

受動的な明るさの振動に基づく光源分離

大屋 瑠璃^{1,a)} 岡部 孝弘^{2,b)}

概要：一般的な照明は交流電源によって作動しているため、その明るさは肉眼では捉えることのできない速さで振動している。よって、交流電源で作動する照明下のシーンを高速度カメラで撮影すると、シーンの明るさが振動していることが確認できる。本研究では、この輝度の振動を手がかりに民生用の高速度カメラを用いて撮影した複数の光源で照らされたシーンの動画像を、各光源のみで照らされたシーンの動画像に分解する手法を提案する。具体的には、交流電源の周波数に基づいてノイズを除去したのち、複数光源下の画像が単一光源下の画像の凸結合で表現されることに基づいて非負値行列因子分解を用いて光源を分離する。

キーワード：光源分離, 交流電源, 非負値行列因子分解

1. はじめに

私たちの身の回りにある一般的な照明は交流電源によって作動しているため、その明るさは肉眼では捉えることのできない速さで振動している。したがって、交流電源で作動する照明下のシーンを高速度カメラで撮影すると、撮影画像の輝度値が振動していることを確認できる [3]。

この振動を手掛かりとした従来手法として、Sheinin ら [1] の交流電源に基づく光源情報を利用した画像解析の手法が挙げられる。この手法では様々なシーンで頑健に光源分離を行うことができるが、分離に自作の特殊なカメラや光源に関する事前知識が必要となる。

本稿では、民生用の高速度カメラを用いて撮影した、複数の位相の異なる光源で照らされたシーンの動画像から、事前知識無しで各光源のみに照らされたシーンの動画像に分離する手法を提案する。提案手法では、分離前と分離後の画素値が非負であることと、複数光源下の画像が単一光源下の画像の凸結合で表現されることに基づいて、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、提案手法を照明シミュレーションや画像中のガラスへの映り込みの除去に応用した結果も報告する。

2. 関連研究

交流電流で作動する光源の出力強度変動は、高速度カメラを用いることで輝度の振動として捉えることが可能である [3]。

Sheinin ら [1] は、さらにその振動が白熱灯や蛍光灯、LED といった光源の種類や製造元ごとに違うことを示し、それぞれの光源の光源色や振動をまとめたデータベースを作成した。また、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を開発した。Sheinin らの従来研究ではこれらのデータベースや自作のカメラを用いることで、交流電源で作動する光源で照らされたシーンの画像をモデル化し、そのモデルから撮影画像からどのような光源が使われているかを判別するなどの画像解析に応用できることを示した。光源分離もその画像解析手法の一例として提案されている。この手法を用いた光源分離では、事前知識を必要とするが交流電源で作動する照明のある静止シーンであれば、どのようなシーンにもロバストに適用できるという利点がある。

光源分離は、特に混合照明下で撮影される画像の悪影響を取り除くのに有用に働く。室内灯のある屋内に窓から差し込む屋外の光や、道路の街灯とそこに並ぶ建物から漏れる照明の光など、多くの写真は人工照明を含む混合照明の下で撮影されている。しかし、混合照明下での撮影は、露光時間が短い際に視覚的に不自然な色を生じたり、撮影時にホワイトバランスの設定を困難にする等、様々な問題を生じさせる [4]。光源分離を行い、単一光源下の画像に分離

¹ 九州工業大学 大学院情報工学府 先端情報工学専攻

² 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

a) r_ooya@pluto.ai.kyutech.ac.jp

b) okabe@ai.kyutech.ac.jp

することでこれらの問題は単純な問題として解決することができる。

3. 提案手法

3.1 光源分離

L 個の光源で照らされているシーンの動画像 (総フレーム数 T) を, 画素数が P の高速度カメラを用いて撮影する. また, ある画素 p のある時刻 t における画素値を $i_{pt} = (i_{Rpt}, i_{Gpt}, i_{Bpt})^T$, ある時刻 t の光源 l の強度を s_{lt} , 光源 l の明るさが 1 で他の光源の明るさが 0 のときの画素 p の画素値を $\mathbf{a}_{pl} = (a_{Rpl}, a_{Gpl}, a_{Bpl})^T$ と定義する. \mathbf{a}_{pl} は時刻 t に関して不変であるが, 画素ごとに反射率等が異なるため画素 p に関して変化する. また, s_{lt} は交流電流が振動するため時刻 t に関して変化するが, シーン中の全画素で強度の変化は一様なので画素 p に関して不変である. ゆえに, ある画素 p に注目したとき, その画素値は L 個の基底の線形結合として,

$$\begin{aligned} i_{pt} &= \mathbf{a}_{p1}s_{1t} + \mathbf{a}_{p2}s_{2t} + \cdots + \mathbf{a}_{pL}s_{Lt} \\ &= (\mathbf{a}_{p1}, \mathbf{a}_{p2}, \cdots, \mathbf{a}_{pL}) (s_{1t}, s_{2t}, \cdots, s_{Lt})^T \\ &= A_p \mathbf{s}_t \end{aligned} \quad (1)$$

のように表すことができる.

i_{pt} を縦に画素数 P 個分, 横に入力画像 T 枚分並べた画素値行列 I は, A_p を画素数 P 個分だけ縦に並べた色行列 $A = (A_1^T, A_2^T, \dots, A_P^T)^T$ と \mathbf{s}_t を入力画像 T 枚分だけ横に並べた光源の強度行列 $S = (s_1, s_2, \dots, s_T)$ の積として,

$$I = AS \quad (2)$$

のように記述することができる. ここで, A と S はどちらも非負値行列であるため, I に非負値行列因子分解 [2] を適用して,

$$f(A, S) = \frac{1}{2} \|I - AS\|_F^2 \quad (3)$$

を最小とする行列 A と S を求める. ここで $\|X\|_F$ は行列 X のフロベニウスノルムである. なお, 本研究では, ALS アルゴリズム [2] を用いて最小化を行った.

3.2 ノイズ除去

高速度カメラを用いて短時間露出で撮影した画像には分離に悪影響を及ぼすノイズが多く含まれるため, 撮影画像そのものを用いて分離を行うことは困難である. そこで, 同位相の画像を平均したものを入力画像として用いる. 撮影した動画像の t 枚目を I_t , 暗電流ノイズを表す画像を D , 交流電流の周期を Δt とすると, M 枚の平均をとって暗電流ノイズを除去した画像 I'_t は

表 1 2 光源で照らされたシーンの光源数推定

固有値の比	白熱灯と LED	白熱灯と太陽光	蛍光灯と青白熱灯
$R(2)$	0.014	0.004	0.021
$R(3)$	0.810	0.875	0.752
$R(4)$	0.944	0.930	0.897
$R(5)$	0.968	0.933	0.929

$$I'_t = \sum_{m=1}^M I_{t+\Delta t \cdot m} - D \quad (4)$$

のように表すことができる. この処理を行うことで撮影画像からノイズの影響が軽減され, 提案手法により頑健に分離を行うことが可能となる.

3.3 光源数推定

光源分離を行うためには画像中のシーンがいくつの光源で照らされているかを推定する必要がある. ここでは光源数の推定法を提案する. また, 今回は輝度の振動のみを手がかりに光源数を推定するため, 入力画像は分離に用いるカラー画像をグレースケール画像に変換したものとす. 入力画像のある画素 i_{pt} を縦に画素数 P 個分, 横に入力画像 T 枚分並べた画素値行列 G の固有ベクトル v と固有値 D を求める. j 番目の固有値を $\sigma(j)$ としたとき, j 番目と $j+1$ 番目の固有値の比 $R(j)$ を

$$R(j) = \frac{\sigma(j+1)}{\sigma(j)} \quad (5)$$

のように表す. このとき, $1 < j < T$ の範囲で固有値の比 $R(j)$ を最小とする整数 j がシーン中の光源数と一致する.

4. 実験

今回の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 に設定して LED 光源と白熱電球などの複数の光源に照らされている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 光源数推定実験

白熱灯や LED などいくつかの光源で照らされたシーンの撮影画像, もしくは各光源のみの画像を任意の枚数合成した画像を用いて, 光源数が推定できているかの検証を行った. 表 1 に 2 光源で照らされたシーンのそれぞれの固有値の比を, 表 2 に 3 光源で照らされたシーンのそれぞれの固有値の比を 3.3 で求めた結果を示す. どの結果においても, 光源数と固有値の比を最小にする j が一致しているため正しく推定できているといえる.

4.2 光源分離実験

白熱灯や LED の 2 光源で照らされたシーンの撮影を行っ

表 2 3 光源で照らされたシーンの光源数推定

固有値の比	白熱灯と CFL と LED	赤白熱灯と緑白熱灯と青白熱灯
$R(2)$	0.621	0.058
$R(3)$	0.011	0.029
$R(4)$	0.778	0.828
$R(5)$	0.904	0.964

表 3 平均枚数と PSNR の変化

入力枚数	分離結果の PSNR(白熱灯)	分離結果の PSNR(LED)
3	27.58	28.34
6	29.02	29.70
20	30.55	30.74
40	31.30	31.13

た. 図 1 に 1000 枚の撮影画像から得られた, 各光源の輝度値の変動を RGB 別に表したグラフを示す. 縦軸が画素値, 横軸が時間を示している. 球の影になっている部分の画素はそれぞれの光源のみで照らされているため, その画素値から振動を表した図 1 のグラフは各光源それぞれの振動を表しており, 互いの光源の影響は受けていない. グラフから, LED 光源と白熱電球は振動のパターンが異なることが確認できるため, 提案手法による分離が可能である.

そこで, 撮影された 1000 枚の動画画像から 3.2 節で述べた提案手法を用いて位相の違う 20 枚の平均画像を作成し, LED 光源のみで照らされている画像と白熱電球のみで照らされている画像にそれぞれ分離した. 図 2 (上段) に入力画像 20 枚のうちの最初の 6 枚を, 図 2(中段) に LED 光源のみで照らされているシーンに分離した結果, 図 2(下段) に白熱電球のみで照らされているシーンに分離した結果を示す. 結果を見ると, 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. しかし, 一方の照明について影になっている場所では色が必ずしも正確ではないことから, うまくいっていない画素があることも分かる. また, 平均する入力画像の枚数を 3 枚, 20 枚, 40 枚と増やして PSNR の変化を表 3 に示す. 表 3 に示した結果から, 入力画像を増やしてノイズ除去を行うことの有効性が確認できる.

5. 応用

5.1 照明シミュレーション

4.2 節で求めた結果を用いて, 光源の色を他の色に変更する照明シミュレーションを行った. 結果を図 3 に示す. 図 3(a) は LED 光源の色を青色, 白熱光源の色をオレンジ色に変更した画像, 図 3(b) は LED 光源の色を変更せずに, 白熱光源の色のみを赤色に変更した画像, 図 3(c) は白熱光源の色を緑色, LED 光源の色を紫色に変更した画像を示し

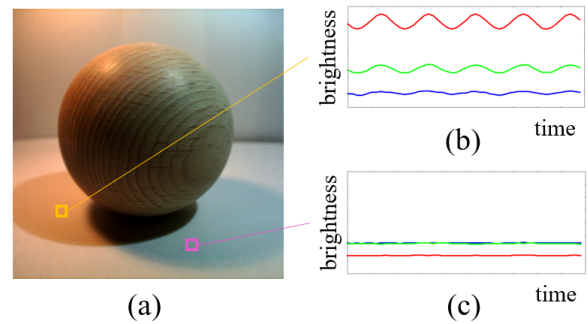


図 1 シーン上のある点における輝度値の時間変化

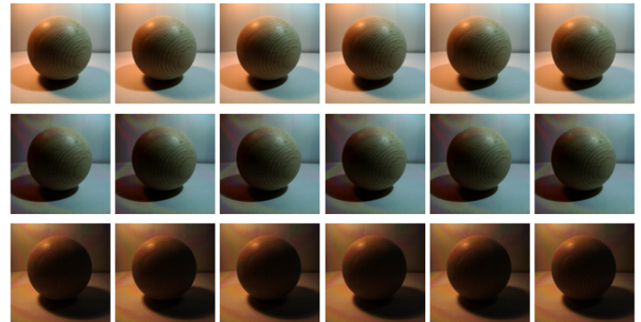


図 2 提案手法により分離した結果 (上段) 入力画像, (中段) 分離結果 (LED 光源), (下段) 分離結果 (白熱光源)

ている.

この照明シミュレーションではそれぞれの光源の色を変更しているため, 画像そのものの色を変更するような画像処理ではこのような画像を得ることは困難である. そのため, このシミュレーションでは提案手法のような光源分離が非常に有効に働いている.

5.2 ガラスへの映り込みの除去

室内から屋外を, もしくは屋外から室内を, 窓越しに写真を撮影した場合, 撮影者側の光源により照らされた物体がガラスに映りこんでしまうことがある. これは, 太陽光という振動しない光源と交流電源によって振動する室内灯の 2 光源で照らされているときと同じであるため, 提案手法を用いるとその映り込みを除去した画像と映り込みのみの画像に分離することができる. 結果を図 4 に示す. 図 4(a) は室内からガラス越しに屋外を撮影したときに室内の置物の映りこんだ撮影画像 1000 枚から作成した入力画像のうちの一例, 図 4(b)(c) は, それぞれ分離後の映り込みのみの画像と映り込みを除去した画像の一例である.

6. むすび

本稿では, 交流電源によるシーン中の明るさの振動を捉えた動画画像からの光源分離の手法と画像のノイズ除去の手法や光源数の推定法を提案するとともに, 照明シミュレーションへの応用を紹介した. 色情報を考慮した分離結果の精度向上は今後の課題である.

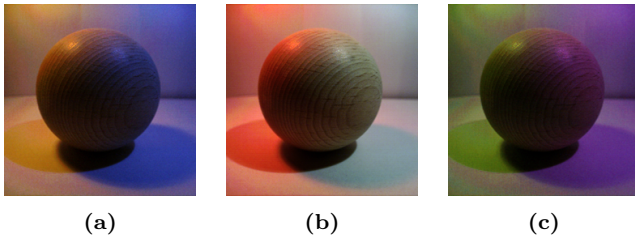


図 3 照明シミュレーション結果 (a) オレンジと青に色を変更, (b) 白熱光源のみ赤に色を変更, (c) 緑と紫に色を変更

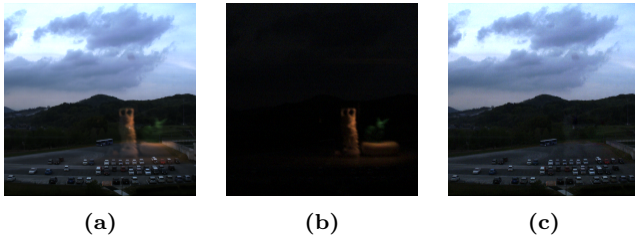


図 4 ガラスへの映り込みを除去した結果 (a) 入力画像, (b) 分離結果 (映り込みのみ), (c) 分離結果 (映り込み除去)

謝辞 本研究の一部は, JSPS 科研費 JP17H01766 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.-P. 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.