

ストッキングの質感表現

坂口寛典^{†1} 宮田一乗^{†1}

本報告では日常の中で女性が身に着けるストッキングの質感を、CGで表現する手法を提案する。ストッキングは伸縮によって構造や質感が変化するという特徴を持ち、女性の表現には欠かせない要素の1つであるため、その質感を表現することは重要である。提案手法では、ばね質点モデルを使用することによってストッキングの構造を再現し、足形状へのフィッティングを行った。その情報を用いてレンダリングすることで、ストッキングの構造に基づいた質感の表現が可能となる。

A Method of Representing Stockings

HIRONORI SAKAGUCHI^{†1} KAZUNORI MIYATA^{†1}

This paper proposes a method to represent the features of stockings by means of CG. A stocking has a feature that changes its structure and texture by stretching. Stockings are one of the essential elements for representing women. The proposed method represents the structure of a stocking by using a mass-spring model. The stocking model is deformed to fit to a specified foot model. After the deformation, the method renders an image of stocking from the obtained geometrical structure of a stocking.

1. はじめに

本研究はストッキングの質感をコンピュータ上で再現することを目的とする。これまでコンピュータグラフィックスの分野では布の表現を行う研究が多数行われている。これらの既存研究では特に織物を中心として、布の幾何形状の表現や光の反射特性、あるいは伸びや曲げによる布の動きなどが研究されてきた。

しかしこれまでの研究は、布を総体として扱うものが多く、ストッキングのように局所的な編み目の疎密が存在する素材を表現するのには向いていない。図1に示すように、ストッキングは伸縮によって編み目の疎密分布ができており、その疎密分布によって見た目にも差異が生じる。質感の差異はストッキングのような薄い素材では、特に透過性に現れている。これは、ハイライト光のような材料固有の静的な質感ではなく構造自体の変化が起因するダイナミックに変化する質感と捉えられる。そのため、ストッキングの構造変化をシミュレートし編み目の疎密を再現することは、ストッキングの表現には重要である。さらに、ストッキングは日常的に着用されるものであり、他人の目に触れやすいため、映像作品等での利用機会も多いと考えられる。

本研究は、伸縮の影響による網目の疎密分布を構造的に再現する点に意義があり、将来的にはストッキングだけでなく、伸縮性を持つ素材全般に適用範囲を拡張することも考えられる。また、構造変化の再現だけでなく、その結果を反映させたレンダリング方法についても述べる。



図1 ストッキングの例

Figure 1 Example of stockings.

2. 関連研究

布に関連する研究としては織物のレンダリングや布の反射特性を解析する研究が挙げられる[1][2]。しかしこれらの研究は、先に述べたような布の局所的な変化は再現できない。

次に構造の再現という観点から布のモデリングに関する研究を挙げる。これについては編み物のモデリングをインタラクティブに行う研究がされている[3]。この研究では様々な編み目を再現できるが、アーティストが編み目のパターンを指定する必要がある。また、織布をスキャンしてボリュームモデルを生成する研究[4]も行われているが、結果はスキャンした織布に依存している。

最後に布の動きに関する研究については、糸レベルで編み物を再現しシミュレーションを行う研究がされている[5]。しかし、この研究では局所的な構造変化ではなく布全体の動きに注目している。

^{†1} 北陸先端科学技術大学院大学
Japan Advanced Institute of Science and Technology

3. 手法の概要

本章では、対象とするストッキングおよび提案手法の概要を説明する。

3.1 対象とするストッキング

図1に示したように、ストッキングはつま先部などの部位によって異なる構造をしている。そのため全ての部位を再現するにはそれぞれの部位に適した手法が必要になると考えられる。そこで本研究では、足首部から太もも部までの範囲を対象を限定し、一般的なストッキングの構造を持つものを表現することを目指す。これは、足首部から太もも部の間が同じ構造を持ち、他人から最も見える範囲であることを根拠とする。

はじめに、一般的なストッキングがどのような構造を持つかを知るために、ストッキングを取り扱う企業に問い合わせを行った。その結果「プレーン編み」と「交編」という2つの構造が重要であることが分かった。プレーン編みとは図2(a)に示す編み方のことである。交編は2種類の糸を交互に編んでいく方法で、図2(b)に示すようなナイロン糸とサポート糸を使用する。ナイロン糸はナイロンのみを使用した糸であるが、サポート糸はポリウレタンの糸の周りにナイロンの糸を巻きつけたもので伸縮性と耐久性を兼ね備えた糸となっている。図3は実際に撮影したストッキングの構造を示しており、2種類の糸がプレーン編みで交互に編まれていることを確認した。

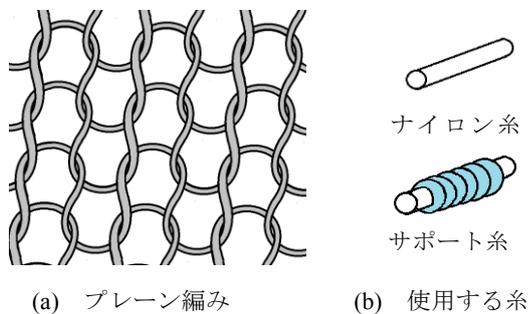


図2 ストッキングの構造
 Figure 2 A structure of a stocking.

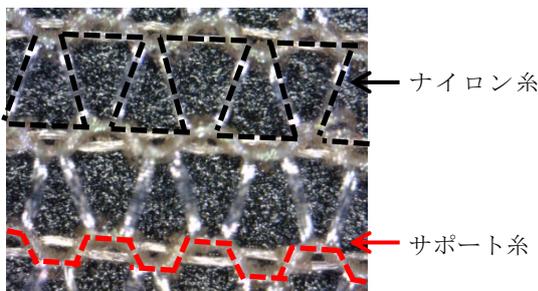


図3 撮影した画像 (200倍)
 Figure 3 Image of a structure of a stocking.

3.2 提案手法

ストッキングを表現するにあたって、本研究では素材の伸縮性に注目している。ストッキングは伸縮によって編み目の大きさ、疎密分布が変化するため、その変化を構造的に再現し描画する手法を提案する。

図4は提案手法の大まかな処理の流れである。まずバネ質点モデルを用いて構造を再現し、各質点に加わる力を計算することで編み目を変形させる。さらに質点の移動を制限することで、編み目を足の3D形状へフィッティングさせる。得られたバネ質点のデータを参照してレンダリングすることで、伸縮による構造の変化を反映させることが可能となる。

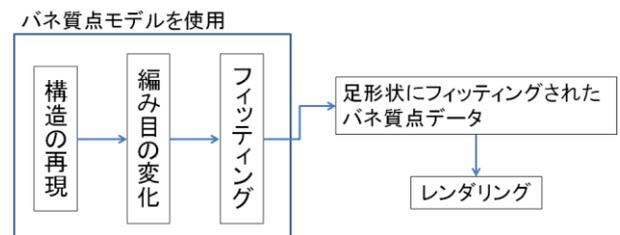


図4 提案手法
 Figure 4 Process overview.

4. ストッキングの構造再現

図5はプレーン編みとバネ質点モデルの対応関係を示している。糸同士が交差する点に質点を配置し、質点を上下左右に結ぶ直線をストッキングの糸とし、バネで表現する。さらに交編を再現するため、質点同士を結ぶバネが2種類の糸のどちらに対応するかを定義する必要がある。そこで、バネ質点モデルの質点に注目し、上下左右の4方向に伸びる糸の種類を調べると、図6に示すように糸の種類の組み合わせによって4つのパターンに分類できることが分かった。この結果から質点毎に1~4のインデックス値を割り振り、4種類の質点の集合を縦横に並べることで構造を再現する。

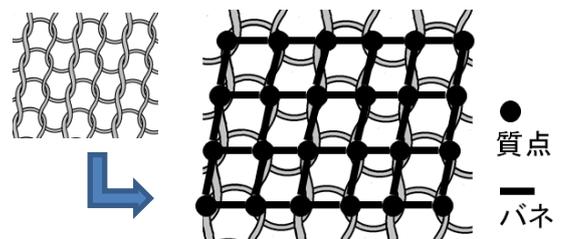


図5 バネ質点モデルによる構造再現
 Figure 5 Structure of mass-spring model.

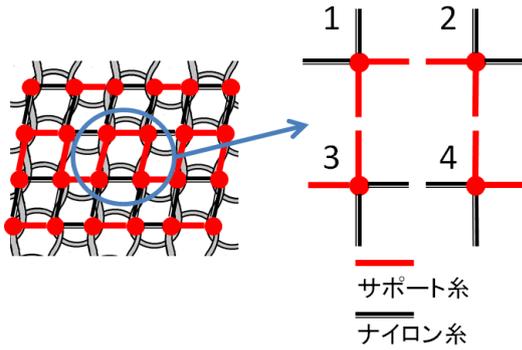


図 6 質点の分類

Figure 6 Classified mass point.

5. 編み目の変形

編み目の変形はバネ質点モデルの各質点に加わる力を計算することで行う。本手法では2種類の力を計算しており、1つ目は式(1)に示すバネ力である。

$$F_i^{spring} = c_1(l - |\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j|) \frac{\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j}{|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j|} \quad (1)$$

この力は2つの質点 i, j の間に働く力であり、 \mathbf{x} はその質点の3次元座標、 l はバネの自然長を表す。 c_1 はバネ係数である。この力によりバネの自然長と2つの質点間の距離の差に応じた力が質点に加わる。

次に2つ目の力として式(2)に示す力を計算する。

$$F_i^{connection} = c_2 |F_{jk}^{spring}| \frac{\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j}{|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j|} \quad (2)$$

この力は糸の繋がりによる引っ張りであり、 c_2 は任意に設定する係数である。図7に示すような1本の糸で繋がれた3つの質点が存在するとき、質点 j, k 間に働くバネの復元力によって質点 i, j 間を結ぶ糸にも力加わる。編み物は編む方向に向かって1本の糸が繋がっているが、この力によってその繋がりが表現される。

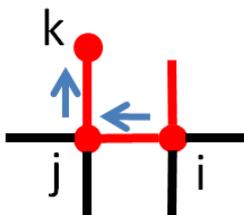


図 7 糸の繋がり

Figure 7 Yarn connection.

実際の計算では1ステップ毎の微小時間 t を設定することで、質点に加わるそれぞれの力と時間から速度を算出し、ダンパによって速度を減衰させることで各質点を移動させる。このステップを繰り返すことで編み目の変形が行われ、いずれ収束する。図8は縦横の質点数が 10×10 、 t を 0.1 に設定した場合の計算結果の一部であるが、収束までに100ステップ程度かかった。また、力を計算する際の係数については、サポート糸がナイロン糸に対して弾性力が高いため、より大きな値の係数を用意しておき、各質点のインデックス値から糸の種類を判別し、糸に対応する係数を用いて計算する。図8ではナイロン糸とサポート糸のそれぞれについて c_1 は 1 と 10、 c_2 は共に 0.2 を設定した。その結果、現実の写真と比較しても編み目の変化を再現できていることが分かる。また、図9のように、ストッキングは伸縮させる方向によって編み目の変形に違いが見られる。図9(a)は画像に対して縦方向、図9(b)は横方向に伸縮させている。伸縮方向による変形の違いは横方向に1本の糸が繋がっているために生じるが、そのような違いも本手法で再現可能である。

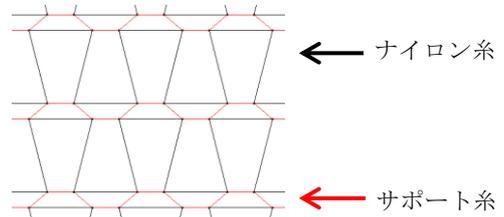
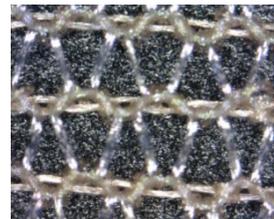


図 8 編み目の変形

Figure 8 Stitch transformation.

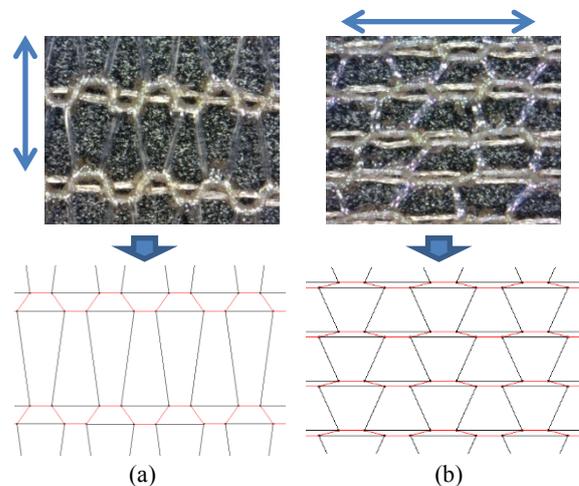


図 9 伸縮方向による編み目の違い

Figure 9 Difference of Stitch transformation.

6. 足形状へのフィッティング

本章では 5 章で得られたストッキングの編み目を足の 3D 形状にフィッティングさせる手法について述べる。

6.1 円筒バネ質点モデル

編み目を足形状にフィッティングさせる前準備として、図 10 に示すような円筒状のバネ質点モデルを用意する。このモデルがストッキングに対応しているが、通常ストッキングは足に対して細い。円筒の円周はバネの自然長と質点数の積で表されるが、今回の実装では入力する足形状の 3D 空間上のスケールにあわせてバネの自然長を調整した

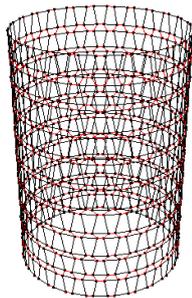


図 10 円筒バネ質点モデル

Figure 10 Mass-spring cylinder model.

6.2 フィッティング

フィッティングは、まず図 11 のように円筒バネ質点モデルを引き伸ばす操作から始まる。足形状の縦軸上の 2 点を指定することで縦方向に伸ばす量が決定され、横方向には足形状を十分に覆うように伸ばす。

次に、引き伸ばされた円筒バネ質点に加わる力を計算すると、図 12 のように足形状を締め付ける方向に質点が移動する。このとき、足形状の内部に質点が侵入する移動を制限することによってフィッティングが実現される。

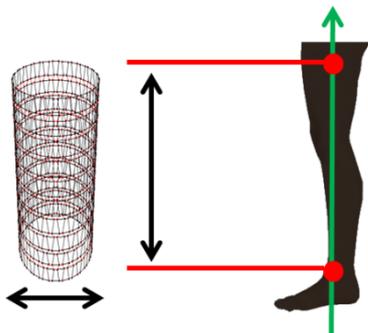


図 11 円筒バネ質点モデルの引き伸ばし

Figure 11 Stretching a mass-spring model.

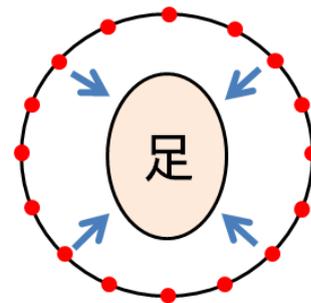


図 12 円筒バネ質点モデルの足形状へのフィッティング

Figure 12 Fitting mass-spring model to target shape.

図 13 は足形状の内部に入り込む質点の移動を制限する様子を示している。質点の移動ベクトルと足表面の各ポリゴンとの衝突判定を行い、衝突する場合は移動ベクトルを修正する。移動ベクトルは、足表面のポリゴンと衝突するまではそのままとし、貫通する部分のベクトルは足表面のポリゴンに正射影する。これにより元の移動ベクトルが足表面を滑る移動ベクトルに修正される。本手法によってフィッティングさせた例を図 14 に示す。この例は円筒バネ質点モデルにおいて、異なる質点数でのフィッティング結果を示しており、円筒表面の縦横に対して 150×150 (図 14 左)、 300×300 (図 14 右) 個の質点数で計算を行った。

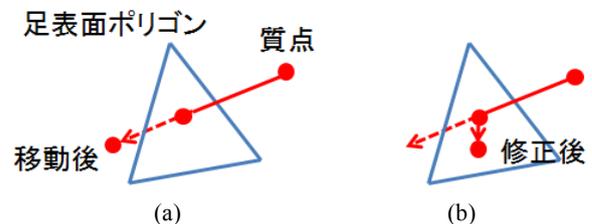


図 13 移動の修正

Figure 13 Modified move .



図 14 フィッティング例

Figure 14 Examples of fitting model.

6.3 貫通部の処理

フィッティングの問題として図 15(a)のような貫通部が発生する点が挙げられる。この貫通部は2つの足表面ポリゴンの境界付近でそれぞれの面上に質点が存在するとき、その質点同士を結ぶ直線が形状内部に入り込むために発生する。本手法では質点を結ぶ直線をストックの糸に対応するため、この貫通部の発生は問題となる。そこで、図 15(b)のように質点を追加し、貫通部が生じないように改善する。この処理はフィッティングの後処理として行う。

ここで必要となるのが、貫通部の判定方法と追加質点位置の決定方法である。まず貫通部の判定は図 15(c)のように、隣の質点までのベクトルと足表面の法線がなす角 θ を求めて行う。質点同士が同一平面上にある場合は θ が 90° となるため、 θ が 90° を超える場合は貫通部であると判定できる。

次に質点を追加する位置は、隣の質点までのベクトルを、足表面ポリゴンに正射影し、その正射影したベクトル方向に対してポリゴンの辺と交差する位置に頂点を追加する。図 15(d)では2つの足表面ポリゴンの境界にあたる辺上に頂点が追加されている。

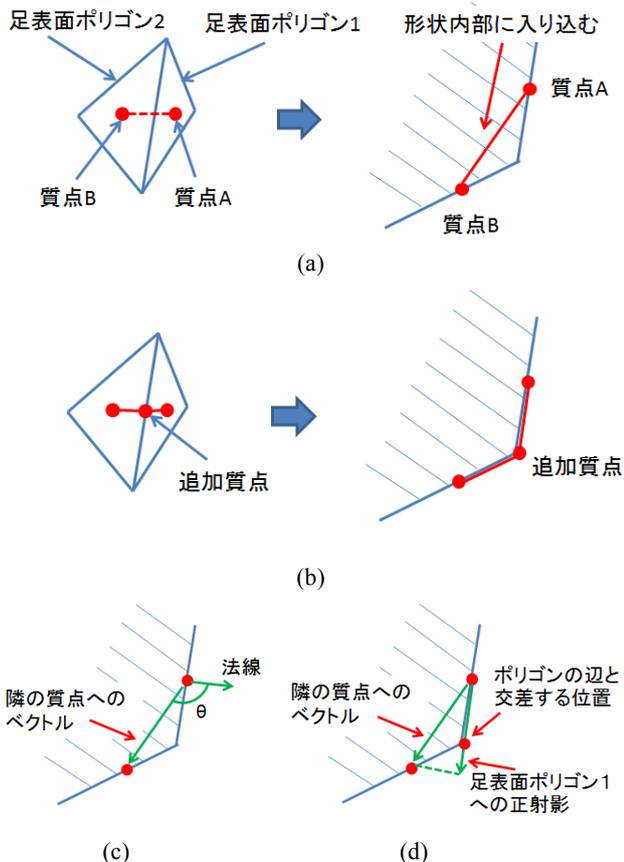


図 15 貫通部の処理

Figure 15 Avoiding penetration.

7. レンダリング

バネ質点のデータから stockings を描画するためには、糸が存在する位置を計算する必要がある。単純な方法としては、図 14 に示すようにバネ質点同士を結ぶ直線をそのまま描画する方法が挙げられる。しかしこの方法では、糸自体の陰影や散乱が表現されておらず、編み目が密になっている部分では塗りつぶされてしまう。これに対して、描画する点に対応する糸の幾何構造を計算することができれば、糸自体の特性を反映させたレンダリングが可能となる。

図 16 は糸の幾何構造を計算する方法を示している。この方法では足形状にバネ質点がフィッティングされているという前提のもと、足表面の任意の点をサンプリング点として、その点に対応する糸の位置を計算する。まず、サンプリング点が与えられると、その周囲に存在するバネ質点を探索する。その後、バネ質点同士を繋ぐシリンダを想定する。このシリンダは任意に設定した半径 r を持ち、バネ質点の組を端点とする。計算はバネ質点の組の片方の質点を原点としたローカル座標で行う。このローカル座標は xy 平面が足形状の表面に平行であり、足表面上のサンプリング点に対して、 xy の値を比較するだけでサンプリング点が糸上に存在するか否かを判定できる。糸上に存在する場合は円の式より z の値を求め、糸の位置が計算できる。

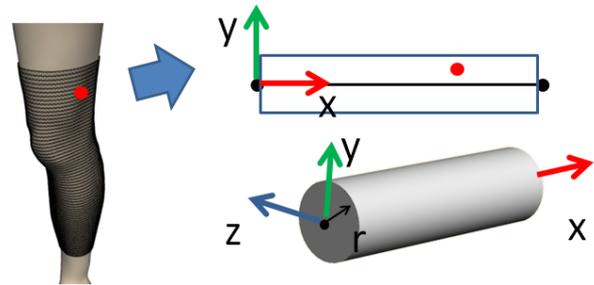


図 16 糸位置の計算

Figure 16 Compute yarn location.

8. 結果

図 17 は7章の計算方法によって糸をレンダリングした結果である。まずレイトレーシングによって各画素に対応する足表面の座標を求める。その座標から糸位置を計算し、その糸位置における法線を用いて陰影付けを行った。

さらに、図 18 は各画素に対応する足表面の座標に対して、その周囲に存在するバネ質点の数を色で表現しレンダリングした結果である。色の範囲は計算された質点数の最大値と最小値によってスケールされ、これにより編み目の疎密分布が視覚化されている。図 18 では最大で 800 個程度の質点数となり、これらの疎密の原因は、図 13 で示

した移動ベクトルの修正に伴い、そのベクトルの大きさが小さくなり、ダンパによる速度の減衰の影響を受けやすい場合があるからと考える。この現象は足表面上の摩擦のような役割を果たしている。



図 17 レンダリング例

Figure 17 Example of rendered image.

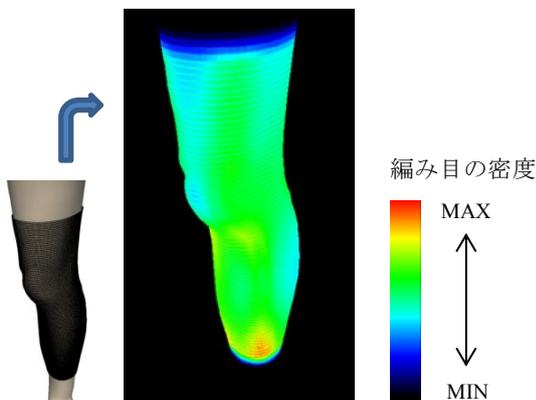


図 18 編み目の疎密分布

Figure 18 Density of stitch.

9. おわりに

本研究ではストッキングの編み目に関して構造の再現とフィッティングを行った。その結果、編み目の疎密分布を持つバネ質点データが得られた。そして、そのデータから糸位置を計算し、図 17 のように糸の陰影付けを行ったレンダリング結果を示した。また、図 14 で示したように糸を直線として表示するだけでも、糸の疎密がストッキングの透過率のように機能し、ストッキングの透け具合や、足の輪郭付近でシルエットを強調する効果が得られた。これらの結果から、構造の変化を要因とする質感をレンダリングに反映させることが可能であることを示した。現在は糸自体の光の反射特性については考慮されていないが、それを実装することにより、光源位置と視点位置の関係によるハイライト光等も再現できると考えられる。

また、本手法の欠点として計算時間がかかるという点が挙げられる。これは、現在の実装ではバネ質点の各質点と

足形状のポリゴンに対して総当たりで計算をしているためである。この問題については実装をより最適化することで改善できると考えられる。他にも、本手法のモデルでは糸の曲げが簡略化されているので、直線ではなく曲線で糸を表現することにより、より現実に近い結果が得られる。さらに、本手法は適用できる範囲が狭いという点も問題である。円筒のモデルでしか実装を行っていないため、つま先部などには適用できない。

今後の課題として、ストッキングの他の部位を再現する手法を考案する必要がある。

参考文献

- 1) Jinhua Yang, and Katsushi Ikeuchi, "A Rendering Method for Woven Clothes Reflections," 情報処理学会研究会報告(CVIM), vol.2003, no.88, pp.33-40, Sept. 2003.
- 2) 武田祐樹, 豊田伸作, 松田悠, 田中弘美, 竹村伸太郎, 坂口嘉之, "多視点画像の反射光解析に基づく布の異方性反射モデリング," 情報処理学会研究会報告(CVIM), 2003-CVIM-140, vol.2003, no.88, pp.41-48, 2003.
- 3) Cem Yuksel, Jonathan M. Kaldor, Doug L. James, Steve Marschner, "Stitch Meshes for Modeling Knitted Clothing with Yarn-level Detail," ACM Transactions on Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 2012), 31, 3, 2012
- 4) Shuang Zhao, Wenzel Jakob, Steve Marschner, Kavita Bala, "Building volumetric appearance models of fabric using micro CT imaging," ACM Transactions on Graphics (TOG), v.30 n.4, July 2011.
- 5) Jonathan M. Kaldor, Doug L. James, Steve Marschner, "Simulating knitted cloth at the yarn level," ACM SIGGRAPH 2008 papers, August 11-15, 2008, Los Angeles, California.