

布地物体の変形表現

安居院 猛 西井 育生 中嶋 正之

東京工業大学 工学部 像情報工学研究施設

あらまし: 布地には柔らかい“しわ”があり, また表面のテクスチャも特有である. しわは変形する過程において形作られていく. また一度できたしわは動きの中で大きく様子が変わることなく, その布独自のしわの癖がつく. これらの布地特有の性質を表現するため, 布の弾性を考慮したモデル化と, 変形を繰り返す中でのしわの形状の取扱, 変形のアルゴリズムを示した. また本手法を用いて実際に布地を表した例を示した.

R e p r e s e n t a t i o n o f d e f o r m a t i o n o f c l o t h o f j e c t s

Takeshi Agui Ikuo Nishii Masayuki Nakajima

Imaging Science and Engineering Laboratory,
Tokyo Institute of Technology

4259 Nagatsuta, Midori-ku, Yokohama-shi, 227 Japan.

Abstract: A method of representation of cloth objects in deformation process is described. Cloth objects are deformed continuously by external forces, and folds appear on them. They have a property that they keep the shape of creases caused by the deformation. To achieve a numerical solution or to get an exact theoretical model to show the property is very difficult. We propose a simple modeling to represent the motion of these objects.

1. はじめに

近年のコンピュータ・グラフィクスが扱う対象物体の種類は確実に多くなっている。その中心となるのは自然物体であり、現在もよりリアルな映像表現のため、各種の自然物を対象とした研究が行われている。それらの主なものとして挙げられるのは、岩、山岳、樹木、炎、雲などである[1]。これらと共に表現の困難な対象物として布地がある。布地は細かな糸がよりあわさってできた繊維が織られてできており、表面のテクスチャとしても特殊なものになっているが、布地の最も明確な特徴は“しわ”を有するということである。布地の形状は大きささまざまなしわによって構成され、紙のしわと異なり、布地はしわが布地を柔らかいものであるという印象を与える要素になっている。これまでもいくつかの布地の表現に関する研究が行われてきた[2]～[6]。筆者らも過去に強い拘束条件のもとに曲がった腕の周りの袖にできるしわの表現を試みた[7]。

今まで行われてきた研究のなかでは布地はある状況下での静的な物体として表現されていることが多い。しかし、しわは時間的に連続な形状変化をしており、布地にさまざまな外力が加えられ変形を繰り返す中で、その布独自のしわの特性が定着していくと考えられる。そこで本報告では布地を変形させていく過程でのしわの形状の取り扱いと、変形過程の中でしわが形成されるという布地の特徴を表現するための手法について述べる。

本報告の中で布地として満たすべき条件を4つ挙げておく。

1) 布地はどのような形に変形していても、それを構成する繊維一本一本の長さは殆ど変化しない。

2) 一度できたしわの特徴は強い外力や拘束を受けない限り、保存される。

3) 布地上にできるしわの大きさは布地を形成する繊維の太さに応じて決定される。

4) 一般にゆるい拘束条件下では、激しく、目の細かいしわが局所的にできるよりも、ゆるやかで大きなしわが全体に発生する。

以上の1)～4)の条件を満足し、実際の布地により近い画像の生成が本研究の目的である。

2. 布地のモデリング

2. 1 格子座標系

まず、布地を表すための座標系として図1.に示すような格子座標系を用意する。格子座標系は縦にJ個、横にK個の格子点群からなり、各格子点群は布地の織り目を表し、j行目、k列目の点の集まりは布地の繊維と対応する。j行目、k列目にある格子点を P_{jk} と表す。 P_{jk} は図2.に示す視点座標系と呼ばれる3次元座標系上の位置を成分として持つ。ここで注意しなければならないことは、格子座標系はあくまで布地を疑似的に表したもので、各列や行、格子点が実際の繊維一本一本や織り目1つ1つに対応するものではなく、実際のそれらの数よりも少なく設定されるということである。格子点の数を増やすことでより実物に近いモデルにすることはできるが、モデルとして扱う場合のデータ量の削減と計算速度の向上のため適切な値をとることにする。

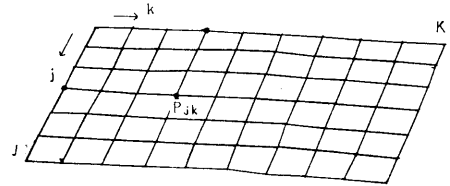


図1. 格子座標系

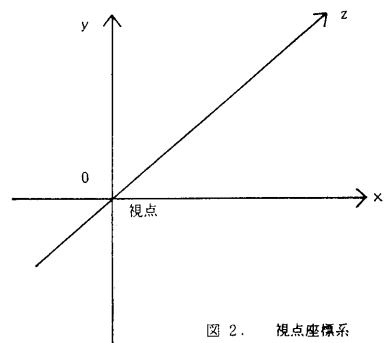


図2. 視点座標系

一部の材質を除き、布地には全体の形状が変化しても一本一本の繊維の長さは殆ど変わらないという性質がある。この性質を表現するため、格子座標系上の各点は視点座標系上でどのような位置にも存在しうるが隣り合う4点との相対位置から拘束を受けることになる。

一般に布地は4角形ではなく、また織り目どうしの間隔もどこも同一とは限らないが、本報告では簡単のため、最も単純なモデルとして長方形の布地を想定し、格子点間の距離は縦横ともに一様であるとする。

2. 2 格子点におけるパラメータの設定

格子座標系上の j 本目の行繊維と k 本目の列繊維の交点である格子点 P_{jk} におけるパラメータを定める。

図3. に示すように、格子点 P_{jk} を含む第 j

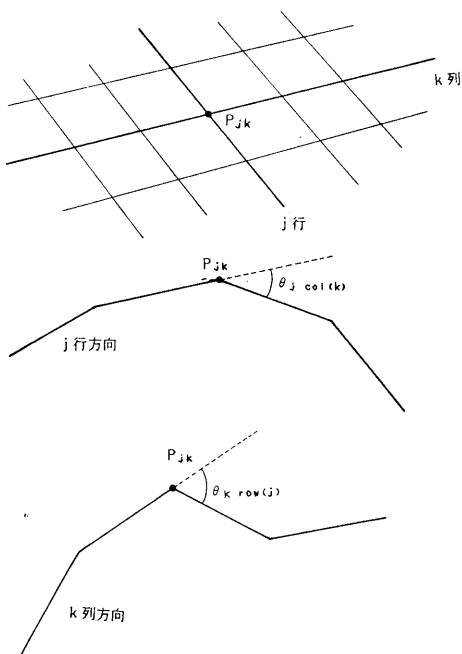


図3. P_{jk} における角度 $\theta_j \text{ col}(k)$, $\theta_k \text{ row}(j)$

行、第 k 列の中で P_{jk} の両側2本の線分のなす角度 $\theta_j \text{ col}(k)$ と $\theta_k \text{ row}(j)$ を定める。このように角度は1つの格子点に対して行方向と列方向の2つあるので、もし格子点が $J \times K$ 個あるとすると、 $\theta_j \text{ col}(k)$, $\theta_k \text{ row}(j)$ がそれぞれ $J \times K$ 個あるため角度は全部で $2 \times J \times K$ 個定められることになる。

布地はそれを構成する要素である繊維の太さによって違った様相、例えば太い繊維でできている布地は大きく滑らかなしわができやすいが、細い繊維からなる布地は小さく目の細かいしわが多く見られる。この違いを表現するため、あ

る特徴量を定める。布地を構成する繊維は一樣な材質でできており、一定の半径 r の円筒形であるものとする。

円筒形柱の曲げエネルギーは曲がり角の2乗と断面の半径の4乗に比例する。この関係を利用して、行方向の特徴量 $F_j \text{ col}(k)$ を次式で定める。

$$F_j \text{ col}(k) = k \times r^4 \times (\theta_j \text{ col}(k))^2 \quad (1)$$

k : 比例定数

r : 繊維の半径

$\theta_j \text{ col}(k)$: P_{jk} をはさむ j 行方向の2辺のなす角度

同様に列方向の特徴量 $F_j \text{ row}(k)$ を次式で定める。

$$F_j \text{ row}(k) = k \times r^4 \times (\theta_k \text{ row}(j))^2 \quad (2)$$

ここで比例定数 k の決め方について述べる。

図4. に示すような平面図形内に微小な面積要素 dS を考え、 dS から y 軸までの距離を z とすると、(3)式で示される M は y 軸に関する dS の面積二次モーメントを図形の全面積について加え合わせたもので y 軸に関するこの図形の断面二次モーメントといい、次式で表される。

$$M = \int_S z^2 dS \quad (3)$$

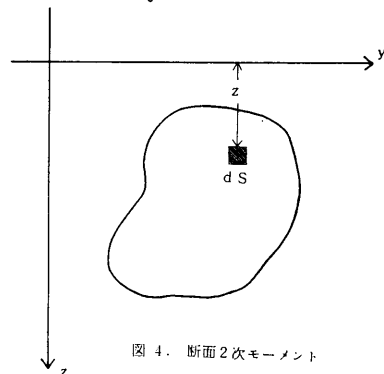


図4. 断面2次モーメント

円筒形においてはこの断面二次モーメントを図5. のような r , y , z , θ , dz , dS を用いて表すと以下のように求められる。

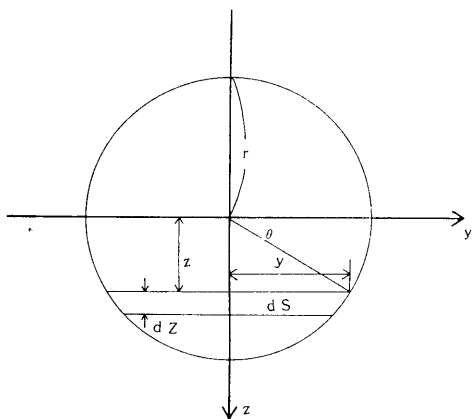


図 5. 円形断面 2 次モーメント

$$y = r \times \cos \theta \quad (4)$$

$$z = r \times \sin \theta \quad (5)$$

$$d z = r \times \cos \theta \times d \theta \quad (6)$$

$$d S = 2 \times y \times d z = 2 \times r^2 \times \cos^2 \theta \times d \theta \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \therefore M &= \int_S z^2 d S = r^4 \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \sin^2 \theta \times \cos^2 \theta \times d \theta \\ &= \frac{\pi \times r^4}{4} \quad (8) \end{aligned}$$

曲げによる単位長あたりのエネルギーが次式 U で表される。

$$U = \frac{1}{2} \times E \times M \times (d \theta)^2 \quad (9)$$

E: 縦弾性係数

M: 断面二次モーメント

d θ: 単位長あたりの曲がり角

E は繊維の場合 $0.001 \times 10^4 \sim 0.05 \times 10^4$ kg/mm² のオーダーの値を持つ定数である。(3)式から(9)式までの関係から特徴量 $F_{j \text{ col}(k)}$, $F_{j \text{ row}(k)}$ の比例定数 k は次の様に定められる。

$$k = \frac{1}{2} E \times \frac{\pi}{4} \quad (10)$$

以上布地の座標系とパラメータの設定について述べた。

3. 布地の変形と移動の表現

ここでは布地の変形や移動にともなう格子点の移動を 2. で設定した特徴量を用いて表現する方法について述べる。

布地を表す格子点の初期配置は終わっている、あるいは 1 ステップ前の格子点の位置は与えられたものとして以下 3. 1 から 3. 5 の処理を行い、移動後の格子点の位置を決定する。

3. 1 4 边上の点の移動

長方形の布地の 4 辺を構成する格子点群の位置は、希望する布地の変形や移動を直接表す要素であるため、その移動は新しい位置の座標値を直接与える。ただしこのとき必要ならば移動後の新しい座標を何らかの計算によって与えることもできる。布地の変形や移動は例え最終的に大きな変形や移動を希望していても、できるだけ微小な移動に分割し、逐次処理していくことがより布地らしい形をもとめるためには望ましい。4 边上のすべての格子点の新しい位置が決まったら、動かす前のそれぞれの位置、すなわち 1 ステップ前における座標値と、新しく定められた位置における座標値から、それぞれ 4 边上の格子点の移動ベクトルを計算する。4 边上の点は新しく定められた位置を直接、初期移動後の座標とする。

3. 2 長方形の内部の点の初期移動

3. 1 で求めた 4 边上の点の移動ベクトルを用いて、布地の長方形内部の点の初期移動を行う。

まず図 6. に示すように端から何番目の点であるかということを用いて、格子点が属する行や列の両端の点の移動ベクトルを線形補間してベクトルを求める。ここで求められる各点における移動ベクトルは、行と列方向から各 1 つずつ計 2 つ求められるはずである。

次に 1 ステップ前の布地の形状の特徴を残すため、この 2 つのベクトルをそのまま用いず、それぞれにある重みをかけてから 2 つを平均して各格子点の初期移動ベクトルとする。この重

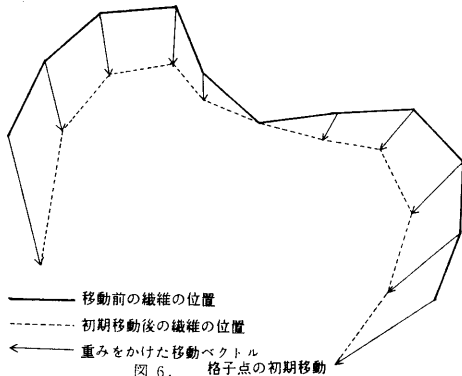


図 6. 格子点の初期移動

みは行や列の端に近い点ほど 1 に近く、両端から離れるほど 0 に近づき、各行や列の中央にあたる点では 0 になるように設定されている。

こうして求められた移動ベクトルを各格子点の座標に加える。上記の重みを用いた結果、長方形の中央付近の格子点は、この時点では 1 ステップ前の位置をほとんど動いていない。長方形内部の全ての格子点に対し以上 3. 2 の処理を行い初期移動を終える。

3. 3 長方形内部の点の 2 次移動

前節で求めた格子点の移動では 4 辺に近い格子点ほど新しい位置に近く、4 辺から離れた点ほど 1 ステップ前の位置に近い状態に配置されている。したがって多くの部分では周囲の 4 格子点との距離がそれぞれ一定値 W であると言う条件を満たしていないだろう。本節で述べる処理と次節の緩和処理で、各格子点が隣接する 4 つの点と互いに W の距離になるように修正する。

前節では各行や列の両端の移動ベクトルを補間したベクトルを直接用いずに、求めたベクトルに 4 辺との位置に応じて 0 から 1 までの重みをかけて各格子点の移動ベクトルとした。この状態で各行や列を構成する繊維の長さを調べる。布地は長方形であるため、各繊維の長さも長方形の辺の長さ L_1 、 L_2 のどちらかに等しいはずである。しかし現段階の点の位置では本来あるべき L_1 、 L_2 の値から大きくはずれている行や列が多いであろう。そこでこうした行や列に行う処理について次に述べる。本来の長さ L_1 、 L_2 と大きく異なった長さの行や列上の格子点は図 7. に示すように、3. 1 で求めた両端の移

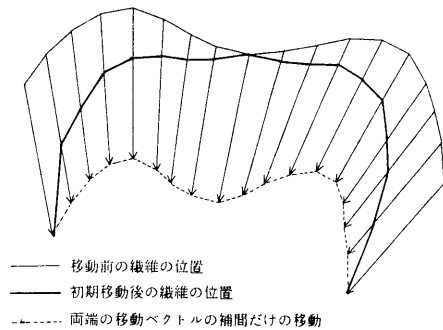


図 7. 繊維の長さの修正

動ベクトルを、線形補間して求めたベクトルを、重みをかけずに直接用いる。この場合の移動すべき位置を求める。その行や列上の各格子点を求めた位置へと近づけるか、または遠ざける。こうして移動させても、本来の長さである L_1 、 L_2 にそれ以上近づかない場合はこの移動を止める。逆に本来の長さ近づいた場合はさらに移動を続ける。こうしてある程度各行や列を構成する繊維が正しい長さをもつ状態に近づいたものとして、長方形内部の点の 2 次移動を終える。

3. 4 緩和処理

3. 3 までで求められた格子点の位置に緩和処理を施す。ここでいう緩和処理とは隣接する格子点どうしの距離が本来の値 S に近づくように各格子点を移動させることである。この場合も繰り返し処理を重ねることで、各格子点が隣接する 4 点と正しい距離 S になった状態を近似的に求めることができる。

3. 5 パラメータの値による点の再移動

本節では 1 式で定めた特徴量を用いて 3. 4 までで定めた点を再度移動する。予め決定された布地の初期形状は繊維の太さや材質を考慮したものであったとしても、点の移動を行っていく過程で初期形状が持っていた繊維の太さや材質による特徴が失われてしまうことが考えられる。この現象を防ぐため以下の処理を行う。

1) 各行、列ごとにその行や列に属する全ての点の特徴量である $F_{j, col(k)}$ や $F_{j, row(k)}$ の総和を求める。例えば第 j 行に関して、第 j 行に属する点が K 個あったとすると、次式のように $E_{col(j)}$ を計算する。

$$E_{\text{col}(j)} = \sum_{k=1}^K F_{jk} \text{col}(k) \quad (11)$$

2) 各行、列の両端の点どうしの直線距離を求め、例えば第 j 行の両端の点の座標を P_{j1} , P_{jk} というベクトルで表すとき、次式で $L_{\text{col}(j)}$ を定める。

$$L_{\text{col}(j)} = |P_{j1} - P_{jk}| \quad (12)$$

3) 布地の辺の本来の長さ L と 2) で求めた距離との差の 2 乗に比例する量 e を定める。例えば第 j 行について次式 $e_{\text{col}(j)}$ が定められる。

$$e_{\text{col}(j)} = k \times (L_{\text{col}(j)} - L)^2 \quad (13)$$

k : 比例定数

L : 行方向の本来の長さ

4) 以上 1) ~ 3) のようにして求めた E と e を各行、列ごとに比較し、もし E が e の値とある許容量以上離れた値をもった場合、その行、あるいは列上の各格子点に対して図 8. に示す方向に再移動を行う。

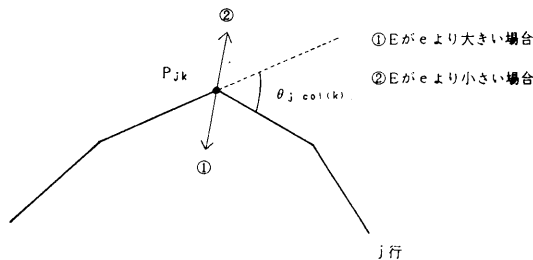


図 8. パラメータの値から決定される再移動

上記 1) ~ 4) の処理は各々の行や列ごとに独立して行われる。本来行方向と列方向における処理を完全に独立に考えることはできないが、3 式で決められる特徴量 F は行か列どちらか 1 方向で隣接する 2 点との間になす角度から決定されるが、正確さを求めるとここで用いるべき角度は行方向、列方向両方に隣接する 4 点からなる立体角である。これを用いることは計算を複雑にし、処理を難しくするため本研究では上記の 2 つの角度だけを用いることにした。

初期形状とその次の段階の 4 辺の位置を与えられた場合に各点を移動する方法について述べた。3. 1 から 3. 2 の方法で布地を表す各点の位置を決定し、3. 3, 3. 4, 3. 5 の方法で前段階のしわの様子を崩さず、布地の特徴をもた維持し続けるような形状を求める。なお 3. 5 の特徴量で求めた移動の後、再び 3. 4 の緩和処理を行い、さらに必要ならば 3. 5 と 3. 4 の処理を順次繰り返す。最終的な移動後の布地の形状を決定する。ここで述べた方法を布地の変形や移動の各ステップ毎に行うことで布地らしい性質を示す変形の様子を表現できる。

4. 本手法の適用例

これまでに述べてきた手法を用いて、実際に布地の変形の表現を試みた例について示す。

図 9., 図 10. は 3. で述べた手順を用いて変形させた長方形の布地の様子を示している。これらの例では 4 端点の移動ベクトルだけを与え、4 辺上の点、並びに長方形内部の点の移動を本手法から計算で求めている。図 9. は布地を構成する格子点群をワイヤフレームを用いて表したもので図 10. はそのデータにシェーディング処理を施したものである。

一定速度の風の流れの中ではためく旗の様子を表現する方法が発表されている [3]。これは布地を表す格子点に加わる、風による外力、隣接点との間の伸び方向に働く弾性力、減衰力を差分近似によって解いたものであった。図 11. はこの解法によって得られた格子点の動作データの一例である。この方法では隣接する点に働く曲げ方向の力が考慮されていないため、場合によっては図 12. のように不自然なデータが算出されてしまうことがある。例えば格子点を布地の大きさに比べ、細かくとつたとしても同様な現象が起こるため、旗の布地らしい印象を損なってしまうことになる。

そこで、布地を表す格子点全てに関して、こうした解析的手法を用いず、ある程度間引いた点についてだけ、予め外力、伸び側の弾性力、減衰力の計算から座標データを求めておく。次にこの間引かれた点のデータをもとに、その間にある残りの格子点の移動を本報告の手法を用

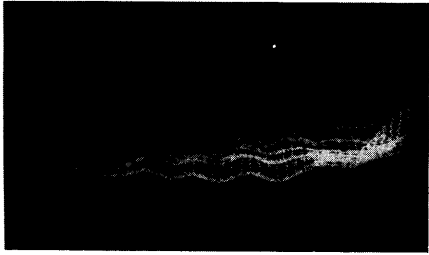


図 9. 本手法を用いて求められたデータ

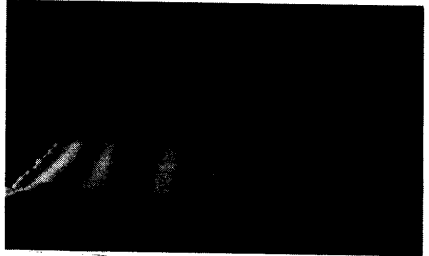


図 10. 布地の変形を表した例



図 11. 近似的に求められた旗のデータ

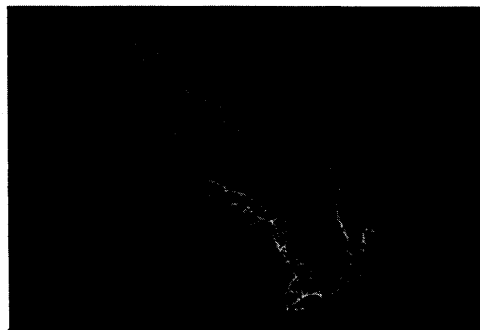


図 12. 不自然さの目立つデータ例

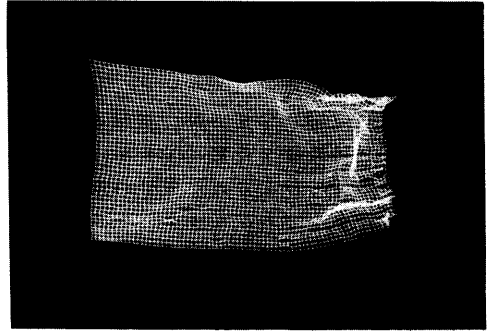
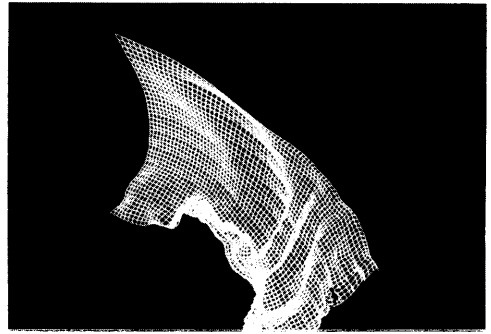


図 13. 得られたデータ

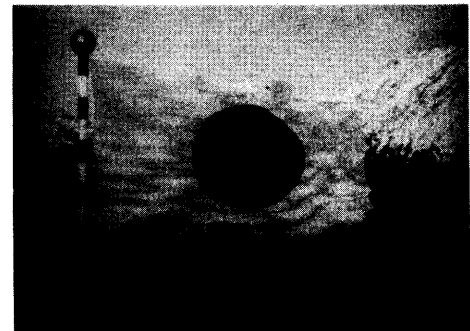


図 14. 画像表示例

いて計算する。こうして各時点の布地の形状を求めらる。

図13、図14は求めた点のデータをワイヤフレーム、シェーディング、マッピング処理を用いて表示したものである。

この例では局所的に本報告の手法を用いているため、各部位を見た場合には曲げ弾性力による特徴を持っている。また全体の形状としても外力や減衰力も考慮されたものとして表現することができる。

5. ま と め

変形過程中的の布地のモデリング、移動の表現に関する手法について述べた。布地の弾性的特性を考慮した特徴量を設定してモデリングを行い、これを用いて与えられた条件のもとで布地の変形を表現することができた。またこの方法を用いて求めた例を紹介した。

今後の課題としては以下のようなことが考えられる。布地が強い外力によって折り畳まれた時、折り目のような“しわ”ができ、とれなくなる。設定した特徴量の値と動作との関係について検討し、この様子を表現することができるような工夫。また布地が、さらに複雑な形状に変形した場合、布地の各部位が互いに接触し、干渉し合う。この自己干渉の様子を表現することができるデータの形式、変形処理のアルゴリズムについても検討していきたい。

参 考 文 献

- 1) 中嶋正之、安居院猛：“CGによる自然物体の表現方法”，テレビジョン学会全国大会講演予稿集，
pp. 575-578. (1989).
- 2) Jerry Weil：“The Synthesis of Cloth Objects”，
SIGGRAPH '86 Conference Proceedings,
Vol. 20, No. 4,
pp. 49-54. (Aug. 1986).
- 3) Demetri Terzopoulos, John Platt,
Alan Barr, and Kurt
Fleischer：“Elastically Deformable
Models”，
Computer Graphics, Vol. 21, No. 4,
pp. 205-214. (July 1987).
- 4) 宇田紀之、鶴岡信治、木村文隆、三宅康二：
“布地物体の材質感表現”，
第3回NICOGRAPH論文コンテスト論文集，
pp. 192-199. (Nov. 1987).
- 5) 木元宏次、大野義夫：“テクスチャ・マッピングによる布の材質感表示”，情報処理学会第37回（昭和63年後期）
全国大会予稿集，pp. 1685-1686. (1988).
- 6) 宇田紀之、鶴岡信治、木村文隆、三宅康二：
“垂下した布地物体の形状表現”，グラフィクスとCAD研究会資料33-2，
(July 1988).
- 7) 安居院猛、大川雅弘、中嶋正之：“拘束条件の強い布地物体の表現”，電子情報通信学会春期全国大会予稿集，
Vol. 2, pp. 285-286. (1987).