高分解能マルチバンド HDR 画像を用いた 織物の微小構造に基づく鏡面反射の色度解析

田中 士郎^{†1} 坂口 嘉之^{†1} 田中 弘美^{†1}

織物の光沢を表す鏡面反射光が光源色ではなく有彩色であることが報告されている.このような光源色と異なる光沢 などの織物固有の質感は、糸断面や繊組織による表面の微小構造に基づく幾何的要因と、繊維や糸の反射や透過特性 に基づく光学的な要因により生み出されている.本研究では、織物の質感を高精度に表現するために、繊維単位の鏡 面反射光の分光反射率の強さと色度座標の変化を織物表面の微小構造と糸の光学特性に基づいて解析する方法を提 案する.まず、織物表面の微小構造を1画素5~7µmで観測した高分解能なマルチバンドHDR 画像から、部分最小 二乗法(PLS: Partial Least Squares)を用いて画素ごとの分光反射率を推定する.次に、推定分光反射率から拡散反射 成分と鏡面反射成分を分離し、鏡面反射の分光反射率を抽出する.鏡面反射の分光反射率と色度の変化と微小構造に おける対応領域との関係より、有彩色の光沢として観測される鏡面反射光の色度変化を解析する.さらに、経糸と緯 糸においてわずかに観測される光源色の鏡面反射領域を抽出し、微小面の構造に基づいた考察を行う.

1. はじめに

織物や肌のような物体表面の複雑で微妙な色や光沢な どの質感を、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 お よび CG 研究分野における重要な課題である.

また最近は、CV(Computer Vision)、CG、心理物理学,脳 科学の分野で質感認知の研究が国際的に注目を集めている. 国内では 2010 年より新領域「質感脳情報学」が発足し、EU では 2011 年より PRISM (Perceptual Representation of Illumination, Shape & Material)プロジェクトが開始され、脳 科学に基づく質感認知メカニズムの解明と同時に、素材固 有の表面テクスチャの質感情報を工学的に獲得し生成する 研究を進めている.

従来より CG 分野においては, 質感表現のための BSSRDF(Bidirectional Scattering Surface Reflectance Distribution Function)が提案されてきた. 従来の鏡面反射や 拡散反射による BRDF(Bidirectional Reflectance Distribution Function)に基づいたレンダリング[11][12][13][14]では表現 できない半透明物体のレンダリングの研究[4]も行われ, 織 物も同様に表面下散乱を用いたレンダリングの研究[7][15] が進められている.

織物表面は, 色や材質の異なるたて糸とよこ糸の織構造 や繊維の断面形状や撚りに基づく微小構造をもつため, 異 方性光学反射特性を示す. また, 絹のような透過性のある 繊維や金糸のような素材でできた織物は, 光沢を表す鏡面 反射光が光源色ではないことが報告されており, 富永らは 従来の二色性反射モデルを拡張している[1]. このように, 微妙な色や光源色と異なる光沢などの織物固有の質感は, 表面の微小構造に基づく幾何的要因と, 繊維や糸の反射や 透過特性に基づく光学的な要因により生み出されている.

最近では、光学機器の高分解能と高性能化に伴い、1本の繊維の反射光や透過光の測定による光学特性の解析 [8][9]や、CTスキャンの測定により繊維を含んだ織構造の ボリュームデータを用いたレンダリング法[10]も提案され ている.しかし、繊維内部における光の伝搬や表面下散乱 光の解析までには至っていない.

そこで本研究では、織物の質感を高精度に表現するため に、繊維単位の鏡面反射光の分光反射率の強さと色度座標 の変化を織物表面の微小構造と糸の光学特性に基づいて解 析する方法を提案する.まず、1 画素7µmの高分解能なマ ルチバンド HDR 画像計測を行う.次に、鏡面反射光が高ダ イナミックレンジであることから、反射光の色を強度と色 度の分離による部分最小二乗法(PLS:Partial Least Squares) を用いて鏡面反射の分光反射率を推定する.鏡面反射光の 強度の変化に対する光沢色の変化を色度空間において追跡 し、安定に光沢色の特徴を解析する.

さらに、織物の微小構造に基づく光沢色変化を解析する ために、織物のよこ糸中心が正反射になるような入射角と 観測角の条件において、織物の微小構造から観測される鏡 面反射光の色度と微小構造における分布領域との関係の解 析を行った. 微小構造において観測される光沢は、微小面 の法線が織物の法線と一致するよこ糸中心付近ほど強く、 その色度座標は光源色とは遠ざかる方向へ変化した.また、 この結果から物体色の鏡面反射の色度変化を微小構造とな る単糸の幾何構造および光学特性に基づいて考察した. この結果から、織物のたて糸とよこ糸領域の微小構造の違 いによって物体色と光源色の鏡面反射光が観測されること、 物体色の鏡面反射光は透過性の高い繊維に入射した表面下 散乱光が三角柱状の繊維の側面で内部反射し正反射方向に 選択的に出射したためであること等を確認した.

^{†1} 立命館大学 情報理工学部

School of Information Science, Ritsumeikan University

情報処理学会研究報告 IPSJ SIG Technical Report

2. 織物の微小構造と質感

2.1 織物の微小構造

絹織物の絹糸やシルクライク織物のポリエステル繊維 は長繊維(5~10×10⁵mm)を束ねたフィラメント糸であり 滑らかで光沢がある.また,透過性が高く,断面が三角形 状の半透明なガラス棒のような形状をしており,「絹のプリ ズム」と表現されている.図1(a)に示す,繭糸の2本の繊 維(フィブロイン)の断面はやや扁平な丸味を帯びた三角 形状をしている.そのため,ポリエステルのような人絹繊 維は,図1(b)に示すように,半透明でその断面が三角形状 になっている.



(a) 繭糸
 (b) ポリエステル繊維
 (c) 半透明な繊維
 図1 繊維の断面形状

また織物は,組織図とよばれるたて糸とよこ糸が浮沈し て交差する仕方に基づいて織られ,複雑で微細な立体形状 が織物表面の微小構造を形成している.

図2に,朱子織の組織図と朱子織(サテン)を実体顕微 鏡で撮影した画像を示す.



図2 朱子織(サテン)の組織図と顕微鏡撮影画像

このように、組織図に基づいて、繊維の束からなるたて 糸とよこ糸の交差により形成される、複雑で微細な立体形 状が織物表面の微小構造を形成している.

2.2 糸の透過性と光沢

織物の光沢を表す鏡面反射光は有彩色であることが報告されている[1].図3(a)に、分光計を用いて計測された赤色と緑色の2種類のサテンの正反射方向付近での反射光の 色度座標の軌跡を示す.一般に、二色性反射モデルで表される物体表面では、反射光の色度座標は正反射方向に近づくにつれて光源色に近づく.しかし、図3(b)と図3(c)に示すように、赤色と緑色サテンとも、正反射方向とのずれ角が-45°から正反射方向(ずれ角0°)に近づくにつれて光源色から遠ざかり、逆に、正反射方向から+45°まで遠ざかるにつれて光源色方向に戻ることが観測されている.

以上より,織物の質感を高精度に表現するためには,織

物の微小構造を構成する各微小面において鏡面反射成分の 分光反射率とその色度座標を抽出し,鏡面反射光の強さと 色度座標の変化を織物表面の微小構造と糸の光学特性に基 づいて解析することが必要とされる.



(a) 入射角に対するサテンの色度変化 (c) 赤色サテン図3 サテン光沢の色度変化(分光計測)

高分解能マルチバンド HDR 画像撮影による織 物の観測

本研究では、赤色のポリエステルサテンを観測対象織物 とする.

2.3 高分解能マルチバンド画像計測システム

本研究では、2ショット型6バンド画像記録方式[5]を用 いて、波長ごとに透過率の異なるバンドパスフィルタを光 源側に取り付け、フィルタあり・なしの2回の撮影によっ て6バンド画像を取得する.

図4に、織物の鏡面反射の観測に用いる、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1軸、ステージ1軸、光源2軸の 合計4軸の回転自由度を持つ.

OGM に取り付ける光源には朝日分光株のキセノン光源 LAX-102 を用いた. 観測用のカメラは Nikon D700, レンズ は AF-S Micro-Nikkor 105mm f/2.8G と kenko 製テレプラス 2X MC7 DG を用いた. 解像度は 4256×2832 ピクセルで, 1pixel=7.0µm の分解能の画像が得られる.





2.4 織物の撮影条件と HDR 画像生成法

織物の織構造に基づき、織物の法線と微小面の法線が一 致するよこ糸中心で鏡面反射が観測されるように、図 4(b) に示すように織物のよこ糸に沿った方向に入射角と観測角 を 15°の条件でマルチバンド画像撮影を行う.また,絞り 値を 25, ISO 感度を 100 の設定で,13 種類の露光時間(8sec, 4, 2, 1, 1/2, 1/4, 1/8, 1/15, 1/30, 1/60, 1/125, 1/250, 1/500)による多重露光マルチバンド撮影を行う.各露光時 間の撮影データは, AHD 法を用いて, リニアリティのある Tiff 画像に現像し,露光時間 1 秒での画素値を算出して, HDR 画像を生成する.

ステージに対してカメラが 15°傾いているため, 観測画 像内のピントの合う 400×400 ピクセルサイズの中心部分 を入力 HDR 画像とする.

3. 織物の分光反射率推定

マルチバンド画像を用いて、画素ごとに分光反射率を推 定する方法が提案されている.しかし、織物の反射光は高 ダイナミックレンジであるため、分光反射率を安定に推定 することは困難でなる.そこで、本研究では、人間は三原 色の比によって色を知覚していることに基づき、色度と輝 度の分離による PLS 法を用いて、織物の分光反射率を推定 する[6].

入力画像からの分光反射率の推定計算は,式(1)で示される.

$$\hat{\mathbf{r}} = \mathbf{W}\mathbf{v}$$

$$\hat{\mathbf{r}} = [\hat{r}(410), \cdots, \hat{r}(\lambda), \cdots, \hat{r}(680)]^{\mathrm{T}}$$

$$\mathbf{v} = [1, v_1, \cdots, v_m]^{\mathrm{T}}$$
(1)

vは入力画素値ベクトル, m はバンド数, $\hat{\mathbf{r}}$ は推定分光反射 率ベクトル, λ は波長(410~680nm を使用)を示し,回帰 行列Wをあらかじめ算出する必要がある.このWを算出し て分光反射率を推定するために,Wiener 推定法,重回帰分 析法,部分最小二乗法(PLS: Partial Least Squares method) [2][3]などの推定法が用いられる.

4. 高分解能マルチバンド HDR 画像を用いた 織物の微小構造に基づく鏡面反射の色度解析

本研究では,推定分光反射率から拡散成分を取り除いた 鏡面反射成分について,輝度に対する色度と織物の微小構 造領域の変化を抽出する.そのため,以下の処理手順に基 づき,鏡面反射光の輝度値に対する,xy色度分布の変化と 織物の領域変化の抽出を行う.

- 織物のマルチバンド HDR 観測画像から、画素ごとの 分光反射率を推定し、理想光源下における CIE RGB 画 像(実数値)とxy 色度分布を生成する.
- 2) 推定した CIE RGB 画像の輝度値ヒストグラムを生成 し、ヒストグラムのピークから拡散反射成分の分光反 射率をする.さらに、各画素における分光反射率から 拡散反射の分光反射率を分離し、鏡面反射成分の分光

反射率を抽出し,その色度分布を生成する.本研究で は観測対象が赤色サテンであることから,輝度値とし て画像のR値を用いる.

- R 値に対する色度と画像における対応領域を抽出し, 鏡面反射の強さと色度変化と微小構造との関係を解析 する.
- 鏡面反射成分の色度分布より、光源色の鏡面反射光が観 測される領域を抽出し、微小構造との関係を解析する.

5. 実験

5.1 織物の観測条件と分光反射率推定について

図 4(b)に示すように、織物のよこ糸中心で正反射が観測 されるように、よこ糸に沿った方向へ光源の入射角を15°、 観測角を15°の条件でマルチバンド HDR 画像の観測を行 った.次に、HDR 画像から、輝度と色度の分離に基づく PLS 法を用いて、各画素の分光反射率を推定した. 推定計算に 使用される回帰行列 W は、事前に Pantone 社製 Color Checker 330 枚の画像および分光反射率の計測データから 算出した.

5.2 織物の分光反射率の推定

赤色サテンの観測 HDR 画像から各画素の分光反射率を 推定した.図 5(a)に,推定分光反射率から算出した理想光 源(E光源で全波長の反射率=1.0)環境下における CIE RGB 画像を示す.画像の RGB 値は実数値を持つ.また,図 5(b) に図 5(a)の Y=272 における X 方向 1 ライン分の分光反射 率の推定結果を示す.推定された分光反射率は基準となる 標準白色板の分光反射率(全波長の反射率=1.0)より高く, 物体色を持つことが確認された.織物の微小構造の変化に よって,分光反射率が大きく変化することが確認された.



(a) CIE RGB 画像(400×400)(b) 推定分光反射率(Y=272)図5 CIE RGB 画像と推定分光反射率

次に,図7に理想光源下での xy 色度分布を示す.図7(b) では,Z軸を画素数とする.色度座標の分解能は x,y 共に 0.005 とした.色度分布を確認すると,ほとんどの画素が赤 色の物体色を含んでおり,白色光源の色度座標(0.33,0.33)付 近の画素はわずかであった.図6に,輝度値とR値に対 するヒストグラムを示す.ヒストグラムに大きな違いはな く,今回は赤色のサテン持つ赤の色度に対して,詳細に変 化を解析するためにR値を基準とした.



また,表1に分光計で計測した色度座標と色度分布にお ける,ヒストグラムのピークとなる色度および平均色度座 標を示す.分光計測による色度座標と平均色度座標が近い 値を示した.

表1 色度座標比較

色度座標	(x,y)
分光計測	(0.554,0.311)
ヒストグラムのピーク	(0.585,0.335)
平均	(0.557,0.331)

5.3 拡散反射光と鏡面反射光の領域の色度分布

推定分光反射率から,拡散反射成分を抽出するために, RGB 画像の R 値におけるヒストグラムを生成した.図 8 に 横軸を R 値とした,画像の全領域,よこ糸,たて糸領域か ら作成したヒストグラムを示す.よこ糸,たて糸の領域抽 出は今回手動により行った.最大 R 値に関して,よこ糸は たて糸の 6 倍となった.しかし,ヒストグラムのピークと なる R 値に関して,たて糸はよこ糸の 2 倍を示した.



(a) たて糸・よこ糸境界
 (b) R値のヒストグラム
 図8 たて糸・よこ糸境界とヒストグラム

次に,全領域でのヒストグラムのピークとなる R=6 とな る画素の推定分光反射率を平均し,拡散反射スペクトルを 算出した.図9に拡散反射スペクトルを示す.赤色の長波 長側の反射率の高いスペクトルを示した.



算出した拡散反射スペクトルを、全画素の推定分光反射率



図6 画像のヒストグラム

から除き,鏡面反射成分を抽出する.図10(a)に,R=9.0以下の拡散反射のみとされる画像領域と色度分布,図10(b)に R=9.0以上で鏡面反射が含まれる画像領域と色度図分布を 示す.拡散反射はよこ糸中心から離れた領域で,この領域 は繊維内部からの出射光は観測されない.よこ糸中心部, たて糸領域においては,拡散反射光以外の鏡面反射が強く 観測される.



(a) R=9.0以下の拡散反射領域と色度分布



(b) R=9.0 以上の鏡面反射領域と色度分布図10 画像領域(緑以外)と色度分布とヒストグラム

5.4 鏡面反射光における色度変化の抽出

鏡面反射光の強さと色度と織物の領域との関連性を解析 する.図11によこ糸とたて糸を含む画像の一部と,画像上 の青色のラインに沿った RGB 値の変化グラフを示す.グ ラフより,たて糸領域,よこ糸中心部とそれ以外の領域に おける特徴が確認され,これはメゾ構造に基づいた変化を 示していることが確認される.



図 12(a)に R 値に対する x, y それぞれの色度変化グラフ とその近似曲線を示す. 青色のグラフが x, オレンジ色の グラフが y の色度座標で, それぞれのグラフ上に近似曲線 を示す.図 12(b)に算出した x, y それぞれの近似曲線を色度 空間にプロットした結果を示す. 色度は R=100 までは光源 色方向, それ以上では再び赤色の物体色方向に変化した.



図12 画像の R 値に対する鏡面反射光の色度座標の変化

次に画像領域との関係を解析する.図 13 に任意のよこ 糸中心付近におけるR値ごとの領域と色度分布の変化を示 す.R値が増加するにつれて,徐々によこ糸の中心部に集 まり,色度はxが少しずつ増加する傾向を示した.

また,他のよこ糸領域においても同様の傾向を示し,物 体色の色度をもつ鏡面反射光が観測された.



図13 R値に対する領域と色度の変化

5.5 光源色の鏡面反射領域の抽出

光源色が観測される領域を抽出する.生成した鏡面反射 成分の色度分布において、図 14(a)の赤枠で示した,白色の 光源色(0.33, 0.33)から±0.04 の範囲で領域を抽出した.図 14(b)に抽出された領域(緑枠)を示す.



(a) 色度図上での選択(b) 光源色の領域図14 光源色の領域抽出

図 14(b)に示すように、たて糸領域において多くの光源色 領域が抽出された.よこ糸領域で抽出された光源色はごく わずかで、よこ糸中心から光源側(X軸正の方向)に離れ た領域において抽出された.図 15 に、たて糸上で抽出され た領域周辺の RGB 値と色度変化を示す.抽出された領域 に関して共通することは、輝度値が低いことであった.



(a) 原画像(b) RGB 値(c) 色度の変位図15光源色が観測されたたて糸周辺の色度変化

6. 織物から観測される鏡面反射光の考察

8 章における実験結果データより、よこ糸およびたて糸 領域において観測される反射光の色度・強さに関して、微 小面分布による幾何的な特徴と、織物を構成する繊維の透 過性による光学的特徴の観点から述べる.

6.1 よこ糸領域で観測される物体色の鏡面反射光の強さ と色に関する考察

よこ糸中心付近で観測される物体色の鏡面反射光につい て考察する.よこ糸は複数の繊維が束になって構成される. 観測画像のよこ糸中心付近の輝度分布から,観測される鏡 面反射光は微小面分布上として存在する繊維に大きく影響 される.微小面分布は繊維の側面,つまり境界面の分布を 示し,繊維の境界面の法線に影響されることとなる.繊維 の境界面の法線を,繊維の軸に沿った方向,それに垂直な 方向に分けて考察する.繊維の直径は 10µm と極めて小さ く透過性を持つ.図 16 に入射角,観測角共に 15°の時の 繊維軸に沿った方向における光の伝搬経路を示す.

繊維1本がメゾ構造により浮き沈みする長さは 1mm と 短く、光源位置はそれに対して十分離れているため、繊維 全体に照射される入射光は平行光と定義できる. 伝搬経路 について、入射光は境界面において屈折し、繊維内部に侵 入する. ポリエステル繊維の屈折角は、入射角が 15°の時、 9.3°となる. 内部に侵入した光は、次に繊維の下側の境界 面において内部反射を起こす. 一部の光は透過する. 内部 反射した光は再び境界面において屈折を起こし、物体色の 持つ光として出射される.入射点から出射点までの距離は、 2 点間の境界面の法線が真上になっている条件が一番短く、 この時 3.2 µmとなる. 観測画像上では1 画素以内と極めて 近くなる.

また,繊維内部に侵入した入射光は,複数回の内部反射 を繰り返して減衰する.そのため,図17に示すように繊維 の境界面が平滑である場合,図中の出射光Oには複数の入 射光A,B,Cにより伝搬された光が含まれる.つまり,境界 面が平滑なほど,離れた入射光からの光が観測方向に出射 されるようになるため,物体色の鏡面反射光がより強く観 測される.



図16 よこ糸の繊維における光の伝搬経路



図17 繊維の境界面が平滑な場合の光の伝搬経路

次に,繊維の軸に垂直な面上の法線の向きによる鏡面反 射の強さと色度に関して考察する.

図 18 に、繊維の境界面が真上の場合での光の伝搬を示 す.繊維の境界面が真上の場合、観測方向に光源色の鏡面 反射も含まれる.境界面が平滑になると、さらに物体色の 鏡面反射光は強くなるが、境界面での光源色の反射量は変 化しないため、より物体色の強い色度を持った反射光を示 すようになる.



図18 よこ糸の繊維における光の伝搬経路

繊維の断面は完全な三角形でなく,図2(b)に示したよう に実際は頂点が丸みを帯びた三角形となる.そのため,光 源色の鏡面反射成分は強さに違いはあるが,三角断面がど の向きになっていても含まれる.この丸みは物体色の鏡面 反射光の指向性を減少させ拡散させる効果を持ち,織物の 光沢や質感を示す要因となるものであると考えられる.

最後によこ糸状で観測される光源色について,観測画像 より,入射光側からよこ糸中心に向かう際に,輝度値が急 激に上昇する箇所において観測される.輝度値の急激な上 昇は,図19に示すように,繊維の境界面の曲率が大きい点 Aにおいて生じることを示す.点Aにおいて観測される物 体色の鏡面反射光は,点Aよりも光源側である左側の境界 面における入射光によって観測される.しかし,点Aより 左側が急激な曲面形状になる場合,繊維内部からの出射光 が観測方向へ向かわなくなるため,光源色の鏡面反射光に 近い色度となると考察される.



図19 光源色の鏡面反射が観測される繊維の境界面

6.2 たて糸領域で観測される物体色の鏡面反射光の強さ と色に関する考察

図 8(b)のたて糸のヒストグラムより,ヒストグラムがピ ークとなる画像のR値は,よこ糸のそれよりも高い特徴が ある.しかし,たて糸領域のダイナミックレンジは狭い. よこ糸領域のヒストグラムでピークとなる領域は,よこ糸 中心から離れた拡散反射しか観測されない領域である.一 方,たて糸領域では,図 20(a)に示すように,入射した光が 繊維内部において,境界面との内部反射と透過を繰り返す ことで,ランダムな方向に出射される.そのため,拡散反 射よりも明るくなる.

また,たて糸上で観測される光源色の鏡面反射は,図 20(b)のように,繊維の境界面が真上を向いていると考察される.よこ糸の場合では,境界面が真上を向いている場合, 光源色の鏡面反射と,入射方向に沿った境界面が長く境界 面上端と下端が平行であることから,繊維内部からの出射 光が強くなり,物体色の色度を持つ反射光が観測される. 一方,たて糸では,ランダムな方向への出射による光の拡 散によって,観測方向へ向かう物体色を持つ反射光は弱い ため,光源色の色度を持つ反射光が観測される.



7. おわりに

本研究では、織物の微小構造に基づいた鏡面反射の色度 の解析を行った.織物から観測される物体色の鏡面反射は、 よこ糸中心付近ほど強く観測され、その色度は光源色側で はなく、物体色の強い方向へ変化した.この結果から、繊 維のメゾ構造に基づく法線と、三角断面による境界面の法 線から、繊維の境界面で生じる光源色の鏡面反射と繊維内 部での光の伝搬による物体色の反射光の強さが変化するこ とで、色度が変化することを考察した.

光源色の鏡面反射はたて糸領域において観測された.し

かし、繊維には透過性があるため、よこ糸中心付近で観測 される物体色の鏡面反射光よりも弱い結果となった.

今後の課題として、本研究での解析と考察に基づいたレ ンダリングによるシミュレーション評価を行う必要がある.

謝辞 本研究の一部は,新学術領域研究「質感脳情報学」 公募研究(25135730,代表:田中弘美)と科研費補助金 基盤 C (26330213,代表:坂口嘉之)助成を受けたものである.

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) Wold, H, Soft Modeling by Latent Variables: the Nonlinear Iterative Partial Least Squares Approach, in Perspective in Probability and Statistics, Paper in Honour of M. S. Bartlett, 520-540, Academic Press. 1975.

3) Wold, S. "Cross-validation estimation of the number of components in factor and principal component analysis," Technometrics, 24, pp.397-405, 1978.

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) M. Hashimoto, "Two-Shot type 6-band still image capturing system using Commercial Digital Camera and Custom Color Filter," Proc. 4th European Conf. on Color in Graphics, Imaging, and Vision 2008.

6)田中士郎,高柳亜紀,土田勝,坂口嘉之,田中弘美,"高分解能 マルチバンド HDR 画像解析に基づく織物の分光反射率推定", 日本色彩学会 第22回視覚情報基礎研究会,2014.

7) P. Irawan, "Specular Reflection from Woven Cloth," ACM

Transactions on Graphics, Vol. 31, No. 1, Jan 2012.

8) X. Liu, R, K, Ramaprasad, Y. Ning, and 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.

9) 戸谷健朗, 林秀樹, 渡辺敏行, "断面が三角形の繊維1本による 透過光の方向制御および偏光の分離機能",繊維学会誌, Vol. 64, No. 7, pp.171-177, 2008.

10) 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.

11) 武田祐樹,田中弘美,"多方向照明 HDR 画像を用いた金襴の 多重解像度異方性 BTF モデリング",電子情報通信学会論文誌 D, Vol. J91-D, No. 12, 2008.

12) 武田祐樹,坂口嘉之,田中弘美,"少数視点画像の反射光解析 に基づくシルクライク織物の異方性反射レンダリング",芸術学 会論文誌, Vol. 17, No. 4, 2008.

M. Ashikhmin, S. Premoze and P. Shirley, "A Microfacet-based BRDF Generator," Proc. SIGGRAPH 2000, pp.65-74, July 2000.
S. H. Westin, J. R. Arvo, and K. E. Torrance, "Predicting Reflectance Functions from Complex Surfaces," Proc. SIGGRAPH 92, pp. 255-264, 1992.

15) 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.