1M-03

低ランク性とスパース性に基づく 多波長・多方向光源下の画像の反射成分分離

小林 直人　　岡部 孝弘
九州工業大学 大学院情報工学府

1　はじめに

物体の見えは，物体を照らす光源の分光的な分布（色）と空間的な分布（方向）の両方に依存する．ところが従来，分光分布に関しては色解析の分野で，空間分布に関しては明るさ解析の分野で，ほぼ独立に研究が行われてきた．近年，光源装置の進化により多波長・多方向光源下の物体の撮影が可能になり，色解析と明るさ解析を統合したイメージベーストモデリングやマテリアル認識などの研究が注目されている．

物体表面で観察される反射光は，一般に，拡散反射成分と鏡面反射成分で構成されている．これらの反射成分を分離することは，イメージベーストモデリングなどの前処理としてだけでなく，質感の編集などの画像処理においても重要である．

そこで本稿では，多波長・多方向光源下の画像を拡散反射成分と鏡面反射成分に分離する手法を提案する．図 1 に示すように，多波長・多方向光源下の画像は，画素・光源色・光源方向を軸とする 3 次元データとして表現することができる．提案手法では，画素を固定した平面 A 上において二色性反射モデルから導かれる低ランク性と鏡面反射成分のスパース性，および，光源色を固定した平面 B 上における拡散反射成分の低ランク性に基づいて，反射成分を頑健に分離する．実画像を用いた実験を行い，提案手法の有効性を確認した．

2　関連研究

Wolff と Boult [3] は偏光に基づく反射成分分離法を提案しているが，カメラと多数の光源に偏光板を取り付けて制御することは困難であり，多波長・多方向光源装置には適さない．Shafer [1] は，拡散反射成分と鏡面反射成分の色の違いに基づいた，単一画像（図 1 の直線 C）の反射成分分離法を提案している．しかしながら，LED 光源は狭帯域であることから両者は類似の色を持つため，色のみに基づく反射成分の分離は困難である．Shahua [2] は，Lambert モデルに従う拡散反射成分のみで構成される任意光源方向下の画像（図 1 の平面 B）が 3 枚の画像の線形結合で表現されることに基づいた反射成分分離法を提案している．しかしながら，この手法は光源色が一定であることを仮定しているため，光源色の変化に伴う画像（図 1 の平面 A）に内在する構造を捉えることができない．

3　提案手法

多波長・多方向光源装置は，D 個の光源クラスタ（方向），各クラスタあたり C 個の異なる分光分布（色）を持つ LED で構成されるものとする．以下では，一般性を失うことなく表記を簡単にするために，C 個の光源色の下で撮影された 3 バンドのカラー画像を考える代わりに，$3C$ 個の光源色の下で撮影された濃淡画像を考える．d 番目 ($d = 1, 2, 3, ..., D$) の方向の c 番目 ($c = 1, 2, 3, ..., 3C$) の色の光源を点灯したときに撮影された被写体の濃淡画像の p 番目 ($p = 1, 2, 3, ..., P$) の画素の画素値を i_{pcd} とする．

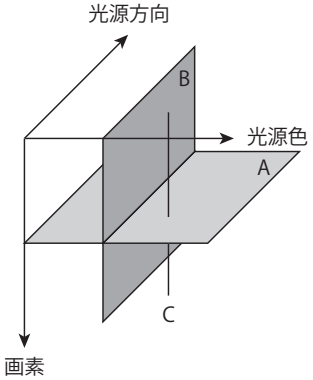

図 1: 多波長・多方向光源下の画像を画素・光源色・光源方向を軸とする 3 次元データとして表現した概念図.

3.1　光源色と光源方向の変化に伴う画素値の変化

ある画素 p において，光源色 c と光源方向 d の変化に伴う画素値の変化を考える（図 1 の平面 A）．二色性反射モデルによると，拡散反射成分と鏡面反射成分は，光源色に依存するスペクトル項と光源方向に依存する幾何学項の積で表現される [1].

したがって，D 個の光源方向，各方向あたり $3C$ 個の光源色の下で観察される画素値を並べた $3C \times D$ の行列 $\boldsymbol{I}_p$ は，$3C \times 2$ の行列 $\boldsymbol{S}_p$ と $2 \times D$ の行列 $\boldsymbol{G}_p$ の積

$$\begin{aligned} \boldsymbol{I}_p &= \boldsymbol{S}_p \boldsymbol{G}_p = \begin{pmatrix} \boldsymbol{s}_{p1} & \boldsymbol{s}_{p2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \boldsymbol{g}_{p1}^\top \\ \boldsymbol{g}_{p2}^\top \end{pmatrix} \\ &= \boldsymbol{s}_{p1} \boldsymbol{g}_{p1}^\top + \boldsymbol{s}_{p2} \boldsymbol{g}_{p2}^\top \end{aligned} \tag{1}$$

で表現される．ここで行列 $\boldsymbol{S}_p$ の各列は光源色が変化するときの鏡面反射成分と拡散反射成分の色の変化を，行列 $\boldsymbol{G}_p$ の各行は光源方向が変化するときの鏡面反射成分と拡散反射成分の強度の変化を表す．

一般に，鏡面反射成分の色 $\boldsymbol{s}_{p1}$ は光源色に等しいことが知られている．また，鏡面反射成分は正反射方向付近のみで観察されるため，鏡面反射成分の強度を表すベクトル $\boldsymbol{g}_{p1}$ はスパースになる．なお，幾何学項は陰（attached shadow）や影（cast shadow）も含むため，$3C \times D$ の行列 $\boldsymbol{I}_p$ のランクは陰や影がある場合も 2 である．

3.2　画素と光源方向の変化に伴う画素値の変化

ある光源色 c において，画素 p と光源方向 d の変化に伴う画素値の変化を考える（図 1 の平面 B）．このとき，Lambert モデルに従う拡散反射成分のみで構成される任意光源方向下の画像は，3 枚の画像の線形結合で表現される [2].

Copyright ©2016 Information Processing Society of Japan.
All Rights Reserved.

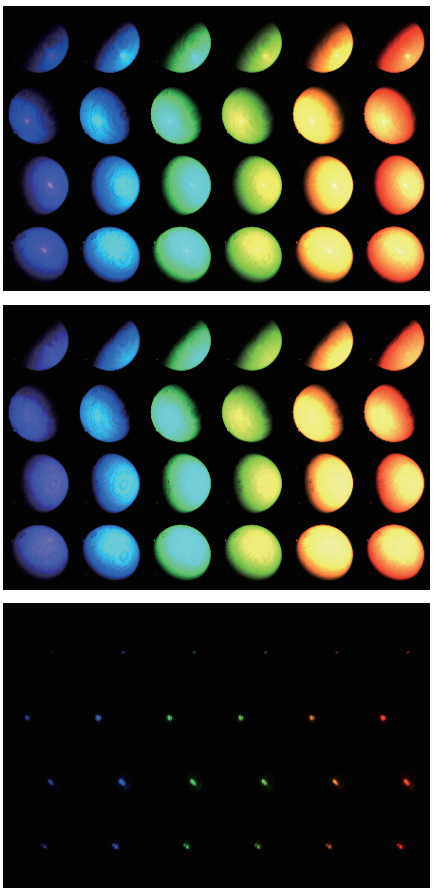

図 2: 木製の球の入力画像（上），拡散反射成分（中央），および，鏡面反射成分（下）．

したがって，D 個の光源方向の下で観察される拡散反射成分のみで構成される画像を並べた $P \times D$ の行列 $\boldsymbol{D}_c$ のランクは

$$\mathrm{rank}(\boldsymbol{D}_c) = 3 \tag{2}$$

となる．ここで，行列 $\boldsymbol{D}_c$ の成分は，式 (1) の拡散反射成分 $\boldsymbol{s}_{p2}\boldsymbol{g}_{p2}^{\top}$ を集めて並べ直すことで得られる．なお，画像に陰や影がある場合はランクが 3 にならないために，これらを外れ値として扱う必要がある．

3.3 反射成分の分離

提案手法では，図 1 の平面 A 上において成り立つ式 (1) と平面 B 上において成り立つ式 (2) に基づいて，画素値，拡散反射成分，鏡面反射成分が非負であることも考慮して，

$$\min_{\{\boldsymbol{s}_{p2},\boldsymbol{G}_p\}} \frac{1}{2}||\boldsymbol{I}_p - \boldsymbol{S}_p\boldsymbol{G}_p||_2^2 + w\sum_d g_{p1,d}, \forall p \tag{3}$$
$$\text{subject to} \quad s_{p2,c} \geq 0,\ g_{p1,d} \geq 0,\ g_{p2,d} \geq 0,\ \forall c, \forall d$$
$$\mathrm{rank}(\boldsymbol{D}_c) = 3,\ \forall c$$

のようにして反射成分を分離する．ここで w はスパース性を課す第 2 項の重みを決める定数である．

具体的には，鏡面反射成分の色が既知であると仮定して，画素ごとに鏡面反射成分と拡散反射成分に分離することと，光源色ごとに拡散反射成分からなる行列のランクを 3 にすることを繰り返す．前者ではスパース非負値行列因子分解（Non-negatige Matrix Factorization: NMF）を，後者では外れ値を考慮した特異値分解を用いる．

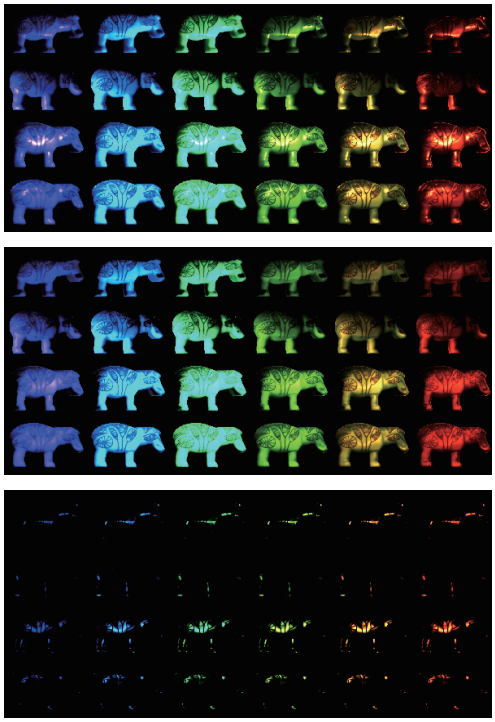

図 3: 陶器のカバの入力画像（上），拡散反射成分（中央），および，鏡面反射成分（下）．

4 実験

20 方向（$D = 20$），6 色（$C = 6$）の光源の下で撮影された 120 枚の実画像を用いて実験を行った．図 2 に木製の球を，図 3 に陶器のカバを被写体としたときの入力画像（上），および，分離した拡散反射成分（中）と鏡面反射成分（下）の一部を示す．いずれの場合も，入力画像中のハイライトの領域が鏡面反射成分として分離されており，定性的には提案手法がうまく働いていることが分かる．

5 むすび

本稿では，低ランク性とスパース性に基づいて多波長・多方向光源下の画像を拡散反射成分と鏡面反射成分に分離する手法を提案した．実画像を用いた実験を行い，提案手法の有効性を確認した．今後は，相互反射の分離や蛍光成分の分離などにも取り組みたい．

謝辞 本研究の一部は，JSPS 科研費（No.25280057）の助成を受けた．

参考文献

[1] S. Shafer, “Using color to separate reflection components”, Color Research & Application, 10(4), pp.210–218, 1985.

[2] A. Shashua, “On photometric issues in 3D visual recognition from a single 2D image”, IJCV, 21(1/2), pp.99–122, 1997.

[3] L. Wolff and T. Boult, “Constraining object features using a polarization reflectance model”, IEEE Trans. PAMI, 13(7), pp.635–657, 1991.

Copyright ©2016 Information Processing Society of Japan.
All Rights Reserved.