Vol.2021-NL-248 No.45
Vol.2021-CVIM-226 No.45
2021/5/21

交流光源下における鏡面反射を伴うシーンの固有画像分解

吉田　雄作[1,a)]　岡部 孝弘[2,b)]

概要：交流電源により動作している光源の明るさは，肉眼では捉えることのできない速さで振動している．短時間露光撮影で捉えたこのような光源の明るさの振動を手掛りにして，複数の光源に照らされたシーンの画像を固有画像に分解できることが知られている．ところが従来手法では，シーンが拡散反射のみで構成されることを仮定している．そこで本稿では，交流光源下における鏡面反射を伴うシーンの固有画像分解を提案する．提案手法では，2 色性反射モデルに基づき，光源ごとの拡散反射輝度画像・鏡面反射輝度画像・光源色，および，画素ごとの拡散反射率を推定する．合成画像と実画像を用いた実験を行い，提案手法の有効性を示す．

キーワード：固有画像分解，フリッカ，2 色性反射モデル

1. はじめに

我々の身の回りにある電源は交流電源であるため，その電流の大きさが周期的に変化している．交流電源に接続されて動作している光源の明るさは，電流の変化に同期して肉眼では捉えられない速さで振動している [1]．この振動はフリッカと呼ばれており，高速度カメラなどを用いて短時間露光で撮影することで確認できる．

このフリッカを利用した画像解析技術として，Sheinin ら [2] は複数の光源に照らされたシーンの画像を，各光源のみに照らされた基底画像に分離する光源分離手法を提案している．自作の特殊なカメラや光源に関する事前知識を用いることで，様々なシーンに対して頑健な光源分離を行うことができる．

これに対し，大屋ら [7] は非負値行列因子分解 （Non-negative Matrix Factorization:NMF）[3] を用いた光源分離手法を提案している．この手法は Sheinin ら [2] の手法とは異なり，自作の特殊なカメラや事前知識を必要としないという特長がある．さらに，光源分離によって得られた基底画像の画素値を反射率，照度，光源色の積で表現し，全ての要素を解析的に求める固有画像分解手法 [8] を提案している．しかし，この固有画像分解は鏡面反射が考慮されておらず，反射率と光源色の間に曖昧さが残るという問題点がある．

本研究では，大屋ら [7] の光源分離手法によって得られた基底画像に対して，鏡面反射成分を考慮した固有画像分解を行う手法を提案する．提案手法では，鏡面反射成分を含む画素を特定することが可能となり，それらの情報から鏡面反射輝度を推定することができる．これによって，より精度の高い固有画像分解を行うことができる．また，拡散反射成分のみから光源色を一意に推定することはできないが，提案手法では鏡面反射成分を考慮することで，光源色と反射率間の曖昧さを解消できることを示す．

2. 関連研究

2.1 フリッカと光源分離

1 節で示したように，交流電源で動作する光源の明るさは高速で変化しており，高速度カメラなどを用いて撮影することでフリッカを確認できる．Sheinin ら [2] は，フリッカを手がかりにして複数の光源に照らされたシーンに対して適用可能な光源分離手法を提案している．光源強度の振動パターンは光源の種類などによって異なっていることが知られている．また，光源色も光源によって異なっている．様々な光源について，これらの情報をまとめたデータベースを作成し，これを事前知識として用いることで光源分離を行う．さらに，交流電源の振動と同期して短時間露光撮影を行うことができる自作のカメラを作成した．これにより，より頑健にフリッカを捉えることができるようになるため，夜間などの暗いシーンに対しても光源分離を行うことが可能となっている

大屋ら [7] は，NMF を用いた事前知識を必要としない光源分離手法を提案している．複数の光源に照らされたシー

[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)] yoshida.yusaku158@mail.kyutech.jp
[b)] okabe@ai.kyutech.ac.jp

ⓒ 2021 Information Processing Society of Japan

ンを撮影した動画像を，各光源のみに照らされた基底画像と各光源の強度変化との積で表現する．これらの各要素が全て非負値であることから，NMF を用いて光源分離を行うことが可能となっている．また，得られた基底画像の画素値を反射率，光源色，照度の積で表現し，それぞれのパラメタに分解する固有画像分解手法 [8] を提案している．

2.2 固有画像分解

固有画像分解 [4][5][6] とは，入力画像を物体表面の反射率を画素値とする反射率画像と，光源の放射や相互反射，影などに依存する陰影画像に分解する問題である．推定された固有画像は様々な応用に利用でき，例えば反射率画像は物体認識や領域分割に，陰影画像は形状復元に有用である．単一画像からこの分解問題を解く場合，式の数に対して未知数の数の方が多くなるため不良設定問題となる．これに対して，従来研究では自然画像の統計的性質を利用した手法 [4]，Retinex 理論に基づく手法 [5] などが提案されている．

大屋らの手法では，光源分離によって得られる複数の画像を入力とすることでこの問題を解決している．これらの基底画像は同一シーンを撮影しているため，画像間の反射率が共通となる．また，各基底画像内での光源色が一定となる．これらの前提を踏まえ，基底画像の画素値を反射率，光源色，照度の積で表現する．式の数が未知数の数を上回るため，全てのパラメタを解析的に推定することが可能となる．しかし，この手法には推定値に不定性が残る，鏡面反射が考慮されていないという問題点がある．

本研究では，この固有画像分解手法に対して，鏡面反射を考慮した固有画像分解手法を提案する．また，これによって分離結果の不定性を解消できることを示す．

3. 提案手法

3.1 光源分離

時刻 t $(t = 1, 2, \ldots, T)$ の画像における画素 p $(p = 1, 2, \ldots, P)$ の画素値（RGB の 3 次元ベクトル）$\boldsymbol{i}_{pt}$ は

$$\boldsymbol{i}_{pt} = \sum_{n=1}^{N} \boldsymbol{b}_{pn} a_{nt} \tag{1}$$

のように表せる．ここで，N はシーンを照らしている光源の数，$\boldsymbol{b}_{pn}$ は n 番目の基底画像における画素 p の画素値，a_{nt} は n 番目の光源の時刻 t における強度である．式 (1) は行列を用いて

$$\boldsymbol{I} = \boldsymbol{B}\boldsymbol{A} \tag{2}$$

のように表すことができる．ここで，$\boldsymbol{I}$ は入力画像行列，$\boldsymbol{B}$ は基底画像行列，$\boldsymbol{A}$ は光源強度行列である．全ての要素が非負値であるため，NMF を用いて光源分離を行うことができる [7].

3.2 鏡面反射成分を含む画素の特定

提案手法では，3.1 節で得られた基底画像に対して，2 色性反射モデル [9] を仮定する．2 色性反射モデルは，観測される物体からの反射光を拡散反射成分と鏡面反射成分の線形結合で表現するモデルである．拡散反射成分の色は反射率と光源色に依存し，鏡面反射成分の色は光源色に依存する．よって，n 番目の基底画像のある画素 p の画素値 $\boldsymbol{b}_{pn}$ は，反射率 $\boldsymbol{r}_p$ と光源色 $\boldsymbol{l}_n$ を用いて

$$\boldsymbol{b}_{pn} = s_{pn}(\boldsymbol{r}_p \odot \boldsymbol{l}_n) + t_{pn}\boldsymbol{l}_n \tag{3}$$

のように表せる．ここで，s_{pn} と t_{pn} はそれぞれ拡散強度と鏡面強度を表し，$\odot$ はアダマール積[*1]を表す．また，全ての基底画像は同一シーンを撮影した画像であるため，基底画像間で反射率は共通の値を取る．

式 (3) において，拡散反射成分のみを仮定（$t_{pn} = 0$）すると

$$\boldsymbol{b}_{pn} = s_{pn}(\boldsymbol{r}_p \odot \boldsymbol{l}_n) \tag{4}$$

となり，従来研究 [8] の式に帰着するため，従来研究と同様の手法で解析的に各パラメタを推定することができる．

式 (4) の各パラメタ間にはスケールの不定性が存在するため，反射率 $\boldsymbol{r}_p$ と光源色 $\boldsymbol{l}_n$ に対して要素和が 1 になるようにスケールを定める．また，拡散反射成分の色は反射率と光源色の積に依存することから，反射率と光源色間にも不定性が存在するため，$\boldsymbol{l}_1 = [1/3, 1/3, 1/3]^\top$ に固定する．これによって，$n = 1$ の基底画像の画素値 $\boldsymbol{b}_{p1}$ から反射率 $\boldsymbol{r}_p$ を求めることができ，この反射率と $n = 2$ 以降のそれぞれの画素値を用いることで，残りの光源色 $\boldsymbol{l}_n$ を解析的に求めることができる．しかし，$\boldsymbol{l}_1$ を固定することで，一般に反射率と各光源色は真値と異なる．

既知である基底画像の画素 $\boldsymbol{b}_{pn}$ の数が $3PN$ であるのに対し，未知数の数は s_{pn} が PN，$\boldsymbol{r}_p$ が $3P$，$\boldsymbol{l}_n$ が $3N$ である．よって，要素和が 1 となるスケーリングを踏まえると，この解析的な推定は $3PN \geqq PN + 2P + 2N$ であるときに可能となる．画素数 P が十分に大きいときは，光源数 $N \geqq 2$ であればよい．

推定された $\boldsymbol{l}_n$ と s_{pn} を用いて，式 (4) に従って n 毎に再推定した反射率を $\boldsymbol{r}_{pn}$ とする．このとき，全ての基底画像間で反射率は共通であるため

$$\boldsymbol{e}_{pnn'} = \boldsymbol{b}_{pn} - s_{pn}(\boldsymbol{r}_{pn'} \odot \boldsymbol{l}_n) \tag{5}$$

のように定義される $\boldsymbol{e}_{pnn'}$ $(n' = 1, 2, \ldots, N)$ について，鏡面反射成分が含まれていないとき $\boldsymbol{e}_{pnn'} = \boldsymbol{0}$ が成立する．一方で，n' 番目の基底画像が鏡面反射成分を含んでいた場合，$\boldsymbol{e}_{pnn'} \neq \boldsymbol{0}$ となる．全ての画素について式 (5) を計算することで，いずれかの n で鏡面反射成分を含んでいる画素 p を特定することができる．

[*1] 同サイズのベクトル間で対応する要素ごとに積を取る

3.3 光源色の曖昧さの解決

拡散反射の色は反射率と光源色の積に依存するため，拡散反射の色のみから光源色を一意に決定することはできない．ところが，2 色性反射モデルにおいては鏡面反射の色は光源色に等しいことから，鏡面反射を手掛かりに光源色を一意に決定することができる．具体的には，3.2 節で特定された鏡面反射成分を含む全画素 P' について，交互最小二乗法により式 (3) の s_{pn} と t_{pn}，および $\boldsymbol{l}_n$ を求める．

式 (3) は反射率 $\boldsymbol{r}_{pn'}$ を用いて行列表現にすると

$$\boldsymbol{b}_{pn} = [(\boldsymbol{r}_{pn'} \odot \boldsymbol{l}_n) \quad \boldsymbol{l}_n]\,[s_{pn}\ t_{pn}]^{\mathrm{T}} \tag{6}$$

のように表せる．全ての基底画像の P' 個の画素に対して，式（6）を非負値制約の下で $[s_{pn}\ t_{pn}]^{\mathrm{T}}$ について解くことで，拡散強度 s_{pn} と鏡面強度 t_{pn} を更新する．

次に，同一基底画像内で光源色は共通であることに基づいて光源色を求める．式 (3) を P' 個並べ行列表現にすると，n 毎に

$$\boldsymbol{T}_n \boldsymbol{l}_n = \boldsymbol{E}_n \tag{7}$$

が成立する．ここで，

$$\boldsymbol{T}_n = [diag3(t_{1n})\ \ldots\ diag3(t_{P'n})]^{\mathrm{T}} \tag{8}$$

$$\boldsymbol{E}_n = \left[\boldsymbol{e}_{1nn'}^{\mathrm{T}}\ \ldots\ \boldsymbol{e}_{P'n'n}^{\mathrm{T}}\right]^{\mathrm{T}} \tag{9}$$

であり，$diag3(t)$ は対角成分に t を持つ 3×3 の対角行列である．式 (7) を $\boldsymbol{l}_n$ について解くことで，光源色 $\boldsymbol{l}_n$ を更新する．

その後，更新された値を用いて反射率 $\boldsymbol{r}_p$ を更新する．以後，値の変化が無くなるまでこれらの処理を繰り返し行うことで，各値の最適化を行う．

3.4 鏡面反射成分の分離

3.2 節で推定される P' 個の画素は，いずれかの基底画像で鏡面反射成分を含む画素であるため，その鏡面反射成分がどの光源によって与えられているかまでは分からない．しかし，前節で推定された光源色と反射率を用いることで，この鏡面反射成分を分離することが可能になる．基底画像の全画素 P について，推定された光源色と反射率を用いて式 (6) を再度解くことで，全ての s_{pn} と t_{pn} を求めることができる．求めた t_{pn} について，ある画素 p で t_{pn} が非ゼロとなる n があれば，その画素に鏡面反射成分を与えている光源 n を特定することができる．

4. 実験

提案手法の有効性を示すために合成画像実験を行った．シーンを照らしている光源数 $N = 2$ として，3.1 節の光源分離が完了している状況を想定し，図 1(a) のような 2 枚の基底画像を入力とする．これらの画像は，それぞれ相異なる色・方向を持つ 2 つの光源情報と，画像データベース内 [10] に含まれるオブジェクトの深度情報から復元した 3 次元形状を用いて，2 色性反射モデルに基づいて生成した．

また，提案手法は影領域に対しては適用できないため，前処理として影領域を除去した前景を求める（図 1(b)）．以降の処理はこの前景内の画素に対してのみ適用する．比較として示す真値や従来手法の結果に関しても，前景を適用したものとなっている．以後，図 1 の上段の画像を apple，下段の画像を teabag と呼称し，(a) の入力画像は左を $n = 1$，右を $n = 2$ とする．

各光源色の真値，従来手法（提案手法適用前）の値，および 3.3 節で得られた推定結果をそれぞれ表 1 に示す．これらの値は，RGB の要素和が 1 になるようにスケーリングが行われている．apple，teabag ともに従来手法では $n = 1$ の光源色を $[1/3, 1/3, 1/3]^{\top}$ に固定したことによっていずれの値も真値から離れた値となっているのに対し，提案手法ではこの曖昧さが解消できており，真値に近い値が得られていることが分かる．

最終的に得られる光源色以外の分離結果を図 2 および図 3 に示す．いずれの結果においても，左から真値，従来手法結果，提案手法結果を示している．(c) 鏡面強度に関しては，従来手法では推定できないため，真値と提案手法結果のみ示している．

(a) 反射率画像に注目すると，光源色と同じく従来手法では光源色の固定によって真値から離れた値となっているが，提案手法では定性的に良好な結果が得られていることが分かる．また，表 2 には，反射率画像に関して真値と各推定結果との平均平方二乗誤差（Root Mean Square Error : RMSE）を示している．こちらからも，提案手法の値は従来手法よりも小さくなっており，定量的にも良好であることが分かる．

(b) 拡散強度画像と (c) 鏡面強度画像は，最終的に得られた s_{pn} と t_{pn} をプロットした画像である．それぞれにおいて，上段が $n = 1$，下段が $n = 2$ に対応している．これらの結果より，提案手法では定性的に良好な結果が得れており，提案手法が有効であることを示している．しかし，図 3(c) に着目すると，スケーリング後の反射率の値が $[1/3, 1/3, 1/3]$ となる画素には鏡面反射成分が含まれているとして推定されていること分かる．これは，このような画素では式 (3) において画素値が光源色の定数倍のみで表現されるためである．

5. むすび

本稿では，複数の交流光源下で撮影されたシーンの画像を入力として光源分離を行い，得られた基底画像に対して鏡面反射を考慮した固有画像分解を行う手法を提案した．また，合成画像実験を行うことでその有効性を示した．実画像実験および光源色推定の精度向上は今後の課題である．

ⓒ 2021 Information Processing Society of Japan

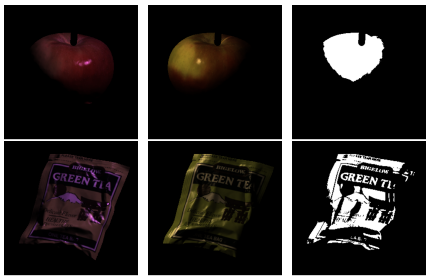


図 1: 入力画像と前景画像：(a) 入力画像，(b) 前景画像.

表 1: 光源色の真値と推定値.

(a) apple

		R	G	B
$n = 1$	真値	0.379	0.189	0.432
	従来手法	0.333	0.333	0.333
	提案手法	0.378	0.190	0.432
$n = 2$	真値	0.447	0.332	0.221
	従来手法	0.324	0.525	0.151
	提案手法	0.434	0.349	0.217

(b) teabag

		R	G	B
$n = 1$	真値	0.379	0.189	0.432
	従来手法	0.333	0.333	0.333
	提案手法	0.395	0.201	0.404
$n = 2$	真値	0.447	0.332	0.221
	従来手法	0.318	0.521	0.161
	提案手法	0.421	0.359	0.220

表 2: 反射率の真値と各推定値間の RMSE.

	従来手法	提案手法
apple	0.1020	0.0044
teabag	0.1162	0.0144

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] N. Andersson, M. Sandstrom, A. Berglund, and K. Hansson, “Amplitude modulation of light from various sources”, Lighting Research and Technology, 26(3):157—160, 1994.
[2] M. Sheinin, Y. Schechner, and K. Kutulakos, “Computational imaging on the electric grid”, In Proc. IEEE CVPR2017, pp.6437–6446, 2017.
[3] 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.
[4] 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.
[5] E. Land and J. McCann, “Lightness and retinex theory”,

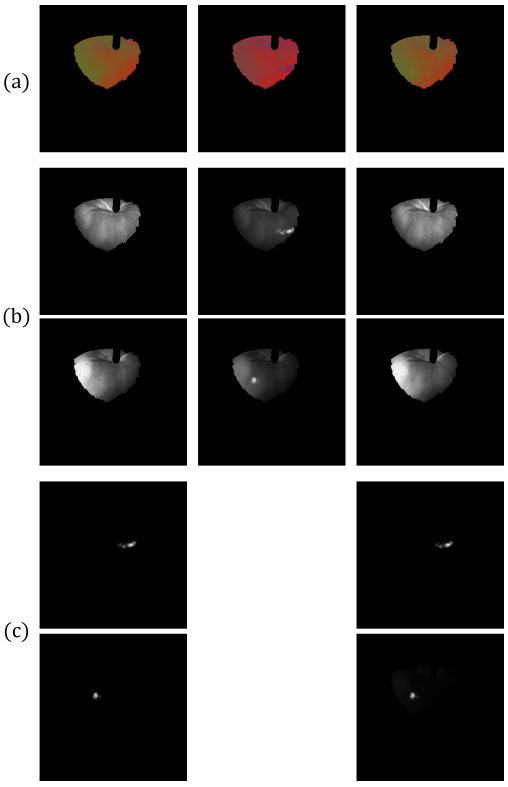


図 2: apple の分解結果：(a) 反射率画像，(b) 拡散強度画像，(c) 鏡面強度画像．それぞれ左から真値，従来手法の結果，提案手法の結果.

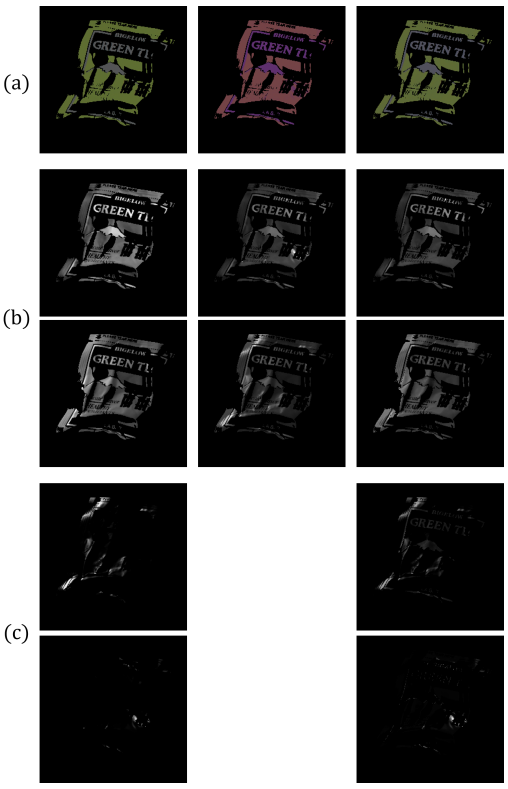


図 3: teabag の分解結果：(a) 反射率画像，(b) 拡散強度画像，(c) 鏡面強度画像．それぞれ左から真値，従来手法の結果，提案手法の結果.

ⓒ 2021 Information Processing Society of Japan

JOSA, 61(1):1–11, 1971.
[6] R. Matsuoka, T. Baba, and M. Okuda, “Reflectance estimation and white balancing using multiple images”, In Proc. IEEE ICIP2015, pp.407–411, 2015.
[7] R. Oya, R. Matsuoka and T, Okabe “NMF vs. ICA for Light Source Separation under AC Illumination”, In Proc. the 15th International Conference on Computer Vision Theory and Applications (VISAPP2020), pp.460-465, February 2020, Valletta, Malta. (short oral)
[8] 大屋, 松岡, 岡部, “フリッカに基づく固有画像分解とその色補正への応用”, FIT2019 予稿集, H-030, 2019.
[9] S.A.Shafer, “Using color to separate reflection components”, COLOR Research and Application, Vol.10, No.4, pp.210–218, 1985.
[10] J. Barron, and J. Malik, “Shape, illumination, and reflectance from shading”, IEEE TPAMI, 38(7):1670–1687, 2015.

ⓒ 2021 Information Processing Society of Japan