

微細繊維が付加された糸を使用した布および織物の生成フレームワーク

池田 泰成 都甲 裕太郎 藤代 一成 (正会員)

慶應義塾大学 大学院理工学研究科

A Framework for Generating Cloth and Fabric Objects Using Yarn with Microfiber Details

Yasunari Ikeda Yutaro Togo Issei Fujishiro

Keio University Graduate School of Science and Technology

{iked, yutaro.togo, fuji}@fj.ics.keio.ac.jp

概要

糸は織物や編物、衣服を構成するために必要であり、現実的なシーンを表現するために不可欠な素材である。これまでに開発された糸の生成手法は、主としてボリュームベースと繊維ベースの二種類に分類できる。近年の先進的な手法により、CGにおける糸の表現力は劇的に向上し、なおかつその生成に必要なコストも減少した。しかし、糸の周囲に生える毛羽立ちや装飾を目的とした糸の生成プロセスは、未だに挑戦的な課題である。特に、表面の毛羽立ちが独特な形状をもつパイル織物や、装飾を施した編物を制作する際に使用されるシェニール糸は、タオルや車のシート地、衣服など生活のあらゆる場所で使用される一般的な素材であるにもかかわらず、その構造の複雑性からモデリングが困難である。加えて、既存手法では一本の糸の生成プロセスに注目しているが、その糸を使用した大規模な織物や布の生成フレームワークについては、筆者らの知る限り提案されていない。これらの課題を解決するため、本論文では既存のフレームワークを拡張することで微細繊維をもつ糸の生成に対応するとともに、この糸から自動的に織物や布を生成する手法を提案する。

キーワード：モデリング、糸、微細繊維。

Abstract

Yarn objects are common materials for generating clothes which are essential for creating realistic scenes in computer graphics. Recent methods for generating yarn can mainly be classified into two categories: volume-based and fiber-based. These methods dramatically improved the representation of yarn details and reduced the cost, while the generation process for flyaway fibers still remains a challenge. In particular, some materials having microfibers around their surfaces, such as pile fabric and chenille yarn, are widely used for necessities including towels, car sheet upholstery, and clothes, but the generation processes of these materials are very difficult within the current frameworks. In addition, the previous approach focused only on automating the creation of a single yarn, and as far as the authors know, there exist no methods for producing fabrics from the generated yarn. In order to address these problems, this paper presents a method for generating yarn with additional microfibers and proposes a framework for automatically generating fabrics using our piled yarn with an arbitrary size.

Keywords: Modeling, yarn, microfiber.

1 序論

これまでの研究により、コンピュータグラフィックス (CG) において研究対象とされるような仮想空間において現実的なシーンを描写する技術は、目覚ましい発展を遂げている。特に近年では、人体のパーツのみならず、衣服のような装飾品も重要な研究対象とみなされ、活発な研究が行われている。現実空間において、衣服は一般的に多数の繊維を組み合わせた物体として作成される。しかし、このような衣服の構造を仮想空間で再現する場合に一本一本の糸を繊維まで詳細に表現することは、未だに容易な処理が困難な課題の一つとして知られている。

Zhao 他 [1] は、糸の CT スキャン画像を使用して得た 22 個のパラメタから、手続き的に糸を構成するフレームワークを提案した。このフレームワークは糸の細部における現実感を劇的に向上させたが、パイル織物やシェニール糸には適用できない。パイル織物は、衣服やカーペット、タオル、車のシート地といった一般的な生活必需品に使用されている素材である。この素材は、布や織物の表面から垂直に生える繊維をもつことで柔らかさを実現している。シェニール糸は、起毛した繊維を一本一本の糸に生やした素材である。シェニール糸には多数の生成方法があり、本論文で対象とする形状以外にも、多様なデザインが存在する。この糸は日本においてはモール糸ともよばれ、装飾の目的や、衣服の材料として広く使用されている。

前述した Zhao 他 [1] の既存手法 [1] において、糸の視覚的な柔らかさを表現するために「flyaway fiber」とよばれる繊維を付加している。しかし、この手法では、糸の奥行方向の軸である z 軸と同じ方向を向いた繊維のうち極端に糸の中心から外れた繊維のみを flyaway fiber とみなしている。このため、パイル織物やシェニール糸がもつ繊維のように狭い区間に密集して生える繊維は、既存手法では表現が困難である。この点を解決し、織物や糸の柔らかな視覚的効果を再現するために、提案手法では既存手法における flyaway fiber の生成プロセスを拡張し、新たな工程を加える。

本論文では、同時に織物や布のような大規模な構造をもつオブジェクトを生成するフレームワークも提案する。糸から構成される大規模な物体を生成する手法としては、Yuksel 他 [2] が知られている。ただしこの

手法は入力にメッシュをとり、そのメッシュ上でどのように縫い目を生成するかという問題に重点をおいている。一方、繊維から糸を生成する Zhao 他 [1] では、糸から織物を生成することは未だに実現の困難な課題となっていた。この課題を解決するため、本論文では微細繊維を付加した糸を使用して、自動的に織物や布を生成するフレームワークを提案する。

本論文で提案するフレームワークは、NICOGRAPH2017 においてカンファレンスペーパーとして発表した論文 [3] の説明を、現実の素材の再調査に基づいて一般化するとともに、より多くの適用対象への対応手法を加えたものである。

2 関連研究

CG において微細構造が大域的な見た目に与える影響を表現するためには、いくつかの課題を解決する必要がある。例えば、金属や粘土、擦りガラス、織物、布がもつ微細構造の特徴は、過去のレンダリングに使用されていたようなサンプリング手法では十分に再現することが困難であるか、再現のために膨大な時間的・空間的リソースを必要とする処理であった。アニメーション生成時には、複雑な微細構造をもつ物体は時間的エイリアシングを発生させ、現実感を損ねる原因となることが知られている。このような微細構造特有の問題は繊維の表現においても存在し、他の素材と同様に、マイクロファセット、ボリウム、幾何構造を使用して物体を表現する手法が開発された。それぞれの手法について以下で説明する。

マイクロファセットは、微細構造を表現する手法として最もよく知られる手法の一つである。微細構造が物体の見え方に影響を与える効果は最初に、物理学の領域における実験的研究 [4] のなかで発見された。その後、同研究グループが理論的なモデル [5] を導出した。発見されたマイクロファセットモデルは Blinn [6] によって CG の領域に導入され、より一般的な CG の問題に適用するため、Cook と Torrance [7] により一部が変更された。マイクロファセットモデルは、微小領域における勾配の分布を使用して、その法線と光源方向から反射する光の総和を計算するアルゴリズムである。これらのモデルは、衣服のレンダリングにも適用可能である。実際に、Wang 他 [8] はクッション表面の異方性反射特性を再現するために、マイクロファセットを使用している。

ボリュームベース手法では、糸を構成するために物体の密度分布を定義する。Zhao 他が 2012 年に提案した CT スキャナを使用する手法 [9] では、小さなパッチ上に繊維を表すボリュームを定義し、これを物体表面に並べることにより高品質な毛羽立ちをもつ布オブジェクトをレンダリングすることを可能とした。実用的には、サンプルの密度分布を測定し、その反射特性を記録するデータベースが用意され、それをもとに最終的なレンダリング結果が生成された。この手法では織物を繊維のレベルまで詳細に再現し、その織り方に基づいてデータベースを参照して表面の色を再現することが可能となった。加えて、織り方のパターンと鏡面反射特性についても分析が行われている [10]。これらの手法は三次元空間内における糸の現実感を向上させることに貢献したが、糸の見た目を制御するためにはボリュームデータのパラメータを操作する必要があることから、アーティストなどによる見た目の調整が困難であるという問題点が存在した。

一方、幾何構造に基づく手法はスキャンした糸を頂点やポリゴンの集合として再構成し、これを使用して衣服や織物を生成する手法である。現実感のある衣服をレンダリングするために、Khungurn は繊維のもつ散乱特性を考慮可能なモデル [11] を提案した。この研究では、ボリュームデータ・幾何構造に基づくデータ双方に適用可能なレンダリングモデルが提案され、その有用性が明確に示された。幾何構造ベース手法における次の課題は、糸がもつパラメータを容易に調整できるような手法を開発することに加え、データの保存に必要とされる空間計算量を減少させることの二点であった。この課題を部分的に解決したのが、プロシージャルモデリングを使用して、糸を繊維の集合体としてモデリングした Zhao 他手法 [1] である。この手法はまず CT スキャンした糸の断面画像からその再構成に必要とされるパラメータを取得する。そして、繊維の本数や糸のねじれをはじめとするパラメータを使用することで元の糸に近い形状をもつ糸を無限に生成することを可能とした。この手法では糸がもつ特徴を詳細にパラメータ化しているため、その外観を細部まで調節することが可能となった。そして、糸を再構成するために保持すべきデータは 22 個の数値のみであるため、空間計算量抑制の観点からもこの手法は劇的な貢献を果たした。しかしパイル織物やシェニール糸に使用されるような微細繊維はこの手法では生成が困難な

め、毛羽立ちの表現には未だに限界が存在する。加えて、この Zhao 他手法 [1] では一本の糸を詳細に表現することに注目しているが、糸の集合体である織物の生成に関するプロセスには着目していない。

3 微細繊維をもつ織物・糸の構造

衣服やカーペット、タオル、車両のシート地といった柔らかな表面をもつ織物や編物に使用される素材として、パイル織物やシェニール糸がある。本章では、最初にこれらの素材の構造と特徴を紹介したうえで、既存手法でモデリングを行う際の課題を詳細に説明する。

3.1 現実におけるパイル織物とシェニール糸の構造

パイル織物は、表面に織物から立ち上がるように生える繊維をもつ。この繊維を付加することで、織物は撥水性や柔らかさを感じさせるような物理的効果を持ち、光学的には光の反射方向に特定の偏りを発生させる特性をもつ。現実のパイル織物の生成手法には、図 1 に示すものをはじめとした複数の手法がある。

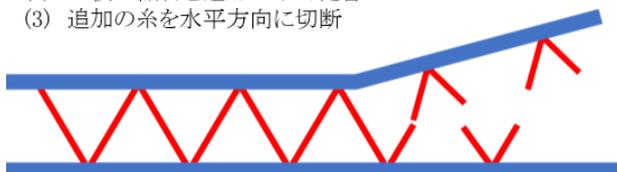
手法1

- (1) 織物を追加の糸とともに作成
- (2) 追加の糸の中心を切断



手法2

- (1) 二枚の織物を同時に作成
- (2) 二枚の織物を追加の糸で縫合
- (3) 追加の糸を水平方向に切断



手法3

- (1) 織物を作成
- (2) 織物表面に接着剤を塗布
- (3) 織物表面に静電気を発生させパイル繊維を付加

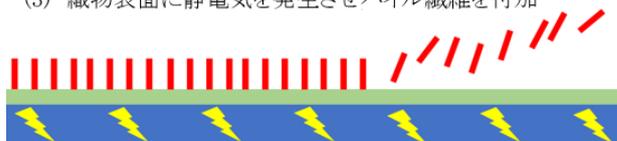


図 1: パイル織物の生成手法。青い線は織物、赤い線は起毛させる糸や繊維、手法 3 の緑の層は接着剤、黄色い稲妻模様は静電気を表す。

パイル織物が面に対して繊維を付加する手法で生成されるのに対して、シェニール糸は糸に対して繊維を付加する手法で生成される。シェニール糸に似た形状をもつ糸には、パイル織物と同様に複数の名称がある。例えば、日本では一般的にモール糸と呼称される場合もある。また、形状自体は類似したものであっても、その製法によって名称が異なる場合もある。糸に対して図 1 手法 3 の静电植毛とよばれる処理 [12] を経て繊維を付加したものはシェニール糸に近い形状をもち、フロックヤーン [13] とよばれる。

本論文では、織物や糸に付加される糸を微細繊維と呼称し、これを糸に対して付加する手法と、その糸を使用して織物を生成する手法を提案する。

3.2 既存研究における制約と改良の基本方針

既存手法 [1] により生成された糸は、糸の中心部を構成する密度の高い regular fiber および糸の周辺部で密度の低い部分を構成する flyaway fiber により構成される。regular fiber は一方向に整列しているのに対して、flyaway fiber は不連続に分布する。これらの flyaway fiber は、本来中心部に存在した繊維が切られたり、外力により引かれたりした結果として現れる繊維である。この生成過程により、flyaway fiber はヘアタイプとループタイプの二種類に分類できる。ヘアタイプの繊維は、中心部の繊維が切れた結果現れる繊維であるため、糸の中心から飛び出すような形状となる。ループタイプの繊維は、中心部の繊維が外力に引かれて現れる繊維であるため、一度糸の中心から飛び出し、その後中心部に戻るような形状となる。既存手法では、二つのタイプを中心部の繊維に付加する形式で糸を生成しているが、糸の中心部から垂直に生える繊維を表現することは不可能である。この理由を、以下に示す既存手法の詳細なアルゴリズムとともに説明する。ここで使用される「繊維束」とは、糸をつくる際に撚り合わせられた繊維の束をさす。例えば、綱のような形状の場合には繊維束は二本、三つ編みのような形状の場合には繊維束は三本となる。

既存手法は、(1) 繊維束の統計データ取得、(2) 繊維の統計データ取得、(3) 繊維の統計データを使用した繊維束の生成、(4) 繊維束の統計データを使用した糸の生成、の四段階の手順で構成される。

手順 (1) では、 k -means クラスタリングを使用して、糸の CT スキャン画像を繊維束ごとに分類する。ここで

k は測定に使用した糸がもつ繊維束の本数とする。その後、CT スキャン画像から取得した繊維の座標を奥行き方向に並べ、それぞれの繊維を再構成する。

手順 (2) では、それぞれの繊維がもつ統計情報に注目する。最初に繊維束の中心からの距離に従って、各繊維は regular fiber と flyaway fiber に分類される。糸の中心からの距離が遠い場合、繊維は flyaway fiber に分類される。この分類を経た後、次のような情報が計測される：flyaway fiber の本数、regular fiber の本数、繊維束がねじれている角度、繊維束の半径。ここでは既存手法の紹介を目的としており、提案手法において既存の変数に対する変更は加えていないため、詳細については参考文献 [1] を参照されたい。

手順 (3), (4) では糸の生成を行う。既存手法のフレームワークでは、計測された統計データから逐次的にそれぞれの繊維束を生成する。その後、繊維束を組み合わせる一本の糸を構成する。

このフレームワークは糸の 3D モデルの生成プロセスを一般化することに貢献した。しかし、このアルゴリズムでは flyaway fiber の定義を、奥行き方向に始点と終点が存在する、密度の低い繊維群としているため、微細繊維のように短く垂直な糸が密集して存在する繊維を生成することは困難である。この課題を解決するために提案手法では既存手法の手順 (4) を改良し、既存のフレームワークで生成された糸に対して微細繊維を付加する。

4 微細繊維をもつ糸のモデリング

微細繊維をもつ糸を生成するために、本手法では既存手法を拡張して、生成した糸に対して微細繊維を付加する。本手法において微細繊維の特徴を定義する際には、表 1 に示すパラメタ群を使用する。糸に生やす微細繊維の本数は、パラメタ n により決定される。長さ方向に対して微細繊維を配置する位置は、パラメタ d により、そ

表 1: 微細繊維のパラメタ。

| パラメタ名 | 意味 |
|----------|---------------------|
| l | 微細繊維の長さ |
| n | 糸を生やす各位置における微細繊維の本数 |
| d | 隣接する微細繊維との距離 |
| θ | 微細繊維の回転角 |

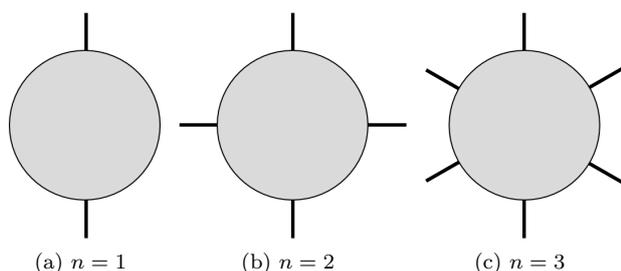


図 2: パラメタ n による繊維と微細繊維の関係. パラメタ n を 1 から 3 まで変更した例. 灰色の円は繊維の断面を表し, 黒線は微細繊維の配置位置を表す.

の間隔を決定する. n を各値に設定した際の挙動を, 一本の繊維の断面図 (図 2) を用いて説明する. 仮に $n = 1$ とした場合には, d により決定される糸上の各位置に, 微細繊維として細長い円柱が一本ずつ付加される. $n = 2$ とした場合には, 各位置に対して, 二本の円柱が微細繊維として付加される. 微細繊維を付加する位置は, 繊維モデルを円柱として, その周囲に $180/n$ 度の間隔で繊維に対して垂直に配置される. 微細繊維を長くした場合には, バスタオルに使用されるような毛足の長い糸が生成される. 一方, 長さを短くした場合には, 最終的に車のシート地のような光沢をもつ糸が生成される.

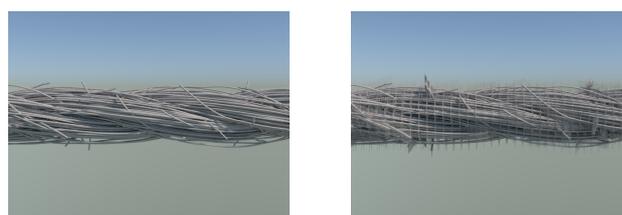
図 3 (a) ~ (d) は既存手法で生成された糸と, 微細繊維を付加した糸のレンダリング結果である. 各糸の生成に使用したパラメタを表 2 に示す.

表 2: 図 3 の糸の生成に用いたパラメタ. 括弧内は単位.

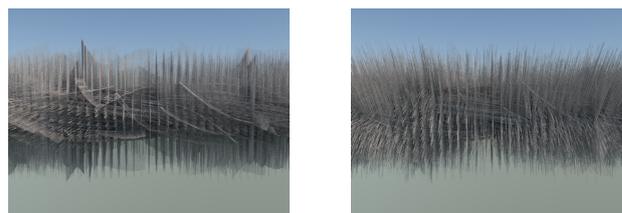
| | l (cm) | n (軸) | d (cm) | θ (度) |
|-----|----------|---------|----------|--------------------|
| (a) | - | - | - | - |
| (b) | 0.005 | 2 | 0.005 | 0.0 |
| (c) | 0.025 | 2 | 0.005 | 0.0 |
| (d) | 0.025 | 2 | 0.005 | $[0.0, 90.0]$ (乱数) |

5 微細繊維を付加した糸を用いたモデリング

前章では, 既存手法 [1] を参考に微細繊維を付加した一本の糸を生成するフレームワークを提案した. 仮想空間上で現実の衣服を作成するためには, 織物や衣服のようにある程度の大きさをもつ物体を生成するフレームワークの構築が必要となる. そこで本章では, 生成した糸を使用して任意の物体を生成する手法を三種類提案す



(a) 既存手法. (b) 短い微細繊維を使用した提案手法.



(c) 長い微細繊維を使用した提案手法. (d) 乱数的に回転させた長い微細繊維を使用した提案手法.

図 3: 糸の拡大画像. 糸表面の表現は, 微細繊維を付加することにより明確に向上している.

る. ここで説明する三種類の手法とは, (1)「端布 (はぎれ)」とよばれる矩形織物を生成する手法, (2) 円柱で糸を表現した三次元モデルを微細繊維をもつ糸の集合に置き換える手法, (3) 糸の配置情報をもたないメッシュオブジェクトの表面に微細繊維をもつ糸を敷き詰める手法である.

5.1 端布の生成手法

本節では, 編物のような糸と糸が絡み合う物体の生成手法を説明する. 本フレームワークの概略を図 4 に示す. 本手法では, 以前に本研究グループが提案したフレームワーク [14] を改良して使用している.

このフレームワークは四つの処理から構成される. サブシステム α は一本の糸を出力する. ここで使用されるアルゴリズムは第 3 章で説明したもので, Zhao 他の手法 [1] を改良したものである. サブシステム β は二つの座標値を入力にとり, これを対角線上の二頂点とする端布の座標データを出力する. ここでは座標データとして, 設定された領域内に糸を配置する場合に, 糸の中心位置となるべき位置の頂点座標を計算する. サブシステム γ は端布オブジェクトを出力する. このサブシステム γ では, サブシステム α で生成した糸を, サブシステム β が出力した座標データに合わせて配置する. そして最後にこのデータを使用してレンダリングを行い, 画像が

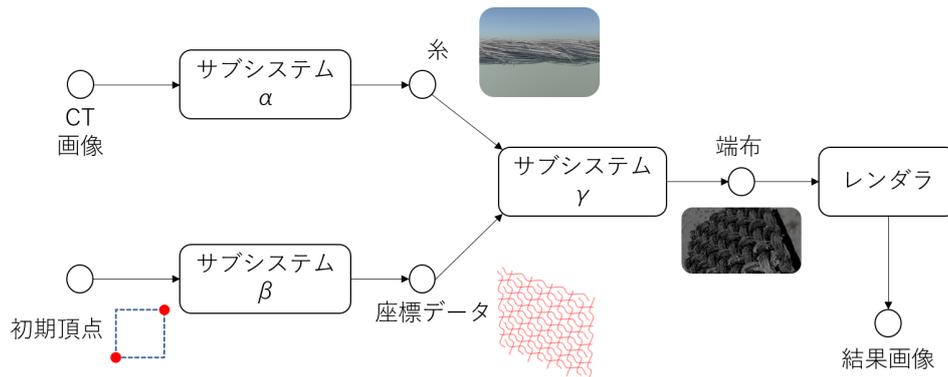


図 4: 繊維ベースで再現された糸を使用して端布を生成するフレームワーク。

出力される。以下の項では、それぞれのサブシステムについて説明する。

5.1.1 サブシステム α : 糸の生成

サブシステム α は第 4 章で示した手法で生成した微細繊維を付加した糸を出力する。

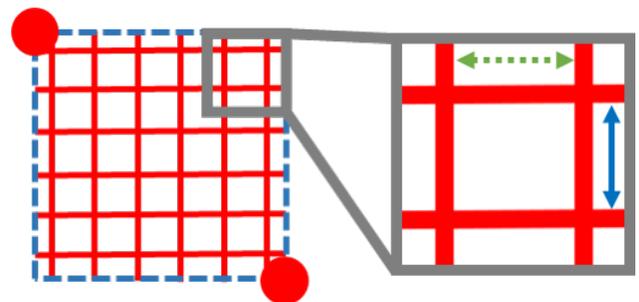
5.1.2 サブシステム β : 糸の座標計算

サブシステム β はそれぞれの糸を配置すべき位置情報を出力する。本サブシステムは合計で四つの段階に分かれ、それぞれの段階で以下の処理を行う。

- (1) 入力された対角線上の二頂点 D_1, D_2 に基づき端布の大きさを決定
- (2) 入力された縦糸の間隔 V および横糸の間隔 H に基づき、糸の配置を決定
- (3) 入力された厚み T をもとに糸を曲線的な形状に変形
- (4) 入力された周波数 F と振幅 A をもとに、端布全体を変形

第一段階では、生成する任意の矩形平面を構成する対角線上の頂点 D_1, D_2 をもとに、糸を配置する領域を定義する。この際、定義した矩形平面の範囲は $(D_{1x} \leq x \leq D_{2x}, D_{1y} \leq y \leq D_{2y})$ となる。第二段階では、ユーザが入力した縦糸および横糸の間隔 V, H に基づき、第一段階で定義した矩形平面上に糸を配置する座標を決定する。この際、矩形平面上に V, H の間隔で配置可能な糸の本数を自動的に計算し、図 5 (a) のように格子状の座標位置を計算する。本サブシステム γ の時点では糸の座標のみを計算しているため、糸の太さに関しては考慮していない。第三段階では、現実の織物がもつ縦糸と横糸が一定の規則に従って交互に表面に表れる構造を再現す

る。本手法では、ユーザが入力した端布の厚み T に基づき、図 5 (b) で示すように一本一本の糸を曲線的に波打たせるように中心軸が通るべき位置情報の変形を行う。この際、最初に糸の中心軸を構成する各頂点を $T/2$ だけ上または下方向に移動させ、この頂点を基準として曲線を生成する。曲線の計算には、ある曲線が通過するべき頂点のみを使用して計算が可能な補間手法として一般的な Catmull-Rom スプライン曲線 [15] を使用している。第四段階では、生成された端布を変形する。現時点では、本システムは正弦波形状への変形に対応している。変形の際には、縦糸あるいは横糸一本分の長さを一単位として、このなかで何回の振幅が行われるかを F により決定



(a) 第二段階における縦糸・横糸の位置の配置。図中の赤実線が糸の中心軸を可視化したもの。赤い円が D_1, D_2 、青の破線で描画された四角形が糸を配置する領域、青の実線で描かれた矢印が H 、緑の破線で描かれた矢印が V を表す。



(b) 第三段階における、一本の糸が通過するべき中心軸を変形している様子。図中の赤破線が移動前、赤実線が移動後の糸の中心軸を可視化したもの。青い円は糸の中心軸を構成する頂点、緑矢印が拡張点の移動方向を表す。

図 5: サブシステム β の詳細な説明。

し、その際の振幅の大きさを A により決定する。

5.1.3 サブシステム γ : 端布の生成

サブシステム γ は、サブシステム α と β の結果を入力として、端布を生成する。具体的には、サブシステム β で計算された糸の座標データに対して、サブシステム α で生成した糸を順番に配置する。

5.2 円柱を糸による表現に変換する手法

パラメタの設定をユーザがインタラクティブに行うことで、端布のサイズや形状を柔軟に調整することが可能である。しかし、実際の衣服のように大規模なオブジェクトを生成する場合には、既存のオブジェクトを再利用する方法や、他の手段により生成したオブジェクトを高品質な糸で構成された物体に変換するような処理が必要とされる。対象とする物体の高品質化を達成するため、本節では糸が円柱で表現されたオブジェクトを第4章で生成したような精巧な糸オブジェクトの集合に変換する手法について説明する。

図4を用いて説明するならば、本手法は入力を変更するためサブシステム β を変更し、新たな入力に対応するためサブシステム γ を拡張したフレームワークとなる。この手法を使用する場合、ユーザは対象とする形状がもつ糸の中心軸の座標リストおよび生成する糸の太さ、密度を決定する必要がある。ただし、糸の配置位置についてはシステムの実行時に入力されたオブジェクトがもつ座標値から自動的に計算されるため、変換対象とする物体の形状に応じたパラメタ変更は必要としない。

一本の詳細な糸は z 軸方向に伸びる曲線の集合として表現される。糸を配置する際には対象とする円柱の始点 \vec{C}_{i1} と終点 \vec{C}_{i2} を利用して、以下に示すベクトル \vec{C}_i を計算し、これに合わせて糸を構成する頂点の座標を基底変換することで、巨大な構造を構成する。この際、 i は糸を配置する対象とする物体がもつ個々の円柱または線分を表すものとする。

$$\vec{C}_i = \vec{C}_{i2} - \vec{C}_{i1} \quad (1)$$

座標変換により糸の方向を決定した後、計算したベクトル \vec{C}_i を中心軸として、それに沿う形で繊維が存在していると仮定することで、入力された円柱から構成される任意の形状をもとに、糸を生成することが可能である。糸の形状はどの方向から見ても似通った螺旋形状をもつため、 z 軸を中心とする回転軸については、本手法では

特に回転を加えずに糸を配置している。

5.3 メッシュに糸を配置する手法

5.1 節ではユーザが入力した矩形領域に糸を敷き詰める手法を提案した、一方5.2 節では入力された円柱ベースオブジェクトを繊維ベースオブジェクトに置き換える手法を提案した。しかし、これらの手法はいずれも糸オブジェクトの配置位置が明確である必要があり、カーペットのように糸オブジェクトが乱数的に直立するような物体には適用が困難である。そこで本節では、入力されたメッシュの表面に直立する糸を生成する手法を提案する。

5.3.1 フレームワーク

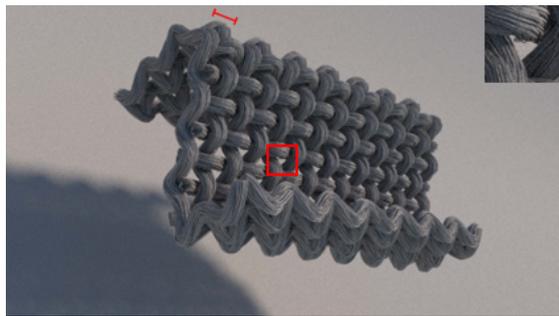
本節で説明する手法のフレームワークは、図4のサブシステム γ への入力について、座標データの代わりにメッシュオブジェクトを使用する。そして、サブシステム γ は入力されたメッシュオブジェクト上に適切に糸を配置し、最終的にレンダリングを行う。ただし、空間計算量の観点から、本節で使用するフレームワークでは、サブシステム γ 以降のすべての処理を単一のプログラム内で実行する。

5.3.2 糸を配置する位置の決定

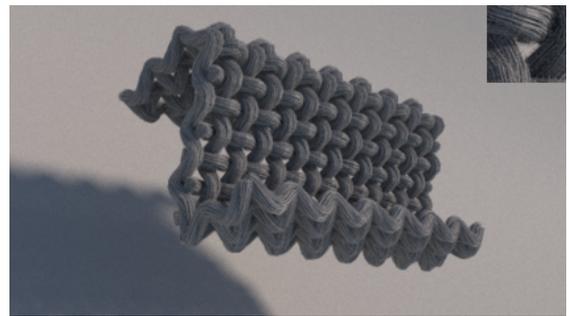
本節で使用するフレームワークにおいて、ユーザ入力が必要とされるパラメタは、使用する糸の合計本数を表す N_{yarn} のみである。ここでは与えられた本数から、自動的に糸の配置位置を決定する手順を説明する。

- (1) 配置する糸の総本数 N_{yarn} の取得
- (2) 対象物がもつポリゴン数 $N_{polygon}$ の取得
- (3) 単一のポリゴンがもつ糸の本数 N_{local} の計算
- (4) 乱数を二つ ($R_{vertical}, R_{horizontal}$) 生成
- (5) 生成した乱数からポリゴン上の位置を計算

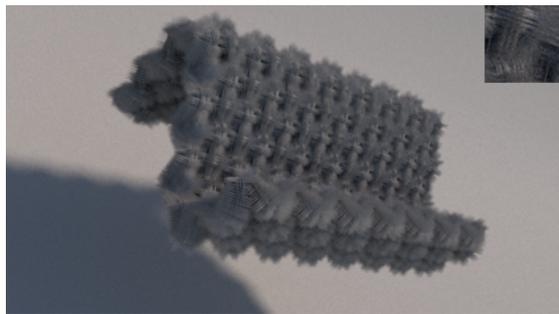
手順 (1),(2) については、ユーザによる入力値およびオブジェクトの読み込み時に得たデータを参照することで取得する。手順 (3) では、ポリゴン上に配置されるべき糸の本数を $N_{local} = N_{yarn} / N_{polygon}$ により計算する。ここで、大規模な物体を構成する個々のポリゴンは類似した面積をもつと仮定している。このため、もし極端に大きな面積をもつポリゴンが存在する場合には、糸の密度に偏りが生ずることとなる。この場合には、面積を用いて糸の本数を再計算する手法や、面積の大きなポリゴンを再分割するといった手法を適用することにより偏り



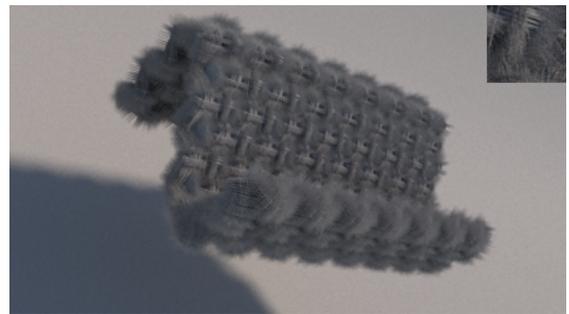
(a) 微細繊維無しの端布



(b) 短い微細繊維を付加した端布



(c) 長い微細繊維を付加した端布



(d) ランダムに回転させた長い微細繊維を付加した端布

図 6: 生成した端布の例。図中の赤色のスケールは第 3 章で説明した一本の糸の長さを表す。各図右上に示す図は、(a) に示す赤枠部分を拡大した画像である。端布の生成に使用した糸がもつパラメタは、図 3(a)~(d) の各々のパラメタと対応している。

を抑制することが可能である。手順 (4) では、ポリゴン上のランダムな位置を計算するために使用する疑似乱数を $[0.0, 1.0]$ の区間で二つ生成する。手順 (5) では、ポリゴンを構成する頂点と、手順 (4) で生成された乱数を使用して、以下の式 (2) ようにポリゴン上で糸を配置すべき任意の位置 P を計算する。

$$\begin{aligned} P_1 &= Rand1 * A + (1 - Rand1) * B \\ P &= Rand2 * P_1 + (1 - Rand2) * C \end{aligned} \quad (2)$$

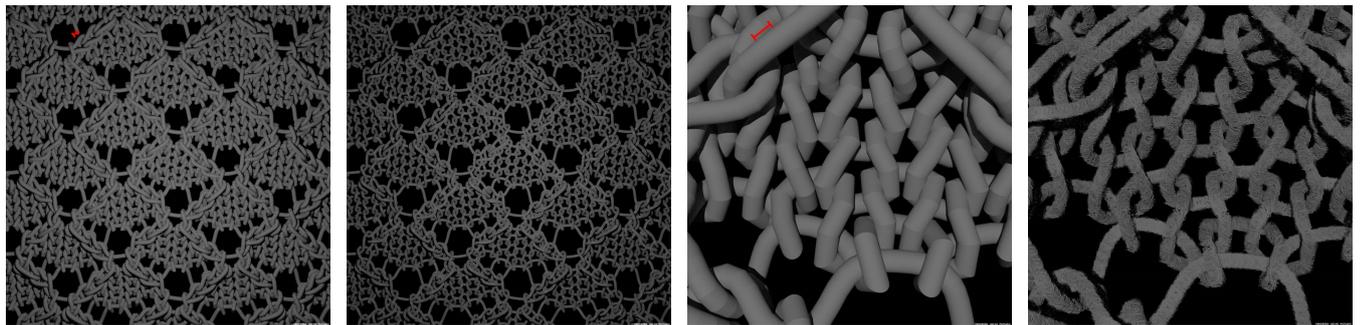
ここで、 A, B, C は対象の三角形ポリゴンを構成する三頂点とする。 $Rand1, Rand2$ は手順 (4) で生成した乱数を表す。 P_1 は式の可読性を高めるために追加した変数であり、最初に二つの頂点のみを使用して計算した、辺 AB 上の点である。疑似乱数の生成には文献 [16] で説明されているハッシュ関数を使用しているため、疑似乱数生成のために入力する値を同一のものとするれば、同一の数値を得ることが可能である。

6 結果

本論文で使用している画像は、Mitsuba レンダラ [17] を使用してレンダリングしている。ただし、5.3 節で説明した手法の実行時は、フレームワークの一部を統合するため、Embree レンダラ Ver. 2 [18] を使用して作成したプログラム内でレンダリングを行っている。既存の三次元モデルの入力には、Cem Yuksel 氏 (米国ユタ大学) が公開している糸ベースの布モデル [19] を使用した。本章の各節は、それぞれ第 5 章で提案した三つの手法に対応している。

6.1 微細繊維による毛羽立ちの再現

図 6 では、異なる特徴をもつ毛羽立ちが糸の見た目に変化を与えることが確認できる。毛羽立ちを付加していない図 6 (a) と短い毛羽立ちを付加した図 6 (b) を比較すると、毛羽立ちが端布の空隙を塞ぐような役割を果たしていることが確認できる。この効果は特に拡大図を見ると明らかである。糸の中心軸に対して垂直に伸びる微細繊維を付加した図 6 (c) では、空隙が完全に塞がれ



(a) 円柱で作成した端布 (b) 繊維で作成した端布 (c) 円柱で作成した端布の拡大図 (d) 繊維で作成した端布の拡大図

図 7: 入力された構造の三次元モデルを繊維ベースの糸の集合に変換した結果. (c), (d) の画像はそれぞれ (a), (b) の拡大図を表す. 図 (a), (c) 中の赤色のスケールは第 3 章で説明した一本の糸の長さを表す.

ている. ただし各微細繊維の方向が一致しているため, 図 6 (a) において空隙である場所には溝のような模様が残されている. 微細繊維の伸びる方向にランダム性を与えた図 6 (d) ではこの点が解消され, 現実の端布に近い表現が可能となっている. この明るさの違いは拡大図でも確認できる.

これに加え, 動画として添付した `normal_fabric.mp4` と `piled_fabric.mp4` を用いた比較も行った. この比較では, 図 6 で使用している画像と同様のシーンを使用して, 織物を中心としてカメラを 1 度ずつ 180 度分回転させ, 微細繊維が無い端布とランダムに回転させた長い微細繊維をもつ端布それぞれについて添付動画を作成した. 微細繊維をもつ端布では, 微細繊維をもたない端布に比べて濃い影が発生しており, 微細繊維の集合が光を遮蔽している様子が確認できる. また, 微細繊維をもたない端布では, カメラの角度が変化した場合に, 局所的に強いハイライトが発生する様子などは確認できない. 一方で, 微細繊維を付加した端布では, 微細繊維が光を強く反射するタイミングがあり, 現実の糸がもつ効果を再現できている様子が確認できる.

6.2 繊維ベースモデルによる大域的な変化

図 7 には, 5.2 節で説明した手法を使用して, 三次元モデルを繊維ベースの糸の集合に変換した結果を示す. PC (CPU: Intel Xeon E5-2687W 3.1GHz, GPU: NVIDIA GeForce GTX 770, RAM: 64GB) を使用してレンダリングを行った際の所要時間を表 3 に示す.

遠景の画像を確認した場合には, 入力した構造と出力結果の間に, 明るさの変化に関して違いがあることがわかる. 入力した構造ではすべての糸は単純な円柱で表現

されているため, 全体の明るさが相対的に均質である. 一方, 提案手法の出力結果を見ると, 中心から周辺部にかけての明るさの変化が激しくなっている. これは, 各部分の表面が繊維ベースで表現されることにより, 光の反射方向の変化や影の発生が起こるためである.

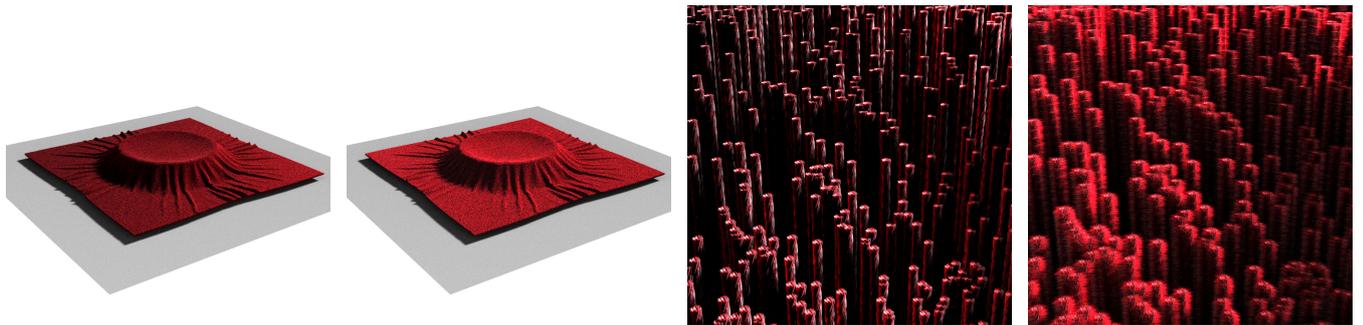
拡大図を確認した場合には, 円柱で表現された結果と比較して, 提案手法は細部の明暗がより詳細に表現されていることがわかる. 微細繊維による柔らかさの表現は, 図 6 に関する説明で詳述したため, ここではマクロに物体を見た場合の表現の違いに着目した.

表 3: PC を使用して図 7 を描画した際の円柱の本数とレンダリング時間.

| | 円柱の本数 (本) | レンダリング時間 (秒) |
|-----|------------|--------------|
| (a) | 19,675 | 7.2 |
| (b) | 19,675 | 7.7 |
| (c) | 17,164,230 | 13.2 |
| (d) | 17,164,230 | 13.3 |

6.3 微細繊維が物体の見た目に与える大域的な影響

メッシュオブジェクトを入力として, 表面に直立した糸を生やすフレームワークについても, 図 8 に示す画像により比較を行った. レンダリングにはパストレーシングを使用し, $N_{yarn} = 1,000,000$ とした. まず遠景の画像を比較する. 微細繊維を付加していない参考画像図 8 (a) に対して, 微細繊維を付加した図 8 (b) は色合いに対して大域的な変化を与えている様子が確認できる. 拡大図に関しても, 図 8 (c) では糸表面の反射・拡散が少なく, 画像が全体的に暗いものに対して, 図 8 (d) では



(a) 微細繊維をもたない糸を付加したメッシュオブジェクト. (b) 微細繊維をもつ糸を付加したメッシュオブジェクト. (c) 微細繊維をもたない糸を付加したメッシュオブジェクトの拡大図. (d) 微細繊維をもつ糸を付加したメッシュオブジェクトの拡大図.

図 8: 入力されたメッシュオブジェクトをに対して微細繊維をもつ糸を付加した結果. (c), (d) の画像はそれぞれ (a), (b) の拡大図を表す.

微細繊維が光を多重に反射することで、糸の周囲が明るく光る様子が確認できる。これらの効果は微細な繊維が密集しているために起こる現象であり、現実においても頻繁に確認できる。現実と同じ構造をもつオブジェクトが現実と同様の光学的挙動を示すことは CG により現実的なシーンを描画するために重要な要素であり、本手法で正しい挙動が確認できたことは、重要な知見の一つであるといえる。

7 結論

本論文では、既存のフレームワークを拡張して糸に微細繊維を付加することで、三次元モデルに視覚的な変化を与えることに成功した。加えて、複雑な構造や糸の構成情報をもたないオブジェクトを入力として、これを高品質な糸の集合体に変換する手法も同時に提案した。これらの手法は、繊維から構成される物体の経年劣化や虫食い、濡れた衣服などの表現を向上させる手助けにもなると考えられる。また、CG を使用した広範な素材を現実的に描画する用途でも、この手法を拡張したものが流用可能であると考えられる。

しかし、本手法では位置や長さ、繊維の太さなどの糸に関するパラメータ設定にユーザの介入が必要であり、完全な自動化には至っていない。また、本研究で再現した微細繊維は本来の構造を抽象化したものであるため、構造の再現性の観点では、さらに拡張が必要である。特に、現在の微細繊維は直線的な繊維として定義しているため、より現実的な繊維に近づけるために、現実の糸から曲線的な微細繊維のパラメータを取得する手法の開発が必

要である。

物理ベースシミュレーションのためには、衝突判定を計算可能にすることも必要である。現時点ではこれを考慮していないため、微細繊維は他の微細繊維と交差している。また、衝突判定は静電気や汚れ、柔らかさとも密接に関係しているため、レンダリングの観点においても対応すべき課題である。近年の頭髮シミュレーション手法 [20] でも、複雑な微細構造間の衝突判定の処理を試みている。しかし、他の研究においても、微細繊維同士の衝突判定については現時点でも解決されていない。したがって、このテーマは今後も重要な課題となると予想される。

生地のもろさを再現するために、必要とされる物理現象を再現することもまた、重要な課題となる。我々は、柔らかさを表現するための要素の一つに、毛羽立ちのような繊維による布表面の光の反射が、物体の視覚的な柔らかさに影響を与えることを確認した。同様の発想は、マイクロファセット理論の分野において *masking function* [21] として知られている。微細構造はその表面に小さな凹凸をもつ。これにより、入射光の一部が遮られ、この影響で最終的な反射光の明るさが変化するというものである。今後の研究においては、これまでよりも現実的な糸のモデルを効率的に作成するために、この効果を導入することも有効な手段であると考えられる。

布の色も、物体の特徴づけにおいて重要な要素である。提案したフレームワークでは、色の変更は端布の生成後に手動で行う必要がある。繊維や糸の構造や素材の色に基づいた色を設定可能とするためには、物体がもつ色の

詳細なパラメタ化と、現実の布のスキャンによるパラメタフィッティングが必要となる。さらに実用化を考えるとすれば、自動的なフレームワークを実現するため、実物の繊維の色情報を画像から解析し、逐次的に繊維の色を決定するような手法が必要とされる。

使用する計算リソースの量も、今後解決する必要のある課題である。例えば、近年の GPU を用いた研究のなかでは、距離に依存した詳細度の概念を導入することで、計算負荷を減少させるような研究 [22] も行われている。

本手法では、巨大な構造物に糸を配置する場合、空間計算量に関するハードウェア的な制約から、インスタンスングを使用して糸を配置した。これにより発生する一本一本の糸の形状が同一となる点に関しては、(1) 現時点では極端な拡大をしない限り、一本一本の糸の形状が全体の見た目に与える影響が軽微である点、(2) 糸の特徴が同一であっても、入射する光の挙動が異なるため、最終的な見た目はそれぞれの糸で異なる点、から、本論文の執筆時点では問題がないと判断した。ただし、今後のハードウェア性能の向上により、糸一本の詳細度が求められる場合に備え、乱数的に一本一本の糸に異なる微細繊維を付加し、かつハードウェアリソースを圧迫しないようなアルゴリズムを開発する必要がある。

謝辞

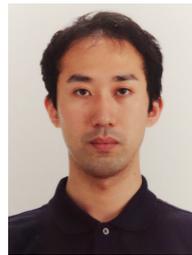
本研究を進めるにあたり、レンダリングおよび使用オブジェクトの作成について多くのアドバイスを頂いた米国ユタ大学の Cem Yuksel 氏と Kui Wu 氏に深く感謝する。また、文献 [1] で提案された糸を生成するプログラムのソースコードと、測定した CT スキャン画像を公開している米国カリフォルニア大学アーバイン校の Shuang Zhao 氏に感謝する。本研究の一部は、文部科学省が設置する慶應義塾大学リーディング大学院プログラム「超成熟社会発展のサイエンス」ならびに科研費基盤研究 (C)15K00761 の補助を受けている。

参考文献

- [1] S. Zhao, F. Luan, and K. Bala, Fitting Procedural Yarn Models for Realistic Cloth Rendering, *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 35, No. 4, pp. 51:1–51:11, 2016. <https://doi.org/10.1145/2897824.2925932>
- [2] C. Yuksel, J. M. Kaldor, D. L. James, and S. Marschner, Stitch Meshes for Modeling Knitted Clothing with Yarn-Level Detail, *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 31, No. 4, Article 37, 2012. <https://doi.org/10.1145/2185520.2185533>
- [3] 池田 泰成, 都甲 裕太郎, 藤代 一成, 糸の微細構造を考慮した細かな毛羽立ちをもつパイル織物の生成手法, *NICOGRAPH 2017 カンファレンスペーパー*, 予稿集, pp. 17-24, 2017.
- [4] K. E. Torrance, E. M. Sparrow, and R. C. Birkebak, Polarization, Directional Distribution, and Off-Specular Peak Phenomena in Light Reflected from Roughened Surfaces, *Journal of the Optical Society of America*, Vol. 56, No. 7, pp. 916–925, 1966. <https://doi.org/10.1364/JOSA.56.000916>
- [5] K. E. Torrance and E. M. Sparrow, Theory for Off-Specular Reflection from Roughened Surfaces, *Journal of the Optical Society of America*, Vol. 57, No. 9, pp. 1105–1114, 1967. <https://doi.org/10.1364/JOSA.57.001105>
- [6] J. F. Blinn, Models of Light Reflection for Computer Synthesized Pictures, *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, Vol. 11, No. 2, pp. 192–198, 1977. <https://doi.org/10.1145/965141.563893>
- [7] R. L. Cook and K. E. Torrance, A Reflectance Model for Computer Graphics, *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 1, No. 1, pp. 7–24, 1982. <https://doi.org/10.1145/357290.357293>
- [8] J. Wang, S. Zhao, X. Tong, J. Snyder, and B. Guo, Modeling Anisotropic Surface Reflectance with Example-Based Microfacet Synthesis, *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 27, No. 3, pp. 41:1–41:9, 2008. <https://doi.org/10.1145/1360612.1360640>
- [9] S. Zhao, W. Jakob, S. Marschner, and K. Bala, Structure-Aware Synthesis for Predictive Woven Fabric Appearance, *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 31, No. 4, pp. 75:1–75:10, 2012.

- <https://doi.org/10.1145/2185520.2185571>
- [10] P. Irawan and S. Marschner, Specular Reflection from Woven Cloth, *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 31, No. 1, pp. 11:1–11:20, 2012. <https://doi.org/10.1145/2077341.2077352>
- [11] P. Khungurn, D. Schroeder, S. Zhao, K. Bala, and S. Marschner, Matching Real Fabrics with Micro-Appearance Models, *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 35, No. 1, pp. 1:1–1:26, 2015. <https://doi.org/10.1145/2818648>
- [12] 東京都立産業技術センター, 技術解説 静電植毛加工技術, *Tiri News*, Vol. 24, 2008. <https://www.iri-tokyo.jp/uploaded/attachment/2479.pdf> (最終アクセス: 2018年11月3日)
- [13] S. Matsuura, Electrostatic Flocking, *Journal of the Textile Machinery of Japan - Proceedings -*, Vol. 20, No. 2, pp. 88–97, 1967. <https://doi.org/10.4188/transjtsj1965a.20.P88>
- [14] 都甲 裕太郎, 池田 泰成, 藤代 一成, 繊維階層の微細構造をもつ糸を用いた織物の生成, 第79回情報処理学会全国大会 講演論文集, Vol. 4, pp. 141–142, 2017.
- [15] E. Catmull and R. Rom, A Class of Local Interpolating Splines, *Computer Aided Geometric Design*, pp. 317–326, 1974. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-079050-0.50020-5>
- [16] M. McGuire, *The Graphics Codex*, 2.13 ed. Casual Effects, 2016.
- [17] W. Jakob, Mitsuba renderer, 2010. <http://www.mitsuba-renderer.org> (最終アクセス: 2018年11月3日)
- [18] I. Wald, S. Woop, C. Benthin, G. S. Johnson, and M. Ernst, Embree: A Kernel Framework for Efficient CPU Ray Tracing, *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 33, No. 4, Article 143, 2014. <https://doi.org/10.1145/2601097.2601199>
- [19] C. Yuksel, Yarn-Level Cloth Models, 2012. <http://www.cemyuksel.com/research/yarnmodels> (最終アクセス: 2018年11月3日)
- [20] M. Chai, C. Zheng, and K. Zhou, A Reduced Model for Interactive Hairs, *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 33, No. 4, pp. 124:1–124:11, 2014. <https://doi.org/10.1145/2601097.2601211>
- [21] B. Smith, Geometrical Shadowing of a Random Rough Surface, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 15, No. 5, pp. 668–671, 1967. <https://doi.org/10.1109/TAP.1967.1138991>
- [22] K. Wu and C. Yuksel, Real-Time Fiber-Level Cloth Rendering, *ACM SIGGRAPH Symposium on Interactive 3D Graphics and Games*, pp. 5:1–5:8, 2017. <https://doi.org/10.1145/3023368.3023372>

池田 泰成



2014年慶應義塾大学工学部情報工学科卒。2016年工学修士(慶應義塾大学)。2017年商学修士(慶應義塾大学)。現在、同大学大学院理工学研究科開放環境科学専攻に所属。同大学博士課程教育リーディングプログラムオールラウンド型「超成熟社会発展のサイエンス」のリサーチアシスタントとして活動中。コンピュータグラフィクス、特に映像作品における繊維状物体の品質向上に関する研究に従事。情報処理学会学生会員。

都甲 裕太郎



2017年慶應義塾大学理工学部情報工学科卒。現在、同大学大学院理工学研究科開放環境科学専攻に所属。情報工学を専修し、コンピュータグラフィックスを専門とする。布の微細構造に着目し、繊維の詳細度においてダメージを再現する研究に従事。情報処理学会学生会員。

藤代 一成（正会員）



1985年筑波大学大学院博士課程工学研究科電子・情報工学専攻修士号取得退学。1988年理学博士（東京大学）。東京大学助手、筑波大学助手・講師、お茶の水女子大学助教授・教授、東北大学教授を経て、2009年より慶應義塾大学理工学部情報工学科教授、現在に至る。形状表現とモデリングパラダイム、応用可視化設計と可視化ライフサイクル管理、多感覚情報呈示による知的環境メディアに関する研究に従事。IEEE, IEEE Computer Society, ACM, SIGGRAPH, Eurographics, CGS, 画像電子学会, 情報処理学会, 日本計算工学会, 日本バーチャルリアリティ学会, 映像情報メディア学会, 電子情報通信学会各会員。現在、本会評議員, 日本学術会議連携会員等。