

マルチバンド画像を用いた織物の鏡面反射の解析

高柳亜紀^{1,a)} 土田勝² 坂口嘉之¹ 田中弘美¹

概要：織物表面は糸の交差により複雑なメゾ構造を持ち、そのことにより織物は異方性反射特性を持つことが知られている。身の周りにある多くの材質は標準二色性反射モデルが適用でき鏡面反射成分と拡散反射成分の分離が比較的容易であるが、織物の中には有色の鏡面反射成分を有するものもあり、反射成分の分離が困難である。そこで本研究ではマルチバンド画像入力による分光反射率推定結果から、鏡面反射成分と拡散反射成分を分離する手法を提案する。糸固有の物体色を表す分光反射率の推定には部分的最小二乗法 (PLS: Partial Least Squares) を用いる。得られた結果を基に、観測された反射光スペクトルから有色の鏡面反射成分を分離する。また、織物の反射光を3つの反射成分に分離することの妥当性を検証する。

1. はじめに

織物表面は糸の交差により複雑なメゾ構造を持ち、そのことにより織物は異方性反射特性を持つことが知られている。織物には物体色の鏡面反射成分があることも観測されており、富永らは従来の二色性反射モデル [1][2] を拡張している。[3] ではその反射特性を表現することができない。そこで我々は、反射光の色と指向性を考慮した一般化二色性反射モデルを新たに提案し、既知の単色 (赤色/青色) の物体色をもつ織物を対象にその鏡面反射成分を、光源色を有する鏡面反射成分と有色の鏡面反射成分に分離することで二色性反射モデルの一般化を図った [4]。しかし、RGB 値による解析のため物体色は単色 (赤色/青色) に限られ、様々な色の織物への汎用性がないことが問題があった。

そこで本研究では、初めにマルチバンド画像を入力とし部分的最小二乗法 (PLS: Partial Least Squares)[7] より織物の分光反射を高精度に推定する。糸表面は微小面幾何構造になっている。各微小面の法線の違いから入射光量が異なり、各面での反射光強度も異なる。そのため各微小面と同じ傾きをもつ標準白色板の反射光の計測値が既知でなければ分光反射率の絶対値を求めることができない。しかし織糸の拡散反射色の等方性が成り立つのであれば、分光反射率の波形は照明光の入射角に依存しない。そこで観測された反射光の反射率を最大値で正規化することにより織

糸固有の分光反射率の波形を推定する。この織糸固有の分光反射率を基にマルチバンド画像から推定された分光反射率から有色の鏡面反射成分と物体色を有する拡散反射成分に分離する。また、織物の反射光を3つの反射成分に分離することの妥当性を検証する。

2. マルチバンド画像撮影システム

一般的なカメラシステムでは、対象物の色を可視光波長域 ($\lambda=410\sim 680$) を3つに区切り短波長側から青、緑、赤の3色で記録していた。一方、マルチバンドカメラシステムでは可視光波長域を4つ以上に区切り、4色以上の画像として記録する。図1に3バンドと6バンドの記録における概念図を示す。[5]

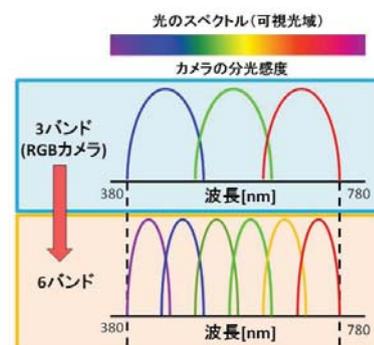


図1 マルチバンド撮影 概念図

この撮影に使われるマルチバンドカメラは、デジタルカメラと狭帯域バンドパスフィルタから構成される。このシステムにより得られるマルチバンド画像に対し分光の色再現処理を施すことで、被写体の正確な色に加え、画像のピ

¹ 立命館大学理工学研究科情報理工学専攻
Ritsumeikan University, Graduate School of Science and Engineering.

² 日本電信電話株式会社 コミュニケーション科学基礎研究所
NTT Communication Science Laboratories, NTT Corporation

a) takayanagi@cv.ci.ritsumeai.ac.jp

クセル単位で分光反射率の推定も可能である。この分光反射率は画像の記録デバイスや画像撮影時の照明光に依存しない被写体固有の情報である。この推定された分光反射率を使うことで、例えば撮影時とは異なる照明環境下での色の見えを正確にシミュレートすることができる。

2.1 マルチバンド画像に依る色再現の原理

可視波長域 410~780 のサンプリング数を N とし、 $N = 271$ とする。画像撮影のバンド数を C とする。6 バンド撮影の場合には $C = 6$ である。撮影対象の物体表面の反射率を $\mathbf{r} \in \mathcal{R}^{N \times 1}$ 、カメラのシステム関数を $\mathbf{H} \in \mathcal{R}^{C \times N}$ とし、カメラ信号値を $\mathbf{u} \in \mathcal{R}^{C \times 1}$ とすると、

$$\mathbf{u} = \mathbf{H}\mathbf{r} + \mathbf{n} \quad (1)$$

となる。 $\mathbf{n} \in \mathcal{R}^{C \times 1}$ はノイズを表す。

この時式 (1) のようにカメラの出力は線形であると仮定する。変換行列は $\mathbf{W} \in \mathcal{R}^{N \times C}$ とすると、反射率の計算は式 (2) のようになる。

$$\hat{\mathbf{r}} = \mathbf{W}\mathbf{u} \quad (2)$$

この変換行列 \mathbf{W} を部分的最小二乗法 (PLS: Partial Least Squares) により求める。

2.2 PLS を基にしたスペクトル推定

重回帰分析をする際、独立変数の中に互いに相関が高い変数が含まれる場合、多重共線性のために通常の最小二乗法 (Ordinary Least Squares :OLS) ではの推定精度が悪くなることがある。このような場合の手法として、主成分回帰 (Principal Component Regression :PCR)、リッジ回帰 (Ridge Regression :RR) とともに開発された Partial Least Squares Regression (PLS 回帰) が知られている。PLS 法は、計量化学 (chemometrics) の分野で Wold[9] によって開発され、その分野ではよく用いられている回帰分析手法である。スペクトルの検量などサンプルサイズに比べて圧倒的に波長数 (変数) が多い場合や変数間の共線性が高い場合に有用とされている。

独立変数 (因子) である教師データの数を J 、従属変数 (応答) であるテストデータの数を K とすると、独立変数 \mathbf{U} は $N \times J$ 行列、従属変数 \mathbf{R} は $N \times K$ 行列であらわされる。今回、PLS では \mathbf{U} と \mathbf{R} を共通する直交因子と、特定の因子負荷量の積として分解する。

多項式応答行列 $\hat{\mathbf{U}}$ は、

$$\hat{\mathbf{U}} = [1, u_1, \dots, u_c, u_1^2, u_1u_2, u_2^2, u_2u_3, \dots, u_2u_c, \dots, u_{c-1}u_c, u_c^2]^T \quad (3)$$

とし、スコア行列である $\mathbf{T} \in \mathcal{R}^{K \times L}$ と負荷量 (ローディング) 行列である $\mathbf{P} \in \mathcal{R}^{J \times L}$ に分解すると式 (4) となる。 L は PLS 成分数である。

$$\hat{\mathbf{U}} = \mathbf{T}\mathbf{P} + \mathbf{E} \quad (4)$$

$\mathbf{E} \in \mathcal{R}^{J \times L}$ は残差行列である。同様に、 \mathbf{R} もスコア行列である $\mathbf{D} \in \mathcal{R}^{K \times L}$ と負荷量 (ローディング) 行列である $\mathbf{Q} \in \mathcal{R}^{N \times L}$ に分解すると、

$$\mathbf{R}^T = \mathbf{D}\mathbf{Q}^T + \mathbf{F} \quad (5)$$

となる。この時 $\mathbf{F} \in \mathcal{R}^{K \times N}$ は残差行列である。

PLS の目標はスコア行列 \mathbf{T} と \mathbf{D} の間の共分散が最大となるように射影を見つけることによって $\hat{\mathbf{U}}^T$ と \mathbf{R}^T の間に共線の構造を抽出することである。数式ではこの関係は次のように書くことができる。

$$\mathbf{D} = \mathbf{T}\mathbf{B} \quad (6)$$

$\mathbf{B} \in \mathcal{R}^{L \times L}$ は回帰の重みを対角要素として持つ対角行列である。

PLS は反復アルゴリズムである。直交スコア行列を取得するため、重み行列 \mathbf{G} は反復計算で求められる。 J を反復の回数を表すインデックス、 $\mathbf{g}, \mathbf{t}, \mathbf{q}, \mathbf{d}$ を $\mathbf{G}, \mathbf{T}, \mathbf{Q}, \mathbf{D}$ の各 j 番目の列ベクトルとする。反復計算を開始する前に $\mathbf{E} = \mathbf{U}^T, \mathbf{F} = \mathbf{R}^T$ とする。 \mathbf{E} と \mathbf{F} の行列は中心化し正規化してあるため、各変数は平均 0、分散 1 となる。まず $j = 1$ 、 \mathbf{d} は \mathbf{F} の任意の列であるとし、式 (7)-式 (10) を順に計算する。

$$\mathbf{g} = \frac{\mathbf{E}^T \mathbf{d}}{\|\mathbf{E}^T \mathbf{d}\|} \quad (7)$$

$$\mathbf{t} = \mathbf{E}\mathbf{g} \quad (8)$$

$$\mathbf{q} = \frac{\mathbf{F}^T \mathbf{t}}{\|\mathbf{F}^T \mathbf{t}\|} \quad (9)$$

$$\mathbf{d} = \mathbf{F}\mathbf{q} \quad (10)$$

$\|\cdot\|$ はユークリッドノルムを表す。 \mathbf{t} が収束しない場合は、式 (7) に戻り、そうでなければ行列 \mathbf{B} の j 番目の対角要素である \mathbf{b} の値を計算する。

$$\mathbf{b} = \frac{\mathbf{d}^T \mathbf{t}}{\mathbf{t}^T \mathbf{t}} \quad (11)$$

そして式 (12) のように、因子負荷量 (ローディング) の行列 \mathbf{P} の j 番目の列ベクトルである \mathbf{p} を計算する。

$$\mathbf{p} = \frac{\mathbf{E}^T \mathbf{t}}{\mathbf{t}^T \mathbf{t}} \quad (12)$$

次の反復の計算で必要となる残差行列 \mathbf{E} と \mathbf{F} は、

$$\mathbf{E} = \mathbf{E} - \mathbf{t}\mathbf{p}^T \quad (13)$$

$$\mathbf{F} = \mathbf{F} - \mathbf{b}\mathbf{t}\mathbf{q}^T \quad (14)$$

と計算される。式 (13) と式 (14) で、次の反復計算に入る前に、得られたスコアとローディングのベクトルに関連付けられた分散を削除している。

$J < L$ の場合、 $j = j + 1$ とし、式 (7) から始まる計算を再度開始する。そうでない場合は反復計算を終了し、

$$\hat{\mathbf{r}} = \mathbf{W}_{\text{PLS}}\hat{\mathbf{u}} \quad (15)$$

となる PLS 回帰式 \mathbf{W}_{PLS} を式 (16) のように求める。

$$\mathbf{W}_{\text{PLS}}^T = \mathbf{G}(\mathbf{P}^T\mathbf{G})^{-1}(\mathbf{T}^T\mathbf{T})^{-1}\mathbf{T}^T\mathbf{R}^T \quad (16)$$

反復計算は L 回行われるが、 L の値は PLS での反射率推定精度に影響する。 $L = \min(J, K)$ の場合、 \mathbf{E} と \mathbf{F} は 0 となり、PLS は最小自乗法となる。また、 $L < \min(J, K)$ の場合は行列 \mathbf{U} の共線性が削減される。本研究のように分光反射率の推定に PLS を使用する場合、その推定精度に応じて L を決定する。

3. 織物の反射成分分離

3.1 織物

繊維には、綿やウールに代表的される短いわた状の短繊維 (20~200 μm) と、絹などに代表される長く連続した長繊維 (5~10 $\times 10^5\mu\text{m}$) がある。[8] 天然繊維では絹だけが長繊維である。糸はこの二つの繊維のタイプによって、スパン糸とフィラメント糸の二つの種類に分けられる。

スパン糸は、短繊維を紡ぎ撚り長い糸にしているため繊維の端 (毛羽) が多く、光沢が少ない。一方、フィラメント糸は、長繊維をばらばらにならないよう数本束ねた糸で、糸にするために撚る必要がほぼなく、毛羽が少なく滑らかで光沢がある。図 2(a) に、フィラメント糸の表面と断面を示す。糸表面ではほぼ撚られていない角柱状の長繊維が並行にならび、糸の断面はたて糸とよこ糸が張りをかけて織られているため、上下につぶされ扁平で対称な楕円状になっている。また図 2(b) に示すように、フィラメント糸の表面では、各長繊維の極細角柱上の各平面で反射した光がスジ状の光沢となって表れている。このように、フィラメント糸自体が持つ異方性反射特性が、フィラメント糸で織られた光沢のある織物の異方性反射特性を特徴づける。以下本論文では、ほとんど撚りがないフィラメント糸で織られた織物をシルクライク織物と記す。

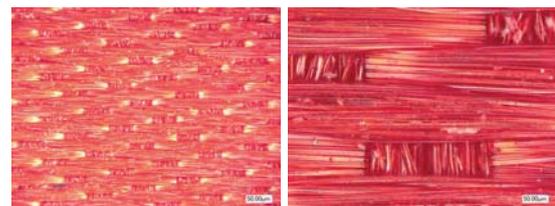
シルク織物の反射特性として、光沢が非常に強く、鏡面反射成分に物体色が付くことが挙げられる。これは、シルク糸の撚りと断面形状、透過性が大きく起因していると考え



(a) フィラメント糸 (b) 糸表面の光沢

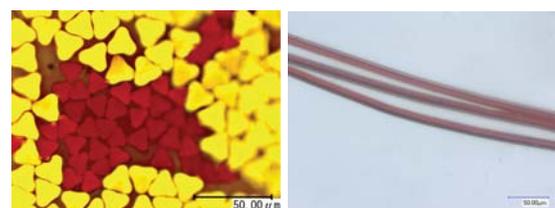
図 2 フィラメント糸の光沢

えられる。図 3 はシルクライク織物であるポリエステルサテンの拡大図である。図 4(b) がシルクライク織物の糸を構成しており、図 4(a) はその断面である。シルクライク織物は、三角柱上のフィブロインが長繊維であり、撚糸されず、整列して束にされ糸により織られている。これにより、糸の法線が一つの方向を向く、つまり滑らかな表面をしているため、特定の観測角度で鏡面反射成分が多く観測され、強い光沢をもつ。また、このフィブロイン一本一本は、透過性が非常に高いため、表面で反射する光は一部である。入射光は透過し屈折したり、内部で低次の散乱をする光が存在するため、指向性をもち物体色をもった鏡面反射成分が起きると考えられる。



(a) 1pixel=1.9 μm (b) 1pixel=0.24 μm

図 3 赤色シルクライク織物の微視的幾何構造



(a) フィラメント糸 (b) 単糸 1pixel=0.21 μm
 1pixel=1.9 μm

図 4 赤色シルクライク織物

3.2 一般化二色性反射モデル

図 5 はシルクライク織物の拡大画像である。複雑な織り構造により、様々な反射光を確認することができる。一様に分布しているのが、拡散反射成分であり、糸の微視的幾何構造より鏡面反射成分がある。さらに鏡面反射成分の中にも、物体色がの部分が存在したり、光源色に部分が存在したりしている。織り構造により、様々な反射光を確認す

ることができる。この特有の反射光を表現するために、新たに提案した反射モデルを一般化二色性反射モデルと呼ぶ。

提案モデルは、反射光の指向性と色に着目し、三成分の和で表現する。図6に織物と各反射成分の関係図を示す。一つ目は、物体内部に光が侵入し散乱を起こすため、物体色をもち指向性をもたず反射する拡散反射成分である。二つ目は、物体表面で反射するため、光源色で指向性をもつ反射する光源色鏡面反射成分である。三つ目は、物体表面に少し侵入し、十分に散乱を起こさずに反射するため、物体色をもち、指向性をもった反射成分を物体色鏡面反射成分である。物体色鏡面反射成分は、織物や紙、層状表面の物質で多く存在すると考えられる。

拡散反射成分 $L_d(\theta, \phi, \lambda)$ と光源色鏡面反射成分 $L_{l_s}(\theta, \phi, \lambda)$ 、物体色鏡面反射成分 $L_{b_s}(\theta, \phi, \lambda)$ とし、一般化二色性反射モデルを式(17)に示す。ここで、 ϕ は反射面の法線周りの角度である。また、 λ は波長を示す。

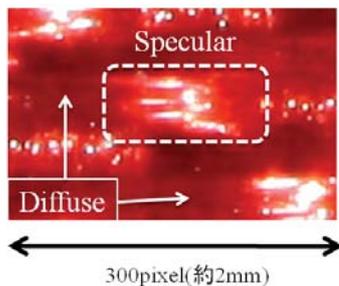


図5 織物の拡大画像

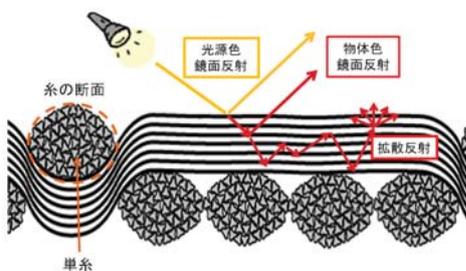


図6 一般化二色性反射モデル 概念図

$$L(\theta, \phi, \lambda) = L_d(\theta, \phi, \lambda) + L_{l_s}(\theta, \phi, \lambda) + L_{b_s}(\theta, \phi, \lambda) \quad (17)$$

$$L_d(\theta, \phi, \lambda) = m_d(\theta, \phi) S_d(\lambda) E(\lambda) \quad (18)$$

$$L_{l_s}(\theta, \phi, \lambda) = m_{l_s}(\theta, \phi) E(\lambda) \quad (19)$$

$$L_{b_s}(\theta, \phi, \lambda) = m_{b_s}(\theta, \phi) S_{b_s}(\lambda) E(\lambda) \quad (20)$$

表1 一般化二色性反射モデルの反射成分

	光源色反射	物体色反射
拡散反射	-	$L_d(\theta, \phi, \lambda)$
鏡面反射	$L_{l_s}(\theta, \phi, \lambda)$	$L_{b_s}(\theta, \phi, \lambda)$

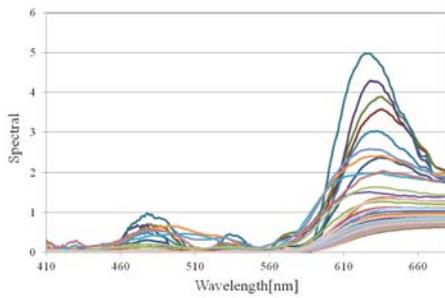
3.3 反射成分の分離手法

3.3.1 拡散反射成分と鏡面反射成分の分離

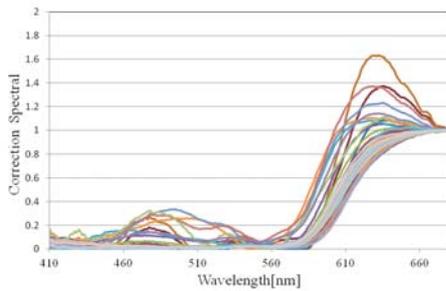
次に前節の一般化二色性反射モデルに基づいて反射成分を3つに分離する手法を述べる。初めに、鏡面反射成分と拡散反射成分の分離を行う。糸表面は微小面幾何構造になっている。各微小面の法線の違いから入射光量が異なり、各面での反射光強度も異なる。そのため各微小面と同じ傾きをもつ標準白色板の反射光の計測値が既知でなければ分光反射率の絶対値を求めることができない。しかし織糸の拡散反射色の等方性が成り立つのであれば、分光反射率の波形は照明光の入射角に依存しない。そこで観測された反射光の最大波長で正規化することにより織糸固有の分光反射率の波形を推定する。図7に画像上で連続した512ピクセルからの分光反射率の推定結果を示す。

元の推定した分光反射率は図7(a)に示す。この推定した各分光反射の680nmの反射を1に正規化する。この正規化する係数が各ピクセルの照明強度となる。正規化した分光反射率を図7(b)に示す。織物の反射成分は拡散反射の方が多いため、多くは拡散反射成分と考えられる。図8(a)に波長500nmでの正規化した反射率の分布をヒストグラムで示す。すると反射率0.04付近が多いことが分かる。また、図8(b)に正規化した反射率の波長610nmでの分布をヒストグラムで示す。こちらでも反射率0.62付近が最も多いことが分かる。よって各波長の反射率の分布を調べ、分散が最も小さい反射率群を求め、平均することで拡散反射成分の反射率を求める。こうして求めた拡散反射成分の反射率が図9(a)である。この元の分光反射を正規化した時の照明強度を拡散反射率にかけ合わせることで、各ピクセルの拡散反射の分光反射を決定する。

次に、鏡面反射成分を決定する。鏡面反射成分は二色性反射モデルに基づく元の推定反射から拡散反射成分を引くことで求められる。よって、正規化した分光反射率(図7(b))から拡散反射成分(図9(a))を引いた結果が図9(b)である。この鏡面反射の分光反射率(図9(b))に正規化した時の照明強度をかけ合わせることで、鏡面反射成分の分光反射(図9(c))を求める。このように推定した分光反射から鏡面反射成分と拡散反射成分を分離する。

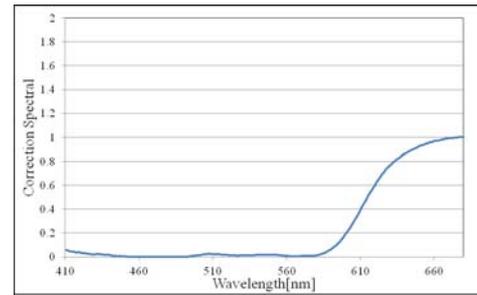


(a) 分光反射率の推定結果

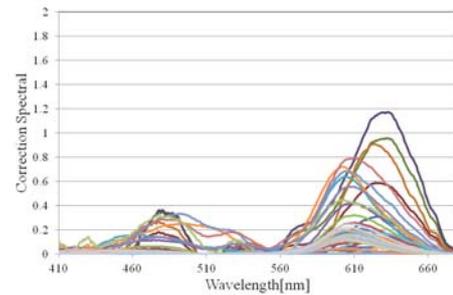


(b) 正規化後の分光反射率

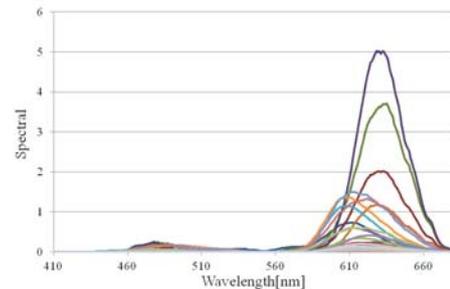
図 7 連続した 512 ピクセルのスペクトル



(a) 拡散反射成分の分光反射率

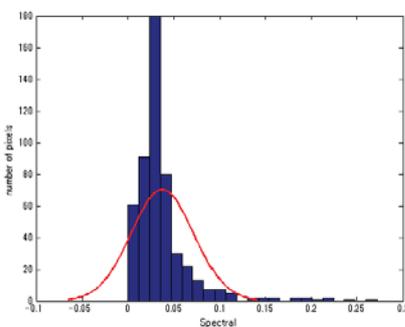


(b) 鏡面反射成分の分光反射

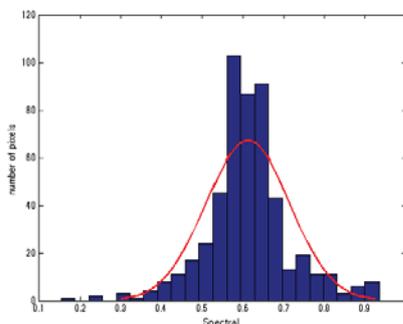


(c) 鏡面反射成分の分光反射率

図 9 拡散反射成分と鏡面反射成分の分離



(a) 正規化後 波長 500nm の反射率のヒストグラム



(b) 正規化後 波長 610nm の反射率のヒストグラム

図 8 512 × 512 全ピクセルの反射率

3.3.2 光源色反射成分の存在についての検討

次に光源色反射成分の分離について検討する。光源色の鏡面反射成分が存在すると仮定すると、織物の糸表面で反射するため、光源色で指向性をもつ反射であると考えられる。推定した分光反射は計測時のキセノン光源の放射輝度で正規化しているため、光源色の反射率は全波長で一定(等しい値)の反射率を持つフラットなスペクトルとなる。よって全波長域で1となるフラットな反射成分があれば、それは光源色反射成分となる。

4. 実験結果

4.1 色再現精度の評価実験

4.1.1 2ショット型6バンド画像記録方式

今回マルチバンド撮影を行うに当たり、2ショット6バンド撮影を行った。図10(a)に2ショット型6バンド画像記録方式の原理を示す。このシステムは市販のデジタルカメラと特注の多層膜フィルタにより構成される。多層膜フィルタは青チャンネルの長波長側、緑チャンネルの短波長側、赤チャンネルの長波長側を透過する分光透過率を持ってい

る。多層膜フィルタの分光特性を図 11 に示す。画像撮影時にはこのフィルタを光源の前に取り付け、フィルタ有りとフィルタ無しのそれぞれの状態で画像を撮影する。得られた光学特性の異なる 2 枚の 3 バンド画像を組み合わせることで 1 枚の 6 バンド画像が得られる。

この方法のメリットは、現状のカメラ (3 バンド：赤青緑の 3 色で色を記録) と比較して、前述の色再現が難しいと言われている被写体に対して色再現性が向上していること、色域が拡大していること (図 10(b))、そして特殊なカメラ装置を用意する必要が無く、現在使用しているほとんどの市販デジタルカメラ (ただし RAW 画像の出力が可能でミドルクラス以上) がそのまま利用できる点にある。

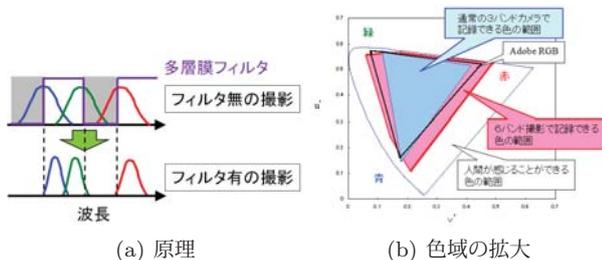


図 10 2 ショット型 6 バンド画像記録方式

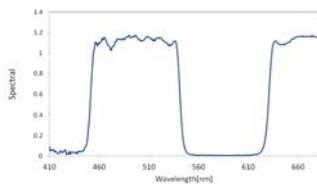


図 11 多層膜フィルタの分光特性

4.1.2 画像撮影システム

実験は暗室で行い、光源には朝日分光 (株) のキセノン光源 LAX102 を用いた。撮影は 2 ショット 6 バンド画像記録方式を採用し、多層膜フィルタは光源の前に設置している。デジタルカメラは Nikon D700、レンズは AF-S Micro-Nikkor 105 f/2.8G とテレプラス 2X MC7 DGX ニコン用を用いた。解像度は 4256×2832 ピクセルで、 $1\text{pixel}=5.7\mu\text{m}$ の画像を獲得する。(図 13(b) 参照) カメラの分光感度は図 12 に示す。

また、図 13 に示す全方位型光学異方性反射測定装置 (OGM: Optical Gyro Measuring machine) を用いて実験を行った。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。この自由度を組み合わせることにより、観測試料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。

計測はカメラの入射角は $(\theta_c, \phi_c) = (0^\circ, 0^\circ)$ で固定、光源の入射角は $(\theta_i, \phi_i) = (15^\circ \sim 45^\circ, 180^\circ)$ で 10° 刻みにし、中心のサンプル台上に赤色のサテンを置き撮影を行った。

シルクライク織物は鏡面反射成分の強い箇所と拡散反射成分の箇所とで輝度差が大きく違い、1 回の撮影ではカメラのダイナミックレンジ内に収まらない。そのため、多重露光画像の撮影を行った。

撮影は ISO 感度は 100、絞りは 40 とした。露光時間は、光源の入射角度が 15° でマルチバンドフィルタ無の画像獲得時は、10s, 8s, 4s, 2s, 1s, 0.5s, 0.25s, 0.125s, 0.0667s, 0.033s, 0.0167s, 0.008s, 0.004s, 0.002s の計 14 回である。マルチバンドフィルタ有りの画像獲得時は、20s, 10s, 8s, 4s, 2s, 1s, 0.5s, 0.25s, 0.125s, 0.067s, 0.033s, 0.017s, 0.008s, 0.004s の計 14 回である。撮影された多重露光画像は 14bit RAW 画像で保存する。

また、部分最小自乗法に基づき分光反射率を推定するため、同時に教師データとして DC Color Checker の 177 色も撮影した。テストデータとして Color Checker Passport の 24 色を撮影し、色再現精度の確認を行う。教師データ、テストデータに対しては ISO 感度 100、絞りは 40 とし、露光時間は 1s, 0.5s, 0.25s, 0.125s の 4 回とした。この時同時に分光計によりキセノン光源の放射輝度も計測する。計測した放射輝度を図 12(b) に示す。

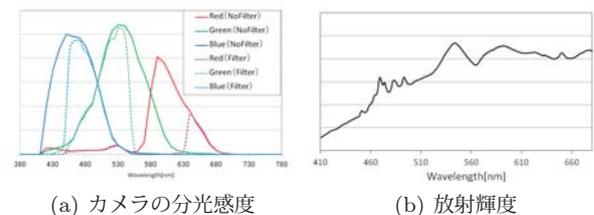


図 12 カメラの分光感度と放射輝度

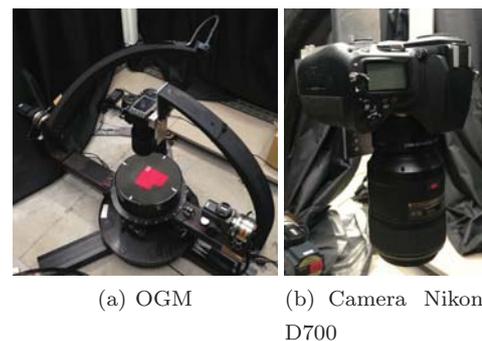


図 13 撮影システム

4.1.3 分光反射率推定結果

撮影した RAW 画像を全て 16bit リニアの Tiff 画像へ現像し、次に多重露光画像から露光時間 1s の画素値を線形近似にて算出した。教師データとして撮影した DC Color Checker 177 色の撮影画像と、分光計で計測した分光反射率を基に PLS に基づく回帰行列を作成する。実装は Matlab 環境で行った。求めた PLS 回帰行列を図 14 に示す。この PLS 回帰行列の教師データに対する分光反射率の推定精度

は、Lab 表色系に基づく色差 ΔE_{ab} 1.95、実測反射率と推定反射率の最小自乗誤差は 0.011 であった。また、テストデータ (ColorCheckerPassport) の 24 色に対し推定を行うと、色差 ΔE_{ab} は 2.59、実測反射率と推定反射率の最小自乗誤差は 0.018 であった。

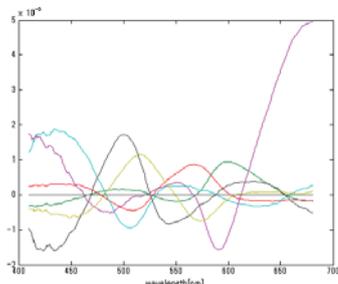


図 14 PLS 回帰行列

4.2 織物の反射成分分離結果

まず光源入射角 $15^\circ \sim 45^\circ$ を 10° 刻みに撮影した分光画像に対し、分光反射率推定を行い、RGB 値に変換したものを図 15～図 18 の (a) に示す。また 3.3 節に基づき織物の反射成分を鏡面反射成分と拡散反射成分に分離した結果を図 15～図 18 の (b)(c) に示す。有色の鏡面反射成分が物体色である拡散反射成分と同一の分光反射率で表わされる場合、本手法では鏡面反射の分光反射率を正規化した分光反射率から、正規化した拡散反射成分の分光反射率で引き算しているため、鏡面反射成分は全波長で一定の 0 となるはずである。しかし、物体色の分光反射率とは異なる赤色を示す波形となった。この結果より、有色の鏡面反射成分は物体色とは異なることがわかる。今回の計測はカメラの入射角は $(\theta_c, \phi_c) = (0^\circ, 0^\circ)$ で固定、光源の入射角は $(\theta_i, \phi_i) = (45^\circ, 180^\circ)$ の結果を比較したが、拡散反射成分の色は照明光の入射角に依存することから入射角度を変えることで物体色の拡散反射成分と有色の鏡面反射成分が一致する可能性はあるので検証する必要がある。

次に光源色鏡面反射成分の存在を検証するため、 512×512 ピクセルの推定した分光反射率を XY 表色系に変換し xy 色度図にプロットした。(図 21) 中心付近の赤い点は白色点であり、計測したキセノン光源で正規化しているため照明点でもある。この結果より、推定した反射率は白色点の方向に向かう傾向が見出せる。しかし、鏡面反射成分が強い個所での B 値に全露光時間の撮影画像で 0 が入っており、正しいカメラ信号値をとらえることが出来なかった。これはおそらくカメラのセンサーのエラー、もしくは撮影した RAW 画像の現像処理でのエラーのためと考える。この影響と、PLS の重みにより鏡面反射成分の強いピクセルで正しい分光反射率推定が行えなかった。そのため白色点付近の色を示す画素値が正しく推定されたものは現時点では判別できない。赤色のシルクライク織物であるため

に、B 値の輝度値が正しくとらえることが出来ない場合、マルコフ性を仮定した Wiener 推定を用いて分光反射率を推定することも検討すべきであろうと考える。マルコフ性を仮定した Wiener 推定は分光反射率が滑らかさであることを先見情報として推定する手法である。しかし、この場合鏡面反射が強い個所についてエラーが抑えられても、その他のピクセルに対し分光反射率の推定精度が落ちる可能性もある。カメラからの撮影画像から正しい RGB 値をとらえ PLS に基づく推定を行えるようにすることと、マルコフ性を仮定した Wiener 推定を行うことで、光源色の鏡面反射成分があるかをきちんと検証する必要がある。

また、対象とした赤色のシルクライク織物に対し分光計での反射率計測も行った。光源の入射角は $(\theta_i, \phi_i) = (45^\circ, 180^\circ)$ 分光計の入射角は $(\theta_c, \phi_c) = (0^\circ, 0^\circ)$ で固定である。光源、カメラ共に同角度でマルチバンド撮影をし、推定分光反射率から拡散反射成分を分離し最大波長で正規化した結果と実測スペクトルの最大波長を正規化した結果を比較すると、波形はほぼ一致し、色差 ΔE_{ab} は 1.57 となった。また最小自乗誤差は 0.016 となった。鏡面反射成分推定結果と実測の分光反射率を図 20 に示す。この結果より、PLS に基づき推定した分光反射率は精度高く推定できていることが分かる。

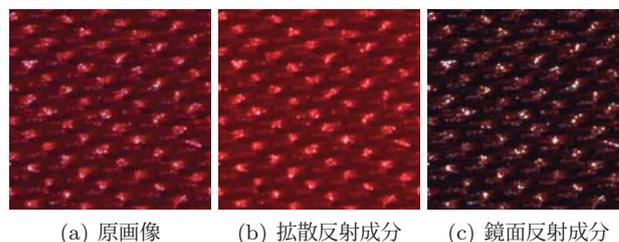


図 15 光源入射角 15°

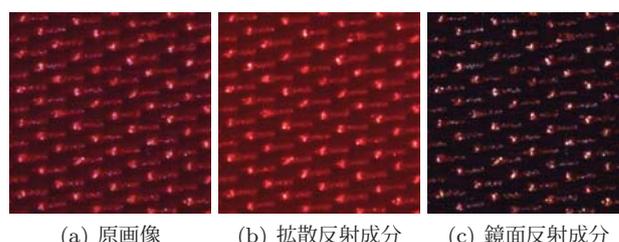


図 16 光源入射角 25°

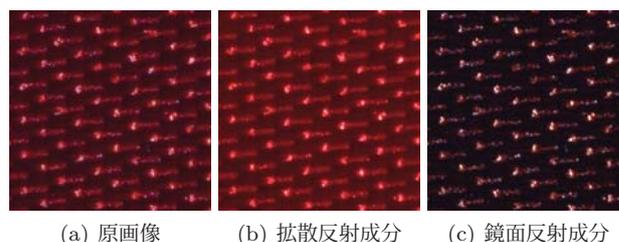


図 17 光源入射角 35°

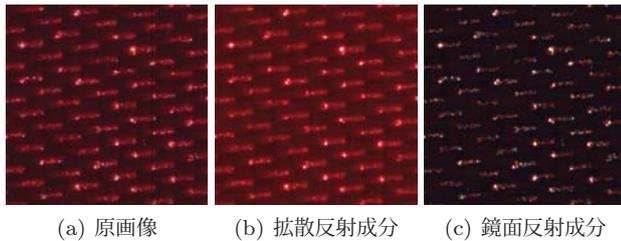


図 18 光源入射角 45°

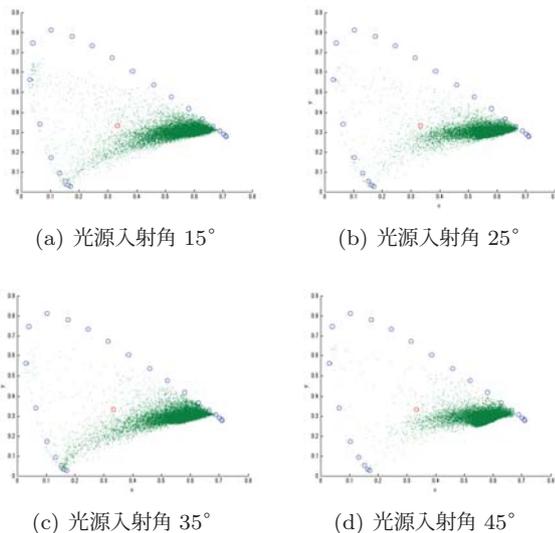


図 19 推定分光反射の xy 色度図上へのプロット結果

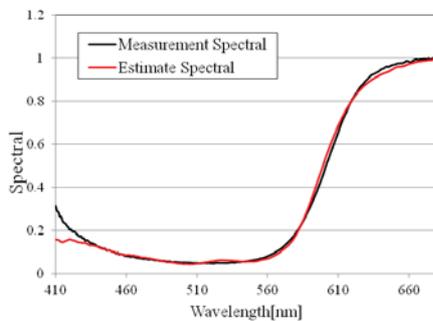


図 20 実測・推定分光反射率 (最大反射率で正規化)

5. おわりに

シルクライクな織物に対し HDR マルチバンド画像を獲得し、各ピクセルに対し部分最小自乗法に基づいて分光反射率の推定を行った。分光計測によりシルクライク織物の反射率を計測した実測スペクトルと、マルチバンド画像から推定したスペクトルを比較すると色差 ΔE_{ab} は 1.57 となり、精度良く推定することが出来た。推定した分光反射率から織物の微小面分布を考慮し鏡面反射成分と拡散反射成分を分離した。この分離結果から、有色の鏡面反射成分は物体色とは一致しないことを確認した。しかし、拡散反射

成分の色は光源の入射角に依存し決定することから、光源の角度を変えると拡散反射成分と物体色の鏡面反射成分は一致する可能性もあるため、更なる検証が必要である。また、光源色鏡面反射成分存在の妥当性について検証した。今回の結果では、推定した反射率は照明光である白色点の方に向かう傾向が見出せる。しかし、鏡面反射成分が強い個所でカメラの画素値に全露光時間で 0 が入り正しくカメラ信号値が得られなかったため、白色点付近の色を示す画素値が正しく推定されたものかは現時点では判別できなかった。カメラからの撮影画像から正しい RGB 値をとらえ PLS に基づく推定を行えるように光源色の鏡面反射成分があるかをきちんと検証する必要がある。また、織物の微小面分布を考慮し鏡面反射成分と拡散反射成分を分離したが、この検証も必要である。

参考文献

- [1] G. L. Klinker, S. A. Shafer, 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] 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", MIRU2010, 2010年7月
- [5] M. Hashimoto, "Two-Shot type 6-band still image capturing system using Commercial Digital Camera and Custom Color Filter.", Proc. Fourth European Conference on Colour in Graphics, Imaging, and Vision (CGIV2008). (2008).
- [6] 村上百合: 分光反射率の推定理論, 日本写真学会誌, 65(4), 234-239(2002)
- [7] Hui-Liang Shen, Hui-Jiang Wan, Zhe-Chao Zhang, "Estimating reflectance from multispectral camera responses based on partial least-square regression", J.Electron.Imaging 19, Apr 12 2010
- [8] 繊維学会, "やさしい繊維の基礎知識", 日刊工業新聞社, 東京, 2004.
- [9] Wold, H. (1975). 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.