させた場合と減少させた場合には、ひずみに対する応力の値が異なる。布はゴムシートなどの素材と異なり糸軸方向への伸長が小さいのが特徴である。つまり、質量に対して伸長剛性が極めて高くなるため数値シミュレーションでは不安定であることが指摘されている<sup>1)13)14)</sup>。

ひずみと伸長応力の関係が非線形であるので、ひずみ  $\epsilon$  の 2 次関数で伸長応力  $\hat{F}(\epsilon)$  (gf/cm) を与え

$$\hat{F}(\epsilon) = C_1\epsilon + C_2\epsilon^2 \quad (7)$$

伸長変形に対して各パーティクルに作用する回復力を

$F_s(\epsilon)$  (gf) とする。ただし、異方性を表現するために経糸方向と緯糸方向ではそれぞれ独立に伸長応力を近似する。

$$F_s(\epsilon) = \hat{F}(\epsilon) \cdot \sigma \cdot 978.80 \quad (8)$$

ここで、 $\sigma$  (cm) はパーティクル間隔であり、978.80 は単位を (gf) から (dyne) に合わせるための係数である。また、布のようにシート状の物質を面内で圧縮した場合には、単純に圧縮されるのではなく湾曲し座屈現象を示す。そこで、圧縮した場合にパーティクルに作用する回復力は伸長した場合 ( $F_s(\epsilon)$ ) よりも小さな値に設定する。ここで  $\alpha$  は減衰定数に相当する。

$$F_c(-\epsilon) = F_s(\epsilon) \cdot \alpha \quad 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (9)$$

図 3(a) は伸長ひずみに対する回復力を示すグラフである。Breen らのモデルでは、(1) 式にあるように伸長・

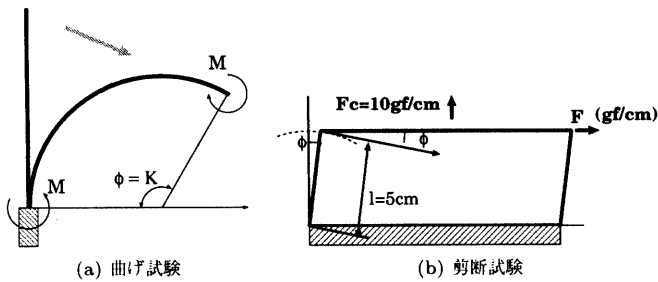


図 4 曲げ試験と剪断試験  
Bending test and shear test.

圧縮変形に対して類似した関数が与えられているため、伸長ひずみと圧縮ひずみの大きさが等しければその回復力の大きさもほぼ等しい。一方、提案するモデルは伸長・圧縮については対称性を仮定しないため、伸長ひずみと圧縮ひずみの大きさが等しい場合でも対応する回復力の大きさは異なる。ただし、Breenらのモデルに含まれる(1)式の係数は  $C_0 = 1.0 \times 10^5$  としている。この数値を大きくすることで伸長を抑制することもできるが、その場合には圧縮回復力まで大きくなってしまいうためシミュレーションの結果が不自然になってしまう。したがって、Breenらのモデルを用いた場合、圧縮回復力を小さく設定するために結果として実際の布よりも伸長変形の大きなシミュレーション結果が避けられない。

### 3.2 曲げ特性

曲げ試験では図4(a)のように  $20 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$  の試料を短辺に沿って曲率が 2.5 になるまで曲げた場合の曲げモーメント  $M \text{ gf} \cdot \text{cm/cm}$  を計測する。図2(b)は曲げモーメントと曲率  $K \text{ cm}^{-1}$  の関係を示している。曲げ特性についてもグラフから異方性と非線形性が確認できる。そこで、曲率  $K$  を用いて曲げモーメント  $\hat{M}(K)$  を次式で近似し

$$\hat{M}(K) = C_0 K^{1/2} + C_1 K + C_2 K^2 \quad (10)$$

曲げ回復トルク  $T_B(\theta)$

$$T_B(\theta) = \hat{M}(K) \cdot \sigma \cdot 978.80 \quad (11)$$

を与える。

図3(b)に変形時の曲げ角度とその回復トルクの関係を示す。Breenらのモデルでは布を曲げ角度に伴ない回復力は増大し、曲げ角度が  $\pi/2$  (rad) のとき、すなわち、布を直角に曲げたときに回復トルクは最大となる。さらに曲げると回復トルクは低下し曲率が  $\pi$  (rad) で折畳まれた状態では回復トルクが 0 となる。実際に布を曲げた場合には曲げ角度が  $\pi/2$  (rad) 以上になっても回復力は増大するため、ここでは  $3\pi/4$  (rad) で回復トルクが最大になるモデルを用いている。

### 3.3 剪断特性

剪断試験では図4(b)のように  $20 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$  の試料の短辺に剪断応力  $F$  を付加した場合の剪断角度  $\phi$  を計

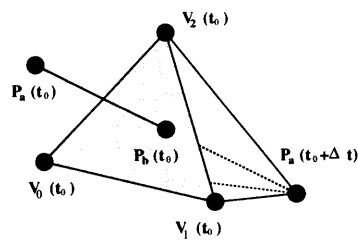


図 5 線分と三角形ポリゴンの交差  
Collision between a line and a triangular polygon.

測する。図2(c)に示した剪断特性はほぼ線形近似が可能である。剪断応力  $F(\phi)$  からこの剪断変形によってなされる仕事  $W$  は

$$\begin{cases} W = \int F(\phi) \cdot \cos \phi \cdot 5 \cdot 20 \cdot d\phi \\ W_\sigma = W \cdot \sigma^2 / (20 \cdot 5) = \int F(\phi) \cdot \cos \phi \cdot \sigma^2 d\phi \end{cases} \quad (12)$$

と表せる。また、剪断変形によって布に蓄えられるエネルギーは

$$E_\sigma = \int T_T(\phi) d\phi \quad (13)$$

となる。いま、外力によってなされた仕事がすべて剪断ひずみのエネルギーに変換されるとすれば

$$E_\sigma = W_\sigma \quad (14)$$

となり、試料辺のパーティクル数 4 で割ると結果として

$$T_T(\phi) = \frac{987.80}{4} F(\phi) \cdot \cos \phi \cdot \sigma^2 \quad (15)$$

が導出される。

図3(c)に剪断角度と回復トルクの関係を示す。グラフから明らかに提案モデルでは剪断角度に対する回復トルクが大きくなっている。

## 4. 衝突判定と反発処理

布を表現するパーティクルモデルから容易に三角形ポリゴンが決定できるため、以下では三角形ポリゴン間の衝突判定および、反発処理について述べる。

### 4.1 衝突判定

2つの三角形ポリゴン間の衝突判定は各ポリゴンの位置とポリゴン間の速度ベクトルで求まる。いま、微小時間  $\Delta t$  における頂点の移動ベクトルを考えると、三角形ポリゴンと移動ベクトルの交差判定で時刻  $t + \Delta t$  における衝突を判定できる(図5参照)。ここでは、ユークリッド S 形式  $4 \times 4$  行列式<sup>28)</sup>を用いて交差判定を行う。ユークリッド S 形式  $4 \times 4$  行列式では線分と三角形ポリゴンの交差判定だけでなく交点の算出も可能である。

### 4.2 反発処理

三角形ポリゴンは3つのパーティクルで構成される質点系である。衝突によってそれぞれのパーティクルに発

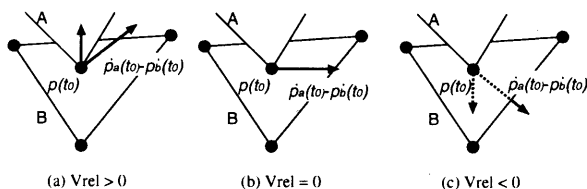


図6 三角形ポリゴン間の相対速度と反発  
Relative speed/velocity and repulsion between triangular polygons.

生する力の総和は衝突力に等しい。しかし、均等に衝突力を3つのパーティクルに分散させた場合には、衝突力と同じ向きの力しか発生しないという問題がある。また、衝突力を3つのパーティクルに振り分けるための重み付けが困難である。そこで、衝突の瞬間だけ、三角形ポリゴンを剛体とみなすことで、衝突力によって発生する並進運動だけでなく回転運動を考慮した反発モデルを提案する。この場合、パーティクルモデルによって表現されている三角形ポリゴンの弾性的な性質は瞬間的に失われるが、衝突・反発現象のモデルがより精密になる。以下では、剛体の衝突・反発モデル<sup>2)</sup>を基に衝突力、反発力の各回転モーメントを求め最終的にパーティクルに作用する力を導出する。

図6に示すように、時間  $t_0$  において衝突判定で衝突すると判定された三角形ポリゴン A と三角形ポリゴン B の衝突点を  $p(t_0)$  とする。また、B の接触面の単位法線ベクトルを  $n$ 、 $p(t_0)$  における A の速度を  $\dot{p}_a(t_0)$ 、B の速度を  $\dot{p}_b(t_0)$  とすると  $t_0$  における相対速度  $v_{rel}$  は次式で与えられる。

$$v_{rel} = n(t_0) \cdot (\dot{p}_a(t_0) - \dot{p}_b(t_0)) \quad (16)$$

ここで、 $v_{rel} > 0$  のとき (図6(a)) には2つの三角形ポリゴンが離れていく状態のため反発は生じない。また、 $v_{rel} = 0$  のとき (図6(b)) には2つの三角形ポリゴンが互いに接触したまま静止、あるいは、接触点が一方の三角形ポリゴン上を移動する状態なので、これについても反発処理の必要がない。したがって、図6(c)の  $v_{rel} < 0$  の場合のみ反発処理が必要となる。

### 4.3 衝突力

ここでは、摩擦による減衰を考慮しない場合の衝突力について述べる。三角形ポリゴンの衝突・反発の瞬間に加速度が不連続になることから、衝突力  $F_a^C(t_0)$  が無限大に、 $\Delta t$  が0に近づくことになる。そこで衝突における力積  $J$  を定義する。

$$F_a^C(t_0)\Delta t = J \quad (17)$$

さらに、力積の大きさに対応するスカラー  $j$  を導入し

$$J = jn(t_0) \quad (18)$$

と表す。次に、衝突における力積  $J$  が作用する前の相対速度を

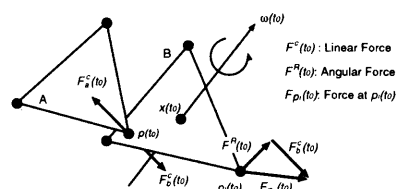


図7 パーティクルに作用する反発力  
Repulsion force acting on the particle.

$$v_{rel}^- = n(t_0) \cdot (\dot{p}_a^-(t_0) - \dot{p}_b^-(t_0)) \quad (19)$$

衝突における力積  $J$  が作用した後の相対速度を

$$v_{rel}^+ = n(t_0) \cdot (\dot{p}_a^+(t_0) - \dot{p}_b^+(t_0)) \quad (20)$$

とすると、摩擦を考慮しない衝突では

$$v_{rel}^+ = -\epsilon v_{rel}^- \quad (21)$$

となる。ここで  $\epsilon$  は  $0 \leq \epsilon \leq 1$  を満たす反発係数である。三角形ポリゴンの質量をそれぞれ  $M_a$ 、 $M_b$  とすると

$$j = \frac{-(1 + \epsilon)v_{rel}^-}{1/M_a + 1/M_b} \quad (22)$$

が導出され、結果として (17)、(18) 式から衝突力  $F_a^C(t_0)$  が求まる。また、 $F_b^C(t_0) = -F_a^C(t_0)$  となる。

### 4.4 反発力

ここでは、三角形ポリゴン B を構成する3つのパーティクルに作用する反発力をそれぞれ算出する。図7は三角形ポリゴン A が B に衝突することによって、並進運動と回転運動が生じる状態を示している。

三角形ポリゴン B の衝突点における速度  $\dot{p}_b(t_0)$  は、角速度を  $\omega(t_0)$ 、重心を  $x(t_0)$ 、重心における速度を  $\dot{x}(t_0)$  とすると

$$\dot{p}_b(t_0) = \omega(t_0) \times (p_b(t_0) - x(t_0)) + \dot{x}(t_0), \quad (23)$$

$$\omega(t_0) \times (p_b(t_0) - x(t_0)) = \dot{p}_b(t_0) - \dot{x}(t_0) \quad (24)$$

と表せる。(24)式において、 $p_b(t_0)$ 、 $\dot{p}_b(t_0)$ 、 $x(t_0)$ 、 $\dot{x}(t_0)$  は既知なので、角速度  $\omega(t_0)$  について解くことができる。

また、衝突力  $F_b^C(t_0)$  によって発生する三角形ポリゴンのトルク  $\tau(t_0)$  は

$$\tau(t_0) = (p_b(t_0) - x(t_0)) \times F_b^C(t_0) \quad (25)$$

となり、回転の運動量を  $L(t_0)$  とすると

$$L(t_0) = I(t_0)\omega(t_0) \quad (26)$$

となる。ここで  $I(t_0)$  は三角形ポリゴンの慣性テンソルである。結果として

$$\dot{L}(t_0) = \tau(t_0) \quad (27)$$

という関係が成り立つ。

次に、三角形ポリゴン B を構成するパーティクルの1つである  $p_i(t_0)$  における加速度を求める。(23)式より、 $p_i(t_0)$  の速度  $\dot{p}_i(t_0)$  は、 $r_i(t_0) = p_i(t_0) - x(t_0)$  とすると

表 2 シミュレーション条件  
Simulation parameters

Parameters	
$C_1$	$0.3 \times 10^{-4}$
$\alpha$	0.1
$\epsilon$	0.2
$\sigma(\text{cm})$	0.5
$\Delta t(\text{sec})$	$2.0 \times 10^{-4}$

$$\dot{\mathbf{p}}_i(t_0) = \boldsymbol{\omega}(t_0) \times \mathbf{r}_i(t_0) + \dot{\mathbf{x}}(t_0) \quad (28)$$

となる。そこで、 $\dot{\mathbf{p}}_i(t_0)$  をさらにもう一度微分すると  $\mathbf{p}_i(t_0)$  における加速度  $\ddot{\mathbf{p}}_i(t_0)$  が算出できる。最終的に、パーティクル  $\mathbf{p}_i(t_0)$  に作用する反発力  $\mathbf{F}_{\mathbf{p}_i}^C(t_0)$  は

$$\mathbf{F}_{\mathbf{p}_i}^C(t_0) = M_i \ddot{\mathbf{p}}_i(t_0) \quad (29)$$

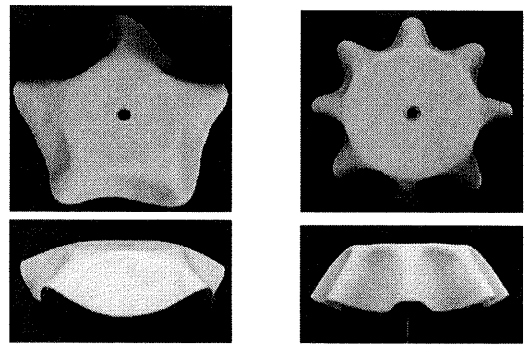
と表せる。

### 5. シミュレーション結果

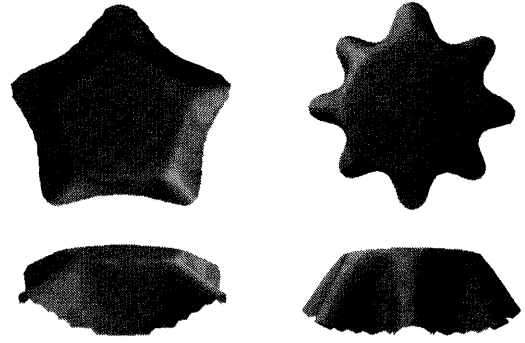
本稿で提案したパーティクルモデルを用いて、cotton と wool 素材についてシミュレーションを行った結果について述べる。シミュレーションは表 1 に示す cotton と wool 素材の力学特性と表 2 にまとめるシミュレーション条件により行った。空気抵抗については無風状態を仮定している。基本的にはパーティクル速度に比例する簡単な粘性抵抗の効果は反映されているが、布の変形によって発生する風など複雑な流体の性質まではモデル化されていない。

直径 10 inch 円形の布を直径 5 inch 円形の試験台に被せた状態のドレープ試験、および、シミュレーション結果を図 8 に示す。用いたパーティクルモデルでは各パーティクルが正方形格子上に配置されるため、境界部分で正確に円弧形状を表現していない。そのためシミュレーション結果では滑らかな境界となっていない。実験結果である上段の写真から cotton では全体に剛性が高いため、ドレープと呼ばれる節の数が 5 つと少ないが、wool では 8 つになっている。下段のシミュレーション結果と実験結果が極めて類似していることから、提案モデルの妥当性が示された。また、図 9 に示したドレープ試験の変形アニメーションにより提案モデルの動的特性が確認できる。

図 10 に 40 cm × 40 cm の大きさのテーブルクロスシミュレーション結果を示す。なお、テーブルの大きさは 20 cm × 20 cm である。図 10 の左側は cotton 素材、図 10 の右側は wool 素材の結果であり、図 10(a)(b) は実際の布を撮影した写真、図 10(c)(d) は Breen らのパーティクルモデル、図 10(e)(f) は提案手法の結果を示している。提案手法の結果では、Breen らのモデルで見られる布の角の部分で顕著な布の伸び過ぎがなく、より自然な変形状態を表現している。Breen らのモデルでは 4 隅の変形部分が細く潰れてしまっているが、提案手法では



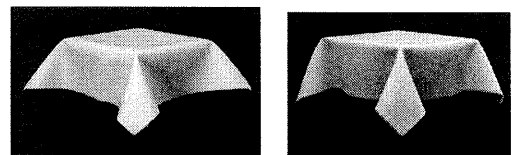
Drape test of the thick cotton      Drape test of the thin wool



Drape simulation of the thick cotton

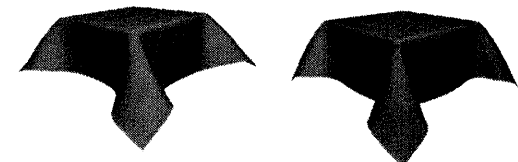
Drape simulation of the thin wool

図 8 ドレープ試験とそのシミュレーション  
Results of actual drape tests and the simulation.



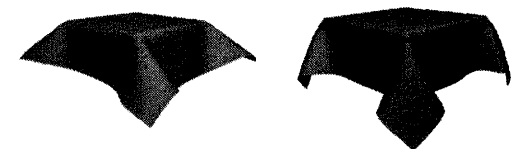
(a) Thick cotton tablecloth

(b) Thin wool tablecloth



(c) Simulation of the thick cotton tablecloth based on Breen's model.

(d) Simulation of the thin wool tablecloth based on Breen's model.



(e) Simulation of the thick cotton tablecloth based on the proposed model.

(f) Simulation of the thin wool tablecloth based on the proposed model.

図 10 テーブルクロスシミュレーション  
Comparison with actual tablecloths, simulations based on Breen's model, and the proposed model.

写真の形状と類似した結果が得られている。

図 11 に wool 素材について伸長・圧縮、曲げ、剪断変形によるパーティクルに作用する力の分布を Breen ら

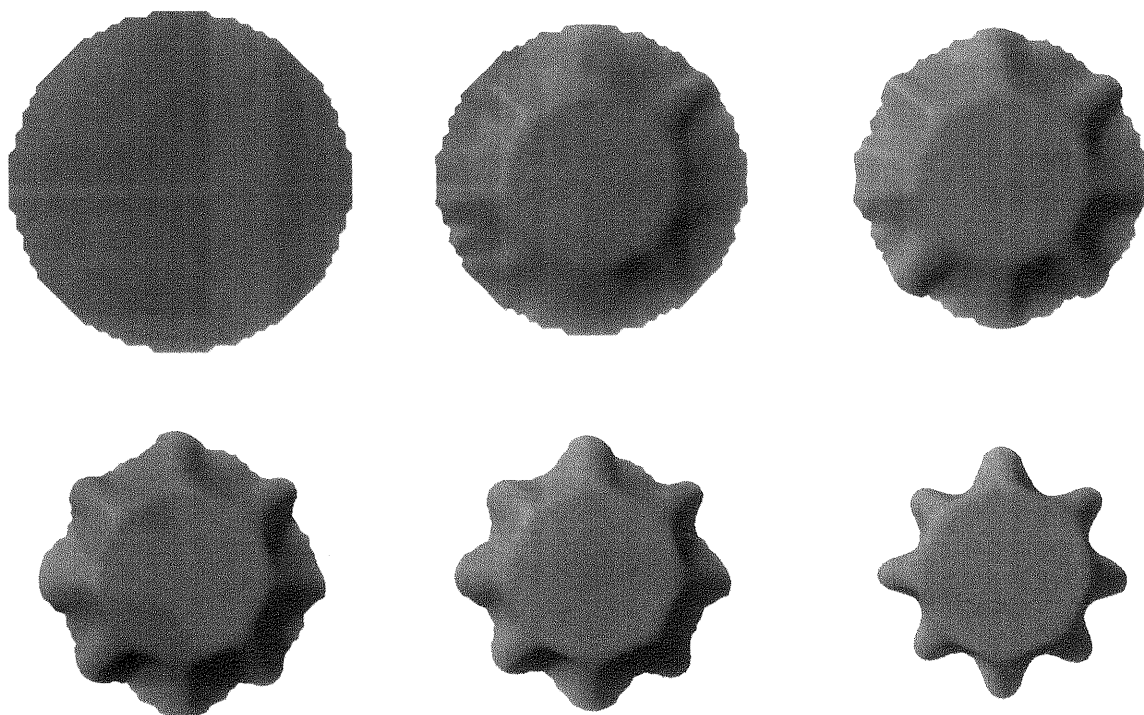


図 9 ドレープ試験の動的シミュレーション  
Dynamic simulation of drape test.

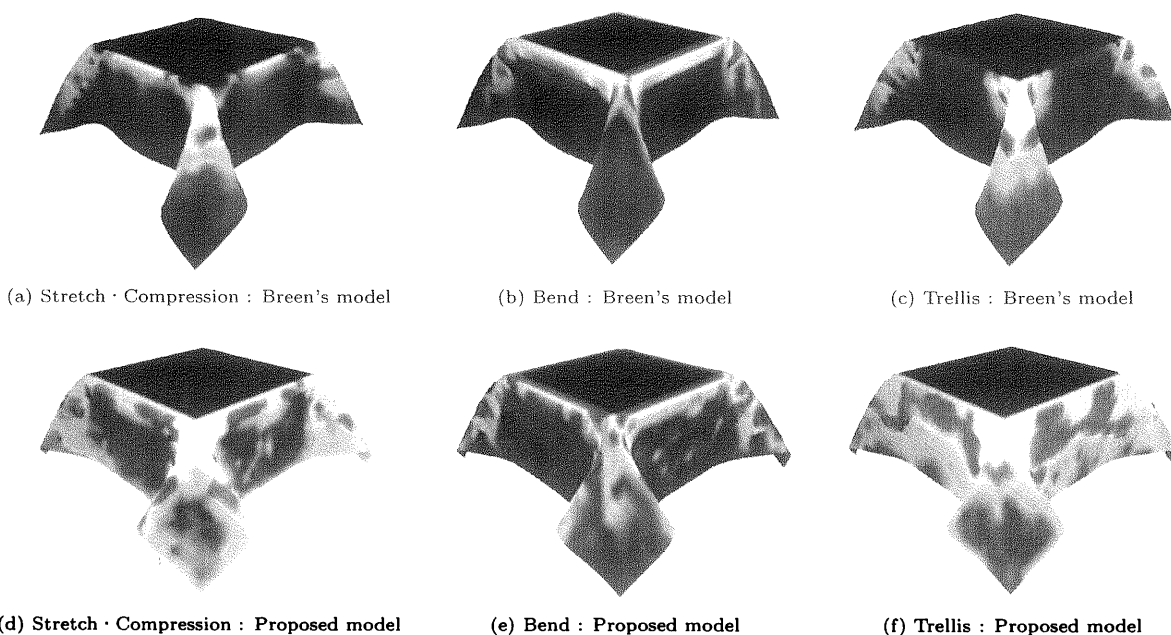


図 11 パーティクルに作用する各種回復力の分布の比較  
Differences of recovering forces distributions between the  
Breen's model and the proposed model in case of thin wool.

のパーティクルモデルと提案手法の結果を比較している。図 11(a)(b)(c) が Breen らのパーティクルモデル、図 11(d)(e)(f) が提案手法の結果を示している。図の青い領域は力が小さく、緑、黄、赤、白の順に作用する力が增大している。それぞれ、テーブルの角で作用する力

が大きいことがわかる。伸長・圧縮変形では提案手法は Breen らのモデルよりも大きな力が作用しており、布の伸び過ぎを強く抑制していることがわかる。曲げ変形では異方性の影響が顕著に見られ、糸軸の方向によって生じている曲げ回復力が異なることが明確に確認できる。

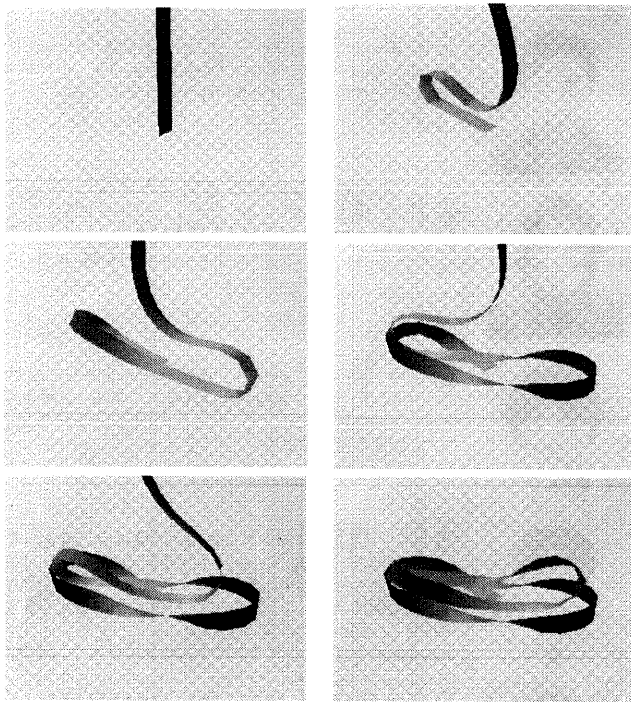
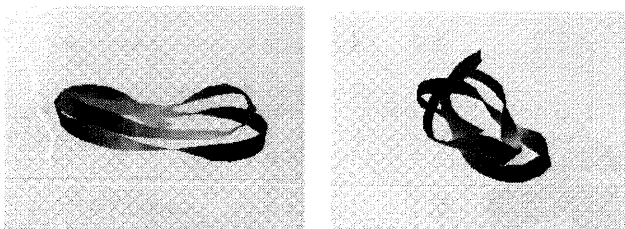


図 12 自由落下するリボンのシミュレーション  
Free falling ribbon simulation.



The angular momentum is reflected      The angular momentum is not reflected

図 13 回転運動の有無によるシミュレーションの比較  
Comparison of existence the angular momentum.

また、剪断変形については主に 4 隅の変形部分に剪断回復力が集中していることがわかる。Breen らのモデルでは主に 4 隅の変形部分に剪断回復力が集中しているが、提案手法では全体的に剪断回復力が作用している。これにより、Breen らのモデルでは弱すぎる剪断回復力が提案手法により改良されている。

図 12 には自由落下するリボン状の布の変形アニメーションを示す。図 13 には回転運動の有無によるシミュレーション結果を比較した。図 14 には実際のリボンの変形を示す。回転運動の導入により自然な変形挙動を表現している。最終的な状態は類似した結果となっているが、シミュレーションに用いた反発係数や動特性の示す変数の計測が困難であり、正確な動的シミュレーションには問題が残る。

## 6. むすび

本稿では、布の力学特性における非線形性と異方性

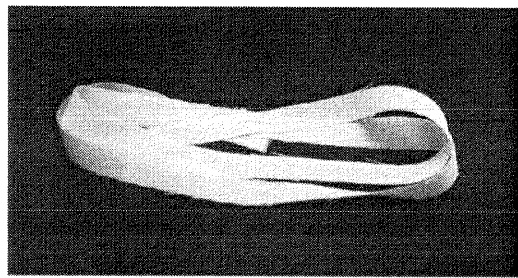


図 14 リボン状の布の変形  
Deformation of actual cloth ribbon.

を考慮したパーティクルモデルを提案し、実験とシミュレーションの結果から提案手法が有効であることを示した。また、衝突・反発の瞬間のみ剛体を仮定するモデルをパーティクルモデルに統合することにより、従来よりも正確な衝突・反発の表現を可能としている。静止状態については、実験結果に一致するシミュレーション結果が得られているが、布の動的な変形・運動については、反発係数などの係数を計測することが困難なため、検証が不十分であり今後の課題として残されている。また、空気抵抗力についても、現在のモデルは実際の布の挙動と比較して必ずしも妥当であるとはいえないと報告されている<sup>29)</sup>ため、今後の課題として残されている。

## 〔文 献〕

- 1) Baraff, D., and Witkin, A.: "Large Steps in Cloth Simulation", Proc. of SIGGRAPH '98, pp. 43-54 (July 1998)
- 2) Baraff, D.: "Rigid Body Simulation", Course Notes of SIGGRAPH '98, pp. D1-D68 (July 1998)
- 3) Barzel, R.: "Physically-Based Modeling for Computer Graphics", ACADEMIC PRESS (1992)
- 4) Booth, J. E.: Principles of Textile Testing, Heywood, London, 3rd edition (1968)
- 5) Breen, D. E., House, D. H., and Getto, P. H.: "A Physical-Based Particle Model of Woven Cloth", Visual Computer, 8, pp. 264-277 (1992)
- 6) Breen, D. E., House, D. H., and Wozny, M. J.: "Predicting the Drape of Woven Cloth Using Interacting Particles", Proc. SIGGRAPH '94, pp. 365-372 (July 1994)
- 7) Carignan, M., Yang, Y., Thalmann, N. M., and Thalmann, D.: "Dressing Animated Synthetic Actors with Complex Deformable Clothes", Proc. SIGGRAPH '92, pp. 99-104 (July 1992)
- 8) Collier, J. R. et al.: "Drape Prediction by Means of Finite-element Analysis", J. Text. Inst., 82, 1, pp. 96-107 (1991)
- 9) Eberhardt, B., Weber, A., and Strasser, W.: "A Fast, Flexible, Particle-System Model for Cloth Draping", IEEE, Computer Graphics and Applications, 16, 5, pp. 52-59 (Sept 1996)
- 10) Fischen, J. W., Deng, S., and Clapp, T. G.: "Finite-Element Modeling and Control of Flexible Fabric Parts", IEEE, Computer Graphics and Applications, 16, 5, pp. 71-80 (Sept. 1996)
- 11) 畑田 敬志, 長橋 宏: "柔軟物体運動表現における衝突と変形の安定な計算法に関する研究", 1999 信学総大, D-12-139, pp.321 (1999)
- 12) House, D. H.: "Cloth and Clothing in Computer Graphics", Course Notes SIGGRAPH '98, pp. B-1-B-17 (1998)
- 13) 今岡 春樹, 岡部 秀彦, 赤見 仁, 渋谷 惇夫, 相坂 登, 富羽 高子, 山田 正紘: "衣服立体形状予測法", 繊維学会誌, 45, 10, pp.60-66 (1989)
- 14) Kang, Y.M., Choi, J.H., Cho, H.G.: "Fast and Stable Animation of Cloth with an Approximated Implicit Method", IEEE, Proceedings Computer Graphics International 2000, pp. 247-255 (June 2000)
- 15) Kawabata S.: "The Standardization and Analysis of Hand Evaluation", The Textile Machinery Society of Japan (1980)
- 16) Lindberg, J., Waesterberg, L. and Svenson, R.: "Wool Fabrics as Garment Construction Materials", J. Text. Inst., 51, pp. T1475-T1493 (1960)



- 17) Okabe, H., Imaoka, H., Tomiha, T., and Niwaya, H.: "Three Dimensional Apparel CAD System", *Computer Graphics*, **26**, 2, pp. 105-110 (1992)
- 18) Reeves, W. T.: "Particle Systems — A Technique for Modeling a Class of Fuzzy Objects", *ACM Trans. Graphics*, **2**, 2, pp. 91-108 (1983)
- 19) Reynolds, C. W., Flocks, Herds and Schools: "A Distributed Behavioral Model", *Computer Graphics*, **21**, 4, pp. 25-34 (1987)
- 20) 坂口 嘉之, 美濃 導彦, 池田 克夫: "仮想服飾環境 PARTY — 動的変形可能な布のための数値計算法 —", *信学論 (D-II)*, **J77-D-II**, 5, pp. 912-921 (May 1994)
- 21) 坂口 嘉之, 美濃 導彦, 池田 克夫: "仮想服飾環境 PARTY — 人体と型紙のための幾何学的制約充足型格子形成法 —", *信学論 (D-II)*, **J77-D-II**, 11, pp. 2210-2219 (Nov 1994)
- 22) 坂口 嘉之, 美濃 導彦, 池田 克夫: "仮想服飾環境 PARTY — 衣服形状計算における衣服と人体との衝突計算法 —", *信学論 (D-II)*, **J78-D-II**, 3, pp.483-491 (1995)
- 23) 坂口 嘉之, 美濃 導彦, 池田 克夫: "仮想服飾環境 PARTY — 人体が動く場合の衣服形状計算法 —", *信学論 (D-II)*, **J79-D-II**, 10, pp. 1712-1718 (Oct 1996)
- 24) Tagawa, K, Kakimi, T, Ojika, T, and Kijima, R.: "A Method for Dynamic Cloth Simulation and its Application in the Virtual Fashion System", *Proc. VSMM'98*, pp. 110-115 (1998)
- 25) Thalmann, N. M.: "Clothing Virtual Actors", *Course Notes SIGGRAPH '98*, pp. D-1-D-26 (1998)
- 26) Volino, P., Courchesne, M., and Thalmann, N. M.: "Versatile and Efficient Techniques for Simulating Cloth and Other Deformable Objects", *Proc. SIGGRAPH '95*, pp. 137-144 (Aug 1995)
- 27) Volino, P., Thalmann, N. M.: "Implementing Fast Cloth Simulation with Collision Response", *IEEE, Proceedings Computer Graphics International 2000*, pp. 257-266 (June 2000)
- 28) 山口富士夫: "図形・形状処理工学", 日刊工業新聞社, (1996)
- 29) 山崎 華恵, 今岡 春樹: "布の動的予測における風の影響", *繊維学会誌*, **52**, 6, pp. 46-54 (1996)



みつい しげる  
**三ツ井 茂** 1999年, 信州大学繊維学部感性工学科卒業。現在, 同大学院博士前期課程在学中。アパレル・コンピュータグラフィックスに関する研究に従事。



こまい だいじろ  
**駒井 太樹** 2000年, 信州大学繊維学部感性工学科卒業。現在, 同大学院博士前期課程在学中。主にアパレル・コンピュータグラフィックスに関する研究に従事。



だい しゅうぐん  
**戴 曉群** 1989年, 中国蘇州大学材料工学科卒業, 1992年, 同大学院修士課程修了。現在, 信州大学大学院博士後期課程在学中。アパレル・コンピュータグラフィックスに関する研究に従事。



ふるかわ たかお  
**古川 貴雄** 1989年, 信州大学繊維学部繊維システム工学科卒業, 1992年, 同大学院修士課程修了。1994年, 新潟大学大学院博士課程単位取得退学, 同年, 信州大学繊維学部繊維システム工学科助手, 1995年, 同大学感性工学科助手, 1998年, 同助教授。コンピュータビジョン, コンピュータグラフィックスに関する研究に従事。工学博士。



たかてら まさゆき  
**高寺 政行** 1981年, 信州大学繊維学部繊維工学科卒業, 1988年, 同大学機能機械学科助手, 1995年, 同大学感性工学科講師, 1997年, 同助教授。繊維工学・感性工学に関する研究に従事。工学博士。正会員。



しみず よしお  
**清水 義雄** 1973年, 信州大学繊維学部繊維工学科卒業, 1975年, 同大学院修士課程修了, 1979年, 東京工業大学大学院博士課程修了。1980年, 東京家政大学講師, 1985年, 同大学助教授, 1986年, 信州大学繊維学部繊維システム工学科助教授, 1995年 同大学感性工学科教授, 感性工学に関する研究に従事。工学博士。



はしもと みのる  
**橋本 稔** 1977年, 東京理科大学理学部II部物理学科卒業, 1980年, 東京大学大学院修士課程修了, 1982年, 同大学院博士課程退学, 同年 電気通信大学短期大学部助手, 1987年, 同大学電気通信学部助手, 1988年, 鹿児島大学工学部助教授, 1999年, 信州大学繊維学部感性工学科教授, ロボティクスに関する研究に従事。工学博士。