

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

柿本 有音 岡部 孝弘
九州工業大学 情報工学部

1 はじめに

一般に、物体の見えは、光源の色と方向に依存する。多波長・多方向光源下で撮影した画像は、これらの性質を捉えることができるため、イメージベーストモデリングや物体認識などの分野で注目されている [1]。

形状が凸でないシーンでは、物体表面間で反射を繰り返す相互反射と呼ばれる現象が生じる。相互反射が生じると、直接反射による色・明るさに相互反射による色・明るさが加わるため、領域分割や形状復元などが不正確になる。したがって、様々な画像処理の前処理において、相互反射の除去は極めて重要である。

Liao ら [2] は、異なる光源色のもとで観測される反射光強度に基づいて相互反射除去法を提案している。Okawa ら [3] は、分光画像を手がかりに、相互反射の除去と分光反射率の推定を同時に行う手法を提案している。ところが、前者は物体の反射率情報が必要であり、反射率未知の画像には適していない。また、後者はハイパースペクトル画像が対象であり、多波長・多方向光源下画像のカラー画像の相互反射除去には適していない。

本稿では、多波長・多方向光源下画像を対象とした相互反射除去法を提案する。提案手法では、森ら [4] が画素ごとに独立に相互反射を除去していたのに対して、多波長・多方向光源下画像を3次元データとして表現したときの構造に基づいて反射成分の分離を行う。具体的には、多波長・多方向光源下画像の画素値が直接反射成分と相互反射成分の線形結合(凸結合)で表されること、および、直接反射の拡散反射成分が3つの基底画像の線形結合で表現されることに基づき、相互反射を分離する。

2 提案手法

多波長・多方向光源のもとで固定視点から撮影されたRGB画像を考える。 C 色 $\times D$ 方向の計 CD 個の光源を順に点灯して撮影したカラー画像において、 c' 番目($c' = 1, 2, 3, \dots, C$)の色 $\cdot d$ 番目($d = 1, 2, 3, \dots, D$)の方向の光源を点灯したときの p 番目($p = 1, 2, 3, \dots, P$)の画素の b 番目($b = 1, 2, 3$)のカメラバンドの画素値を i_{pcd} とする。ここで、 $c = 3(c' - 1) + b$ である。このとき、撮影された画像は、図1のように、画素 p 、光

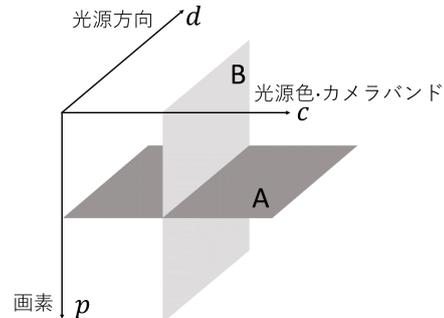


図1: p, c, d を軸とする3次元データ
光源色・カメラバンド c 、光源方向 d を軸とする3次元データとして表される。

まず、図1の平面A上の画素値、つまり、光源色・カメラバンドと光源方向を変化させたときの画素 p の画素値の変化を考える。直接反射光の明るさは物体表面の反射率に依存する。一方、相互反射は物体表面間で相互に反射を繰り返すため、その点の反射率だけでなく、それまでに反射したすべての点の反射率の積に依存し、色や明るさが直接反射光とは異なる。反射光の強度は反射のたびに減衰する性質に基づき、反射回数を2回までと仮定する。 (c, d) 番目の要素が i_{pcd} で示される $3C \times D$ の行列 I_p は、 $3C \times 2$ の行列 SR_p と $2 \times D$ の行列 W_p を用いて、

$$I_p = SR_p W_p \quad (1)$$

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

次に、図1の平面B上の画素値、つまり、光源色・カメラバンドを固定したときに、光源方向の変化に伴う画像の変化を考える。直接反射成分の画素値を並べた行列は、 (p, d) 番目の要素が i_{pcd} で表される $P \times D$ の行列 D_c となり、

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

と表現できる。直接成分がランバートモデルに従う拡散反射成分で構成されていると仮定すると、 W の成分 w_{pd} は、

$$w_{pd} = n_p^T l_d \quad (3)$$

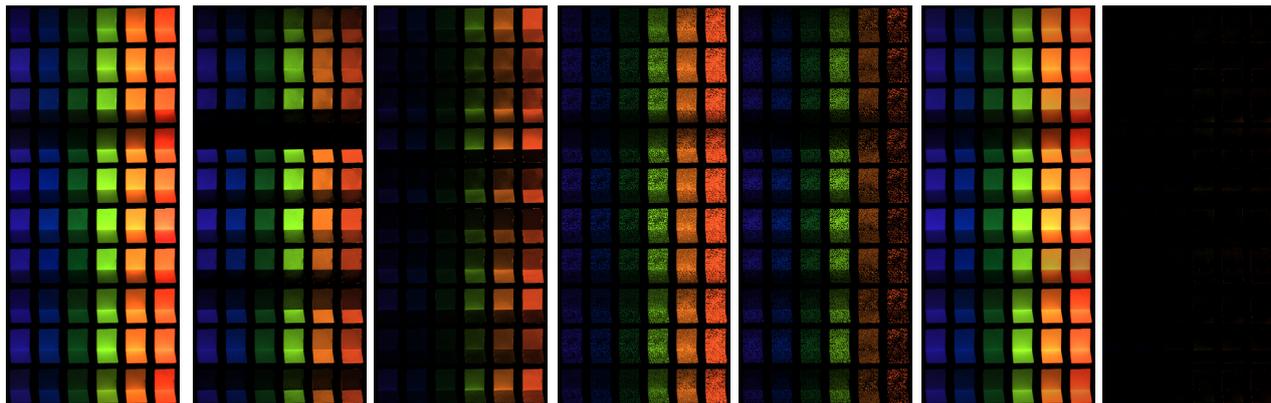


図 2: 入力画像 (a) 直接反射成分 (b) 相互反射成分 (a) 直接反射成分 (b) 相互反射成分 (a) 直接反射成分 (b) 相互反射成分 (a) 直接反射成分 (b) 相互反射成分

と表され、 \mathbf{W} は $P \times 3$ の法線ベクトルの行列 \mathbf{N} と $3 \times D$ の光源ベクトルの行列 \mathbf{L} の積となる。よって、 \mathbf{D}_c はランク 3 を持つ。

提案手法では、図 1 の平面 A 上の画素値がランク 2 かつ非負値の拘束を、平面 B 上の直接成分がランク 3 の拘束を満たすようにして、直接反射と相互反射を分離する。平面 A 上の拘束については非負値行列因子分解 (NMF) を、平面 B 上の拘束については特異値分解 (SVD) を用いる。

具体的には、まず、入力画像の行列に対して SVD を適用する。直接反射成分は拡散反射のみで構成されると仮定し、式 (2) の \mathbf{D}_c に対して SVD を適用し、そのランクが 3 になるように近似することで、拡散反射成分とそれ以外の成分に分解できる。

次に、SVD の結果を初期値として入力画像の行列に対して NMF を用いる。式 (1) に対して、両辺に左から \mathbf{S} の Moore-Penrose 疑似逆行列を掛けて、

$$\mathbf{S}^\dagger \mathbf{I}_p = \mathbf{R}_p \mathbf{W}_p \quad (4)$$

が得られる。行列 \mathbf{R}_p と行列 \mathbf{W}_p がともに非負値行列であることから、 $\mathbf{S}^\dagger \mathbf{I}_p$ に対して NMF を行い、2 つの成分に分解することができる。ここで、反射光の強度は反射のたびに減衰する性質により、分離後の画素値の和が最大となる成分を直接反射成分、それ以外の成分を相互反射成分と分類する。

さらに、得られた直接反射成分に対して SVD を再び行い、その結果と NMF で分類された相互反射成分を初期値として NMF を適用することを繰り返し、相互反射を除去する。

3 実験

被写体として紙を二つ折りにした物体を用意し、6 色の狭帯域光源で 10 方向から被写体を照らした。撮影された合計 60 枚の RGB 画像を入力画像 (図 2) とし、実験を行った。提案手法の結果を図 3、NMF のみを適用した結果を図 4、SVD のみを適用した結果を図

5 に示す。それぞれ分離後の直接反射成分を (a)、相互反射成分を (b) に示す。

図 2 の入力画像では、折り目付近で相互反射が発生しており、そのほかの部分よりも明るくなっている。提案手法により得られた図 3 の画像では、明るくなっている部分が相互反射成分として分離されており、定性的には良好な結果が得られている。一方で、図 4 の画素ごとに NMF のみを適用した結果では、画素間の関係が考慮されていないために、不連続な虫食い状の画像が得られている。また、図 5 の SVD のみを適用した結果では、相互反射成分が直接反射成分に吸収されてしまっていることが分かる。

4 むすび

本稿では、多波長・多方向光源下で撮影された画像を対象に、相互反射を除去する手法を提案した。具体的には、多波長・多方向光源下画像の構造に基づいて、SVD と NMF を繰り返し適用することで、直接反射成分と相互反射成分に分解した。実画像を用いた実験を行い、有効性を示した。定量的な評価や複雑な物体への適用は今後の課題である。

謝辞 本研究の一部は、JSPS 科研費 JP17H01766、および、JP20H00612 の助成を受けた。

参考文献

- [1] C. Wang and T. Okabe, “Joint Optimization of Coded Illumination and Grayscale Conversion for One-Shot Raw Material Classification”, In Proc. BMVC2017, 2017.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 森 英真, 松岡 諒, 岡部 孝弘, “多波長・多方向光源下画像の相互反射除去”, 情報処理学会全国大会, 2ZC-08, 2019.