

多波長多方向光源下における頑健な相互反射除去

谷口 暢章 川原 僚 岡部 孝弘
九州工業大学 情報工学部

1 はじめに

多波長多方向光源下画像は、複数方向に設置された複数の狭帯域光源の下で撮像されたカラー画像である。この画像は、光源の方向と色の両方に依存する物体の見えることができるため、画像の理解・認識・生成において重要な手がかりとなる。

非凸な物体表面上の各点の輝度値は、直接反射成分と相互反射成分で構成される。直接反射成分は光源からの入射光が物体表面で一度だけ反射して生じる成分であり、一方、相互反射成分は光源からの光が物体表面で複数回反射して生じる反射成分である。この相互反射成分が画像に含まれると、領域分割や形状復元などが不正確になるため、相互反射成分の除去は画像処理の前処理として重要である。

相互反射除去の手法として、Liao ら [1] は光源色による反射率の変化に基づく相互反射除去を提案しているが、シーンの RGB の反射率が既知である必要がある。また、Okawa ら [2] はハイパースペクトル画像を用いて相互反射の除去と分光反射率の推定を行っているが、カラー画像には適用することができない。

本稿では、多波長多方向光源下のカラー画像を対象として、相互反射除去手法を提案する。提案手法では、多波長多方向光源下画像を画素、光源色・カメラバンド、光源方向に関する 3 次元データとして表現したときの低ランク構造に基づいて、直接反射と相互反射を分離する。具体的には、直接反射と相互反射の色が異なること、および、カゲ（陰・影）を除く直接反射の明るさが入射角余弦則に従うことに基づいて、NMF とロバスト PCA を組み合わせて分離を行う。提案手法は、非負値行列因子分解（NMF）と特異値分解（SVD）に基づく柿本ら [3] の手法を、ロバスト PCA を用いて拡張することで、カゲに頑健な相互反射除去を実現したものである。

2 提案手法

C 色 $\times D$ 方向の多波長多方向光源下において撮影された RGB 画像は、図 1 のように、画素 p ($p = 1, 2, 3, \dots, P$)、光源色・カメラバンド c ($c = 1, 2, 3, \dots, 3C$)、光源方向 d ($d = 1, 2, 3, \dots, D$) を軸とする 3 次元データとして表される。

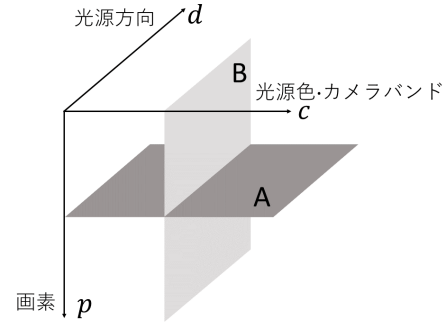


図 1: p, c, d を軸とする 3 次元データ表現

図 1 の平面 A において、画素値を並べた $3C \times D$ の行列 I_p は、反射回数を 2 回までと仮定すると、 $3C \times C$ の行列 S_p 、 $C \times 2$ の行列 R_p 、 $2 \times D$ の行列 W_p を用いて、

$$I_p = S_p R_p W_p \quad (1)$$

と表され、行列 I_p はランク 2 となる。ここで、行列 $S_p R_p$ は観測される光源色と物体の分光反射率の積、行列 W_p は光源方向に依存する係数であるため、行列 I_p は非負値行列の積で表される。

また、図 1 平面 B において、入射角余弦則に従う拡散反射成分で構成された直接反射成分の画素値を並べた $P \times D$ の行列 D_c は、

$$D_c = R_c S_c W_c \quad (2)$$

と表すことができる。行列 W_c は光源方向に依存する行列であることから、行列 D_c はランク 3 の拘束を得る。よって、柿本ら [3] は、SVD により拡散反射成分を求めた。

しかし、一般に、カゲは $i \propto \cos \theta$ で定式化される入射角余弦則に従わない。ここで、画素値を i 、法線と光源方向のなす角を θ とする。陰（attached shadow）は、物体の入射光が当たらない部分に生じるカゲであり、入射角余弦則において、 $i = 0$ かつ $\cos \theta < 0$ となる。一方、影（cast shadow）は、別の物体によって落とされたカゲであり、 $i = 0$ かつ $\cos \theta > 0$ となる。よって、画像内にカゲが含まれると、その画素値は入射角余弦則に従わないため、推定される拡散反射成分に悪影響を及ぼす。そのため、SVD を用いた手法は

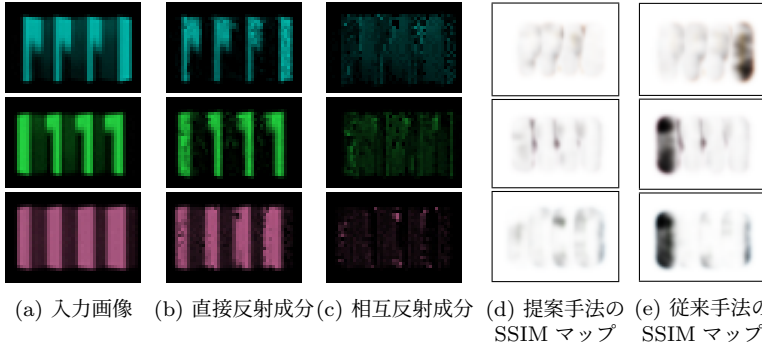


図 2: 合成画像の分離結果

表 1: 直接反射成分の分離精度

	PSNR	SSIM
提案手法	30.37	0.98
従来手法	25.67	0.95



図 3: 実画像の分離結果

カゲを含む画像に適していない。

提案手法では、図 1 平面 B において、カゲに対して頑健な次元削減を行うため、ロバスト PCA を用いる。ロバスト PCA により、 $i = 0$ の画素を除いて主成分を求めることで、直接成分を並べた行列 D_c は、ランク 3 の主成分行列 L_c とスパース行列 S_c に分解できる。

$$D_c = L_c + S_c \quad (3)$$

ここで、ランク 3 の主成分行列 L_c は、入射角余弦則に従う拡散反射成分であるため、 p 行 d 列成分が陰であるとする、陰は $\cos \theta < 0$ より、 $l_{pd} < 0$ となる。同様に、 p 行 d 列成分が影であるとする、影は $d_{pd} = 0$ かつ $\cos \theta > 0$ であることから、式 (3) より、 $s_{pd} < 0$ となる。よって、 $l_{pd} < 0$ または $s_{pd} < 0$ を満たす画素について、行列 L_c の要素 l を 0 とすることで、カゲを考慮した拡散反射成分を求めることができる。

図 1 の平面 A について、画素値がランク 2 かつ非負値の拘束から、NMF により、直接反射成分と相互反射成分を求める。ここで、反射光強度は反射ごとに減衰するため、画素値の和が大きい成分を直接反射成分、小さい成分を相互反射成分と分類する。次に、平面 B 上の直接反射成分がランク 3 の拘束を満たすよう、ロバスト PCA により、カゲを考慮した拡散反射成分を求め、その拡散反射成分を次の NMF の直接反射成分の初期値として用いる。このように、NMF とロバスト PCA を繰り返すことで、相互反射除去を行う。

3 実験

6 色の狭帯域光源で 10 方向から照らされた波型の被写体の合成画像を入力画像 (図 2(a)) とし、実験を行った。提案手法による分離後の直接反射成分と相互反射成分をそれぞれ図 2 の (b) と (c) に示す。図 2 の (b) と (c) から、カゲの箇所で、直接反射成分が暗くなっており、相互反射成分が明るく照らしていることが分かる。

また、図 2(a) の入力画像に対して、提案手法と従来

手法を適用し、真値を基準とした直接反射成分の SSIM マップをそれぞれ図 2 の (d) と (e) に示す。従来手法は被写体の端にあたる部分で誤差が見られるが、提案手法ではその誤差が軽減されていることが分かる。表 1 に、提案手法と従来手法の直接反射成分の分離精度を、画像劣化評価 (PSNR) および構造的類似性 (SSIM) を用いて評価した結果を示す。表 1 より、従来手法に比べ、定量的に分離精度が高いことが分かる。

さらに、6 色の狭帯域光源で 10 方向から照らされた V 字型で橙色の紙を被写体とした実画像を入力画像 (図 3(a)) とし、実験を行った。提案手法による分離後の直接反射成分と相互反射成分をそれぞれ図 3 の (b) と (c) に示す。図 3 の (b) と (c) から、合成画像の分離結果と同様に、カゲの箇所で、直接反射成分が暗くなっており、相互反射成分が明るく照らしていることが分かる。

4 むすび

本稿では、多波長多方向光源下画像を対象として、NMF とロバスト PCA を用いた相互反射除去の手法を提案した。また、実験として、柿本ら [3] による SVD を用いた手法に比べ、カゲに頑健な相互反射除去が行えることを定性的および定量的に確認した。3 回以上の反射で生じる相互反射の扱いは今後の課題である。

謝辞 本研究の一部は、JSPS 科研費 JP20H00612 の助成を受けた。

参考文献

- [1] M. Liao, X. Huang, and R. Yang, “Interreflection Removal for Photometric Stereo by Using Spectrum-Dependent Albedo”, In Proc. IEEE CVPR2011, pp.689-696, 2011.
- [2] H. Okawa, Y. Zheng, A. Lam, and I. Sato, “Spectral Reflectance Recovery with Interreflection Using a Hyperspectral Image”, In Proc. ACCV2016, pp.52-67, 2016.
- [3] 柿本有音, 岡部孝弘, “低ランク性に基づく多波長・多方向光源下の相互反射除去”, 情報処理学会全国大会, 5M-01, 2020.