

フリッカに基づく固有画像分解とその色補正への応用

大屋 瑠璃† 松岡 諒‡ 岡部 孝弘‡

†九州工業大学大学院情報工学府先端情報工学専攻

‡九州工業大学大学院情報工学研究院知能情報工学研究系

1 はじめに

我々の身の回りにある光源は交流電源により動作しているため、その明るさが振動している。このフリッカは一般には肉眼で捉えることができないが、交流電源で動作する光源に照らされているシーンを高速度カメラなどを用いて短時間露光で撮影すると、確認することができる [3]。

このようなフリッカに基づく画像解析として、Sheinin ら [1] は、複数の光源に照らされたシーンの画像を各々の光源のみに照らされた画像に分解する光源分離に取り組んでいる。また、交流電源に同期した符号化露光カメラ、および、様々な光源の強度変化パターンのデータセットを用いることで、低照度シーンにおいても光源分離が可能であることを示している。

これに対して本稿では、受動的な明るさの振動に基づいて固有画像分解 (intrinsic image decomposition) [5][6] を行う手法を提案する。提案手法では、高速度カメラを用いて撮影した動画像を、重ね合わせの原理に基づいて光源分離したのち、輝度が光源色、反射率、照度の3つの積で表現されることに基づいて、固有画像分解、つまり、反射率画像、光源ごとの照度画像・光源色の推定を行う。

具体的には、光源強度も各々の光源のみに照らされた画像の画素値も非負であることから、非負値行列因子分解 (Non-negative Matrix Factorization: NMF) [2] を用いて光源分離を行う。また、各々の光源のみに照らされた基底画像が光源色、反射率画像、照度画像の積により記述されることから、光源色と反射率の間の不定性を残して、固有画像分解を解析的に行う。さらに、これらの推定結果を初期値として非線形最適化を行い、固有画像分解を改善する。実画像を用いた実験を行い、提案手法がシーン (反射率・照度) や光源 (色・強度) の理解だけでなく、色補正への応用にも有効であることを示す。

2 関連研究

2.1 明るさの振動に基づく画像解析

Sheinin ら [1] は明るさの振動を頑健に捉えることのできる特殊な自作のカメラや、画像解析のためにそれぞれの光源の光源色や振動パターンをまとめたデータベースを作成して、交流電源による明るさの振動に基づく画像解析を行った。しかし、この手法ではデータベースにより観測データを尤も説明する強度変動パターンを選択するため未知の光源などが存在するシーンには対応できない。

本研究では、交流電源に基づく輝度の振動のみを手掛かりに、上述した事前知識を用いない、光源分離手法を提案した。それにより、未知の光源を含むシーンにおいても光源分離を可能とする。さらに、光源分離のみならず、その固有画像分解と色補正への応用を実現した。

2.2 固有画像分解

固有画像分解 [5][6] とは、撮影画像から反射率画像と照度画像を推定する問題である。反射率画像は領域分割に、照度画像は陰影に基づく形状復元に有用である [5]。しかし、単一画像を用いる場合、一つの方程式に対して二つの未知変数をもつ不良設定問題となるため、固有画像分解を解析的に求めることができない。

本研究では、分解された基底画像が別光源で照らされた同一シーンの画像であることから、各々の光源のみに照らされた画像間で反射率が共通かつ各分離画像で光源色が共通であることと、光源分離画像が光源色と反射率と照度の積で表現されることに注目することで、反射率と光源色の間に不定性を残すものの、良設定問題として固有画像分解を解析的に求められることを示した。

2.3 複数光源下シーンの色補正

複数の光源で照らされているシーンは、我々の身近に多く存在する。例えば、室内灯で照らされた屋内に外光が差し込んでいるような場合などが挙げられる。しかし、このような複数光源環境では、一般に、光源色が複数存在し、また、それらの混合比率が画素ごとに異なるため、色補正が困難であることが知られている [4]。

本研究では、2.2 節で述べた固有画像分解の応用として、複数光源環境における色補正手法を提案する。具体的には、固有画像分解により得られる各基底画像の（相対的な）光源色を用いて、基底画像の光源色を揃えたのち、それらを組み合わせて単一光源色の画像を再構成する。その後、既存の単一の光源色を仮定した色補正法を適用することで、複数光源環境における色補正を実現する。

3 提案手法

3.1 概要

本節では、まず、高速度カメラなどを用いて短時間露光で撮影した動画像を入力として、重ね合わせの原理に基づいて光源分離を行う方法を述べる。次に、輝度が光源色、反射率、照度の 3 つの積で表現されることに基いて、固有画像分解を解析的に行い、その後、光源分離と固有画像分解の結果を初期値として非線形最適化を行うことで結果を改善する方法を述べる。また、複数光源下の固有画像分解の色補正への応用についても述べる。

3.2 光源分離

複数の光源に照らされたシーンの画像は、各々の光源のみに照らされた画像（基底画像）の凸結合で表現される。具体的には、時刻 t ($t = 1, 2, 3, \dots, T$) の画像において、 p 番目 ($p = 1, 2, 3, \dots, P$) の画素の c 番目 ($c = 1, 2, 3$) のチャンネルの画素値 i_{pct} は、

$$i_{pct} = \sum_{n=1}^N b_{pcn} a_{nt} \quad (1)$$

のように記述できる。ここで、 N は基底画像（光源）の数、 b_{pcn} は n 番目 ($n = 1, 2, 3, \dots, N$) の基底画像の p 番目の画素の c 番目のチャンネル ($c = 1, 2, 3$) の画素値、 a_{nt} は n 番目の基底画像（光源）の時刻 t における結合係数（強度）である。

式 (1) は、行列を用いて、

$$\mathbf{I} = \mathbf{B}\mathbf{A} \quad (2)$$

のように表現することができる。ここで、 \mathbf{I} は入力画像を並べた $3P \times T$ の行列、 \mathbf{B} は基底画像を並べた $3P \times N$ の行列、 \mathbf{A} は光源強度を並べた $N \times T$ の行列である。したがって、光源分離は、入力画像を並べた行列を基底画像と光源強度に分解する問題に帰着する。なお、光源数 N は入力画像を並べた行列 \mathbf{I} のランクに等しい¹。4 節の実験では、行列 \mathbf{I} の特異値の 2 乗に基づいて、光源数 N を決定した。具体的には、 $(n+1)$ 番目の特異値の 2 乗 σ_{n+1}^2 と n 番目の特異値の 2 乗 σ_n^2 の比 $\sigma_{n+1}^2/\sigma_n^2$ が最小となる n を光源数 N とした。

一般に、式の数未知数の数よりも大きいとき、すなわち、 $(3P \times T) \geq (3P \times N + N \times T)$ のときに光源分離が可能である。例えば、画素数 P が十分に大きいときは、 $T > N$ であれば良い。提案手法では、基底画像の画素値も光源強度も非負であることから、NMF を用いて光源分離を行う。具体的には、

$$\min_{\{\mathbf{B}, \mathbf{A}\}} \frac{1}{2} \|\mathbf{I} - \mathbf{B}\mathbf{A}\|_F^2 \quad (3)$$

の最適化により基底画像と光源強度に分解する。ここで行列 \mathbf{B} と \mathbf{A} の要素は全て非負値とする。なお、基底画像と光源強度の間には、スケールの不定性があるため、行列 \mathbf{A} の各行の要素の和が 1 になるようにスケールを定める。また、 $\mathbf{B}\mathbf{A} = \mathbf{B}\mathbf{U}^{-1}\mathbf{U}\mathbf{A}$ であることから、 $\mathbf{B}\mathbf{U}^{-1}$ と $\mathbf{U}\mathbf{A}$ の全要素を非負に保つ $N \times N$ の正則な行列 \mathbf{U} で表現される不定性もある。

3.3 固有画像分解

基底画像の画素値 b_{pcn} は、 n 番目の光源の色 l_{nc} 、 p 番目の画素の反射率 r_{pc} 、および、 n 番目の光源下における p 番目の画素の照度 s_{np} を用いて、

$$b_{pcn} = l_{nc} r_{pc} s_{np} \quad (4)$$

のように表すことができる。光源色・反射率・照度の間にはスケールの不定性があることから、 $l_{n1} + l_{n2} + l_{n3} = 1$ 、ならびに、 $r_{p1} + r_{p2} + r_{p3} = 1$ を満たすようにスケールを定める²。また、光源色と反射率の間にも不定性があることから、 $n = 1$ の光源の色を $l_{11} = l_{12} = l_{13} = 1/3$ に固定する（これにより反射率と 2 番目以降の光源色が

¹強度変化パタン等の等しい複数の光源は、一つの光源とみなされる。これらの光源色が同一であれば、以降の議論は一般性を失わない。また、基底画像は線形独立であると仮定する。

²これらの正規化により、照度のスケールも影響を受ける。

影響を受ける)。色が既知の光源、もしくは、反射率が既知の画素が1つでもあれば、この不定性を解決することができる。

一般に、式の数未知数の数よりも大きいとき、すなわち、 $3PN \geq (3N + 3P + PN)$ のときに、固有画像分解が可能である。例えば、画素数 P が十分に大きいときは、 $N \geq 2$ であれば良い。式 (4) から、各画素の反射率は

$$r_{pc} \propto \frac{b_{pcn}}{l_{nc}} \quad (5)$$

のように、光源色は

$$l_{nc} \propto \frac{b_{pcn}}{r_{pc}} \quad (6)$$

のように与えられる。1 番目の光源の色を固定すると、式 (5) から各画素の反射率を求めることができる。各画素の反射率が分かると、式 (6) から 2 番目以降の光源の色を求めることができる。

3.4 非線形最適化

3.2 節では基底画像と光源強度を、3.3 節では基底画像を元に光源色・反射率・照度を逐次的に推定している。ここでは、これらの推定結果を初期値として、次式で定義される非線形最適化により、光源色・反射率・照度・光源強度を改善する。

$$\min_{\{l_{nc}, r_{pc}, s_{np}, a_{nt}\}} \sum_{p,c,t} \left| i_{pct} - \sum_{n=1}^N l_{nc} r_{pc} s_{np} a_{nt} \right|^2 \quad (7)$$

これは、3.2 節で述べたように、複数の光源に照らされたシーンの画像が基底画像の凸結合で表現されるだけでなく、3.3 節で述べたように、基底画像が光源色、反射率、照度の積で表現されることも考慮して、光源分離を行っているときもみなすこともできる。これにより、3.2 節で述べた正則な行列 U で表現される不定性が解決することが期待される。

なお、4 節の実験では、非線形最適化の計算時間、メモリのコストの問題から、3.4 節の非線形最適化は一部の画素のみに対して行った。その後、非線形最適化により得られた光源強度を元に基底画像を再計算するとともに、非線形最適化で得られた光源色を用いて、3.3 節に従って固有画像分解を行った。

3.5 色補正への応用

従来の多くの色補正手法は、シーンを照らす光源の色が単一であると仮定している [7]。よって、複数光源に照

らされたシーンでは、一般に上記の仮定が成り立たないため、従来手法による色補正が困難である。そこで、提案手法では、3.3 節で求めた反射率、照度、光源強度の情報を用いて、光源色が非一様なシーンの色補正を行う。具体的には、求めた反射率、照度、光源強度の情報を用いて固定した 1 番目の光源の色に、2 番目以降の光源で照らされたシーンの光源色を合わせる。それにより、複数光源下シーンを疑似的に単一色の複数光源で照らされたシーンとして扱うことができ、従来の色補正手法を適用することができる。

4 実験

実験ではフォトン製の高速度カメラ FASTCAM Mini UX50 を用い、フレームレートを 2500fps、露光時間を 0.4ms に設定し、LED 光源と白熱灯光源を用いて複数の光源に照らされている静止シーンの撮影を行った。また、西日本で実験を行ったため、交流の周波数は 60Hz と仮定している。

4.1 光源分離

本節では、白熱灯と LED 照明の 2 光源で照らされたシーンの光源分離実験を行った。具体的には、前述したシーンにおいて 100 枚画像 (動画) を撮影し、提案手法を適用することで LED 光源のみでとらされる画像と白熱灯光源のみで照らされる画像へ分離した。

図 1 に、(a) 単一光源のみで照らされたシーンを撮影した真値画像、(b) 入力画像、(c) 光源分離の結果を示す。また、(b) については入力とした 100 枚のうち時間 t で並べた場合の最初の 3 枚を示している。図 1(a)-(c) より、光源色や球の影などはそれぞれの光源で照らした場合に出る正しいものが出力されており、おおむね真値に近いといえる。

4.2 固有画像分解

前節の実験で求めた 100 枚の光源分離画像を用いて、固有画像分解実験を行った。図 1 の (d) は光源分離画像から推定した固有画像を示しており、左から白熱灯光源のみで照らされたシーンの照度画像、LED 光源のみで照らされたシーンの照度画像、推定した反射率画像である。図 1(d) より、反射率画像におけるシーン中の紙コップの模様や、照度画像における石膏像の複雑な陰影などが、正しく表現されていることから、定性的におお

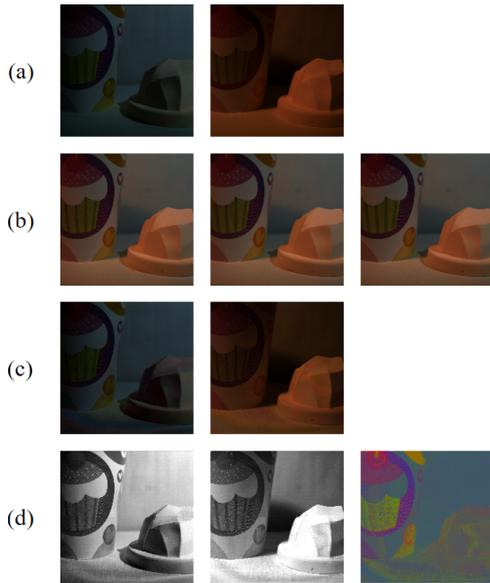


図 1: (a) 真値, (b) 入力画像の一部, (c) 光源分離画像, (d) 推定固有画像

むね正しく求められていることが分かる。ここで、反射率画像が全体的に青みがかっているのは、式 (4) において固有画像分解を行う際に LED 光源シーンの光源色を $l_{11} = l_{12} = l_{13} = 1/3$ に固定したためである。

4.3 色補正

4.2 節で求めた固有画像を用いて、白熱灯光源のみで照らされている画像の光源色の RGB 値を、LED 光源色の RGB 比率と同一になるように補正した。その後、これらの画像から再構成した疑似的な単一色の複数光源で照らされたシーンに対して従来手法 [7] を適用し色補正を行った。図 2 に、(a) 入力画像, (b) 入力画像 (a) に従来手法 [7] を直接適用した結果, (c) 提案手法により再構成した (光源色を合わせた) 画像, (d) 再構成画像 (c) に従来手法 [7] を適用した結果を示す。

図 2 より、単一光源色を仮定する従来の色補正手法 [7] では、非一様な光源色の影響が残っている。一方、提案手法では、非一様な光源色の影響を補正できていることがわかる。

5 むすび

本稿では、交流電源で動作する光源のフリッカによるシーンの明るさの振動を捉えた動画を重ね合わせの原理に基づいて分離する光源分離手法を提案した。加えて、

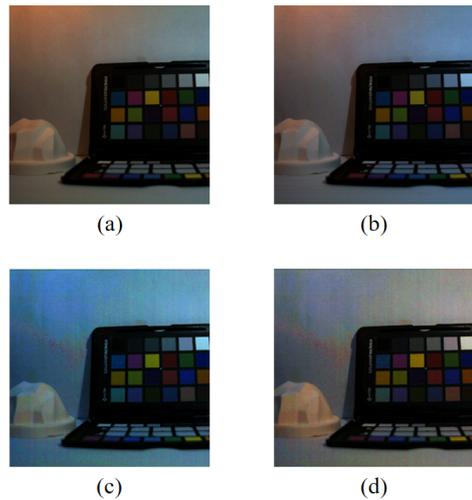


図 2: (a) 入力画像, (b) 入力画像の色補正結果, (c) 光源色を統一した再構成画像, (d) 再構成画像の色補正結果

推定した光源分離画像から固有画像を推定する手法と、それを応用したシーンの色補正手法を提案した。白熱灯光源と LED 光源の 2 つの光源が存在するシーンを撮影した実画像実験により、提案手法の有効性を確認した。鏡面反射などの考慮について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 JP18H05011 の助成を受けた。

参考文献

- [1] M. Sheinin, Y. Schechner, and K. Kutulakos, “Computational imaging on the electric grid”, In Proc. IEEE CVPR2017, pp.6437–6446, 2017.
- [2] M. Berry, M. Browne, A. Langville, V. Pauca, and R. Plemmons, “Algorithms and applications for approximate nonnegative matrix factorization”, Computational Statistics & Data Analysis, 52(1), pp.155–173, 2007.
- [3] M. Vollmer and K. Moellmann, “Flickering lamps”, European Journal of Physics, 36(3), 035027, 2015.
- [4] E. Hsu, T. Mertens, S. Paris, S. Avidan, and F. Durand, “Light mixture estimation for spatially varying white balance”, In Proc. ACM SIGGRAPH, Article No.70, 2008.
- [5] M. Tappen, W. Freeman, and E. Adelson, “Recovering intrinsic images from a single image”, In Advances in Neural Information Processing System, pp.1343–1350, 2003.
- [6] Y. Weiss, “Deriving intrinsic images from image sequences”, In Proc. IEEE ICCV2001, pp. 68–75, 2001.
- [7] G. Buchsbaum, “A spatial processor model for object colour perception”, Journal of the Franklin Institute, vol. 310, 1980.