

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 2 日現在

機関番号：34315

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26330213

研究課題名(和文) ミクロレベルの分光画像計測による織物の光学特性の解析

研究課題名(英文) Chromaticity Analysis of woven fabric by using micro level Multi-band HDR Images.

研究代表者

坂口 嘉之 (SAKAGUCHI, YOSHIYUKI)

立命館大学・総合科学技術研究機構・プロジェクト研究員

研究者番号：50425021

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：物体からの反射光の鏡面反射成分は光源と同じであるが、光沢を有する織物の鏡面反射光は、光源色ではなく有彩色であることが報告されている。このような織物特有の反射特性は、糸の幾何的要因と、繊維や糸の光学的な要因による。織物の鏡面反射が物体色になる仕組みを調べ、織物の光反射モデルを構築することが目的である。本研究では、ミクロレベルの繊維のHDRマルチバンド画像を撮影し、鏡面反射光の分光反射特性を推定し、繊維の光沢の反射特性を解析した。さらに、光線追跡シミュレーションにより、繊維内部の光の伝搬を計算した。また、3Dプリンターでスケールアップした繊維構造を製作し、光学反射特性を測定して実測値と比較する。

研究成果の概要(英文)：Although the specular reflection component of an object is the same as the light source, it has been reported that specular reflection light of a glossy fabric is chromatic color rather than light source color. The reflection characteristics peculiar to such fabrics are due to the geometric factors of the yarns and the optical factors of the fibers and yarns. Our purpose is investigated the mechanism that specular reflection of the fabric becomes the object color and construct a light reflection model of the fabric. In this study, HDR multiband images of micro level fibers were taken, spectral reflectance characteristics of specular reflection light were estimated, and reflection characteristics of fiber gloss were analyzed. In addition, light propagation inside the fiber was calculated by ray tracing simulation. In addition, we fabricate a fiber structure scaled up with a 3D printer, measure the optical reflection characteristics, and compare it with the measured value.

研究分野：感性情報処理

キーワード：BRDF 光学特性 Multi-band HDR

1. 研究開始当初の背景

CGでリアルな画像表現を得るには、光の反射モデルが重要である。一般に、物体からの反射光の鏡面反射成分は光源と同じであるが、光沢を有する織物の鏡面反射光は、光源色ではなく有彩色であることが報告されている。このような織物特有の反射特性は、糸の断面や織組織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る。

2. 研究の目的

織物の鏡面反射が物体色になる仕組みを調べ、織物の光反射モデルを構築することが目的である。

3. 研究の方法

本研究では、ミクロレベルの繊維のHDRマルチバンド画像を撮影し、鏡面反射光の分光反射特性を推定し、繊維の光沢の反射特性を解析した。さらに、光線追跡シミュレーションにより、繊維内部の光の伝搬を計算した。また、3Dプリンターでスケールアップした繊維構造を製作し、光学反射特性を測定して、実測値と比較する。

4. 研究成果

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(5~10×10<sup>5</sup>mm)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(フィブリン)の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、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になっており、図1(c)に示すように半透明になっている。

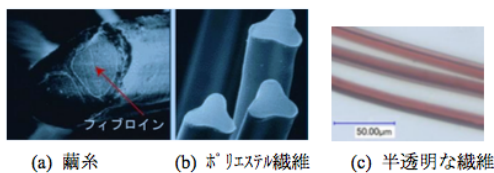


図1 繊維の断面形状

図2(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2(b)と図2(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正反射方向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

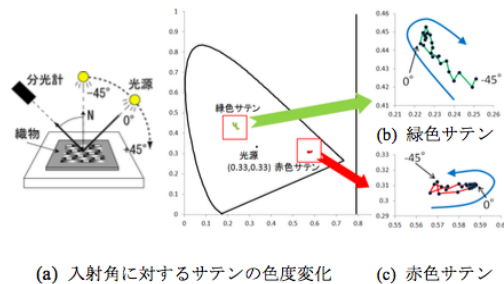


図2. サテン光沢の色度変化

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。

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バンド画像を取得し、PLS法を用いて織物の分光反射率を推定した。その結果を図3に示す。

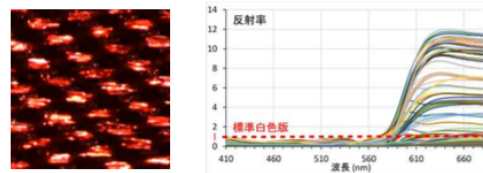


図3. CIE RGB画像と推定分光反射

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4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る。これはメゾ構造に基づいた変化を示している。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5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

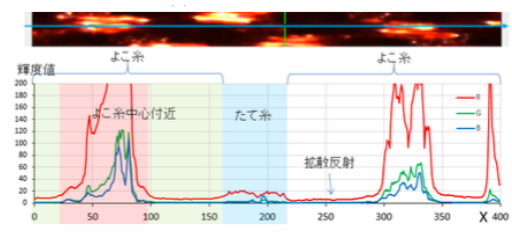


図4. メゾ構造に基づくRGB値の変化

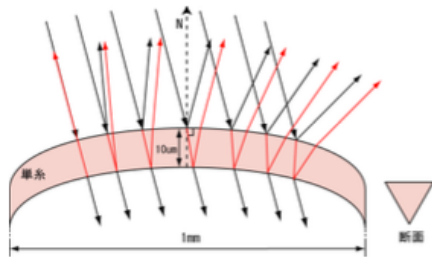


図5. よこ糸の繊維における光の伝搬

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。

### 三次元光学シミュレーションの構築

次に、幾何光学に基づいた光学計算による3次元の光学シミュレーションを行った。図5に示すように、3次元の単繊維モデルを定義して、それらを平行および多層に定義した繊維モデルを構築し、繊維モデルに入射した光の伝搬経路や観測方向へ向かう光を分光分布で表示する。

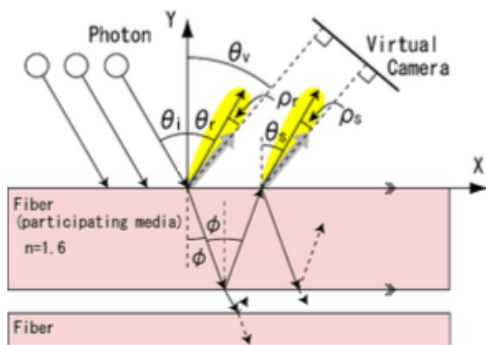


図6. 光学シミュレーションの概要経路

図6に光学計算の概要図を示す。光は繊維と空気の境界面において、反射、屈折による透過を起こす。入射光をエネルギーの持つ光の粒子(以降 Photon と呼ぶ)が複数集まったものとして定義する。

図7に光学シミュレーションによって得られた、三葉断面と三角断面の回転角(グラフ横軸)に対する正反射方向への反射光の強さ

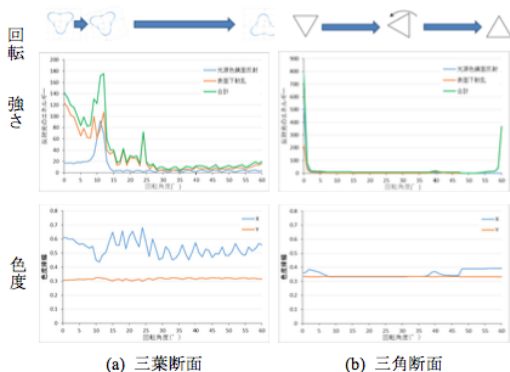


図7. 単繊維の断面回転による正反射

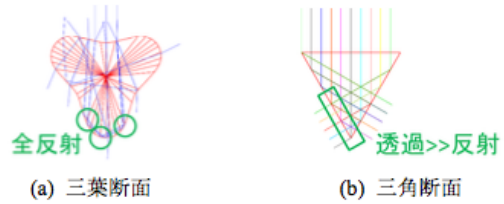


図8. 光の伝搬経路の比較(=0°)経路率

と色度の結果を示す。最上段の図では $\rho$ の単繊維の断面の向きの状態を示す。三葉断面では、 $\rho = 0^\circ$ の時、赤色の強い反射光が得られた。また、 $\rho = 11^\circ$ の時、光源色の鏡面反射が強くなった。一方、三角断面では、 $\rho = 0^\circ$ の時に反射光が三葉断面よりも5倍強いものの、色度は極めて光源色に近く、色度座標はいずれの回転角においても $x < 0.4$ で、光源色に近い状態となることが確認された。

三葉断面の $\rho = 0^\circ$ における反射光が赤くなる。原因を解析するために光の伝播経路を出力した。図8に特徴となる光の伝播経路を示す。三葉断面では図8(a)に示すように、丸みを帯びた先端部において、繊維内部を伝搬する光が全反射することによって、観測方向へ物体色の強い光が射出される。一方、三角断面では、図8(b)に示すように、緑で囲まれた境界において入射角が少なく、透過が多くなるため観測方向へ物体色の光が射出されにくい。三葉断面の先端の丸みとその間の緩やかな曲面により、内部での全反射が生じやすく、表面での反射光や射出光が拡散され、赤色の強い反射光として観測される効果を持つことが確認された。

次に、よこ糸上における反射光解析を行った。単繊維によこ糸の曲がりを与えるために、よこ糸方向に沿って光源位置を変化させて撮影された多方向照明画像からX軸方向成分の法線マップ画像を生成した。法線マップの最も高い輝度値(=255)を示す領域が正反射領域を示し、その中心位置からの距離と正反射のズレ角の対応から近似曲線を算出し、各単繊維モデルに同じ曲がりを与え、よこ糸モデルを作成した。入射領域を繊維軸方向に対し $-50 \sim 50 \mu\text{m}$ 、軸の垂直方向に対し $-10 \sim 10 \mu\text{m}$ の範囲で光学シミュレーションを行った。また、図9に観測方向成分のRGB画像(最上段)と、各繊維層からの観測方向への射出光の強さと色度を示す。結果よりも、表面層で生じる光源色の鏡面反射光よりも、1層目の単繊維内部からの射出光が2倍ほど強く(実際には赤色波長領域にエネルギーが集まっている)、全体の観測方向への反射光の色度は、1層目からの射出光による影響が大きいことが確認された。

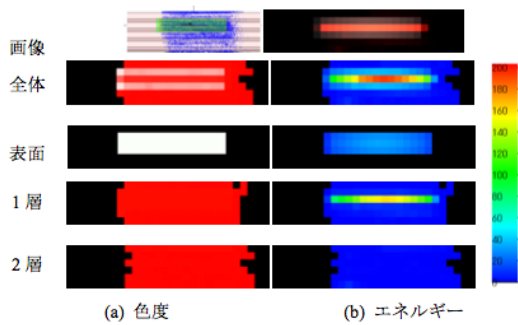


図9. 繊維層からの出射強度と色度

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

1. Wataru Wakita, Shiro Tanaka, Kohei Furukawa, Kozaburo Hachimura, and Hiromi T. Tanaka, “Digital Archiving of Takigi Noh based on Reflectance Analysis”, Proceedings of the HCI International 2015, 査読有, The Westin Bonaventure Hotel & Suites, Los Angeles, U.S.A., Aug. 2015, Lecture Notes in Computer Science(LNCS)9179, pp. 398-408, DOI: 10.1007/978-3-319-21067-4\_41, Aug. 2015.
2. 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”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 査読有, vol. 20, no. 1, pp. 35-44, Mar. 2015

[学会発表] (計 12 件)

1. 田中 士郎, 脇田 航, 八村 広三郎, 田中 弘美 “動的照明による織物の異方性反射レンダリングに基づく薪能の再現” CVIM 研究会 204 回 CVIM-204-14 ポスター発表 2016 年 11 月 10 日 「九州大学 医学部百年講堂 (福岡県福岡市)」
2. 田中 士郎, 脇田 航, 八村 広三郎, 田中 弘美 “動的照明による織物の異方性反射レンダリングに基づく薪能の再現” CVIM 研究会 204 回 CVIM-204-14 テーマセッション 2 2016 年 11 月 9 日 「九州大学 医学部百年講堂 (福岡県福岡市)」
3. Shiro Tanaka, Yoshiyuki Sakaguchi and Hiromi Tanaka, “Chromaticity Analysis of Specular Reflection of Woven Fabrics from High-Resolution Multi-band HDR Images ” 22<sup>st</sup> Japan-

4. Korea Joint Workshop on Frontiers of Computer Vision (FCV2016), 02-2, Hida Hotel Plaza, Takayama, Gifu, Japan, Feb.17-19, 2016 (02,17 発表)
5. 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”, 第 200 回コンピュータビジョンとイメージメディア研究会, 2016 年 1 月 22 日 「大阪大学 (大阪府吹田市)」
5. Shiro Tanaka, Wataru Wakita, Hiromi T. Tanaka, “Anisotropic Reflectance Rendering of Noh-Kimono Costumes in Dynamic Lighting Environments with Bonfire”, The IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV2015), 2015, 12, 16 「CentroParque Convention Center (Santiago Chile)」
6. Shiro Tanaka, Yoshiyuki Sakaguchi, Hiromi T. Tanaka, “Chromaticity analysis of specular reflection of woven fabrics from high-resolution multi-band HDR images”, The 11th Joint Workshop on Machine Perception and Robotics (MPR2015), Kyushu University, 2015.11.26-27 「JR HAKATA CITY Conference Rooms, (Fukuoka)」
7. 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反射光の解析”, 新学術領域質感脳情報学, 質感のつどい第 1 回フォーラム, 2015.11.25 「東京大学生産技術研究所コンベンションホール (東京都目黒区)」
8. 田中士郎, 坂口嘉之, 田中弘美, “織物の微小構造に基づく鏡面反射の色度と光の伝搬解析”, MIRU2015 第 18 回画像の認識・理解シンポジウム, SS1-30, 28 Jul. 2015 「ホテル阪急エキスポパーク, (大阪府吹田市)」
9. 田中 士郎, 坂口 嘉之, 田中 弘美, “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”, 質感脳情報学第 9 回領域班会議, 2015, 03, 19 「千里ライフサイエンスセンター (大阪府豊中市)」
10. Shiro Tanaka, Aki Takayanagi, Masaru Tsuchida, Yoshiyuki Sakaguchi and Hiromi T. Tanaka, “Estimating Spectral Reflectance of Fabrics from High-Resolution Multi-band HDR Images”, 21<sup>st</sup> Japan-Korea Joint Workshop on Frontiers of Computer Vision (FCV2015), 2015. 01.29 「Shinan Beach Hotel, Mokpo, (South Korea)」

11. 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画像を用いた織物の微小構造に基づく鏡面反射の色度解析”, 情報処理学会 コンピュータビジョンとイメージメディア研究会 (CVIM2015), 2015. 01. 22 「奈良先端科学技術大学院大学 (奈良県生駒市)」
12. 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 視覚情報基礎研究会 第22回研究発表会, CSA-FVI-2014-28, pp. 31-36, 2014年12月6日, 「中央大学後楽園キャンパス (東京都文京区)」

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

坂口 嘉之 (Sakaguchi Yoshiyuki)  
立命館大学・総合科学技術研究機構・プロジェクト研究員  
研究者番号：50425021

### (2) 研究分担者

脇田 航 (Wakita Wataru)  
広島市立大学・情報科学研究科・助教  
研究者番号：80584094