仮想布操作のための視覚・力覚フィードバックの実現

和田典大† 亀田 能成†† 角所 考†† 美濃 導彦††

†京都大学大学院情報学研究科 ††京都大学総合情報メディアセンター

本研究では、仮想環境での布の対話的な操作における、視覚及び力覚のフィードバックの実現を目的とする。
布は柔軟で大きな変化を伴う物体であるため、仮想環境での操作に対する布の振る舞いを把握するための操作者へのフィードバックは重要となる。その重要性は操作による変形のない剛体の操作に較べてはるかに高い。従来の布シミュレーションの研究においては、操作に伴い変化する布の形状を視覚的に操作者に伝えることを考えている。これに加えて力覚のフィードバックがあれば、布の形状、質感を布からの反力として操作者に伝えることができる。また、このようなフィードバックに布が持つ物理的特性が反映されていれば、布の種類に応じた物理的振る舞いを操作者に伝達できる。そこで本研究では、布の物理的特性を反映した視覚及び力覚のフィードバックのための、シミュレーションを行う。布の物理的特性としてはKES法による計測結果を利用する。そして、曲げ特性を反映したシミュレーションについて、布の曲げ特性の違いが実際にフィードバックの違いとして現れることを示す。

1 はじめに

アパレル業界における衣服のデザインは、衣服の大まかなデザインを描くラフスケッチ、それを基にした型紙生成、型紙に合わせて実際に布を切り人体への着せ付けを行う寸法確認など高度な技能や経験を要する作業である。寸法確認の段階で寸法に違いがあれば再び型紙生成からやり直す必要がある。このような作業は、専門技能を持たないものが手軽に実行することは困難である。そこで専門技能を持たないものにも、コンピュータ上での衣服のデザインを可能とするような仮想環境の構築を目標とした研究として、坂口らのPARTY[1]、岡部らのアパレルCADシステム[2]、Pascal Volino、Nadia Magnenat Thalmannらによる[3]などの研究が行われている。

布は柔軟で操作によって大きな変化を起こす。そのため、布を仮想環境で対話的に操作するとき、操作者に布の振る舞いを的確に把握させるためのフィードバックが重要となる。その重要性は、操作による変形のない剛体の操作に較べてはるかに高い。前述の研究ではいずれもコンピュータグラフィックスとしての布の忠実な再現を目標にし、外力により変化する布の形状を視覚フィードバックして操作者に見せることを目指している。これに加えて力覚のフィードバックがあれば、操作中の布の形状、質感を布からの反力として操作者に与えることが可能となり、操作に伴う布の振る舞いの情報を操作者が把握する上で有効であると考えられる。さらに、フィードバックにそれぞれの布が持つ物理的特性が反映されていれば、布の種類に応じた物理的振る舞いの情報を操作者に伝達できる。そこで本研究では、布に対する操作、変形に伴う視覚及び力覚のフィードバックを実現し、そこに布の物理的特性を反映させることを目標とする。

布の物理的特性を表わすデータとして、KES法（Kawabata'sEvaluation System）[4]による計測データがある。KES法とは、布の性質を知るために布が持つ物理的特性を計測する方法で、布の風合いを調べるために繊維業界では広く用いられている。

KES法で計測する布の物理的特性には、引張り特性（縦糸・横糸方向について伸び回復力と伸び率の関係）、曲げ特性（曲がっているときの曲率と曲げ回復力との関係）、表面特性（表面摩擦と粗さ）、剪断特性（剪断方向の伸び率とかかる力との関係）、圧縮特性（圧縮荷重と圧縮歪みとの関係）、重量・重み特性（厚さと単位面積当たりの重量）という6つの特性がある。これらの特性のうち、布の形状シミュレーションを行う上で特に重要となる特性は、引張り特性、曲げ特性であると考えられている[1]。

図1に、曲げ特性の計測結果を示す。計測は長さ10cm, 幅1cmの布に対して曲率を-2.5から$2.5cm^{-1}$まで等速度曲率で曲げ変形を行い（表曲げ過程）、その後再び曲率を2.5から$-2.5cm^{-1}$まで逆向きに曲げ変形を行う（裏曲げ過程）という2つの過程について行われる。図における2本の曲線は、表曲げ過程、裏曲げ過程におけるそれぞれの曲率と曲げ回復力の関係を示す。

曲げ特性が曲率（位置）から曲げ回復力を導くものであるのに対し、引張り特性は引張り力から伸び率（位置）

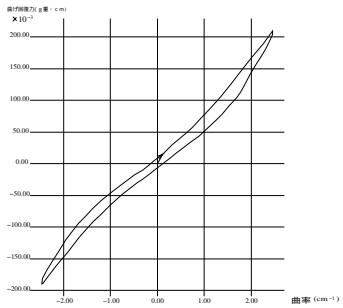


図 1: KES 法によるウールの曲げ特性計測結果

を導く。したがって、[1] では、曲げ特性のみを力学的制約として用いた制約充足処理の後、引張り特性を幾何学的制約として用いた制約充足処理を実行することにより布のシミュレーションを行っている。しかし、制約充足処理のために、2 度の最急降下法が必要となり、本研究で目標とする布の対話操作のための実時間処理には適さない。

そこで本研究では、実時間処理のため、布の物理的特性としては曲げ特性のみを導入し、引張り特性についてはばねの特性を用いる。これにより、布の物理的特性を反映した視覚フィードバックを、対話操作に十分な処理時間で実現する。さらに、操作点にかかる力をこれらの特性に基づいて計算し力覚的に提示することで、布の物理的特性を反映した力覚フィードバックを実現する。

そして、これらのフィードバックが操作者に布の形状、材質などの情報を伝える上で実際に有効なチャネルとなり得るかどうかについて検討する。

2 視覚フィードバック

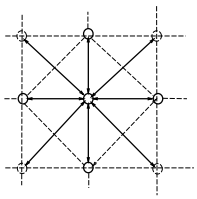
2.1 布のモデル

KES 法で計測された特性は、布を構成する質点の位置関係と質点にかかる力との関係を示すものと考えることができる。そこで、布を有限個の質点からなる、正方格子状のメッシュを用いて表す。このとき正方格子をなす各質点は、布の縦糸と横糸を表わす。個々の質点が互いに影響をおよぼすことなく独立に移動するのであれば、それは布には見えないが、質点間に制約を与えることにより正方格子は布としての挙動をシミュレーションすることができる。

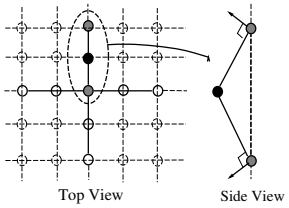
本研究では布の形状制約として、

- 伸び制約
  垂直、水平、斜め方向に隣接する 8 質点との距離について、初期長からの伸びを 0 に戻そうとする制約
- 曲げ制約
  垂直、水平方向に連続する 3 質点がなす布の曲がり具合いに対する制約。布の曲率を 0 に戻すような制約

という制約を考える (図 2)。



(a) 伸び制約



(b) 曲げ制約

図 2: 制約

2.2 ばねモデルに基づく伸び制約

最も一般的に考えられる伸び制約は、質点間の距離の初期長からの伸びに比例した大きさだけ、質点間の距離が縮まる方向に質点の位置を修正するというばねの特性を導入したものである。これは以下のように定式化できる。

$P_i = (x_i, y_i, z_i)$ を i 番目の頂点の座標、$Q_k(k = 1, ..., 8)$ を P_i と隣接する 8 つの頂点、L_k を頂点間距離 ($P_i\bar{Q}_k$) の初期値 (定数) とするとき、伸びに関するエネルギー関数 E_{tns} を以下のように定義する。すなわち E_{tns} は伸びの 2 乗和であり、線分 $P_i\bar{Q}_k$ をばねと仮定したときの力学的エネルギーに比例する。

$$E_{tns} = \sum_{k}^{8} (|P_i - Q_k| - L_k)^2 \qquad (1)$$

これを最小値 0 に近づけるように、質点の位置を修正する。本研究では、この制約を伸び制約として質点 P_i に与える。

2.3 KES 法の曲げ特性に基づく曲げ制約

曲げ特性を質点間の曲げ制約として表現することを考える。まず, 連続する 3 質点がなす曲率を求め、KES の曲げ特性においてその曲率に対応する曲げ回復力を得る。次に、連続する 3 質点を含む平面を考える。3 質点の両端の 2 点と、中間の点を結ぶ 2 本の直線を考え、平面上における 2 直線のそれぞれの法線ベクトルを導く。ただし、2 本の法線ベクトルの向きは 2 直線がなす角度を 0 に近づける向きとする (図 3の$\vec{N_i}$及び$\vec{N_l}$が相当)。そして、両端の 2 点に、曲げ回復力をそれぞれの法線ベクトル方向に与えることで各質点の位置を修正する。

2.2と同様に $P_i = (x_i, y_i, z_i)$ を i 番目の頂点の座標、$R_l(l = 1, ..., 4)$ を P_iと垂直水平方向に 1 つおきにある 4 つの質点とする。P_i, R_l及びそのあいだの質点 Mより決まる曲率 Kを求める。

曲率は隣接質点を結ぶ線上では一定と仮定して計算することができるが、角度が小さい場合はこの仮定による計算は正確さに欠ける。そこで、角度が小さい場合に、より正確な計算を行うため以下の式 (2) で求める。

$$K = \begin{cases} \frac{2}{l_l} cos\theta_l & \frac{\pi}{4} < \theta_l \leqq \pi \\ -(\frac{\pi}{4})\frac{\beta}{\theta_l} + \alpha + \frac{\pi}{4}\beta & 0 \leqq \theta_l < \frac{\pi}{4} \end{cases} \qquad (2)$$

ただし、θ_lは、$\vec{MP_i}$、$\vec{MR_l}$がなす角度、l_lは質点 P_i, R_l 間の距離、$\alpha = \frac{2}{l_l} cos(\frac{\pi}{8})$、$\beta = \frac{1}{l_l} sin(\frac{\pi}{8})$ とする。

得られた曲率から、KES の曲げ特性グラフを参照し対応する曲げ回復力を得る。

$$t_l \quad = \quad \phi_l^h(K) \qquad (3)$$

ここでϕ_l^hは、グラフで参照されるヒステリシスを含む曲げ特性関数を表わし、t_lは曲げ回復力の値である。

このとき、弾性曲げの理論に基づいて、曲げに関するエネルギー関数を計算することができる。

単位幅当たりの曲げエネルギーは以下のようになる。

$$U = \int_0^{l_0} |\frac{t_l K}{2}| ds \qquad (4)$$

ここで l_0は隣接質点間の距離である。

隣接質点を結ぶ線分を中心軸に $l_0 \times\ l_0$方形 (図 3の斜線部) を考える。このとき $l_0 \times\ l_0$方形内では曲げ回復力及び曲率は一定であるとすれば、曲げエネルギーは以下のようになり、曲率の関数として定義することができる。

$$E_{bnd} = \sum_l^4 |\frac{t_l K}{2}| {l_0}^2 \qquad (5)$$

これを最小値 0 に近づけるように、質点の位置を修正することで曲げ制約とする。

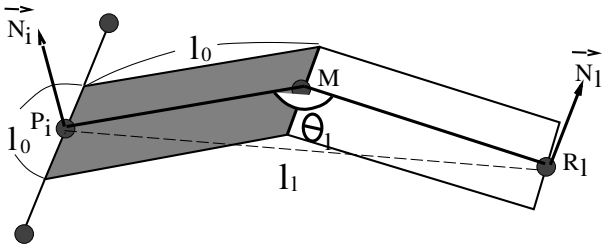


図 3: 曲げ回復

2.4 視覚フィードバックの実現

2.2、2.3で述べた 2 種類の制約に基づいて、布の形状変化に応じた視覚フィードバックを実現する。

仮想環境内の布の操作には、3 次元ポインティングデバイスを用いるものとする。

ポインティングデバイスにより、仮想環境内の布のある質点をつまみ布を操作すると、その操作に伴い、布の各質点と隣接質点との位置関係が変化する。その位置関係から 2.2、2.3で述べた制約を満足するように各質点の座標が次々と更新される。

このときの各質点の座標は以下の式で表わされる。

$$P_i(t+1) = P_i(t) - \gamma_1 \frac{\partial E_{tns}}{\partial P_i} - \gamma_2 \frac{\partial E_{bnd}}{\partial P_i} \qquad (6)$$

ここで、$P_i(t+1)$ は修正後の質点 P_iの座標を表わし、右辺 2 項及び 3 項は式 (1)、式 (4) で得られる位置関係から与えられるエネルギーを最小化する、質点 P_iの修正値である。

このようにして得られる各質点がなすポリゴンをレンダリングして描画し、ディスプレイに示すことにより操作者への視覚フィードバックを実現する。

3 力覚フィードバック

力覚フィードバックは、力覚フィードバック機能を備えた 3 次元ポインティングデバイスを用いることで実現する。力覚フィードバックは、操作質点にかかる制約に基づいて以下のように与えられる。

質点 P_iを操作するとき、隣接質点との位置関係から伸び回復力$\vec{F_{tns}}$が、そして 1 つおきの質点との位置関係から曲げ回復力$\vec{F_{bnd}}$が与えられる。与えられる力の大きさ$\vec{F}$は以下のように表わされる。

$$
\begin{aligned}
\vec{F} &= \vec{F_{tns}} + \vec{F_{bnd}} \\
\vec{F_{tns}} &= K_1\{\sum_{k}^{8}(l_{ik} - L_k)P_i\vec{Q}_k\} \qquad (7) \\
\vec{F_{bnd}} &= \sum_{l}^{4} t_l l_0 \vec{N_i}
\end{aligned}
$$

ここで、K_1は定数である。

力覚フィードバックは、このようにして得られる力をポインティングデバイスの力覚フィードバック機能を用いて操作者に与えることで実現する。

4 実験及び考察

前述の処理を以下のような環境で実装した。

- グラフィック処理言語: OpenGL ライブラリ
- 3 次元ポインティング及び力覚フィードバックデバイス: PHANToM (SensAble Technologies, Inc.) (図 5)

4.1 視覚フィードバックへの特性反映の確認

布の曲げ特性の違いが視覚フィードバックにより伝達されることをドレープの比較により確かめた。ドレープの比較とは布のたるみやしわを調べるもので布の曲げ特性の違いによる振る舞いの違いを調べるのに適している。

4 種類の布について、ドレープの形状の比較を行った。各布は 18 × 18 個の質点からなり、布の端部の 5 × 5 個の質点を固定した後に自由落下させる。これは布をテーブルにかけたときの角部分での状況に一致する。

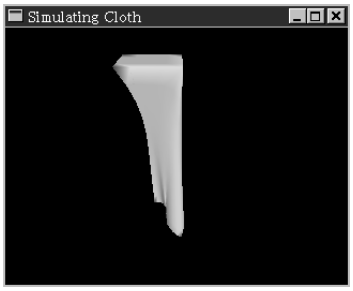
形状が安定するまでに、約 10HZ の更新速度で約 30 秒間計算を行った。その結果を図 4に示す。

実験結果において、曲げ特性 6,10 の布は手前の角の部分において大きくふくらんでいる。これは、曲げ回復力が強いために元の形状に戻ろうとするからである。曲げ特性 3 の布についてもある程度のふくらみが見られるが、曲げ特性 1 の布は、ふくらみが少なく、曲げ回復力が弱いことがはっきりと確認できる。

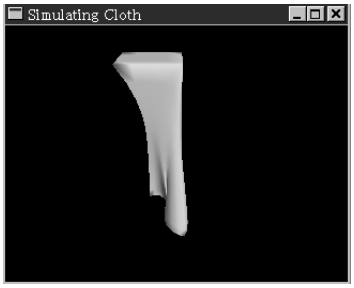
このように曲げ特性の違いがドレープに現れることから、実時間性を保ちつつ、視覚的なフィードバックに布特性の違いが現われることが確認できた。

4.2 力覚フィードバックへの特性反映の確認

布の曲げ特性の違いが力覚フィードバックにより伝達されていることを、布の曲げ操作により確かめる。これは KES 法の布の曲げ試験と同様の操作であり、力覚的に布の曲げ特性が最も確認しやすい操作であるといえる。

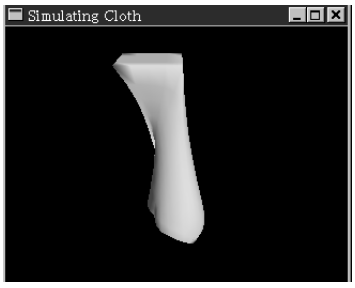


(a) 曲げ特性 1



(b) 曲げ特性 3

(c) 曲げ特性 6



(d) 曲げ特性 10

図 4: ドレープの比較

17 × 9 の質点からなる布を操作する。操作に伴い変化する布の形状に対して、操作点にかけられている力覚フィー

図 5: PHANToM (SensAbleTech,Inc.)

ドバックの方向を図 6に示す。図において力覚フィードバックの方向は布上の操作点から伸びたベクトルにより示される。

図が示すように、曲がっているときには安定状態に戻ろうとする方向に力がかかる。

また、布を初期状態から曲げたときの、質点間がなす曲率とかかる力の大きさの関係を図 7に示す。

表曲げヒステリシスのみを用いていること及び負の曲率に対して正の曲げ回復力を与えないように修正を加えていることから完全には一致していないが、曲率とそれに応じて操作質点にかかる曲げ回復力の大きさ (図 7 (a)) は、曲げ特性グラフ (図 7 (b)) に対応したものとなっている。

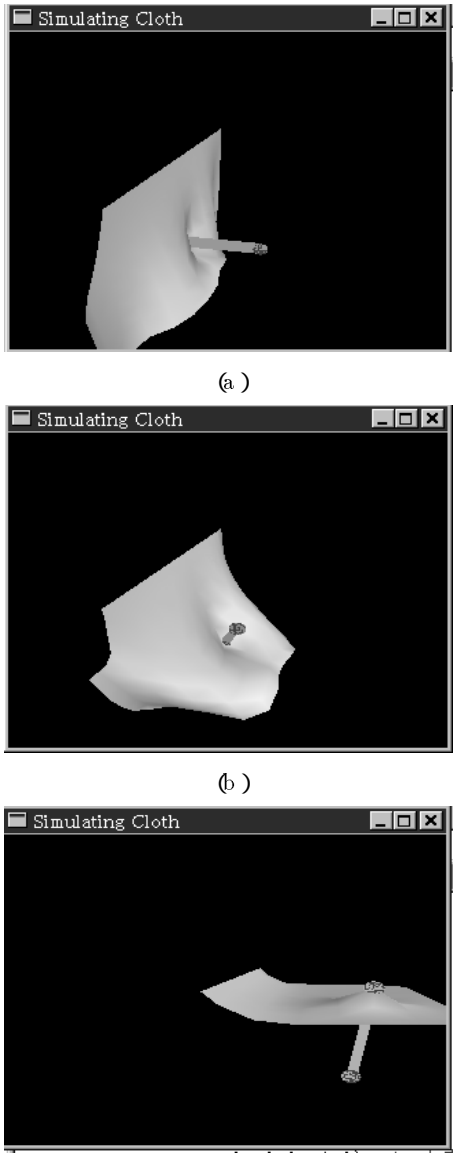
異なる種類の布の場合についての実験結果を図 8に示す。図が示すように、同じ曲率でも布の種類により操作質点にかかる力が異なる。

以上のように、曲げ特性の違いが返される力の違いとなって現れていることから、力覚フィードバックに布特性の違いが現れることが確認できた。

4.3 考察

本実験では、視覚及び力覚のフィードバックに布の曲げ特性の違いが現われることを確認した。

本実験で行ったドレープテストのように重力のみが外力となる場合であれば、布はそれほど伸びないので、曲げ特性のみでもある程度布らしいシミュレーションは可能である。しかし、布をつまんで様々に操作し、それに伴う的確な反発力を得るためには、これでは十分ではない。そのため、引張り特性あるいはその他の特性を反映



(a)

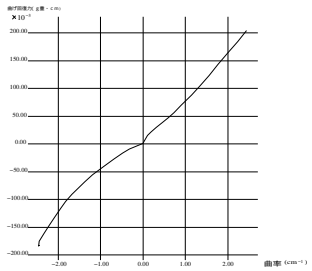
(b)

(c)

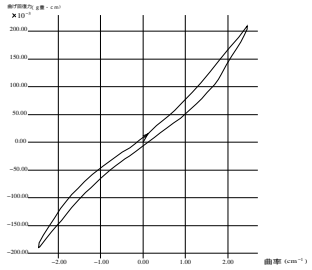
図 6: 曲げ回復力の力覚提示の方向

させたうえで、視覚及び力覚のフィードバックを出力として与えられるような、シミュレーションの構築が必要となる。

また、本実験では曲げ特性として表曲げ過程の計測結果のみを用いた。KES 法による計測結果は、布をある最小曲率からある最大曲率まで変化させたときのヒステリシスを含めた曲げ回復力の変化である。そのため、ある最大あるいは最小曲率に達するよりも以前に異なる曲げ過程に変遷した場合、計測結果はそのまま用いることはできない。そのような場合の計測結果の補間方法など、裏曲げのヒステリシスを含めた特性の表現について検討す

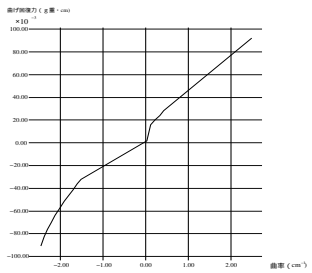


(a) 曲率とフィードバックされる力の関係

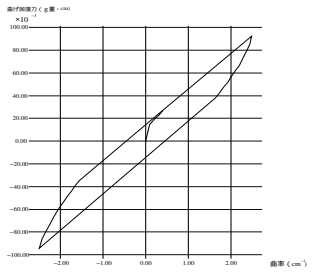


(b) KES による計測値

図 7: 曲率と曲げ回復力の関係 (曲げ特性 3)



(a) 曲率とフィードバックされる力の関係



(b) KES による計測値

図 8: 曲率と曲げ回復力の関係 (曲げ特性 1)

る必要がある。

5 まとめ

本研究では、仮想環境において布操作を行う際に、操作に対する布の振る舞いを操作者へフィードバックすることが重要であると考え、布の物理的特性を反映した視覚及び力覚のフィードバックの実現について述べた。具体的な物理的特性として KES 法による計測データの中から、曲げ特性を取り上げ、この特性の違いを反映した視覚及び力覚のフィードバックを実現した。そして、実験によって布の特性の違いが実際に視覚及び力覚のフィードバックとして顕著に現れ、これを布の特性の把握のための有効な情報として操作者に提示できることを確認した。

今後は、KES 法による曲げ特性以外の、引張り特性などの計測データを反映させる布モデルの考案が必要となる。

さらに、力覚提示に関しては物理的特性による力に加えて、押す側 (指など) の加速度、空気抵抗、布同士の摩擦などに関連すると思われる反力のメカニズムの導入についても考えていく予定である。

参考文献

[1] 仮想服飾環境 PARTY-動的変形可能な布のための数値計算法、電子情報通信学会論文誌 (94 年 5 月 pp.912-921)

[2] Three Dimensional Apparel CAD System, Hidehiko Okabe, Haruki Imaoka, Tkako and Haruo Niwaya

[3] Pascal Volino, Martin Courchesne and Nadia Magnenat Thalmann: Versatile and Efficient Techniques for Simulating Cloth and Other Deformable Objects, SIGGRAPH '95 Proceedings, ACM, Addison-Wesley, pp.137–144(1995).

[4] 風合い評価の標準化と解析、川端季雄

[5] 荻野 友隆: 動的変形に基づく布形状の高速シュミレーション、京都大学大学院工学研究科情報工学専攻修士論文 (1997)

[6] 北脇淳、亀田能成、角所考、美濃導彦、仮想空間における対話的衣服設計に関する基礎的検討

[7] Predicting the Drape of Woven Cloth Using Interacting Particles , David E.Breen Donald H.House Micheal J.Wozny