

# 原色の織物における繊維内部の光の伝搬に基づく吸収係数の推定

田中士郎<sup>†1</sup> 田中弘美<sup>†1</sup>

**概要**：サテンのような光沢を放つ織物の反射光には、織物表面で生じる光源色の鏡面反射光と、透過性の高い繊維の内部から出射された物体色の反射光が含まれ、物体色の反射光が強く観測される。織物の反射特性は、織構造に基づく糸および繊維の曲げと繊維固有の断面形状による幾何的特徴と、繊維の高い透過性による光学的特徴に影響される。透過性がある物体の吸収係数の推定法として、対象を中心に光源と光学機器を対称に配置したときの観測画像から推定する方法が挙げられる。しかし、高分解能な織物の観測では織構造による糸の曲げとたて糸とよこ糸の隙間の存在より内部が均一でないため、吸収係数を推定することは難しい。そこで本研究では、従来の二色性反射モデルに加え、繊維内部からの反射成分を幾何光学で示した反射モデルを提案し、赤色のポリエステルサテンの繊維の吸収係数を推定する。まず、対象の織物では青色成分は十分に吸収されることを仮定して、1画素5 $\mu\text{m}$ の高分解能な多方向照明画像計測より微小面の反射分布を取得し、青色成分より画素の微小面の傾きと表面粗さを推定する。次に、微小面の傾きと表面粗さと観測条件を用いて吸収係数を0とした光学シミュレーションを行い、実測の画素領域における繊維内部からの反射光の反射率、伝搬距離を算出する。得られたパラメータを用いて、提案した反射モデルと実測の反射光の誤差が最小になる吸収係数を推定する。観測画像より強い反射光が観測される横糸中心の繊維を選定し、幾何光学シミュレーションのための三葉断面の繊維の三次元モデルデータを生成し、提案手法より吸収係数を推定した。

**キーワード**：織物、光沢、鏡面反射、吸収係数、光学シミュレーション

## 1. はじめに

織物や肌のような表面の構造が複雑で微妙な色や光沢などによる質感を、観測画像データから抽出し高精度にモデリングすることや、それらを忠実に再現しフォトリアリスティックなレンダリングを実現することは、依然としてCV (Computer Vision)およびCG (Computer Graphics)の研究分野における重要な課題である。

織物表面は色や材質の異なる経(たて)糸と緯(よこ)糸の交差による織構造を持つため、異方性反射特性が見られる。また、サテンのような光沢を放つ織物から観測される鏡面反射光は光源色ではないことが報告されている[1]。

サテンで使用される絹糸の繊維は、半透明のガラス棒のような形状をしており、その断面はやや丸みを帯びた三角形で、プリズムのような構造をもつため「絹のプリズム」と表現されている。絹織物はこの絹糸の構造によって光を透過・反射し、複雑な光沢や質感を発するとされている。したがって、織物の質感を忠実に再現するためには、微小な織構造、繊維の高い透過性、繊維断面形状に基づくレンダリングと、それに必要なパラメータを実測データから取得する必要がある。

近年の織物のレンダリングに関する研究では、糸および繊維の透過性が着目され、BSSRDF (Bidirectional Scattering Surface Reflectance Distribution Function) に基づく、表面下散乱を用いたレンダリング法[2][3]が提案されている。しかし、繊維内部に侵入した光の伝播と織物の光沢との関係の解析に基づいたレンダリングまでには至っていない。また、実測画像より、透過率、または吸収係数を取得する方法が

数多く提案されている[4][5][6][12]。しかし、内部が均一または、複数レイヤー層で構成される物体を対象とし、織物のような、織構造に基づく糸の曲げや繊維の異形断面形状によって内部が不均一な構造では困難とされる。

そこで本研究では、原色に近い赤色のポリエステルサテンを対象に、繊維の断面形状と幾何光学計算に基づく繊維内部からの反射成分による反射モデルと吸収係数の推定法を提案する。

まず、1画素5 $\mu\text{m}$ の高分解能な多方向照明画像計測より微小面における反射分布を取得する。対象の織物では青色成分は十分に吸収されることを仮定して、青色成分の鏡面反射分布より微小面の傾きと表面粗さを推定する。次に、微小面の傾きと表面粗さをを用いて生成した三次元の繊維モデルに対して、実測と同じ条件下で吸収係数を0とした光学シミュレーションを行い、繊維内部からの反射光の反射率、伝搬距離を算出する。得られたパラメータを用いて、提案した反射モデルによる推定値と実測の反射光の強さが最小になる赤色と緑色成分の吸収係数と、鏡面反射係数、光学シミュレーションで扱うフォトンの初期エネルギーを推定する。

繊維の断面形状は異方性であり、さらに断面の傾きは繊維ごとに異なる。そのため、実験では織物の観測画像より反射光が最も強い繊維を選択し、その領域内でさらに撚りが無いとされる画素を抽出し、それらの実測データより吸収係数を推定した。推定結果より本手法の有効性を示し、さらに推定過程の解析より、繊維モデルの生成方法を改善することで推定精度を向上させることが可能であることを確認した。

<sup>†1</sup> 立命館大学 情報理工学部  
School of Information Science, Ritsumeikan University

## 2. 関連研究

近年では、透過性を持つ物体を対象とした反射特性のモデル化やレンダリングの研究が進められている。BSSRDFの概念に基づく表面下散乱特性を計測，モデル化することによって，牛乳や人肌など透過性を持つ媒体および物体などが挙げられる[4][5][6][12].

織物のレンダリングの研究に関しても同様に，糸，または繊維の透過性が着目されている．断面が楕円形状の糸モデルを最小単位として，表面下散乱を用いたレンダリング法[2][7]や，CT スキャンを用いて織構造の局所的な範囲の透過率を高分解能に測定し，ボリュームデータを作成してレンダリングする手法[3]が提案されている．しかし，繊維内部に侵入した光の伝播と織物の光沢との関係の解析に基づいたレンダリングまでには至っていない．

織物の他に，繊維に基づくレンダリングの研究として，髪の毛のレンダリングが挙げられる[8][9]. 髪の毛を覆うキューティクルによる表面構造によって，髪の毛に沿って光が入射すると，反射光は正反射方向よりも $2\sim 3^\circ$  ずれた方向に強く観測されることが報告されている．髪の毛のように断面の直径が短い場合，髪の毛内部を伝播する光の反射によるレンダリングが用いられる．

織物の繊維と髪の毛の異なるところは，髪の毛の断面は楕円形状であるが，織物の繊維は異形断面も含まれる点である．そのため，繊維の研究分野では異形断面の繊維の反射解析[10]も行われているが，VRでの再現を目的とされていない．

## 3. 織物の微小構造と光沢

### 3.1 織物の微小構造

絹織物の絹糸やシルクライク織物で使用されるポリエステルは長繊維 ( $5\sim 10 \times 10^5 \text{ mm}$ ) を束ねたフィラメント糸であり，透過性が高く光沢がある．図 1 (a)に示すように，1本の絹の繭糸は2本の繊維（フィブロイン）から成り，断面はやや扁平な丸味を帯びた三角形をしている．そのため，図 1 (b), (c)に示すような人絹繊維とされるポリエステルも，三葉断面と呼ばれる光沢を目的とした断面形状をしており，透過性を持つ．

また，織物は組織図と呼ばれる経（たて）糸と緯（よこ）糸が浮沈して交差する仕方に基づいて織られる．図 2 に，朱子織の組織図(a)と朱子織（サテン）を光学顕微鏡で撮影

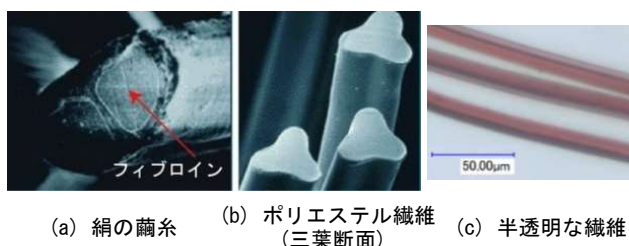


図 1 長繊維の顕微鏡画像

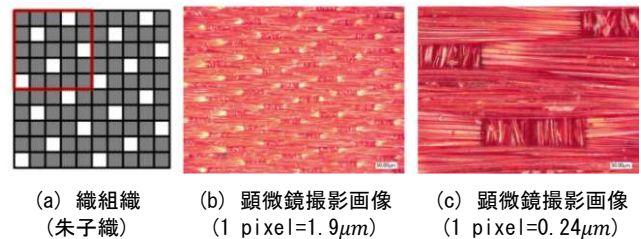


図 2 朱子織（サテン）の組織図と顕微鏡撮影画像

した画像(b)(c)を示す．このように，織物は組織図に基づいて，透過性の高い繊維の束からなる経糸と緯糸の交差による複雑で微細な立体形状によって，織物表面の微小構造が形成される．

### 3.2 織物の光沢

透過性を持つ媒体の内部で生じる光学現象として，表面下散乱と媒体境界面での反射・透過の2つが挙げられる．

図 3 (a)に示すように，透過率が高い媒体では，光が媒体内の粒子に衝突する確率が低く直進の割合が高いため前方散乱が生じ，観測位置  $V$  では単一散乱光が観測される．

一方，図 3 (b)に示すように媒体の厚さ  $D$  を減少させた場合では，媒体内に侵入した光は下端側の境界面  $B_2$  に到達しやすくなり，そこで反射と透過が生じる．境界面  $B_2$  での法線に対する入射角が大きいのか，または媒体の屈折率が外部よりも高いほど， $B_2$  で生じる反射率は高くなる．そのため，媒体の厚さ  $D$  が小さいほど単一散乱よりも境界面  $B_2$  での反射光が強く観測される．透過性が高く薄い物体の場合では，物体の幾何形状に基づく内部からの反射光が強く観測されると考察される．

織物で扱われる絹糸やポリエステルの繊維も同様に透過率が高く，直径が  $10 \mu\text{m}$  程度と極めて細い．そのため，織物の微小面において観測される物体色の鏡面反射光は，繊維内に侵入した光が繊維の下端側の境界面での反射した光であると考えられる．織物の光沢は，透過性が高い長繊維に基づく光学的特徴と，織構造，繊維を束ねた糸，繊維の断面形状に基づく織物の幾何学的特徴による影響が大きいと考察される．そのため，織物の光沢を再現するためには，透過性を持つ繊維の幾何形状に基づいたレンダリングが必要であり，その際に吸収係数が必要となる．

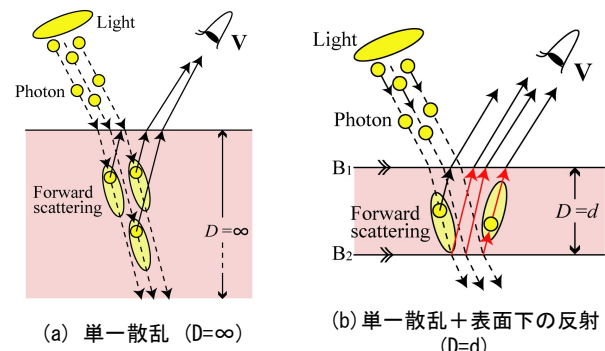


図 3 透過率が高い媒体における光学現象

## 4. 提案手法

### 4.1 繊維における反射モデルと吸収係数推定の概要

透過性を持つ物体に生じる光の反射は、拡散反射と鏡面反射、さらに表面下散乱などの物体内部からの反射成分が含まれる。

$$i = i_{\text{diffuse}} + i_{\text{specular}} + i_{\text{reflection from inside}} \quad (1)$$

拡散反射成分と鏡面反射成分は物体の幾何形状および表面粗さに大きく影響される。本研究では次式の微小面の粗さを考慮した Torrance-sparrow モデル[13]を用いる。

$$r = \rho_d (\mathbf{l} \cdot \mathbf{n}) + \rho_s \frac{F_r e^{-\cos^{-1}(\mathbf{v} \cdot \mathbf{l}')^2 / 2\sigma^2}}{\mathbf{n} \cdot \mathbf{v}} \quad (2)$$

$$\mathbf{l}' = 2(\mathbf{n} \cdot \mathbf{l})\mathbf{n} - \mathbf{l}$$

式に示す  $\mathbf{l}$ ,  $\mathbf{v}$ ,  $\mathbf{n}$  は、光の入射ベクトル、観測ベクトル、微小面の法線ベクトルを示す。 $\mathbf{l}'$  は、 $\mathbf{l}$  の正反射の方向ベクトルを示し、 $\mathbf{h}$  は  $\mathbf{l}$  と  $\mathbf{v}$  のハーフベクトルを示す。 $F_r$  はフレネル反射率を示し、 $n$  は相対屈折率を示す。 $\rho_d$ ,  $\rho_s$ ,  $\sigma$  はそれぞれ、拡散反射係数、鏡面反射係数、鏡面反射の広がりに影響を与える物体の表面粗さを示す。

内部からの反射成分に関しては、物体の表面粗さだけでなく物体の内部構造に影響される。繊維の繊維が観測されるほどの高分解能な画像の各画素値は、繊維内部を伝搬して観測方向へ到達した光を含む。その反射光は物体色が強く、繊維の形状に基づいて指向性を持つ。そのため、繊維内部からの反射成分は、織構造や繊維の断面形状による幾何学的特徴に大きく影響されると考えられる。さらに、繊維内部を伝搬する光は、吸収による減衰が生じ、減衰量は伝搬距離に依存する。内部が均一な透明物体であれば、物体を中心に光源と光学機器を対称に配置して観測を行い、直接光に対する減衰率を取得することで吸収係数を推定することができる。しかし、繊維は織構造と無数の糸と、糸を構成する異形断面の繊維の束によって内部が均一でない構造であるため、観測画像から吸収係数を推定することは困難である。

そのため本研究では、幾何光学に基づく物体内部からの反射成分を加えた反射モデルを提案し、繊維の観測画像より吸収係数を推定する方法について述べる。

### 4.2 繊維の多方向照明画像計測

繊維に含まれる繊維の吸収係数を推定するために、本研究では繊維の多方向照明観測画像を取得する。

図 4 (a) に全方位型光学異方性反射測定装置 OGM (Optical Gyro Measuring Machine) を示す。OGM はカメラと光源を先端に付けた 2 本のアームと水平ステージで構成され、光源 2 軸、カメラ 1 軸、ステージ 1 軸の合計 4 軸の回転自由度を持つ。繊維のよこ糸が観測画像の X 軸方向と一致するように、繊維を水平ステージに配置する。観測用カメラには、Nikon 製 D4(解像度 4928×3280)、レンズには、

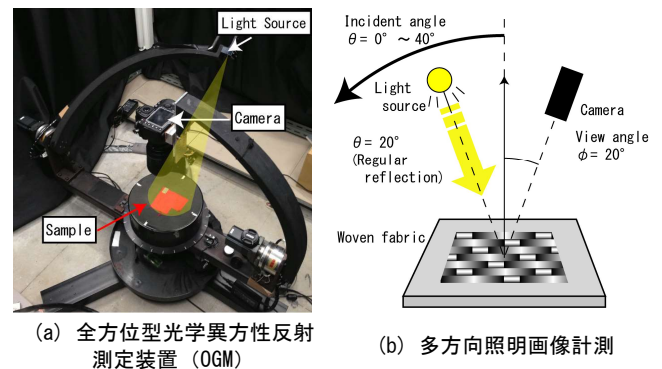


図 4 OGM と繊維の多方向照明画像計測

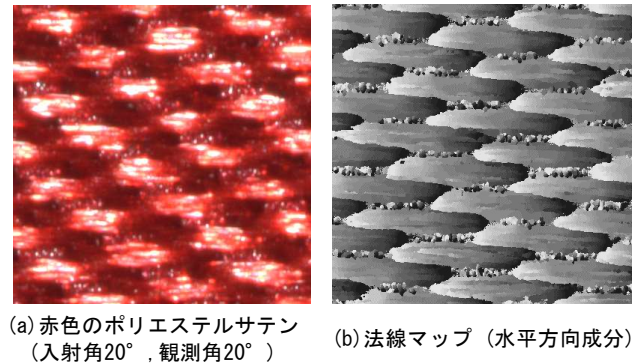


図 5 繊維の HDR 観測画像と法線マップ

Nikon 製 AF-S MICRO NIKKOR 105mm と Kenko 製テレプラス(2倍)を使用する。観測画像の分解能は  $5 \mu\text{m}$  となり、繊維の繊維の太さ(約  $10 \mu\text{m}$ )よりも高い分解能を持つ。

図 4(b) に示すように、カメラの観測角を  $\phi = 20^\circ$  で固定し、光源の入射角を  $0^\circ$  から  $40^\circ$  までを  $2^\circ$  刻みで変化させた 21 種類の入射条件で観測する。また、繊維の鏡面反射は強いいため、一つの露光時間ではサチュレーションが生じ反射光を正確に計測できない。そのため、多重露光による撮影を行い、各露光時間の観測画像を統合して HDR (high dynamic range) 画像を生成する。HDR 画像は、入射角  $0^\circ$  で観測された標準白色板(完全拡散反射板)の観測画像の平均画素値で正規化される。正規化された画素値は、標準白色板で観測された反射光の強さを 1.0 とした相対的な強さを示す。

図 5(a) に、OGM を用いて入射角  $20^\circ$  で観測された繊維の HDR 画像を示す。よこ糸の中心付近は正反射に近いため反射光が強く、繊維ごとに強さが大きく異なることが確認される。また、図 5(b) に、多方向照明観測画像より得られた水平方向成分の法線マップを示す。よこ糸の中心付近での輝度値は 128 で法線が真上であることを示す。中心から離れていくと法線は左右いずれかの方向に傾く。画像に対して法線が左側(+)に傾くと輝度値が増加、右側(-)に傾くと輝度値が減少する。ただし、光源の入射角が  $2^\circ$  間隔の観測であるため、法線の傾きの分解能は  $\pm 0.5^\circ$  範囲内の誤差を含む  $1^\circ$  までしか示すことができない。



### 4.3 幾何光学に基づく繊維内部からの反射光の計算

繊維内部からの反射成分を取得するために用いる幾何光学に基づく光学シミュレーション計算について述べる。

図 6 に、光学シミュレーションにおける光線追跡計算の概要図を示す。入射光を光子が複数集まったものと定義し、各光子に明るさを示すエネルギーと入射方向を初期情報として与える。光子の入射ベクトルを  $\mathbf{l}$ 、観測ベクトルを  $\mathbf{v}$  とする。  $\mathbf{h}$  は、  $\mathbf{l}$  と  $\mathbf{v}$  のハーフベクトルを示す。

$-\mathbf{l}$  方向に直進する光子は、繊維の境界面に到達し、そこで反射と屈折による透過が生じる。光子の入射ベクトル  $\mathbf{l}$ 、境界面との交点における法線ベクトル  $\mathbf{n}$  と 2 つの媒体の屈折率  $n_1$ 、  $n_2$  より、次式に示す光線屈折式を用いて屈折ベクトル  $\mathbf{t}$  を算出する。

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{t} = \left| \frac{n_1}{n_2} \right| \mathbf{n} \cdot \mathbf{l} \quad (3)$$

また、フレネルの式を用いて、光子の反射光と透過光のエネルギーを算出する。

境界面で屈折した光子は繊維内に侵入し、繊維内では光の減衰が生じる。光子が繊維内を  $x$  進んだ時、光子のエネルギー  $i$  は吸収係数  $\alpha$  を用いて次式のように示される。

$$i = i_0 e^{-\alpha x} \quad (4)$$

光子の境界面での反射、透過と光の減衰による計算は、光子のエネルギーが閾値以下、または光子が繊維の境界面に衝突しなくなるまで繰り返される。光子が繊維内部に入射して出射するまでに生じたフレネル反射および透過の回数を  $m$  とすると、伝搬の計算は次式で示すことができる。

$$i = i_0 \prod_{j=2}^{m-1} F_r(\theta_j) \times F_t(\theta_1) F_t(\theta_m) e^{-\alpha \sum_{j=1}^{m-1} x_j} \quad (5)$$

$F_t(\theta_1)$  は、繊維内部への入射における透過率を示し、 $F_t(\theta_m)$  は、繊維内部から出射における透過率を示す。 $F_r(\theta_j)$  は、繊維内部を伝搬する光子の内面反射による反射率を示す。さらに、式(5)は次式で簡略することができる。

$$i = i_0 A_m e^{-\alpha B_m} \quad (6)$$

$A_m$  は、光子が入射から出射までに生じるフレネル反射による光の減衰率を示し、 $B_m$  は伝搬距離を示す。 $i_0 = 1.0$  として反射率を求めるのであれば、入射角、観測角、繊維の幾何形状が定義されていれば、 $\alpha$  の値に関わらず  $A_m$  と  $B_m$  は算出可能となる。

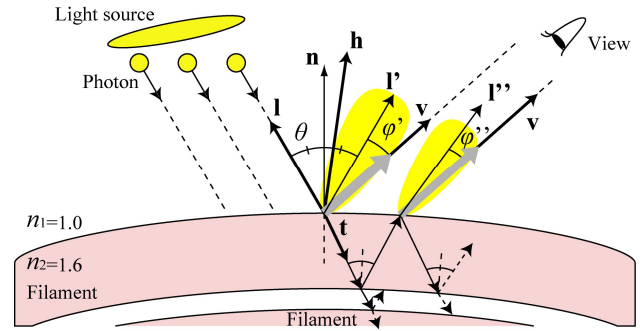


図 6 光学シミュレーションの概要図

### 4.4 反射モデルと吸収係数の推定

式(2)と式(6)を用いて、式(1)を次式で示す。

$$i = I(\mathbf{n} \cdot \mathbf{l}) \rho_s \frac{F_r(\cos^{-1}(\mathbf{n} \cdot \mathbf{l}))}{\mathbf{n} \cdot \mathbf{v}} e^{-\varphi'^2/(2\sigma^2)} + i_0 \sum_{k=1}^p e^{-\varphi''^2/(2\sigma^2)} A_{m,k} e^{-\alpha B_{m,k}} \quad (7)$$

$\varphi''$  は、繊維内部から出射された光の方向ベクトル  $\mathbf{l}'$  と観測方向ベクトル  $\mathbf{v}$  の成す角を示す。

本研究ではこのモデル式に基づき、吸収係数  $\alpha$  を推定する。  $I$  と  $p$  は、1 画素領域における入射光の強さと光子の数を示し、これらの関係を次の式で示す。

$$I = i_0 p \quad (8)$$

図 1(b) に示すようにポリエステル繊維の断面は三葉断面形状で異方性がある。また、織構造や撚りによって、糸を構成している各繊維の断面の傾き、つまり断面の中心軸に対する回転量は異なる。そのため、式(7)で示す鏡面反射係数  $\rho_s$  は繊維の断面の傾きによって変化することから、本研究では観測画像内から 1 本の繊維を選択する。また、1 本の三次元の三葉断面繊維モデルを水平に配置し、入射角と観測角を繊維軸に沿って  $20^\circ$  の正反射条件で固定し、繊維断面を  $1^\circ$  刻みで回転させた時の反射光の強さの変化を確認した[11]。その結果、反射光が最も強くなる条件は、三葉断面の滑らかな側面の法線が真上の状態であることが確認された。これに基づき、本研究では反射光が最も強く観測される繊維を選択し、三葉断面の側面が真上になる状態と仮定し、吸収係数を推定する。

まず、選択した繊維に沿った各画素の  $B$  値における反射分布を用いて、式(7)の第 1 項に対して *Levenberg-marquardt* 法によるフィッティングを行い、各画素の表面粗さ、 $\pm 0.5^\circ$  範囲内である法線の微小な傾きを推定する。次に、推定された表面粗さと法線の傾きを用いて、実測環境と同じ入射角と観測角および、光子の初期値  $i_0 = 1.0$ 、吸収係数  $\alpha = 0.0$  の条件で光学シミュレーションを行い、 $A_{m,k}$  と  $B_{m,k}$  を算出する。最後に、式(7)より  $i_0$  と  $R$  と  $G$  チャンネルの吸収係数、鏡面反射係数  $\rho_s$  を推定する。

## 5. 実験

### 5.1 実験環境と繊維領域の選択

OGM の観測角を $20^\circ$ に固定し、入射角を $0^\circ$ から $40^\circ$ までを $2^\circ$ 刻みの間隔で変化させて、赤色のシルクライク織物の多方向照明観測画像を取得した。

反射光が最も強く観測される繊維を選択するために、まず、図 5 (b)の法線マップの各画素が示す入射角と一致する観測画像の画素値で示したピークマップ画像を生成した。

図 7(a)に、生成したピークマップ画像を示す。

次に、その画像内で反射光が極めて強い画素を最も多く含む領域の繊維(図 7(a)の右上の矩形)を選択した。図 7(b)に、選択した繊維領域の画像を示す。また、画像内の緑の画素は同じ法線マップ領域内で最も反射光が強く、正反射に近い状態とされる画素を示す。

### 5.2 繊維上の画素における微小面の表面粗さと法線の傾きの推定

吸収係数を安定に推定するために、撚りが無い繊維の画素を抽出する必要がある。そのため、図 7(b)上の緑の画素を中心とする X 軸方向の近傍画素において、その画素の B 値が Y 軸方向の近傍画素よりも高い条件を満たす画素を抽出した。図 7(b)中央の矩形で囲まれた 22 画素が、最終的に抽出された画素を示す。22 画素における実測の反射分布より、各画素における表面粗さと法線の傾きを推定した。

図 8 に、22 画素における表面粗さと法線の傾きの推定結果を示す。グラフの X 軸は、選択された画素の X 座標を示す。背景に表記されている角度は、反射光が最も強く観測された入射角を示す。図 7(b)上の各法線マップ領域における B 値が最大を示す緑色の画素では、法線の傾きは $0^\circ$ に近い値が推定され、正反射状態に近いことが確認された。一方、その画素から離れるほど、法線が僅かずつ傾いていくことが確認された。また、RMSE は 0.025 と小さく、ロバストな推定結果が得られた。

### 5.3 光学シミュレーションによる繊維内部からの光の反射光と総合伝搬距離の算出

各画素における繊維内部からの反射光を光学シミュレーションで算出するためには、繊維の三次元モデルを生成する必要がある。図 9(a)に対象とする赤色サテンの繊維をばらし、光学顕微鏡で撮影した繊維の断面形状を示す。この画像から得られた三葉断面の輪郭情報を抽出し、図 9(b)に示す三葉断面の輪郭データを生成した。

次に繊維の曲げを与えるために、前節で推定された法線の傾き角を用いて、図 9(c)上に示すように、画素間の法線を円で近似した繊維軸を作成し、 $10\ \mu\text{m}$ の太さの三次元の繊維モデルを作成した。1 画素の繊維モデルを作成するためには、中心とその近傍を含む 3 画素の法線情報が必要となる。そのため、その条件を満たす図 7 (b) 下に示す矩形領域に含まれる 8 画素の繊維モデルを作成した。

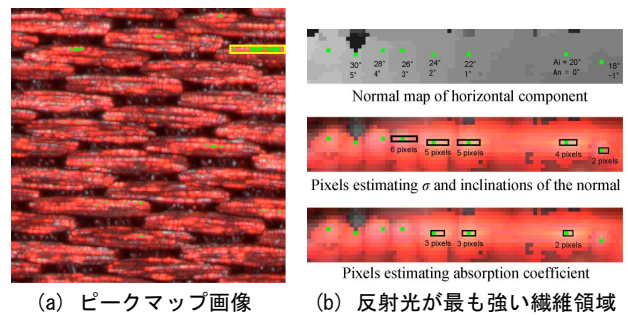


図 7 ピークマップ画像と反射光が強い繊維領域

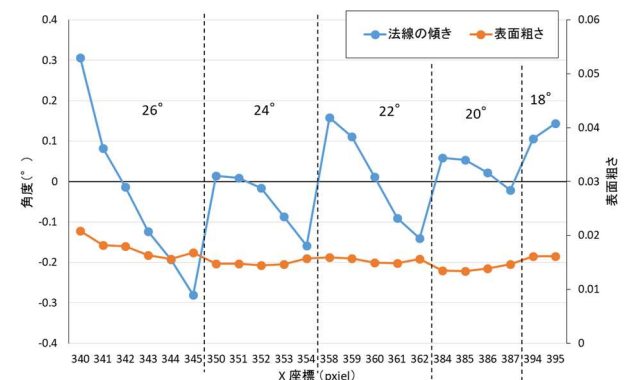


図 8 法線の傾き角と表面粗さの推定結果

フォトン入射サンプリング間隔に関しては、正反射条件で入射角と観測角を共に増加させた時の反射光の変化の連続性を確認し、断面に沿った Z 軸に対しては $1/1000\ \mu\text{m}$ とした。一方、繊維軸に沿った X 軸成分の表面の変化は断面形状に比べて滑らかであり、計算時間を抑えるために、本研究ではサンプリング間隔を $0.5\ \mu\text{m}$ とした。吸収係数を 0 とし、図 7(b)下の矩形領域の 8 画素における繊維内からの反射光の強さと総合伝搬距離を算出した。

図 10 に入射角 $22^\circ$ 、観測角 $20^\circ$ の条件で反射光が最も強く観測される座標(360,59)の画素における、光学シミュレーションによる光の伝搬結果を示す。緑色の実線はフォトンの入射、青色の実線は繊維内部から出射を示す。入射と出射の実線の長さは、フォトンのエネルギーを示す。

紫色の実線は、観測方向に強く反射するフォトンの経路を示す。この伝搬経路では、繊維の下端側の境界面において全反射が生じているため、フォトンのエネルギーの損失

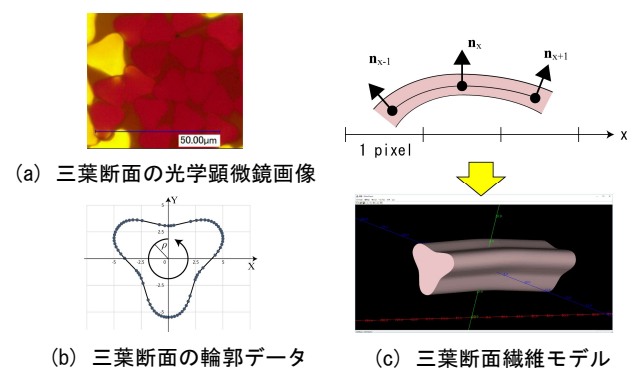


図 9 三次元の三葉断面繊維モデルの生成

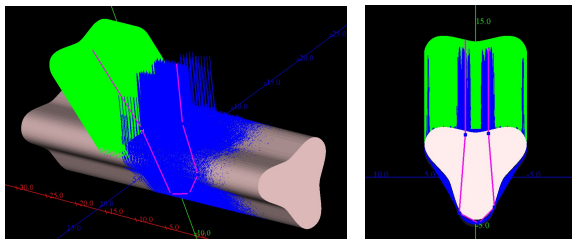


図 10 入射角 $22^\circ$ 、観測角 $20^\circ$ の条件での光学シミュレーションによる光の伝搬計算結果

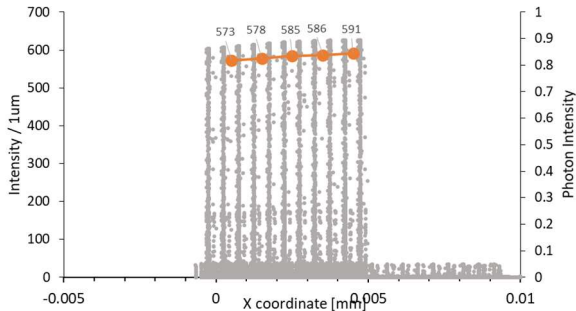


図 11 (360, 59)の画素における、観測方向へのフォトン分布と、 $1\mu\text{m}$ ごとの反射光の強さの変化が少なく、観測方向に強い反射光が観測されることが確認される。

また、図 11 に、同じ座標(360,59)の画素において観測方向に出射したフォトンエネルギーの分布と、 $1\mu\text{m}$ ごとの反射光の強さの変化を示す。近傍画素の法線の変化によって、反射光の強さは変化していることが確認された。しかし、1画素右側である(361,59)の画素に近づくほど法線は正反射条件から離れるにもかかわらず、反射光が強くなることが確認された。この問題については次節で考察する。

### 5.4 吸収係数の推定

光学シミュレーションより算出された全てのフォトンにおける $A_m$ 、 $B_m$ を用いて、式(7)におけるフォトンの初期値 $i_0$ 、 $R$ と $G$ チャンネルの吸収係数 $\alpha_R$ 、 $\alpha_G$ 、鏡面反射係数 $\rho_s$ を推定した。しかし、8画素全てのデータを使用したフィッティングは十分に収束されなかった。そのため、画素ごとにパラメータを推定し、その平均値を算出した。

表 1 に各パラメータの平均値と標準偏差を示す。いずれのパラメータも標準偏差が平均値に対して5%よりも小さく、各推定値に大きな誤差は確認されず、吸収係数を推定することができたことが確認された。

次に、先ほどの8画素のデータを使用したフィッティングが収束されなかった原因を解析するため、実測値、前節において算出された全てのフォトンの $A_m$ 、 $B_m$ 、フィッティングの推定値等の比較を行った。図 12 にそのグラフを示す。赤色の実線は内部からの反射光の実測値 ( $R-B$ )、三角形のマーカを使用した赤色の実線はフィッティングにおける初期値、緑色の実線はフィッティングによる推定値を示す。青色の実線は $B$ 値を示し、非常に小さく変化が確認できないため、15倍にスケールアップした点線で示した。

表 1 吸収係数、フォトンの初期値、鏡面反射係数の推定結果

	$\alpha_R$ ( $\text{mm}^{-1}$ )	$\alpha_G$ ( $\text{mm}^{-1}$ )	$i_0$	$\rho_s$
平均	102.616	298.45	0.000387	0.005864
標準偏差	1.561	12.776	0.000012	0.000495

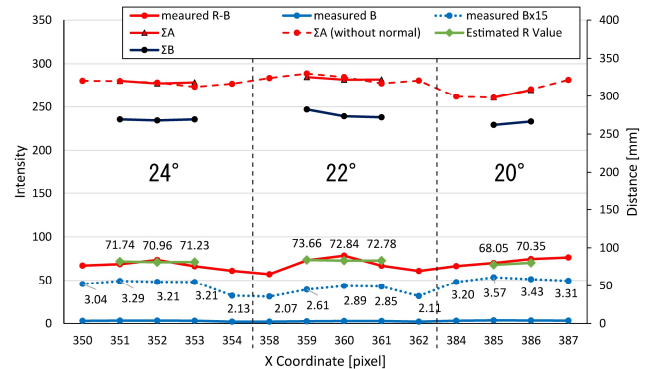


図 12 実測値と初期推定値、推定結果の比較

また、赤色の点線は近傍画素の法線を使用しない繊維モデルを用いた場合のフィッティングの初期値を示す。

$R$ の推定変化について着目すると、初期値と推定値それぞれの近傍画素間の変化には相関があり、伝搬距離によって変化はするものの極端に大きな変化がないため、吸収係数が変化しても維持される傾向にある。しかし、その変化は実測値の場合と異なるためにフィッティングが十分な精度で収束されなかったと考察される。

(360,59)の画素を確認すると、図 8 より法線が正反射条件に極めて近く、表面粗さは低くて滑らかな面である。そのため、内部の反射光は強いと考えられる。しかし、図 12 に示す、赤色の実線、および推定を示す緑色の実線を確認すると、反射光の強さは近傍画素よりも低い結果を示し、実測の変化と異なることが確認される。このような違いの原因としては、法線を使った円の近似による繊維の曲げに問題があり、実際には表面粗さも少ないことから、より滑らかな曲げを表現しないとけない。そのため、さらに吸収係数の推定精度を上げるためには、法線だけでなく表面粗さを含めた繊維の曲げに基づいた繊維モデルを生成することが必要である。

## 6. おわりに

本研究では、織物の光沢を再現するために、透過性の高い繊維内からの反射光を繊維の断面形状と幾何光学計算に基づく反射モデル式と吸収係数の推定法を提案し、赤色のシルクライク織物の多方向照明観測画像より吸収係数を推定した。繊維の画素を選択することによって吸収係数を推定できることが確認された。また、三次元の繊維モデルを改善することで、さらに精度を上げることは可能であり、織物の光沢のフォトリアリスティックな再現に必要である。

今後の課題として、法線と表面粗さに基づく繊維の曲げ

を表現した三次元の繊維モデルに改善することで、より高精度な吸収係数の推定を目指す。また、推定した鏡面反射係数は繊維断面の回転に基づくもので、その回転によって変化する。そのため、繊維の回転に対する鏡面反射係数のモデル化の必要がある。

## 参考文献

- [1] S. Tominaga, "Dichromatic reflection models for a variety of materials," Color Research and Application, Vol.19, No.4, pp.277-285, 1994.
- [2] P. Irawan, "Specular reflection from woven cloth," ACM Transactions on Graphics, Vol. 31, No. 1, Jan 2012.
- [3] S. Zhao, W. Jakob, S. Marschner and K. Bala, "Structure-aware synthesis for predictive woven fabric appearance," Proc. ACM SIGGRAPH 2012, Vol. 31, No. 4, July 2012.
- [4] H. W. Jensen, S. R. Marschner, M. Levoy, and P. Hanrahan, "A partical model for subsurface light transport," Proc. SIGGRAPH2001, pp.511-518, 2001.
- [5] S. Tariq, A. Gardner, I. Llamas, A. Jones, P. Debevec, and G. Turk, "Efficient Estimation of Spatially Varying Subsurface Scattering Parameters", Modeling, and Visualization 2006.
- [6] S. K. Nayar, G. Krishnan, M. D. Grossberg, and R. Raskar, "Fast Separation of Direct and Global Components of a Scene using High Frequency Illumination ", Proc. SIGGRAPH2006, pp.935-944, 2006.
- [7] I. Sadeghi, O. Bisker, J. D. Denken, and H. W. Jensen, "A Practical Microcylinder Appearance Model for Cloth Rendering," ACM Transactions on Graphics, Vol. 32, No. 2, 14:1–14:12, Apr 2013.
- [8] S. R. Marschner, H. W. Jensen, M. Cammarano, S. Worley, and P. Hanrahan, "Light scattering from human hair fibers." ACM Transactions on Graphics, Vol. 22, No. 3, pp. 780–791, 2003
- [9] W. Jakob, J. T. Moon, S. Marschner, "Capturing Hair Assemblies Fiber by Fiber," ACM Transactions on Graphics, Vol. 28 No. 5, 2009.
- [10] X. Liu, R. K. Ramaprasad, Y. Ning, F. Wang, "Goniophotometric Study of Reflectance of Non-circular Cross-section Polyester Monofilament and Its Yarn under Various Applied Tensions," Fibers and Polymers, Vol. 14, No. 10, pp. 1754-1761, 2013.
- [11] 田中士郎, 坂口嘉之, 田中弘美, "光学シミュレーションを用いた織物の繊維断面形状に基づく光の伝搬解析", CVIM 研究会技術研究報告, Vol. 200, No. 22, pp. 141-147, Jan. 2016.
- [12] A. Ghosh, T. Hawkins, P. Peers, S. Fredriksen and P. Debevec, "Practical Modeling and Acquisition of Layered Facial Reflectance," ACM Transactions on Graphics, Vol. 27, No. 5, pp. 139:1-139:10, Dec 2008.
- [13] K. E. Torrance and E. M. Sparrow. "Theory for Off-Specular Reflection From Roughened Surfaces", Journal of the Optical Society of America, Vol. 57, Issue 9, pp. 1105-1114, 1967.