

# 照度推定に基づく蛍光成分付与による質感編集

日高 大地<sup>1</sup> 岡部 孝弘<sup>2</sup>

## 概要：

蛍光物体とは、入射光に含まれる波長のうち、ある波長領域の光を吸収してより長波長の光として放出する特性をもつ物体である。出射光の波長が入射光の波長と等しい反射光に加えて、蛍光を放つことから、反射物体と比べるとより発色がよく、際立って見えるような印象を与える。これまで画像中の物体の光学的特性を編集するさまざまな質感編集手法が提案されてきたが、蛍光に関する質感編集は実現されていない。そこで本稿では、単一画像中の拡散反射物体に蛍光成分を付与することで蛍光に関する質感編集を実現する。蛍光成分を付与するためには物体表面上の各点で分光照度を推定する必要があることを示すとともに、光源環境や物体形状の復元を行うことなく、3バンドの分光照度を画像から直接推定する手法を提案する。

キーワード：質感編集, 蛍光物体, 分光照度

## 1. はじめに

蛍光物体は入射光に含まれる波長のうち、ある波長領域の光を吸収し、それらを長波長側にシフトしたような波長の光で放出する特性をもつ物体であり、塗料や植物、鉱石など人工物、自然物問わず実シーン中に多く存在している [1]。反射物体においては、入射光が物体表面で反射した光が観測される。このときの波長は入射光に含まれる光の波長に等しい。入射光の波長と等しいか、等しくないかが反射光と蛍光の大きな違いである。蛍光物体の明るさは、吸収する波長を表す吸収スペクトルと放出する波長を表す放出スペクトルを用いて、反射成分と蛍光成分の和でモデル化されている [2]。

質感編集とは画像中の物体の表面の反射特性や、透明度などの光学的特性を編集するものである。物体の光学的特性は、その物体の見え方に直接影響し、物体の見えは光源環境や物体の形状にも依存している。そのため、物体の見えを編集する質感編集では、設定した光学的特性を反映させるために、光源環境や物体形状に関する情報が必要である。これまでに、既知の奥行き画像と法線画像を用いた手法 [3] や、単一画像のみから光源環境、物体形状の復元を行う質感編集手法 [4] が提案されているが、蛍光に関する質感編集は実現されていない。拡散反射物体が蛍光特性を持っていた場合の見えを表現するという点でも、蛍光特性の視覚的効果を検証するという点でも、蛍光に関する質感

編集の有用性は高い。そこで本稿では、単一画像中の拡散反射物体に蛍光成分を付与する手法を提案し、蛍光に関する質感編集を実現する。

具体的には、拡散反射光と蛍光発光の強度が双方とも物体を照らす光の強度、つまり分光照度に依存するという点に着目する。画像から得られる拡散反射成分から照度を推定できることを示した上で、推定した照度とユーザが設定する(吸収スペクトルと放出スペクトルからなる)蛍光特性を用いて蛍光成分を求める手法を提案する。画像から直接照度を推定することで、その画像中の光源環境や物体形状の復元を行うことなく、シーンに即した蛍光成分を求めることができる。実画像を用いた実験を行い、提案手法の有効性を確認するとともに、照明シミュレーションへの応用を実現する。

## 2. 提案手法

### 2.1 基本的な原理

蛍光物体の明るさは反射成分と蛍光成分の和で表現される。つまり蛍光物体を撮影した画像のある画素の画素値  $i$  は反射成分  $r$  と蛍光成分を  $f$  を用いて、

$$i = r + f \quad (1)$$

と表される。

画像中の物体が拡散反射物体であったときの画素値は反射成分のみとなる。そこで、式 (1) と同じかたちになるように蛍光成分を付与することができれば、拡散反射物体から蛍光物体への質感編集を実現できる。蛍光成分の付与に

<sup>1</sup> 九州工業大学大学院情報工学府先端情報工学専攻

<sup>2</sup> 九州工業大学大学院情報工学府知能情報工学研究室

あたり、提案手法では既存の蛍光成分のモデルを用いて蛍光成分を求める。そのためには物体を照らす光の強度つまり照度が必要になることを示したうえで、拡散反射成分から照度を推定する手法を提案する。

## 2.2 蛍光成分のモデル

蛍光物体は吸収スペクトル、放出スペクトルという蛍光物体特有の分光特性をもっている。吸収スペクトルと光源の分光強度の積を全波長で積分したものが吸収光の強度となる。また、吸収光と放出スペクトルとの積で蛍光成分は求まる [2]。実シーン中では物体は様々な方向から照らされており、蛍光物体を分光感度が  $c_k(\lambda)$  ( $k = R, G, B$ ) のカメラで撮影した場合、波長  $\lambda$  で、方向ベクトル  $\boldsymbol{\omega}$  からの光源の分光強度を  $l(\lambda, \boldsymbol{\omega})$ 、画素  $\boldsymbol{x}$  における物体表面法線を  $\boldsymbol{n}(\boldsymbol{x})$ 、蛍光物体の吸収スペクトルを  $a(\lambda)$ 、放出スペクトルを  $e(\lambda)$  とすると、画素  $\boldsymbol{x}$  における蛍光成分  $f_k(\boldsymbol{x})$  は、

$$f_k(\boldsymbol{x}) = \int c_k(\lambda) e(\lambda) d\lambda \times \int a(\lambda') \left[ \int l(\lambda', \boldsymbol{\omega}) \boldsymbol{\omega}^\top \boldsymbol{n}(\boldsymbol{x}) d\boldsymbol{\omega} \right] d\lambda' \quad (2)$$

と表せる。

提案手法ではナローバンドカメラによる撮影を仮定するとともに、 $\lambda'$  に関する積分を 3 波長の和で近似して  $f_k(\boldsymbol{x})$  を

$$f_k(\boldsymbol{x}) = c_k(\lambda_k) e(\lambda_k) \sum_{m=R,G,B} a(\lambda_m) s(\lambda_m, \boldsymbol{x}) \quad (3)$$

のように近似する。ここで  $\lambda_k$  は  $k$  バンドの分光感度のピーク波長である。 $s(\lambda_m, \boldsymbol{x})$  は画素  $\boldsymbol{x}$  において物体表面がすべての方向の光源によってどの程度照らされているかを表す 3 バンドの分光照度とし、

$$s(\lambda_k, \boldsymbol{x}) = \int l(\lambda_k, \boldsymbol{\omega}) \boldsymbol{\omega}^\top \boldsymbol{n}(\boldsymbol{x}) d\boldsymbol{\omega} \quad (4)$$

のように定める。 $a(\lambda_k)$ 、 $e(\lambda_k)$  はユーザー任意に決定するパラメータである。カメラの分光感度 (スケール) の影響は無視できるものとして、以後 1 とする。3 バンドの分光照度  $s(\lambda_k, \boldsymbol{x})$  は光源環境、物体形状に依存しているが、提案手法では分光照度と拡散反射成分の関係を利用することで、光源環境や物体形状の復元を行うことなく拡散反射成分から直接 3 バンドの分光照度を推定する。

## 2.3 拡散反射成分のモデル

ランバートモデルに従う拡散反射成分は、分光感度  $c_k(\lambda)$  のカメラで物体を撮影した場合、画素  $\boldsymbol{x}$  での物体の拡散反射率と法線、方向  $\boldsymbol{\omega}$  からの光源の 3 バンド分光強度をそれぞれ、 $\rho(\lambda, \boldsymbol{x})$ 、 $\boldsymbol{n}(\boldsymbol{x})$ 、 $l(\lambda, \boldsymbol{\omega})$  とすると、画素値  $\boldsymbol{x}$  においては

$$r_k(\boldsymbol{x}) = \int c_k(\lambda) \rho(\lambda, \boldsymbol{x}) \times \left[ \int l(\lambda, \boldsymbol{\omega}) \boldsymbol{\omega}^\top \boldsymbol{n}(\boldsymbol{x}) d\boldsymbol{\omega} \right] d\lambda \quad (5)$$

と表すことができる。

式 (2) から式 (3) への変形と同様に、ナローバンドカメラを仮定すると、入力画像中の画素  $\boldsymbol{x}$  の拡散反射成分  $r_k(\boldsymbol{x})$  を  $c(\lambda_k)$ 、 $\rho(\lambda, \boldsymbol{x})$ 、 $s(\lambda, \boldsymbol{x})$  を用いて

$$r_k(\boldsymbol{x}) = c_k(\lambda_k) \rho(\lambda_k, \boldsymbol{x}) s(\lambda_k, \boldsymbol{x}) \quad (6)$$

と表すことができる。上述と同様に  $c_k(\lambda_k) = 1$  とする。この拡散反射成分を拡散反射率で割ることで分光照度を推定できる。そのために拡散反射率を推定することを考える。

## 2.4 分光照度の推定

一般に物体表面で観測される色は拡散反射率と光源色の積で表される。拡散反射率を推定するために物体の 3 バンド分光輝度とシーンを照らすすべての光源で平均した光源の 3 バンドの分光強度を考える。

被写体がテクスチャのない物体である場合、拡散反射率は物体表面上で一様であるので、式 (6) を  $\boldsymbol{x}$  について積分して平均をとると、

$$\bar{r}_k = \rho(\lambda_k) \bar{s}_k \quad (7)$$

となる。カラーコンスタンシーに基づくと、分光照度の平均は光源色に等しいと考えられる。そこで、分光照度の平均  $\bar{s}_k$  をカラーコンスタンシーを用いて求めた光源色  $d_k$  に置き換え、式 (7) を

$$\rho(\lambda_k) = \frac{\bar{r}_k}{d_k} \quad (8)$$

のように変形し、拡散反射率を推定する。

各画素での画素値を、推定した拡散反射率で割ることで画素  $\boldsymbol{x}$  での 3 バンドの分光照度を

$$s(\lambda_k, \boldsymbol{x}) = \frac{r_k(\boldsymbol{x})}{\rho(\lambda_k)} \quad (9)$$

のように推定する。

## 2.5 蛍光成分の付与

推定した  $s(\lambda_k, \boldsymbol{x})$  を用いて蛍光成分  $f_k$  を求める。求めた蛍光成分を入力画像に付与することで出力画像とするが、ある波長の光が吸収されて蛍光として放出されるとき、その波長では反射される光が減少する。このことを表すために、吸収光の強度と拡散反射率の積を吸収によって減少した反射光とみなし、蛍光成分を付与したものからそれを減算したものを画素値とする。このときの画素値  $i_k(\boldsymbol{x})$  を蛍光成分  $f_k(\boldsymbol{x})$ 、入力画像  $r_k(\boldsymbol{x})$ 、拡散反射率  $\rho(\lambda_k)$ 、吸収スペクトル  $a(\lambda_k)$ 、照度  $s(\lambda_k, \boldsymbol{x})$  を用いて

$$i_k(\boldsymbol{x}) = r_k(\boldsymbol{x}) + f_k(\boldsymbol{x}) - \rho(\lambda_k) a(\lambda_k) s(\lambda_k, \boldsymbol{x}) \quad (10)$$

のように求める。

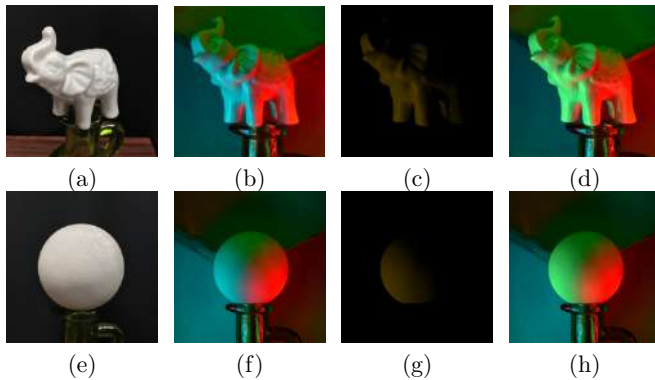


図 1 3色の光源で照らされたシーンでの実験：(a)(e) 被写体の像と球，(b)(f) 入力画像，(c)(g) 提案手法で求めた蛍光成分，(d)(h) 結果画像

### 3. 実験

まず，図 1(a)(e) に示すようなテクスチャを持たない物体での実験を行った．この実験では特定波長領域のみの光を吸収し，より長波長の光を放出する蛍光特性を再現できているかを検証するために図 1(b)(f) に示すように，対象物体が異なる 3 方向から赤緑青の 3 色の光源で照らされているようなシーンを撮影した画像を入力画像とした．本実験では，被写体の拡散反射率が物体表面上の位置によらず一定であるものと仮定し，光源の分光強度は隣接する画素の画素値の変化量の平均が灰色になることを仮定したグレイエッジ仮設 [5] を用いて推定した．

$a(\lambda_k)$  と  $e(\lambda_k)$  をそれぞれ  $[0.0,0.0,0.4]$ ， $[0.4,0.3,0.0]$ ，つまり青色の光を吸収し，黄色の光で放出するように設定した場合に提案手法によって求めた蛍光成分を図 1(c)(g) に示し，それを入力画像に付与した結果を図 1(g)(h) に示す．結果から分かる通り青色の光で照らされている領域のみで蛍光成分を付与できており，定性的に良好な結果が得られた．

これまで物体の拡散反射率が物体表面上で一様であると仮定してきたが実際はほとんどの物体にはテクスチャ，つまり模様が存在するためこの仮定は成り立たない．そこで反射率の推定をテクスチャごとに行うことで，この問題を解決する．入力画像中の対象物体を色の閾値を用いて領域分割した後，分割された領域ごとに反射率を推定した．この実験結果を図 2 に示す．領域分割することで，図 2(d) に示すように，蛍光成分を付与する領域（今回は紙コップの模様がある部分）を選択することも可能となった．

また，実際の蛍光物体の画像と提案手法によって合成された画像の比較実験を行った．この実験では蛍光物体であるテニスボールを撮影した画像図 3(a) を，反射成分と蛍光成分に分離する従来手法を用いて分離した 2 つの画像図 3(b)(c) のうち，反射成分のみの画像図 3(c) を入力画像とした．また，放出スペクトルに関しては，蛍光成分のみの画像から求めた．この入力画像のみから提案手法で求めた

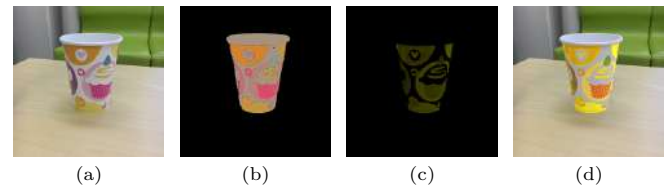


図 2 太陽光と蛍光灯で照らされたシーンでの実験：(a) 入力画像 (b) 推定した反射率画像 (c) 提案手法で求めた蛍光成分 (d) 結果画像

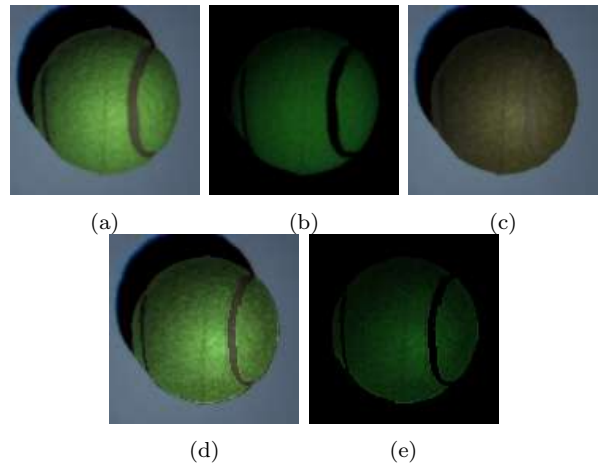


図 3 蛍光物体との比較実験：(a) テニスボールの画像 (b) 従来手法により分離された蛍光成分 (c) 従来手法により分離された反射成分 (d) 結果画像 (e) 提案手法で求めた蛍光成分

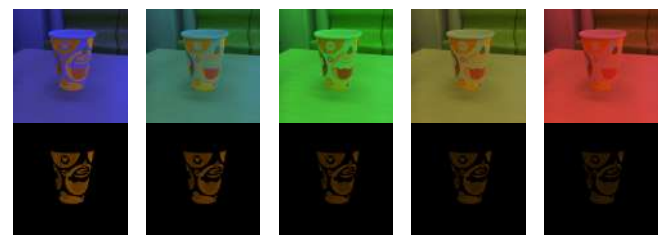


図 4 照明シミュレーション

蛍光成分図 3(e) と結果画像図 3(d) を分離後の蛍光成分と実画像とでそれぞれで比較を行ったところ，求めた蛍光成分に球の陰影が十分に反映されており，結果画像としても，違和感のない画像が生成された．一方，求めた蛍光成分には本来の蛍光成分にはないハイライトが確認できる．これは入力画像に鏡面反射が含まれていることが原因であり，入力画像から鏡面反射を除去することの必要性が確認できた．

応用として，シーン全体の色を変更し，照明シミュレーションを行った結果を図 4 に示す．上下それぞれ結果画像と対応する蛍光成分のみの画像である．この実験でも  $a(\lambda_k)$  と  $e(\lambda_k)$  をそれぞれ  $[0.0,0.0,0.4]$ ， $[0.4,0.3,0.0]$  としており，光源色が青色から離れていくにつれてつまり，吸収する光が少なくなることで蛍光成分も減少しており，定性的に良好な結果が得られたといえる．また，光源色の変化によらず蛍光成分の色が一定であるという性質も再現できており，このことから提案手法の有効性が確認できた．

## 4. むすび

本稿では、単一画像中の拡散反射物体に蛍光成分を付与する手法を提案した。そのためには、物体表面上の各点で分光照度を推定する必要があることを示したうえで、光源環境や物体形状の復元を行うことなく画像から直接3バンドの分光照度を推定する手法を提案し、蛍光に関する質感編集を実現した。実画像を用いた実験では提案手法の有効性を確認するとともに、被写体の陰影を正確に蛍光成分に反映させるためには、入力画像から鏡面反射の除去が必要であることも確認した。また、照明シミュレーションへの応用も実現した。

現在は、反射率がテクスチャごとに一様であることなどを仮定しており照度推定に課題が残っているため、照度推定をもっともらしくすること、鏡面反射成分を持つ物体への蛍光成分の付与などが今後の予定として挙げられる。

謝辞 本研究の一部は、JSPS 科研費 JP16H01676 の助成を受けた。

## 参考文献

- [1] K. Barnard, “Color constancy with fluorescent surfaces”, In Proc. CIC1999, pp.257–261, 1999.
- [2] C. Zhang and I. Sato, “Separating reflective and fluorescent components of an image”, In Proc. IEEE CVPR 2011, pp.185–192, 2011.
- [3] G. Liu, D. Ceylan, and E. Yumer, “Material editing using a physically based rendering Network”, In Proc. ICCV 2017, pp.2261–2269, 2017.
- [4] E. Khan, E. Reinhard, R. Fleming, and H. Bülthoff, “Image-based material editing”, In Proc. ACM SIGGRAPH 2006, pp.654–663, 2006.
- [5] J. van de Weijer and T. Gevers, “Color constancy based on the grey-edge hypothesis”, In Proc. ICIP 2005, Part II, pp.722–725, 2005.