

多波長・多方向光源下画像の相互反射除去

森 英真 松岡 諒 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、光源の色と方向の両方に依存する。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、画像の理解・認識・生成において重要であり、イメージベーストモデリング (IBM) や物体認識などの分野で注目されている [1]。

しかし、物体表面間で相互反射が発生する場合、その領域では、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、形状復元、および、反射特性の推定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、異なる色の光源でシーンを照らしたときの反射光強度を手がかりに、相互反射を除去する手法を提案している。また、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必要であり、多波長・多方向光源下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、物体表面で観察される反射光が、直接反射成分と相互反射成分の凸結合で表現されること、および、光源が狭帯域であることに基づいて、画素ごとに相互反射を除去する。具体的には、直接反射成分・相互反射成分と、その結合係数がいずれも非負値であることから、非負値行列因子分解 (NMF) [3] に基づいて、多波長・多方向光源下における画素値からなる行列の分解を行うことで、相互反射を除去する。

2 提案手法

物体が理想的なランバート拡散反射モデルに従うと仮定する。このとき、波長を λ として、物体の分光反射率を $r(\lambda)$ 、光源の分光分布を $l(\lambda)$ 、RGB カメラの分光感度を $s(\lambda)$ 、物体の形状や光源方向に依存する係数を w と表すと、物体上の任意の画素の画素値 i は、

$$i_{cdb} = w_d \int l_c(\lambda) r(\lambda) s_b(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

と表すことができる。ここで、 c は光源の波長、 d は光源方向、 b は RGB カメラのバンドを表す。光源が狭帯域で、ある波長 λ_c の光で物体を照らすとき、

$$i_{cdb} = w_d r(\lambda_c) s_b(\lambda_c) \quad (2)$$

となる。つまり、狭帯域光源下で観測される物体の色は光源色に等しく、光源波長における分光感度で決まり、その強度は分光反射率や光源方向に依存して変化する。なお、光源の明るさは波長と方向によらず等しいとする。

物体表面で1回だけ反射する光の明るさは、その点の反射率 r に依存するが、相互反射によって複数回反射する光の明るさは、その点の反射率とそれまでに反射した全ての点の反射率の積に依存する。また、係数 w は、直接反射光においては、光源方向と反射点の法線の内積に依存し、相互反射光においては、各反射点間の距離および法線に依存する。つまり、各反射光は、光源の波長に依存する項 (分光反射率 r · 分光感度 s) と、光源の方向に依存する項 (係数 w) の積で表現され、観測される反射光は、直接反射成分と相互反射成分の凸結合で表すことができる。

物体上の任意の画素について、その画素値が異なる N 個の成分の凸結合で表せるとき、画素値 i は、観測される光源色 s と、光源波長に依存する係数 r 、および、光源方向に依存する係数 w を用いて、

$$i_{cdb} = \sum_{n=1}^N s_b(\lambda_c) r_n(\lambda_c) w_{nd} \quad (3)$$

と表せる。

C 種類の狭帯域の光源を D 方向から照らした場合に観測される各 RGB 値は、観測される画素値を並べた $3C \times D$ の行列 I 、観測される光源色を表す $3C \times C$ の行列 S 、反射率や反射率の積に依存する $C \times N$ の係数行列 R 、および、光源方向と法線の内積やフォームファクタに依存する $N \times D$ の係数行列 W を用いて、

$$I = SRW \quad (4)$$

と表現される。ここで、行列 S が既知のとき、その Moore-Penrose 疑似逆行列を式 (4) の両辺に左から掛けることで、

$$S^\dagger I = RW \quad (5)$$

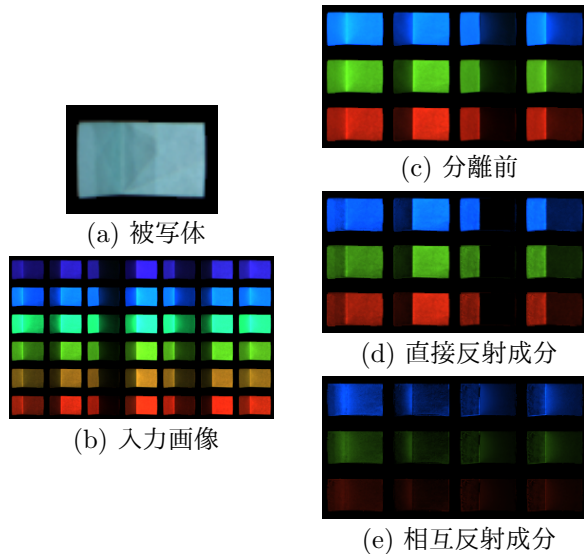


図 1: 青緑色の単色物体を用いた実験結果

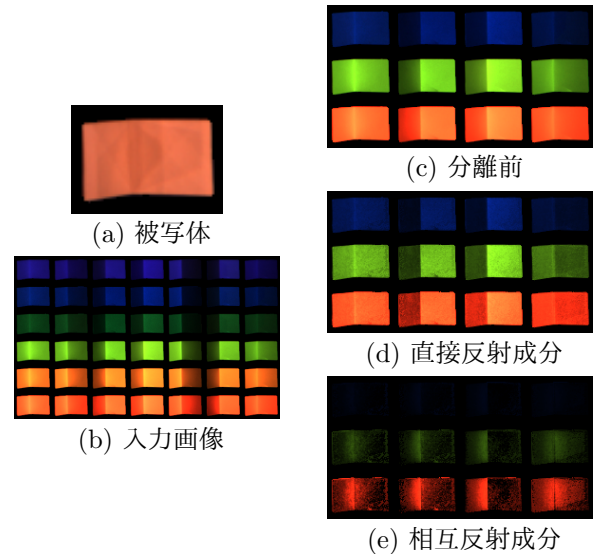


図 2: 橙色の単色物体を用いた実験結果

が得られる。

行列 R と W はともに非負値行列であるため、行列 $S^{\dagger}I$ に NMF を適用することで、前述の 2 つの行列を得ることができる。これにより、異なる N 成分への分離が可能となる。

次に、推定された N 個の成分を、直接反射または相互反射に分類する。具体的には、光の強さは反射するたびに減衰するという性質に基づき、分離後の多波長・多方向光源下の画素値の和が最大となる成分を直接反射、それ以外の成分を相互反射と分類する。

実際には、NMF が初期値に依存することから、再度最適化を行う。具体的には、上記のようにして得られた解に対して、入力画像をガイドとして平滑化を施したものを初期値とする。

3 実験

1 色で構成された物体を用いて実験を行った。図 1 に青緑色、図 2 に橙色の単色物体を用いた実験結果を示す。どちらの被写体も、紙を縦に 2 つ折りにした形状の物体であり、白色光源下で撮影した画像を (a) に示す。入力画像として、6 色の狭帯域波長の光源で 10 方向から物体をそれぞれ照らし、合計 60 枚の RGB 画像を用意した。その一部を (b) に示す。

実験では、被写体が 1 色で構成されていることから、各画素に直接反射と相互反射の 2 成分が含まれていると考え、 $N = 2$ として分離を行った。なお、行列 S は、各狭帯域光源下で撮影された RGB 画像の平均値から求めた。分離前の画像の一部を (c)、提案手法によって分離した直接反射成分を (d)、相互反射成分を (e) に示す。分離前の画像では、折り目付近の領域で相互反射が発生しており、周囲の領域よりも明るくなっている

ことが確認できる。推定された相互反射成分では、どちらの単色物体においてもこの領域が相互反射成分として分離されており、定性的に良好な結果が得られていることがわかる。また、どちらも被写体の色により近い光源色下で、相互反射の影響が大きくなっている。これは、物体の各面で反射率の大きい波長が一致するため、そのような光源下では相互反射が強くなるということを示している。

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、非負値行列因子分解 (NMF) により、画素ごとに多波長・多方向光源下画像の画素値を並べた行列を分解することで、直接反射成分と相互反射成分の分離を行った。実画像を用いた実験を行い、その有効性を示した。今後は、多色物体を用いた実験を行うとともに、画素間の関係を考慮した手法についても検討したい。

謝辞 本研究の一部は、JSPS 科研費 JP17H01766 および JP18H05011 の助成を受けた。

参考文献

- [1] N. Kobayashi, and T. Okabe, “Separating Reflection Components in Images under Multispectral and Multidirectional Light Sources”, In Proc. ICPR2016, pp.3199–3204, 2016.
- [2] M. Liao, X. Huang, and R. Yang, “Interreflection Removal for Photometric Stereo by Using Spectrum-Dependent Albedo”, In Proc. 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.