

ほつれを伴う布の破れのシミュレーション

Cloth Tearing Simulation with Frayed Edges

メタアパノン ナパーポーン* 坂東 洋介*、† 陳 炳宇‡ 西田 友是*

Napaporn METAAPHANON* Yosuke BANDO*、† Bing-Yu CHEN‡ and Tomoyuki NISHITA*

*東京大学

† (株)東芝

‡ 国立台湾大学

*The University of Tokyo

† TOSHIBA Corporation

‡ National Taiwan University

E-mail: *{noimeta, ybando, nis}@nis-lab.is.s.u-tokyo.ac.jp, ‡ robin@ntu.edu.tw

1. はじめに

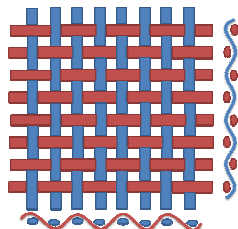
コンピュータグラフィックスの分野における布の表現の研究では、主に連続体としての布の変形に焦点が置かれてきた。典型的には、布は弾性素材のシートとしてモデル化され、布の巨視的な幾何形状のみを表すことができる。このようなモデルは、圧縮や伸びや曲げなどを表現できるため、一般的な場合には、布の表現に適している。ただし、場合によっては布を総体的に扱うことは十分ではない。例えば、破れた布の場合である。

織布の破れ目には通常、ほつれが図 1(a)のように作られる。製織が崩れ、糸が簡単に動く。これは、織布に特徴的な現象である。多くのコンピュータグラフィックスの研究では、織られた糸同士は相対的に移動しないと仮定されるため、破れ目のほつれは一般に無視され、ゴムのように滑らかな破れ目だけが表示されるような結果となる。

本研究はほつれを伴う布の破れをモデル化する方法を提案する。糸が破れ目で互いに滑ったり、動いたりできるようにするため、布の各糸をバネ-質点系モデルに基づいてモデル化する。各バネの伸張の比率が上限値を超えると、バネが一本ずつ切られて、周りのバネが互いに滑るようになる。破れが進み、これらの糸が互いに離れると、他の近傍の糸がさらに滑り始める。つまり、我々のモデルでは、ほつれが布を伝播する。我々の方法は、さまざまな加重をかけたときの、さまざまな布のほつれの動的挙動を表示できる。



(a)



(b)

図 1: (a)ほつれを伴う破れた布の例 (b)平織の構造

2. 関連研究

布の破れのシミュレーションは、布シミュレーションと破壊シミュレーションとに関係があるので、以下にそれぞれの関連研究を述べる。

2.1 布シミュレーション

従来のコンピュータグラフィックスにおける布は一般的な材質のシートとしてモデル化されてきた。1988年に Terzopoulos ら [25, 26, 27]は運動と弾性表面エネルギーのラグランジュ方程式を使って、有限差分法により方程式の解を取得する手法を提案した。Terzopoulos らの手法を拡張し、Magnenat-Thalmann の研究グループ[7, 29, 31]はより正確なモデルを開発した。Baraff と Witkin[4]は三角形にグループ分けした離散的な点集合で布をモデル化した。Breen[2]はエネルギーの最小化に基づいて、布の正確な構造をモデル化した。より最近では精度の代わりに計算速度を追求するモデルも開発されている。例えば、Volino と Thalmann[30]の研究および Provot[23]のグリッドモデルが挙げられる。

布シミュレーションの重要な要素は精度と速度だけではない。シミュレーションの数値的不安定性を避けるため、Baraff と Witkin[4]は陰的積分法を用いた。また、ひだとシワが付いている布をシミュレーションするため、Bridson ら[3]は、陽的積分と陰的積分を混合する方法を使用した。他の研究は衝突処理[1, 5, 30]や曲げモデル[3, 9]や布の座屈の表現[6, 33]や伸縮しにくい布の表現[1, 10, 23]などを提案した。

上記の技術は全て、布の動的ほつれを表すように意図されていない。いくつかの手法は布の破れをシミュレーションできるが、糸レベルのモデル化を行わないため、一般に、滑らかな破れ目しか表現できない。

もちろん、我々の方法は最初の糸レベルの織布モデル化方法ではない。例えば、Peirce[22]の糸レベルモデルや Kemp[14]の改良 Peirce モデルや、Warren[32]の糸の交点の曲線モデルなどが存在する。最近のモデルとしては、

Jiang と Chen[13]による B スプライン曲線に基づいた静的な織布モデルと、Nadler ら[18]の二スケールの有限要素法がある。これらの研究は、主に、布の非線形的な挙動を表現・予測することを目的とした、繊維工業のためのモデルであり、動的なほつれを伴う布のアニメーションに適当ではない。Kaldor ら[15]はコンピュータグラフィックス用途の糸レベルの編物のモデルを提案したが、破れとほつれは考慮されていない。

2.2 破壊シミュレーション

コンピュータグラフィックスの分野で、破壊シミュレーションは数種類の材質について研究された。1988年に、Terzopoulos と Fleischer[25, 26]は紙や布のような材料を破る技術を示した。また、O'Brien と Hodgins[21]の脆性破壊のシミュレーションや O'Brien らの[20]延性破壊のシミュレーションも有限要素法に基づいたものである。

Norton ら [19] はバネ-質点系システムを使用して、大変形によって壊れる固体をモデル化した。Hirota ら [12] もバネ-質点系を使用して、亀裂を伴う泥の乾燥をモデル化した。Smith ら [24] はバネ-質点系の代わりに、拘束力に基づいて、脆性物体の粉砕をシミュレーションした。Müller ら [17] の方法と同様に、このモデルにおける亀裂は多角形の辺に沿って発生・伝播する。

残念ながら、上記の方法はいずれも破れた布の動的なほつれをシミュレートする目的には直接使用できない。

3. 織布のモデリング

本節はまず、織布の基本的な構造を説明する。次に、布の破れていない部分をシミュレートするための「基本モデル」と破れおよびほつれをシミュレートするための「糸レベルモデル」を説明する。最後に、いつ、どのように基本モデルから糸レベルモデルに遷移するかを説明する。

3.1 織布の仕組み

織布は、おそらく工学応用で最も一般的に使用される布である[28]。織布は、主に縦糸と横糸から形成される。垂直に張られた縦糸に対して、横糸が絡みながら水平に張られる。これらの糸の質や織り方などが布の機械的特性を制御する[11]。最も簡単な織り方は「平織」である。平織は図 1(b)に示すように、各横糸が単に縦糸を上と下に繰り返してまたいだ織り方である。

説明の簡略化のため、以下における製織パターンは平織を仮定するが、提案法は他の製織パターンにも簡単に適用できる。6節では、あや織りの例も示す。

3.2 基本モデル

基本モデルは、布の破れていない部分をシミュレートするためのものであり、図 2 (a) のようにバネ-質点系に基づく。各質点に付いているバネには 3 種類ある：構

造バネ、曲げバネ、せん断バネである。構造バネはすぐ隣同士の質点をつなぎ、曲げバネは一つ飛ばした質点をつなぐ。せん断バネは斜め方向の質点をつなぎ、圧縮された場合のみ効力を発揮する[33]。我々は糸レベルモデルへの円滑な移行のため、四辺形のメッシュを使用する。基本モデルは連続体として布を扱うが、二つのモデル間の一貫性のため、基本モデルは糸レベルの解像度を持つ。一般的な三角形メッシュおよび粗い格子を使用しても、一貫性を維持できるようにするのは今後の課題とする。

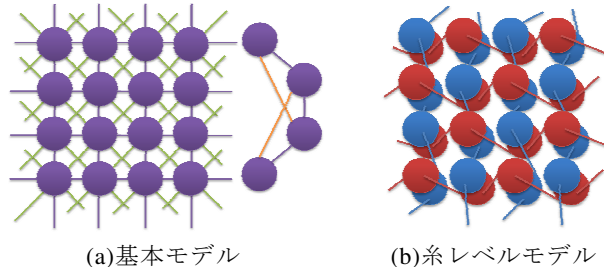


図 2：提案法による 2 種類の布モデル

3.3 糸レベルモデル

糸レベルモデルにおいては、個々の糸は互いに重なり合う横糸もしくは縦糸として明示的にモデル化する。各糸は一連の質点とバネで構成される。静止状態では、横糸にある一つの質点と縦糸にあるもう一つの質点が糸の交点に位置するように配置する。この二つの質点をマスカップルと呼ぶ。マスカップルの二つの質点は、布の法線ベクトル \hat{n}_c の方向に布の厚さ T だけ分離されている(図 2 (b))。布の法線ベクトル \hat{n}_c は、マスカップルの二つの質点に接続している質点間のベクトルの外積から計算される(図 3 (a))。マスカップルの状態は二つがあり、「接続状態」と「切断状態」と呼ぶ。

「接続状態」では、マスカップルのそれぞれ質点に付いている横糸バネと縦糸バネが、もう片方の上で滑ることはできても貫通はしないようにいくつかの制約を適用する。この考えは、十分に接近した物体間にはたらく反発力の考えと類似している。しかし、我々はシステム内のすべてのバネの組ではなく、同じマスカップルに付いたバネの間だけで近傍チェックを行う。

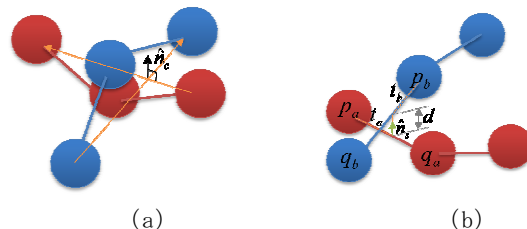


図 3：(a) 布の法線ベクトル (b) 最も近いバネのペアの法線ベクトル

制約を適用する処理においては、まず、マスカップルに付いている横糸バネと縦糸バネの最近点対を見つける。

このステップでは、一つのマスカップルが最大で二つの横糸バネと二つの縦糸バネに接続しているので、最大 4 組のチェックが必要である。一つのパネについては法線ベクトル \hat{n}_s の方向に制約を適用し、もう一つのパネには逆向きの法線ベクトル $-\hat{n}_s$ の方向に制約を適用する。最も近いパネのペアの法線ベクトルは、最近点对の一点から他の点までの方向から計算できる。ただし、制約を適用する対象は質点であるから、パネの端点に重心座標によって重み付けして制約を適用することで最近点对での制約が満たされるようにする [1]。図 3 (b) に示すように、最近点对を a と b とし、それらの端点を p_a, q_a, p_b, q_b とする。最短距離を d とし、最近点对 a と b の線分 $p_a q_a$ と $p_b q_b$ 上の割合をそれぞれ t_a と t_b とすれば、新しい位置 p'_a, q'_a, p'_b, q'_b は

$$p'_a = p_a + (1-t_a)(d-T)\hat{n}_s$$

$$q'_a = q_a + t_a(d-T)\hat{n}_s$$

$$p'_b = p_b - (1-t_b)(d-T)\hat{n}_s$$

$$q'_b = q_b - t_b(d-T)\hat{n}_s$$

となる。

「切断状態」では、位置調整は行わない。マスカップルに付いている横糸バネと縦糸バネの間の距離が指定された閾値以上になると、そのマスカップルの状態を「切断状態」に変化させる。

3.4 モデルの遷移

二つのモデル間の遷移のため、横糸バネと縦糸バネの番号をデータ構造に入れる。また、製織パターンに従って、横糸と縦糸とどちらが上にあるかのフラグも入れる。基本モデルから糸レベルモデルへ遷移すれば、マスカップルは布の面に沿って横糸質点と縦糸質点に分割される。分割された質点の速度は元の質点の速度と同じで、質量は半分になる。次に、マスカップルに付いている構造バネは横糸バネと縦糸バネに選別し、それらのバネを該当質点に付ける。運動量と角運動量は保存される。分割される前の質点の質量と速度を m_{base}, \vec{v}_{base} とし、縦糸質点と横糸質点の質量と速度を $m_{warp}, \vec{v}_{warp}, m_{weft}, \vec{v}_{weft}$ とすると運動量は

$$m_{base}\vec{v}_{base} = \frac{m_{base}}{2}\vec{v}_{base} + \frac{m_{base}}{2}\vec{v}_{base}$$

$$m_{base}\vec{v}_{base} = m_{warp}\vec{v}_{warp} + m_{weft}\vec{v}_{weft}$$

と表される。布の厚さを T とし、重心からの相対位置ベクトルを R とする。

$$R_{warp} = \frac{T}{2}(\hat{n}), R_{weft} = \frac{T}{2}(-\hat{n})$$

$$R_{warp} = -R_{weft}$$

角運動量 L は

$$L_{warp} + L_{weft} = R_{warp}m_{warp}\vec{v}_{warp} + R_{weft}m_{weft}\vec{v}_{weft}$$

$$L_{system} = 0$$

である。

曲げバネの付け替え方は構造バネと同様である。縦糸にある曲げバネは縦糸質点に付け、横糸にある曲げバネは横糸質点に付ける (図 4 左上)。しかし、せん断バネの場合は、複製の必要がある。二つの複製したせん断バネは、同じ平面上の質点間 (上または下) に接続する。または、片方の質点が基本モデルの場合は、同じ元の質点に接続する (図 4 右上)。複製されたバネの強さ (バネ定数) は元のバネの半分になる。

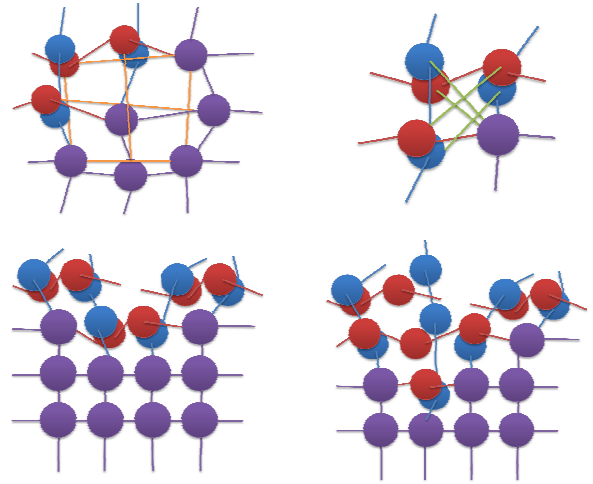


図 4: 上段の図は、モデルの遷移時における曲げバネ (左) とせん断バネ (右) の更新のしかたを示す。下の図は、質点を分割し、モデルの遷移が伝播する様子を示す。

バネのひずみが閾値を越えると、モデルの遷移を行う。ひずみ限度のを超えたバネの両端の質点は図 4 左下のようにマスカップルに分割される。この閾値は、一般に、バネが切れるための限界ひずみ量より小さい。分割は近傍の質点まで伝播させ、その範囲は織りのパターンが切り替わる (横糸と縦糸の上下が入れ替わる) 質点までとする (図 4 右下)。

各バネのひずみ上限値に乱数で変動を与えておくことで、バネはの切断位置が直線に並ばないようにすることができる。その結果、ナイフで切る場合と異なり、自然な破れ目を作成できる。

4. シミュレーション

各シミュレーションループは下記のようになる：

- すべての質点と布以外の剛体に力を適用する
- すべての速度を更新する
- Müller らの方法に従って、速度にダンピングを適用する

- すべての位置を更新する
- 制約を適用する
- 衝突を処理する
- ひずみを更新して、必要に応じてモデルを遷移する。そして、ひずみ上限以上のバネを切る
- 速度の後処理

布の運動の積分には、我々は小さなタイムステップを利用して陽的オイラー法を複数回適用した。

4.1 ひずみの制限

布の糸は一般に大きくは伸張しない。そこで、バネを大きく伸張しないように、Müllerらの制約投影法を適用する。一つのバネの長さを修正することにより別のバネの長さも変わるので、この制約的影法は本来、収束するまで繰り返し適用する必要がある。ただし、我々の目的は布の破れを表現することなので、収束する（すべてのバネがひずみ限度内に収まる）までは反復計算しない。反復の最小数は、すべてのバネが自然長より最大10パーセント以内の伸張に収まる反復回数とした。

制約投影法を適用してから、各バネのひずみを計算する。このステップでは、任意のひずみ限度以上のバネが切られる。

4.2 自己衝突

本モデルにおける主な衝突タイプはエッジ（バネ）間衝突になる。二つの動いているエッジ間の衝突を検出するため、二つの連続フレーム間の中で、二つのエッジが接触している時間 t があるか調べる。2つのエッジが接触している時、二つのエッジの四つの端点は同一平面上にある。エッジ $\vec{x}_1\vec{x}_2$ とエッジ $\vec{x}_3\vec{x}_4$ の両端の速度を $\vec{v}_1, \vec{v}_2, \vec{v}_3, \vec{v}_4$ とする。両方のエッジが等速で動くと仮定すると、以下の式を解くことで衝突時間 t を計算できる：

$$(\vec{x}_{31} + t\vec{v}_{31}) \cdot ((\vec{x}_{21} + t\vec{v}_{21}) \times (\vec{x}_{43} + t\vec{v}_{43})) = 0$$

ここで前フレームの時刻を $t = 0$ 、現在のフレームの時刻を $t = 1$ とする。区間 $[0, 1]$ の外にある解は破棄される。複数の解が残っている場合は、最小のものを衝突時間として選ぶ。さもなければ、衝突が起らなかったと判断する。衝突時間 t の計算には、通常の浮動小数点演算では誤差が出るので、より正確な区間演算[8]を使用した。

4.3 剛体との衝突

本研究では布の質点と剛体表面間の衝突だけを扱う。質点のみ考慮した場合、バネが剛体内部に貫通する可能性があるが、実験した限り見た目に大きな影響はなかった。

5. 糸のレンダリング

詳細な織布の外見を表現するため、また、2種類のモデル（基本モデルと糸レベルモデル）間の境界を滑らか

に見せるため、布は織り糸のレベルでレンダリングする。基本モデルの場合、各質点の位置に布の法線ベクトルと法線ベクトルの逆方向に布の厚さの半分を追加することで、横糸の位置と縦糸の位置を計算できる。どちらが縦糸か横糸かは織り方によって決まる。この処理は3.4節で述べた質点分割処理と同じである。横糸の位置と縦糸の位置を計算してから、それぞれの糸は補間され、Catmull-Rom スプラインとして描かれる。また、破れた糸の末端の引き伸ばされた様子が見えるようにアルファブレンディングも適用する。

糸のシェーディングについては、Kajiya-Kay[16]とランバートのシェーディングを併用する。

6. 実験結果

提案法の結果を図5-図8に示す。タイムステップサイズは1/240秒に設定し、フレームにつき20ステップのシミュレーションを行った。C++およびOpenGLを用いて実装を行い、Intel Core 2 Duo CPU, 2GHz, メモリ2GBのマシンで実験を行った。

我々は、二つのボールに掴まれた布が引き裂かれる様々な状況をシミュレートした。図5には、最初に3200質点がある布が二つのボールに角を掴まれて、破れる様子を示した。この場面のシミュレーションには1フレームあたり平均2秒が掛かった。別の例は、いくつかのアニメーションシーケンスとして図7に示す。図7の正方形の布は初めに4096質点がある。その場面は、平均的に1フレームあたり8秒の計算時間が掛かった。

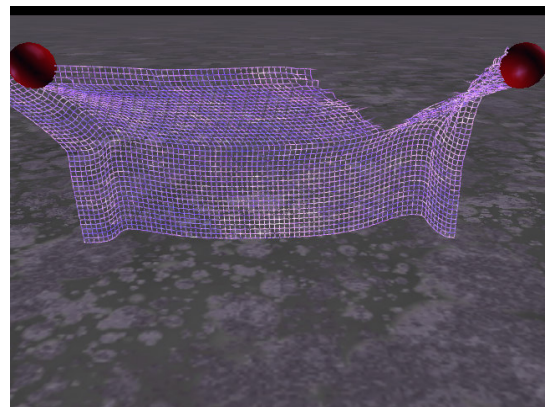


図5：二つのボールで角を掴んで、布を破った例

図6には、3200質点がある布を示す。布は左右の端を剛体にしっかり取り付けられていて、投げたボールによって破れた。この場면을シミュレートするには平均的に1.5秒掛かる。

図8には布を破るいくつかの他の例を、同じ場面のレンダリングの結果とワイヤーフレームモデルの両方で示す。ワイヤーフレームモデルは基本モデルと糸レベルモデルがどう組み合わせられているかを示す。基本モデルの

領域は紫で表し、糸レベルモデルの領域は青色で表示した。

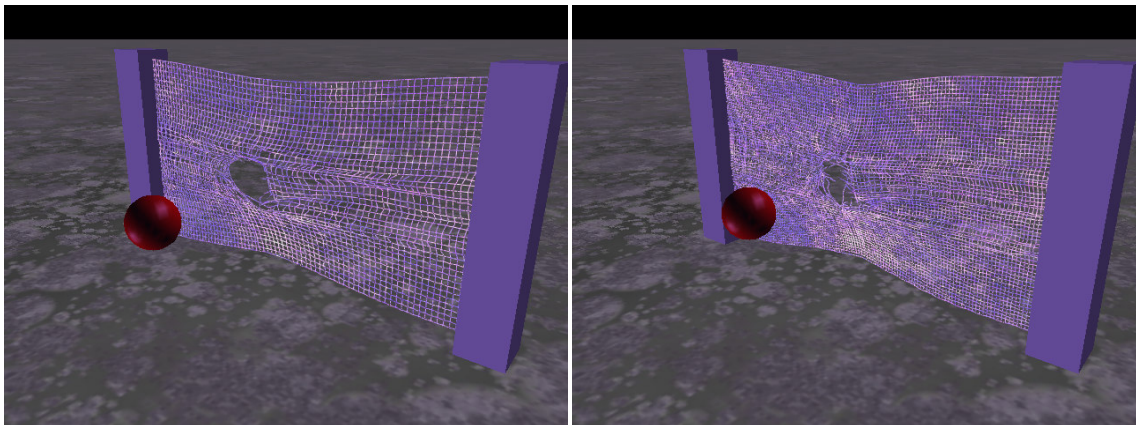


図 6：2つの製織パターン の布を投げたボールで破った例：左は平織、右はあや織り

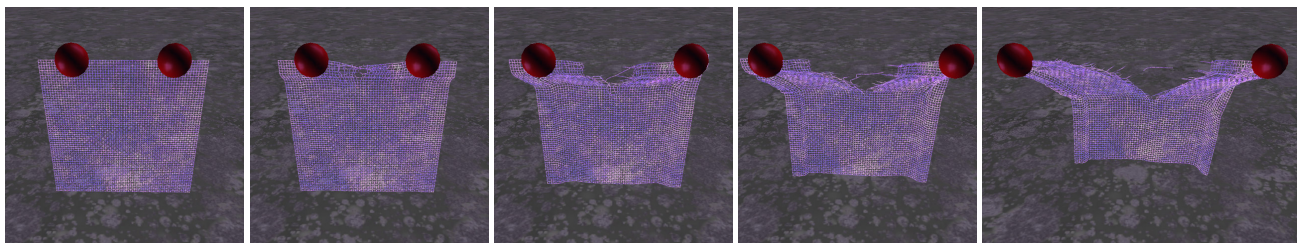


図 7：2つのボールに掴まれた布を 破るアニメーション

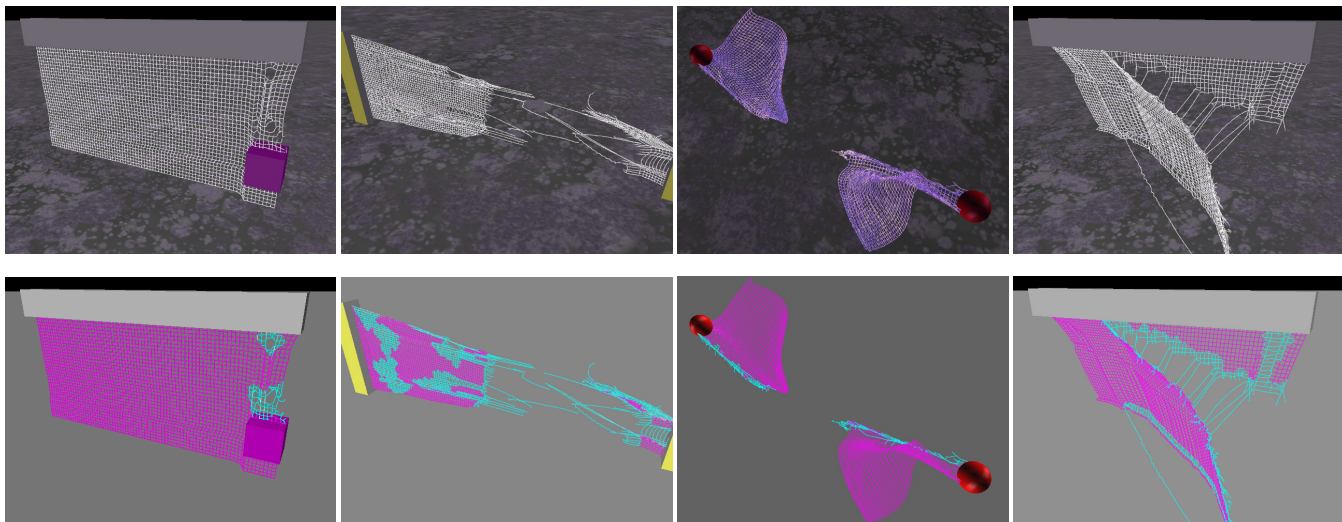


図 8：レンダリングの結果とワイヤーフレームモデル

7. まとめと今後の課題

本稿では、ほつれを伴う布の破れのシミュレーション方法を提案した。詳細な布の破れをモデル化する初めての試みであると考えている。我々の手法は、布全体をシートとしてモデル化するのではなく、それぞれの横糸と縦糸を切断することができる。その結果として、破れ目のほつれという、破れた布に一般的に見られる特徴が表現できた。

我々の方法の制限の1つは、全体の布を糸レベルの解像度でシミュレートするので、糸の密度の高い布を表現するためには、多数の質点とバネが必要となり、計算コストが高くなることである。布の破れていない部分を粗い解像度でシミュレーションする手法の開発を今後の課題としたい。

参考文献

- [1] R. Bridson, R. Fedkiw, J. Anderson. "Robust treatment of collisions, contact and friction for cloth animation," *ACM Transactions on Graphics*, vol.21, no.3, pp.594-603, 2002.
- [2] D. E. Breen, D. H. House, M. J. Wozny. "Predicting the drape of woven cloth using interacting particles," *ACM SIGGRAPH 1994 Conference Proceedings*, pp.365-372, 1994
- [3] R. Bridson, S. Marino, R. Fedkiw. "Simulation of clothing with folds and wrinkles," *ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation*, pp.28-36, 2003.
- [4] D. Baraff, A. Witkin. "Large steps in cloth simulation," *ACM SIGGRAPH 1998 Conference Proceedings*, pp.43-54, 1988.
- [5] D. Baraff, A. Witkin, M. Kass. "Untangling cloth," *ACM Transactions on Graphics*, vol.22, no.3, pp.862-870, 2003.
- [6] K. J. Choi, H. S. Ko. "Stable but responsive cloth," *ACM Transactions on Graphics*, vol.21, no.3, pp.604-611, 2002.
- [7] M. Carignan, Y. Yang, N. M. Thalmann, D. Thalmann. "Dressing animated synthetic actors with complex deformable clothes," *ACM SIGGRAPH 1992 Computer Graphics*, vol.26, no.2, pp.99-104, 1992.
- [8] C. Ericson. "Real-time collision detection," Morgan Kaufmann, 2004.
- [9] E. Grinspun, A. N. Hirani, M. Desbrun, P. Schröder. "Discrete shells," *ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation*, pp.62-67, 2003.
- [10] R. Goldenthal, D. Harmon, R. Fattal, M. Bercovier, E. Grinspun. "Efficient simulation of inextensible cloth," *ACM Transactions on Graphics*, vol.26, no.3, pp.49, 2007.
- [11] D. H. House, D. E. Breen. "Cloth modeling and animation," A. K. Peters, Ltd., 2000.
- [12] K. Hirota, Y. Tanoue, T. Kaneko. "Generation of crack patterns with a physical model," *The Visual Computer*, vol.14, no.3, pp.126-137, 1998.
- [13] Y. Jiang, X. Chen. "Geometric and algebraic algorithms for modeling yarn in woven fabrics," *Journal of the Textile Institute*, vol.96, pp.237-245, 2005.
- [14] A. Kemp. "An extension of peirce cloth geometry to the treatment on non-circular threads," *Journal of Textile Institute*, vol.49, pp.44-48, 1958.
- [15] J. Kaldor, D. L. James, S. Marschner. "Simulating knitted cloth at the yarn level," *ACM Transaction on Graphics*, vol.27, no.3, pp.65:1-65:9, 2008.
- [16] J. T. Kajiya, T. L. Kay. "Rendering fur with three dimensional textures," *ACM SIGGRAPH 1989 Computer Graphics*, vol.23, no.3, pp.271-280, 1989.
- [17] M. Müller, B. Heidelberger, M. Hennix, J. Ratcliff. "Position based dynamics," *Journal of Visual Communication and Image Representation*, vol.18, no.2, pp.109-118, 2007.
- [18] B. Nadler, P. Papadopoulos, D. J. Steigmann. "Multiscale constitutive modeling and numerical simulation of fabric material," *International Journal of Solids and Structures*, vol.43, no.2, pp.206-221, 2006.
- [19] A. Norton, G. Turk, R. Bacon, J. Gerth, P. Sweeney. "Animation of fracture by physical modeling," *The Visual Computer*, vol.7, no.4, pp.210-219, 1991.
- [20] J. F. O'Brien, A. W. Bargteil, J. K. Hodgins. "Graphical modeling and animation of ductile fracture," *ACM Transactions on Graphics*, vol.21, no.3, pp.291-294, 2002.
- [21] J. F. O'Brien, J. K. Hodgins. "Graphical modeling and animation of brittle fracture," *ACM SIGGRAPH 1999, Conference Proceedings*, pp.137-146, 1999.
- [22] F. T. Peirce. "The geometry of cloth structure," *Journal of the Textile Institute*, vol.28, pp.45, 1937.
- [23] X. Provot. "Deformation constraints in a mass-spring model to describe rigid cloth behavior," *Proceedings of the 1995 Conference on Graphics Interface*, pp. 147-154, 1995.
- [24] J. Smith, A. Witkin, D. Baraff. "Fast and controllable simulation of the shattering of brittle objects," *Computer Graphics Forum*, vol.20, no.2, pp.81-91, 2001.
- [25] D. Terzopoulos, K. Fleischer. "Modeling inelastic deformation: viscoelasticity, plasticity, fracture," *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, vol.22, no.3, pp.269-278, 1988.
- [26] D. Terzopoulos, K. W. Fleischer. "Deformable models," *The Visual Computer*, vol.4, no.6, pp.306-331, 1988.
- [27] D. Terzopoulos, J. Platt, A. Barr, K. Fleischer. "Elastically deformable models," *ACM SIGGRAPH computer Graphics*, vol.21, no.3, pp.205-214, 1987.
- [28] P. Tan, L. Tong, G. P. Steven. "Modelling for predicting the mechanical properties of textile composites-a review," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol.28, no.11, pp.903-922, 1997.
- [29] P. Volino, M. Courchesne, N. Magnenat Thalmann. "Versatile and efficient techniques for simulating cloth and other deformable objects," *ACM SIGGRAPH 1995 Conference Proceedings*, pp.137-144, 1995.
- [30] P. Volino, N. M. Thalmann. "Implementing fast cloth simulation with collision response," *Computer Graphics International 2000 Conference Proceedings*, pp.257-266, 2000.
- [31] P. Volino, N. M. Thalmann, S. Jianhua, D. Thalmann. "An evolving system for simulating clothes on virtual actors," *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol.16, no.5, pp.42-51, 1996.
- [32] W. E. Warren. "The elastic properties of woven polymeric fabric," *Polymer Engineering and Science*, vol.30, no.20, pp.1309-1313, 1990.
- [33] C. Zhou, X. Jin, C. C. L. Wang. "Shear buckling and dynamic bending in cloth simulation," *Computer Animation and Virtual Worlds*, vol.19, no.3-4, pp.493-503, 2008.