

二色性反射モデルの一般化に基づく織物の鏡面反射成分の解析

鳥居 悠人[†] 中村 友哉[†] 坂口 嘉之[†] 田中 弘美[†]

[†] 立命館大学情報理工学部知能情報学科 〒 525-8577 滋賀県草津市野路 1-1-1

E-mail: †{torii,nakamura,sakaguchi,hiromi}@cv.ci.ritsume.ac.jp

あらまし BRDF 近似モデルが多数, 提案されており, プラスチックのような等方性反射の場合には, よく当てはまる事が知られている. しかし, 強い異方性反射特性がある織物の場合には再現が難しい. 我々は二色性反射モデルの一般化を提案し, 多方向照明 HDR 画像から四つの反射成分に分離し, それぞれの反射成分について考察を行ってきた. 本論文では, 偏光板により反射成分を分離した結果と提案手法により反射成分を分離した結果を比較することで, 分離手法の精度評価を行う. また織物と二色性反射モデルで近似できるプラスチックの分離結果の各反射特性を解析することで, 提案モデルの有用性を示す.

キーワード BTF, 異方性反射モデル, 物体色鏡面反射, 織物, 偏光

1. はじめに

近年, BRDF の反射モデルが数多く提案され評価されている [8-14]. さらに, 周辺を撮影した HDRI を照明環境として利用することで, 映り込みや相互反射をもレンダリングし, ホトリアリスティックな画像が生成できるようになってきた. しかし, 提案されている反射モデルは, 等方性反射特性をもつ物体は正確に表現できても, 織物のように強い異方性反射特性を持つ物体は正確には表現することは難しい [6].

武田らは, ほとんど撚りが無いフィラメント糸で織られた光沢のある織物をシルクライク織物と呼び, 能装束のレンダリングの研究を行ってきた [16]. この研究過程において, 織物の拡散反射成分の分離や, スペキュラローブの EM 推定を行い, 能装束の BTF レンダリングを可能にしてきた [5]. 織物の異方性反射特性は, 織り構造や糸の反射特性に起因していると考えられる. しかし, それらが, それぞれ, どのように反射特性に影響を与えるのかは明確ではなかった.

また, 従来から, 拡散反射成分と鏡面反射成分の分離や二色性反射モデル [1][2] のように物体色と光源色の分離がなされている. 前者は反射光の方向依存性による分類であり, 後者は反射光の色による分類である. 拡散反射成分が物体色であり, 鏡面反射成分は光源色になっている.

我々は二色性反射モデルを拡張した, 二色性モデルの一般化を提案してきた [17]. 全ての反射成分は, 物体色と光源色, 指向性の有無により四つの反射成分で表現できると仮定する. 物体色で指向性を持たない反射成分を物体色拡散反射成分と呼び, 光源色で指向性を持たない反射成分を, 光源色拡散反射成分と呼ぶ. また, 物体色で指向性を持つ反射成分を物体色鏡面反射成分と呼び, 光源色で指向性を持つ反射成分を光源色鏡面反射成分と

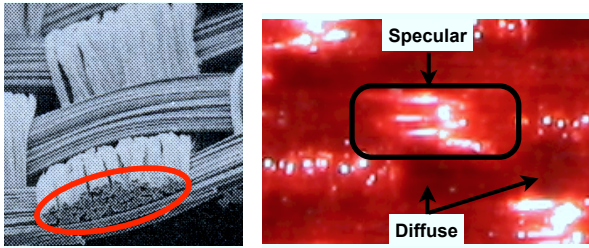
呼ぶ. 我々は各反射成分の分離方法を提案し [17], シルクライク織物と綿織物について実験している. 分離結果より, 物体色鏡面反射成分は糸を構成している単糸の透過と反射により発生していると考察している. しかし, それらの反射成分の分離結果の評価が十分ではなかった.

そこで本研究では, 偏光板により反射成分を分離した結果と, 提案手法により反射成分を分離した結果を比較することで, 分離手法の精度評価を行う. また従来の反射モデルである二色性反射モデルで近似することができるプラスチックと追加実験を行う. プラスチックの分離結果と織物の分離結果を比較することで, 提案モデルの有用性を示す.

2. 二色性反射モデルの一般化

本章では, 我々が提案してきた, 二色性反射モデルの一般化について述べる [17]. 拡大レンズを使って織物を拡大撮影して詳細に観察してみると, 図 1(b) のように鏡面反射領域は, 1 本の糸の上であり, さらに二つの領域があることが分かる. 実線で囲まれた部分が, 反射強度が大きい鏡面反射付近である. 白い部分に光源が写っている鏡面反射の領域があつて, ここには織物の物体色は付いてはいない. このハイライト部分は, 図 1(a) に示すように, 糸の単糸部分からの鏡面反射である. また, このハイライト周辺には, 明るい物体色の反射成分が取り囲んでいる. 物体色であることから, 糸の物体色反射成分であると考えられる. また, 糸と糸との間にも, 多少, 暗くはなっているが物体色の反射成分が見られ, この部分は, 一様に反射しているように見える.

これらの観察結果より, 反射光の指向性の有無と物体色の有無に着目し, 光源色鏡面反射成分と物体色鏡面反射成分, 光源色拡散反射成分と物体色拡散反射成分が存在すると考えた. そこで, (1) 式に示すような反射モデルを新たに提案した. また, 表 1 と図 2 に (1) 式の各反



(a) 単糸 (b) 赤織物の拡大画像

図1 織物の拡大図

射成分を示す.

$$L(\theta, \phi, \lambda) = L_{l_s}(\theta, \phi, \lambda) + L_{b_d}(\theta, \phi, \lambda) + L_{l_d}(\theta, \phi, \lambda) + L_{b_s}(\theta, \phi, \lambda) \quad (1)$$

ここで、 ϕ は反射面の法線周りの角度である.

$$L_{l_s}(\theta, \phi, \lambda) = m_{l_s}(\theta, \phi)E(\lambda) \quad (2)$$

$$L_{l_d}(\theta, \phi, \lambda) = m_{l_d}(\theta, \phi)E(\lambda) \quad (3)$$

$$L_{b_s}(\theta, \phi, \lambda) = m_{b_s}(\theta, \phi)S_{b_s}(\lambda)E(\lambda) \quad (4)$$

$$L_{b_d}(\theta, \phi, \lambda) = m_{b_d}(\theta, \phi)S_{b_d}(\lambda)E(\lambda) \quad (5)$$

	光源色反射成分	物体色反射成分
拡散反射成分	$L_{l_d}(\theta, \phi, \lambda)$	$L_{b_d}(\theta, \phi, \lambda)$
鏡面反射成分	$L_{l_s}(\theta, \phi, \lambda)$	$L_{b_s}(\theta, \phi, \lambda)$

表1 一般化二色性反射モデルの反射成分

ここで、物体色反射の定義には、表面色散乱の効果や透過や相互反射の効果も含んでいるとする。(1)式は二色性反射モデルと拡張二色性反射モデルを包括し、さらに方向依存性をも含んでいる。図2に、一般化した二色性反射モデルの各反射成分を示す。

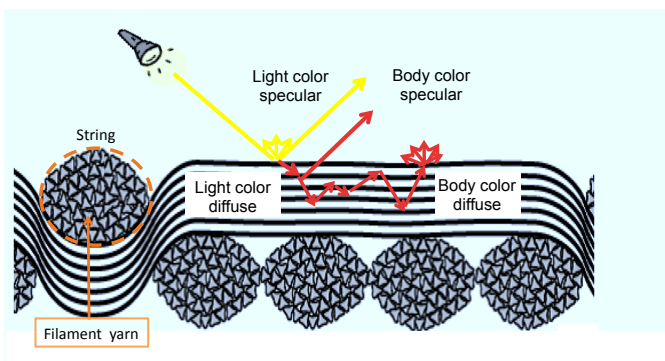


図2 織布の反射成分

3. 反射成分の分離手法

本章では、反射成分の分離方法について述べる。反射成分の分離は、反射色による分離と反射方向による分離の二段階になる。まず、分光特性を利用して、光源色反射成分と物体色反射成分の二成分に分離する。次に、反射の指向性に着目して、得られた二成分をそれぞれを拡散反射成分と鏡面反射成分に分離し、合計、四成分に分離する。

撮影画像は、白色板の反射特性で規格化し、光源の波長特性、及び、ランバート反射における \cos 項の影響を補正している。ゆえに、補正後の画像の光源色反射成分は、RGBそれぞれが同じ値を持ち、光源の色と同じになる。実験に使用した赤色のサンプルであれば、拡散反射成分のB値は、織物の物体色成分をほとんど含まない。このことから、各画素のRGB値の最小値が光源色反射成分となる。本手法では、色情報を使った分離なので、RGBそれぞれの単色の物体色の場合にしか適用できない問題があるが、RGBの3バンドよりもスペクトル解像度の高いマルチバンドカメラ[15]を用いることで、この問題は解決できると考えている。本論文では、織物の反射特性を考察することが目的であるので、本手法に適用可能な物体色のサンプルだけを対象とする。

次に、測定した入射角度の異なる648枚の画像から、全ての方向に均等に反射する拡散反射成分と特定の方向に強い強度で反射する鏡面性反射成分に分離する方法について述べる。図3は各ピクセルにおける、入射角度の異なる648枚の画像の、反射率のヒストグラムである。ある反射率の位置にピークが現れていることがわかる。拡散反射成分の計測点数が鏡面反射成分の計測点数よりも遙かに多いことから、これらの反射率付近が拡散反射成分になる。そこで、我々は各ピクセル毎に、図3のヒストグラムから平均値(μ)と標準偏差(σ)を求め、反射率が $\mu + \sigma$ 以上を鏡面反射成分、その以下の平均反射率を拡散反射成分の反射率として分離を行った。しきい値は標準偏差 σ を考慮することにより、ヒストグラムのピークが顕著に現れない場合でも正確に分離することができる。

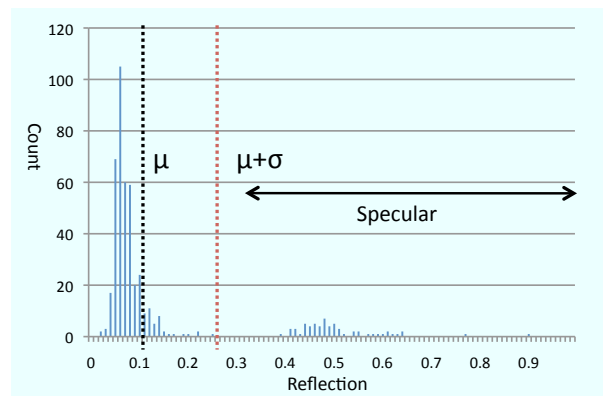


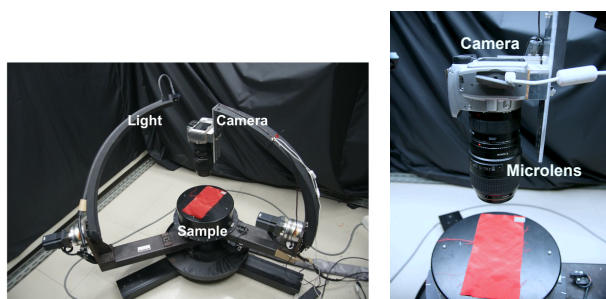
図3 各ピクセルにおける反射率のヒストグラム

4. 実験結果

4.1 実験環境

本研究では、提案した反射成分の分離手法に基づいて、実際の織物の反射光を分離し、解析を行った。実験の用いた試料は、光沢のあるシルクライク織物、光沢の少ない綿織物、また従来の二色性反射モデルで近似することが可能な、表面が凹凸形状のプラスチックをそれぞれ赤色と青色、合計6種類を観測対象とする。

図4に、反射分布測定に用いた光学異方性測定装置(OGM: Optical Gyro Measuring Machine)を示す。図4(a)に示すように、OGMは試料台とデジタルカメラ、光源を先端に付けた2本のアームで構成される。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。この自由度を組み合わせることで、織物に対し任意の入射方向に対する任意の視点方向から、反射光の計測が可能である。観測は暗室で行い、光源には朝日分光(株)のキセノン光源LAX 102を用いた。3888 × 2592ピクセル、デジタルカメラCanon EOS Kiss Digital X, EF100mm F2.8 マクロ USM のレンズを用いて撮影倍率を上げて高解像度画像(1pixel幅≒8μm)を得た。また、図4(b)のように、マイクロレンズの最小焦点距離0.31mまで近づけて撮影した。カメラは $(\theta_c, \phi_c) = (15^\circ, 0^\circ)$ で固定。光源の入射方向 (θ_i, ϕ_i) を、 θ_i が 0° から 80° まで 1° ずつ、 ϕ_i が 0° から 315° まで 45° ずつ変化させ、648通りの入射方向に対して観測画像を獲得する。ただし、各照明方向において露光時間を1/400, 1/50, 1/8, 0.8, 5.0, 15(sec)の6種類とし、観測画像は計3888枚となる。カメラは固定しているが、 θ_c 方向に 15° 傾けているため、織物の法線が真上を向いている場合でも鏡面反射光を観測することができ、織物のBRDFの特徴は測定できる。これらの撮影環境で512 × 512ピクセルの多方向照明高解像度HDR画像を観測した。



(a) Optical Gyro Measuring Machine

(b) カメラ

図4 撮影システム

4.2 反射成分の分離

図5は赤色のシルクライク織物の反射成分を、物体色反射成分と光源色反射成分に分離し、さらに、それぞれ鏡面反射成分と拡散反射成分に分離した結果である。(A)物体色反射成分、(B)が光源色反射成分である。(C)は物体色を持ち、指向性を持った物体色鏡面反射成分であり、(D)は物体色を持ち、指向性を持たない物体色拡散反射成分である。(E)は光源色を持ち、指向性を持った光源色鏡面反射成分であり、(F)は物体色を持ち、指向性を持たない物体色拡散反射成分である。

(C)と(E)の成分が大きく、(D)と(F)の成分は小さい。(C)と(E)を観察すると、光源色鏡面反射成分は単糸上に現れており、物体色鏡面反射成分も単糸上に多く現れている。また、(F)から光源色拡散反射光はほとんど存在しない。

実験に用いたシルクライク織物は撚糸されていないフィラメント糸でできているので、単糸上に伸びた鏡面反射成分が現れている。これより、単糸表面の反射成分が集まって、織物の鏡面反射成分を形成するものと考えられる。

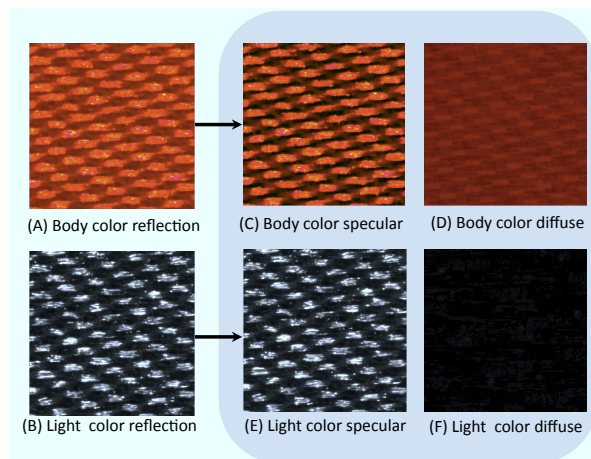


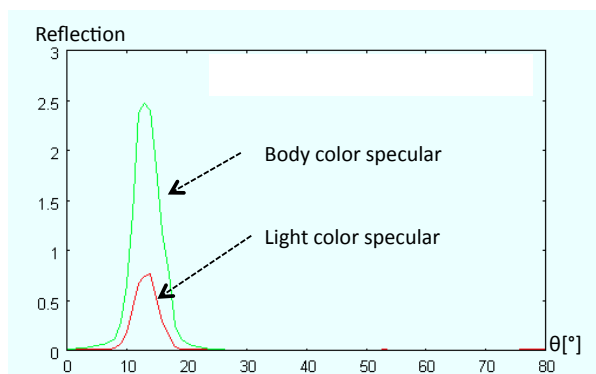
図5 シルクライク織物の分離結果

4.3 各反射成分の解析

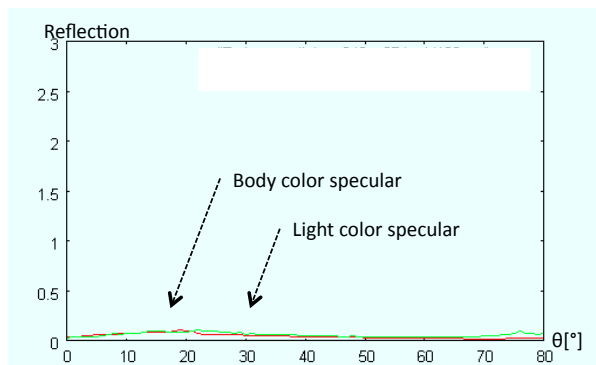
各反射成分の強度比を確認するために、シルクライク織物、綿織物、プラスチックについて、光源の角度が変化した場合の各反射成分の反射率をプロットした。まず、任意の15 × 15ピクセルの領域を抽出することで糸1本分の反射率を獲得する。光源を $\phi_i=180^\circ$ に固定し、 θ_i 方向に 0° から 80° まで 1° 刻みに変化させた時の、光源色鏡面反射成分と物体色鏡面反射成分の推移を図6(a),(b),(c)に示す。カメラは $(\theta_c, \phi_c) = (15^\circ, 0^\circ)$ から観測しているため、 $\theta_i=15^\circ$ 付近で鏡面反射が観測され、反射率が上昇している。綿織物は、繊維長の短いステープルが密に撚り合わさっており、単糸上の鏡面反

射成分は、細かな分布になるため、糸一本レベルにおいては、鏡面反射成分はほとんど観測されていない。

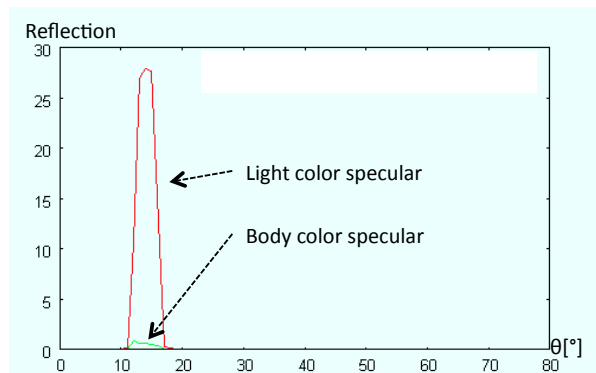
表2には、鏡面反射を観測できる光源の角度 $\theta_i=15^\circ$ の時の、光源色鏡面反射成分と物体色鏡面反射成分の、全反射成分に占める割合をシルクライク織物、綿織物、プラスチックについてそれぞれ示す。シルクライク織物では、物体色鏡面反射率が光源色反射率より3倍以上大きくなっている。この結果より、シルクライク織物の鏡面反射成分は、光源色と物体色の反射成分で構成されていることが分かる。一方で、プラスチックでは、物体色鏡面反射成分はほとんど持たず、光源色鏡面反射成分と拡散反射成分の二成分で十分近似できることが分かる。



(a) シルクライク織物



(b) 綿織物



(c) プラスチック

図6 光源色鏡面反射成分と物体色鏡面反射成分の反射特性

我々は、物体色鏡面反射成分は糸を構成している単糸

	Light color specular	Body color specular
Silk like	23%	74%
Cotton	25%	29%
Plastic	97%	1%

表2 各試料における光源色鏡面反射成分と物体色鏡面反射成分の割合

の透過と反射により発生していると考察している [17]。そこで、単糸の影響により各反射成分の変化を確認するために、先の実験で抽出した 15×15 ピクセルの領域を、さらにピクセル単位で同様に解析した。各ピクセルにおける、シルクライク織物の光源色鏡面反射成分と物体色鏡面反射成分の強度比を図7に示す。糸一本と同様に、物体色鏡面反射成分が、光源色反射成分より大きくなっている。しかし、物体色鏡面反射成分は、各ピクセルにおいて大きく異なっている。これらより、糸を構成している単糸の位置関係や透過性によって、物体色鏡面反射成分は大きく変化すると考えられる。また、物体色鏡面反射成分が光源色鏡面反射成分より、幅広い角度から観測され、指向性が少し失われていることから、単糸レベルでの透過や散乱が行われていると考えられる。

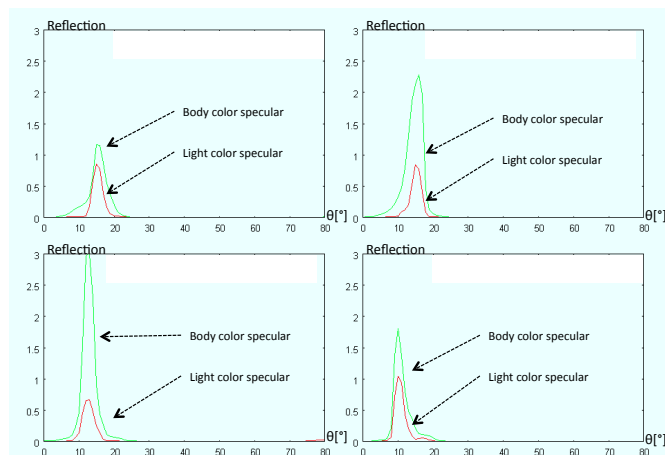


図7 各ピクセルにおける光源色鏡面反射成分と物体色鏡面反射成分の反射特性

5. 評価実験

5.1 評価方法

反射成分の分離手法についての評価方法を述べる。今回、分離した物体色拡散反射、光源色拡散反射、物体色鏡面反射、光源色鏡面反射をそれぞれ独立に観測することは困難である。ここで、我々が提案した手法で分離した反射成分である、物体色拡散反射成分と光源色拡散反射成分が合わさった反射成分が、二色性反射モデルにおける拡散反射成分である。また物体色鏡面反射と光源色鏡面反射成分が合わさった反射成分が、二色性反射モデルにおける鏡面反射成分である。これらことから、偏光を利用して反射光を分離した、拡散反射成分と鏡面反射

成分を真値として、物体色拡散反射成分と光源色拡散反射成分が合わせた拡散反射成分、物体色鏡面反射と光源色鏡面反射成分が合わせた鏡面反射成分を比較することで、分離精度の評価を行う。

5.2 直線偏光による反射成分の分離

偏光 [18] を用いて、今回の観測対象において、拡散反射成分と鏡面反射成分に分離する [19]。図 8 に直線偏光による反射成分分離のイメージを示す。まず、直線偏光板を光源の前と、観測するカメラの前に設置する。直線偏光板を光源の前に配置するため、偏光板を通過した光は直線偏光となり、物体に入射する。鏡面反射成分は物体表面で反射するため、鏡面反射成分は直線偏光を保ったまま反射する。一方で拡散反射は物体表面を通過して着色層に入射した光は乱反射するため、偏光性は失われ非直線偏光となる。よって、光源の前の直線偏光板を回転させて光を観測すると、直線偏光である鏡面反射成分は除去され、非直線偏光である拡散反射成分だけを観測することができる。また、光源側の偏光板を回転させることで、画像の位置ずれを防ぐことができる。これらの原理から、直線偏光を用いて拡散反射成分を獲得する。次に、カメラの前に偏光板を設置せずに観測した反射光から、今回観測した拡散反射成分の差を求めることで鏡面反射成分を獲得する。ここで、標準白色板を、直線偏光板有り無しで撮影することで、偏光板により生じた反射光の強度変化を補正している。

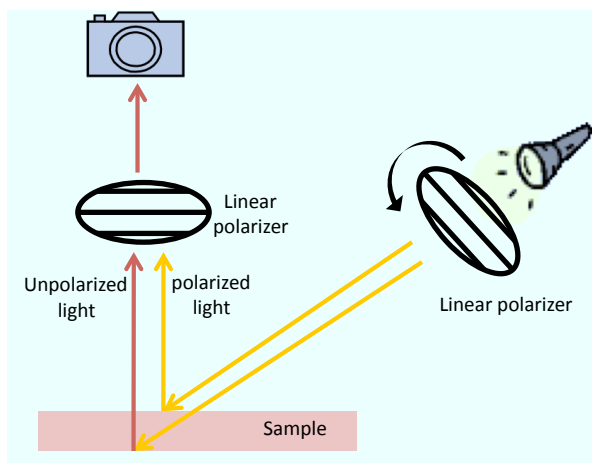


図 8 直線偏光板による反射成分の分離

5.3 結果

図 9 にシルクライク織物と綿織物についての、分離評価の結果を示す。(A), (B) は提案手法で分離し、物体色成分と光源色反射成分を統合した拡散反射成分と鏡面反射成分である。また (C), (D) は偏光により分離した拡散反射成分と鏡面反射成分である。表 3 には、各反射成分画像において、全ピクセルの反射率の平均値を示している。この平均反射率を比較すると、誤差 0.01 程度と

非常に小さく、我々が提案した分離手法により正しく分離できていることがわかる。

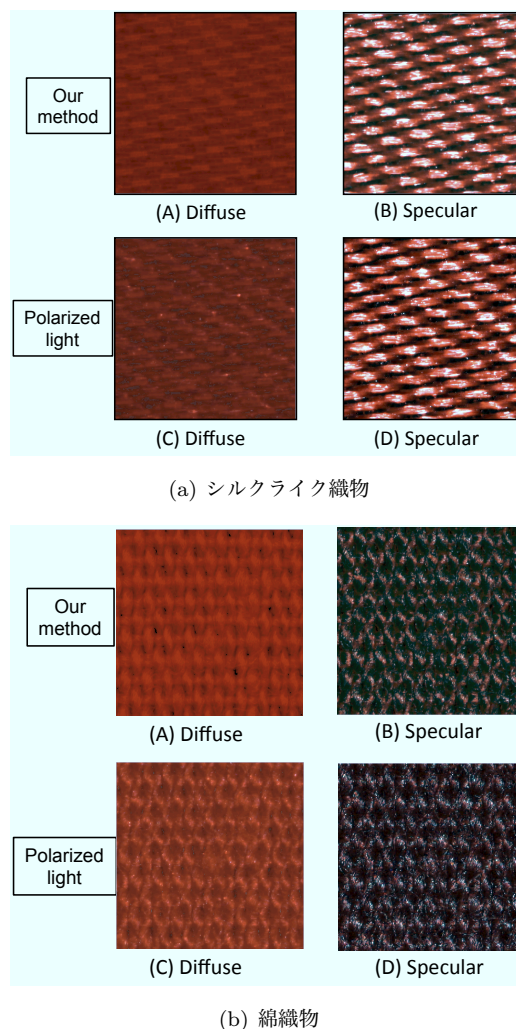


図 9 評価実験の結果

	Silk like		Cotton	
	Diffuse	Specular	Diffuse	Specular
Our method	0.0748033	0.365018	0.114697	0.045922
Polarized light	0.0639614	0.374727	0.120595	0.035857

表 3 評価実験の画像の平均反射率

6. まとめ

我々は、反射光の色成分と反射の方向性から織物の反射特性を四つの反射成分に分離する方法を提案し、分離したそれぞれの反射成分について考察を行ってきた。物体色を持つ鏡面反射は単糸内部を透過した光の反射により生じていることが推定されていた。しかしそれらは想像でしかなかった。また、反射成分の分離手法については評価がされていなかった。

本研究では、光沢のあるシルクライク織物、光沢のない織物、従来の二色性反射モデルで表現できるプラスチックを追加実験をし比較することで一般化二色性反射モ

デルの有用性を示した。シルクライク織物では、鏡面反射において、物体色鏡面反射成分と光源色鏡面反射成分が混在しており、二色性反射モデルや拡張二色性反射モデルのように、鏡面反射成分を一つの反射成分とするモデルでは、反射光を表現することは困難であることがわかった。

また、糸一本レベルと単糸レベルの各反射成分の強度比を比較することで、同じ糸上であるが、単糸の位置が異なれば、鏡面反射成分は大きく変化してきた。単糸の配置と透過性が原因で物体色鏡面反射成分は構成されることが考えられる。さらには、偏光を用いた評価方法を提案した。その手法に基づき、反射成分の分離手法についての評価を行った。

これらの知見から、ミクロレベルでは、単糸の鏡面反射特性と透過特性、及び、単糸の配置が重要であり、メソレベルでは単糸の集合形態である糸形状や織り構造が拡散反射に関係すると思われる。これらの結果から、織物のCGレンダリングでは、単糸の反射特性を考慮することが必要と言える。織物は、織組織の繰り返しからなっているので、最小繰り返し単位のメソ構造をモデリングし、単糸に反射特性と透過特性を与えて、織物としての反射特性をPRT(Pre-computed Radiance Transfer)として算出することで、リアルな質感を表現できる布のCGレンダリングが可能となると思われる。

しかしながら、本論文の方法では、RGBで分離できる原色の織物しか適用できないので、マルチバンド撮影により、様々な色の織物についても実験を行う必要があるだろう。また、単糸内部を透過している光を実際に測定したいと考えている。今後は、様々な試料を対象に、本手法を適用して、有効性を確認し、織物のCGレンダリングに応用していく予定である。

文 献

- [1] G. L. Klinker, S. A. Shafer and T. Kanade, "The Measurement of Highlights in Color Images," *International Journal of Computer Vision*, Vol.2, pp.7-32, 1988.
- [2] G. L. Klinker, S. A. Shafer and T. Kanade, "A Physical Approach to Color Image Understanding," *International Journal of Computer Vision*, Vol.4, pp.7-38,1990.
- [3] S. Tominaga, "Dichromatic Reflection Models for a Variety of Materials," *Color Research and Application*, Vol.19, No.4, pp.277-285, 1994.
- [4] P. E. Debevec and J. Malik, "Recovering High Dynamic Range Radiance Maps from Photographs," In *SIGGRAPH 97*, pp. 369- 378, 1997.
- [5] Y.Takeda, H.T.Tanaka, "Multi-resolution Anisotropic BTF Modeling of Gold Brocade Fabrics based on Multi-illuminated HDR Image Analysis," *IPSJ SIG Notes. CVIM 2008(27)*pp.259-266 2008.
- [6] Nga. A, Durand. F, Matusik. N, "Experimental Analysis of BRDF Models," *Eurographics Symposium on Rendering (EGSR), Textures and Materials*, pp. 117-126, June 2005 (EGSR).
- [7] Kajiyama, James T, "The rendering equation", *SIGGRAPH 1986*: 143.
- [8] ASHIKMIN M, PREMOZE S, SHIRLEY P, "A Microfacet-based BRDF Generator," In *Proc. of SIGGRAPH 2000 (2000)*, ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co. 2, 8
- [9] BLINN J. F, "Models of light reflection for computer synthesized pictures," In *Proceedings of SIGGRAPH 1977 (1977)*, ACM Press, pp.192-198. 3
- [10] COOK R. L, TORRANCE K. E, "A reflectance model for computer graphics," In *Proceedings of SIGGRAPH 1981 (1981)*, ACM Press, pp.307-316. 1,3,5,6
- [11] HE X. D, TORRANCE K. E, SILLION F. X, GREENBERG D. P, "A comprehensive physical model for light reflection," In *Proceedings of SIGGRAPH 1991 (1991)*, ACM Press, pp.175-186. 1,3
- [12] LAFORTUNE E. P. F, FOO S.-C, TORRANCE K. E, GREENBERG D. P, "Non-linear approximation of reflectance functions," In *Proc. of SIGGRAPH 1997 (1997)*, ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., pp. 117-126.2, 3, 4, 5
- [13] PHONG B. T, "Illumination for computer generated pictures," *Communications of ACM* 18, 6 (1975), 311-317.6.
- [14] WARD G, "Measuring and modeling anisotropic reflection," In *Proc. of SIGGRAPH 1992 (1992)*, ACM Press.1, 3.
- [15] Masaru Hashimoto, Keiji Yano and Hiromi T. Tanaka, "Development of a High-definition and Multispectral Image Capturing System for Digital Archiving of Early Modern Tapestries of Kyoto Gion Festival," *ICPR2010*.
- [16] 武田 祐樹, フィン ファン フィ ヴィエト, 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*, 7-4, pp.132-144, 2008.
- [17] 鳥居悠人, 中村友哉, 坂口嘉之, 田中弘美, "二色性反射モデルの一般化による織物の異方性反射モデリング" *画像認識理解シンポジウム MIRU2010*
- [18] M. Born and E. Wolf, *Principles of optics*, Pergamon Press, London, 1959.
- [19] Daisuke Miyazaki, Katsushi Ikeuchi, "Basic Theory of Polarization and Its Applications" *PSJ Transactions on Computer Vision and Image Media*, Vol.1, No.1, pp.64-72, 2008.06.