

蛍光物体のモデリングと その任意照明下画像の生成・編集への応用

北原 雅啓*

岡部 孝弘†

1 はじめに

蛍光物体は反射光に加えて、入射光を吸収し物体に固有の分光分布の蛍光を放出する。また、蛍光放出光の分光強度のピークは吸収した入射光よりも長波長にシフトし、その差はストークスシフトと呼ばれる。蛍光物体は繊維や染料、植物など身近に無数に存在し、ランダムに集められたシーン中の20%に蛍光物体が存在するという報告[2]もある。

近年コンピュータビジョン分野において蛍光を含むシーンの解析が注目を集めており、蛍光放出光の分光分布が、シーンによらず一定であることを利用したカメラ分光感度推定[6]や、蛍光放出光が物体凹部にて再帰的な反射が生じないことを利用した高精度な物体形状推定[11]、散乱した入射光と被写体から放出される蛍光を分離することで散乱媒質中の物体形状を推定する手法[9]など様々なタスクに蛍光を利用することが有効であると示されている。

蛍光物体のもつ分光特性そのものを推定しようとする手法も多く提案されており[3][7][12]、特にFuらは通常のRGBカメラを用いて数色の光源下で撮影された画像から蛍光物体の分光特性を推定して、任意の分光分布下でのリライトイング(Relighting)を可能とした[4]。しかし蛍光物体の見えは、被写体の分光特性と光源の分光分布だけではなく、被写体の法線と光源の方向にも依存するため、任意の光源分光分布・方向下でのリライトイングは不可能である。また、推定された分光特性に光源の方向と法線に起因する明るさの不定性¹が残り、シーンのクラスタリングや材質識別などといった応用の精度が低下する可能性がある。

そこで本稿では、光源色の異なる画像を解析する分光イメージングと光源方向の異なる画像を解析する照度差ステレオを組み合わせて、先行研究[1][5][8]に類似の多波長多方向光源装置を用いて撮影した、色や陰影が様々に変化した多波長・多方向光源下画像から蛍光物体の分光特性と法線の両方を推定する手法を提案する。そして推定された蛍光物体のモデルから、従来手法では不可能であった任意の光源分光分布・方向下でのリライトイングを行う。さらに、推定された分光特性を編集することで、蛍光物体画像の質感を制御することも可能とする。

2 提案手法

蛍光物体を撮影した画像では、反射光に加えて蛍光が観測され、その色は光源の分光分布と物体固有の分光反射率・蛍光吸収スペクトル・蛍光放出スペクトルに依存する。本研究では、撮影した画像の色と陰影の両方を考慮して、蛍光物体の分光特性と法線の推定を行う手法を提案する。

2.1 蛍光物体モデル

蛍光物体表面のある点を光源方向 o から光源分光分布 p で照射したとき、カメラバンド q で観察される画素値 i_{opq} は、反射成分 r_{opq} と蛍光成分 f_{opq} の和で、

$$i_{opq} = r_{opq} + f_{opq} \quad (1)$$

$$r_{opq} = \int \rho(\lambda) l_p(\lambda) c_q(\lambda) d\lambda \mathbf{s}_o^\top \mathbf{n} \quad (2)$$

$$f_{opq} = \int e(\lambda) c_q(\lambda) d\lambda \int a(\lambda) l_p(\lambda) d\lambda \mathbf{s}_o^\top \mathbf{n} \quad (3)$$

のように記述される。ここで、 λ は光の波長、 $\rho(\lambda)$ は分光反射率、 $l_p(\lambda)$ は光源の分光分布、 $c_q(\lambda)$ はカメラの分光感度、 \mathbf{s}_o は光源の方向、 \mathbf{n} は法線ベクトル、 $e(\lambda)$ は蛍光放出スペクトル、 $a(\lambda)$ は蛍光吸収スペクトルである。光源の分光分布・方向、カメラの分光感度が事前に計測して既知であると仮定すると、式中の未知数は被写体の分光反射率 $\rho(\lambda)$ 、法線ベクトル \mathbf{n} 、蛍光放出スペクトル $e(\lambda)$ 、蛍光吸収スペクトル $a(\lambda)$ である。

分光反射率、蛍光吸収スペクトルと蛍光放出スペクトルは波長に関して連続的に変化する関数のため、そのまま推定をしようとすると不良設定・不良条件問題に陥りやすい。そこで本研究では、様々な物体の分光反射率と蛍光吸収スペクトルのデータに主成分分析をかけて獲得された、分光反射率と蛍光吸収スペクトルの統計的線形結合モデル[10][4]

$$\rho(\lambda) = \sum_{j=1}^J \alpha_j b_j(\lambda) \quad (4)$$

$$a(\lambda) = \sum_{k=1}^K \beta_k v_k(\lambda) \quad (5)$$

によって解空間を制限し、安定的な推定を実現する。ここで、 α_j は分光反射率の線形結合係数、 $b_j(\lambda)$ は分光反射率の線形結

*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府先端情報工学専攻

¹推定された分光特性の大きさが実際の分光特性の大きさによるものか、光源の方向と法線によるものかが判別できない。

合基底関数, β_k は蛍光吸収スペクトルの線形結合係数, $v_k(\lambda)$ は蛍光吸収スペクトルの線形結合基底関数である。さらに, 蛍光放出光とカメラ分光感度の積の積分である蛍光色相は, 同一の分光感度のカメラで撮影した場合一定なので, 蛍光色相が推定できれば任意照明下での画像生成のような応用では問題が生じない。そこで本稿ではこの蛍光色相を推定することとする。

上記を踏まえて, 式 (2) と式 (3) に式 (4) と式 (5) を代入すると,

$$r_{opq} = \sum_{j=1}^J \alpha_j \int b_j(\lambda) l_p(\lambda) c_q(\lambda) d\lambda s_o^\top \mathbf{n} \quad (6)$$

$$f_{opq} = E_q \sum_{k=1}^K \beta_k \int v_k(\lambda) l_p(\lambda) d\lambda s_o^\top \mathbf{n} \quad (7)$$

となる。ここで E_q は蛍光色相である。

2.2 蛍光物体の法線と分光特性の推定

本研究では様々な分光分布・方向の光源下で撮影した多波長・多方向光源下画像から, $\boldsymbol{\alpha} = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_J)^\top$, $\boldsymbol{\beta} = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_K)^\top$, $\mathbf{E} = (E_1, E_2, E_3)^\top$, $\mathbf{n} = (n_x, n_y, n_z)^\top$ を推定する。全ての未知数を推定する問題は非線形問題であるため, 本研究では未知数の推定をいくつかの線形問題のステップに分解する。

蛍光物体の陰影は同一の光源方向であれば, 光源の分光分布やカメラバンドによって変化せず, それぞれの光源方向ごとに i_{opq} 光源分光分布とカメラバンドに関して和をとると,

$$\begin{aligned} i'_o &= \sum_{p=1}^P \sum_{q=1}^3 i_{opq} \\ &= \sum_{p=1}^P \sum_{q=1}^3 \left(\int \rho(\lambda) l_p(\lambda) c_q(\lambda) d\lambda + \int e(\lambda) c_q(\lambda) d\lambda \int a(\lambda) l_p(\lambda) d\lambda \right) s_o^\top \mathbf{n} \\ &= A s_o^\top \mathbf{n} \end{aligned} \quad (8)$$

となり, A は光源方向が変わっても不変である。そこで本研究ではまず照度差ステレオ [13] によって法線を以下のように推定する。

$$\mathbf{I} = (i'_1, i'_2, \dots, i'_O)^\top \quad (9)$$

$$\mathbf{S} = (s_1, s_2, \dots, s_O)^\top \quad (10)$$

$$\mathbf{n}' = A \mathbf{n} = (\mathbf{S}^\top \mathbf{S}) \mathbf{S}^\top \mathbf{I} \quad (11)$$

$$\mathbf{n} = \frac{\mathbf{n}'}{\|\mathbf{n}'\|} \quad (12)$$

ここで, 陰となっている画素値とその光源方向はランバートモデルからの外れ値となるため, 閾値で判別し除外する。推定した法線を式 (6) と式 (7) に与えると, 光源方向と法線の内

積に依存する明るさの不定性が解消されるため, 残りの未知数である分光特性の推定は Fu らの手法 [4] と同様な問題設定となる。

提案手法では, 分光反射率と蛍光吸収スペクトルが非負であることを考慮するとともに滑らかさ拘束を課して,

$$\begin{aligned} \{\hat{\boldsymbol{\alpha}}, \hat{\boldsymbol{\beta}}, \hat{\mathbf{E}}\} &= \\ \arg \min_{\boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{\beta}, \mathbf{E}} & \left\{ \sum_{o=1}^O \sum_{p=1}^P \sum_{q=1}^3 \left[i_{opq} - \left(r_{opq} + f_{opq} \right) \right]^2 \right. \\ & + w_r \int \left[\sum_{j=1}^J \alpha_j \frac{d^2 b_j(\lambda)}{d\lambda^2} \right]^2 d\lambda \\ & \left. + w_f \int \left[\sum_{k=1}^K \beta_k \frac{d^2 v_k(\lambda)}{d\lambda^2} \right]^2 d\lambda \right\} \end{aligned} \quad (13)$$

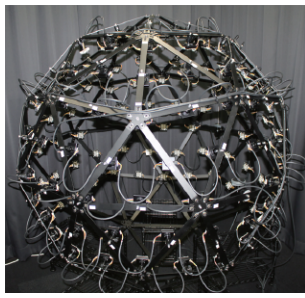
$$\begin{aligned} \text{subject to } \forall \lambda \quad & \sum_{j=1}^J \alpha_j b_j(\lambda) \geq 0, \\ \forall \lambda \quad & \sum_{k=1}^K \beta_k v_k(\lambda) \geq 0, \\ \forall q \quad & E_q \geq 0. \end{aligned} \quad (14)$$

を解くことで蛍光物体の分光特性に関する未知パラメータを推定する。ここで w_r は分光反射率の滑らかさ拘束の重み, w_f は蛍光吸収スペクトルの滑らかさ拘束の重みである。

Fu ら [4] が蛍光色相と分光反射率を交互最適化により推定をした後に蛍光吸収スペクトルを推定する手法であったのに対して, 本稿ではこの非線形最適化問題を解くために, 蛍光吸収スペクトルの線形結合係数 $\boldsymbol{\beta} = (1, 0, \dots, 0)^\top$ を初期値として, 蛍光色相 \mathbf{E} と分光反射率線形結合係数 $\boldsymbol{\alpha}$ の最小二乗法による推定と蛍光吸収スペクトルの線形結合係数 $\boldsymbol{\beta}$ の最小二乗法による推定を結果が収束するまで繰り返すことで全ての未知数を推定する。

3 実験結果

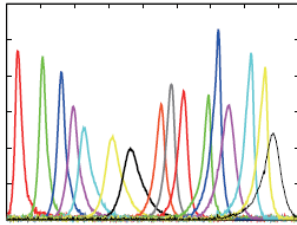
本稿では, 提案手法の定量的評価のために合成画像から推定された蛍光物体の分光特性・法線の真値との比較と, 実画像から推定された蛍光物体モデルを用いた画像生成・質感編集実験を行う。また本稿では, 分光反射率と蛍光吸収スペクトルの基底関数 J と K を先行研究 [10][4] にならい, それぞれ 8 と 9 とする。さらに, 蛍光色相の各カメラバンドの和が ($E_1 + E_2 + E_3 = 1$), 法線ベクトルは単位ベクトルであるとする。光源として図 1 に示す 128 方向に 16 色の LED クラスタをもつ光源装置 Kyutech Light Stage II の上半球 70 方向に設置した LED クラスタのうち可視光領域 400-700nm に強度のピークをもつ 11 色を用いた。



(a) 多波長・多方向光源装置



(b) LED クラスタ拡大図



(c) LED の分光分布

図 1. (a) 類似の光源装置 [1][5][8] より多数の光源色をもつ多波長・多方向光源装置 Kyutech Light Stage II, (b) 各方向に配置された LED クラスタ, (c) 各 LED の分光強度.

	蛍光色相	法線
物体 1		
物体 2		

図 3. 蛍光色相と法線の推定結果 (左) と真値 (右下). 蛍光色相は 255 倍して可視化. 法線は xyz 成分をそれぞれ RGB 値に変換して可視化.

表 1. 分光特性と法線の推定誤差

	分光反射率	蛍光吸収スペクトル	蛍光色相	法線
物体 1	0.064	0.093	0.003	0.847°
物体 2	0.079	0.184	0.008	0.769°

近く, 提案手法が有効であることが確認できる.

さらに, 表 1 に推定結果の定量的評価を示す. 分光反射率と蛍光吸収スペクトルは波長に関する真値と推定値の RMSE の一画素あたりの平均値, 蛍光色相は RGB バンドに関する真値と推定値の RMSE の一画素あたりの平均値, 法線は真値と推定値のなす角の一画素あたりの平均値を表示している. 推定に用いる入力画像にガウスノイズを加えているが, 分光特性と法線はいずれも定量的に高精度に推定ができていることがわかる.

3.2 任意照明下での蛍光物体再照明と質感編集

蛍光特性をもたない白色物体, 白色光下で桃色と橙色に見える蛍光物体をそれぞれ上, 左下, 右下に並べて Kyutech Light Stage II を用いて撮影した実画像から推定された分光特性と法線から, 先行研究では不可能な任意の分光分布・光源方向下での蛍光物体画像生成実験を行った. 図 4 からわかるように, 蛍光成分をもたない物体は光源色と同色になっているが, 蛍光成分をもつ物体では蛍光色が再現される. また, 光源の波長が長波長領域になると, 蛍光吸収スペクトルと重なりが少なくなり, 蛍光色が目立たなくなる.

さらに提案手法によって, 蛍光物体のもつ蛍光感の編集が可能となる. 蛍光物体の質感編集の例として, 図 5 に図 4 と同様の光源下において蛍光成分を除去した画像を, 図 6 に蛍光色相を変えた画像を掲載する.

4 むすび

本研究では光源方向と光源色を変えて撮影した画像の陰影と色の变化から, 蛍光物体の法線と分光特性を推定する手法

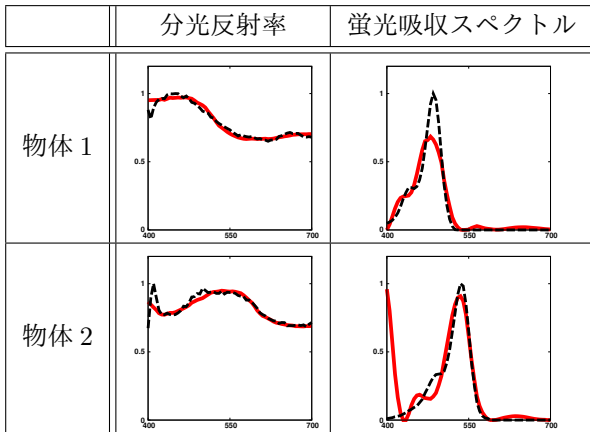


図 2. 推定された分光特性 (赤実線) と真値 (黒破線). 真値の最大値が 1 となるスケールで正規化.

3.1 分光特性と法線の評価

11 色の光源分光分布 (400-700nm にピークをもつ LED), 70 方向の光源方向, カメラの分光感度, 二つの物体の分光特性, 球の法線のデータから 70 方向 11 色の光源下で照らされた 770 枚の蛍光物体画像を生成し, 提案手法による分光特性と法線の推定を行った. また実画像実験に条件を近づけるため, 入力画像には 8bit 画像の時に分散が 4 となるスケールのガウスノイズを加えている.

図 2 に推定された分光反射率と蛍光吸収スペクトル (赤実線) と真値 (黒破線) を示す. いずれの推定結果も可視光領域の 400-700nm に関して分光特性の真値をよく近似しているが, 物体 2 の蛍光吸収スペクトルの推定結果の短波長領域に大きく誤差がある. これは今回使用した 11 色の光源に, 400nm 付近に高い強度もつものがないためだと考えられる.

図 3 に蛍光色相と法線の推定値 (左) とその真値 (右下) を示す. 蛍光色相と法線の推定結果はいずれも定量的に真値に

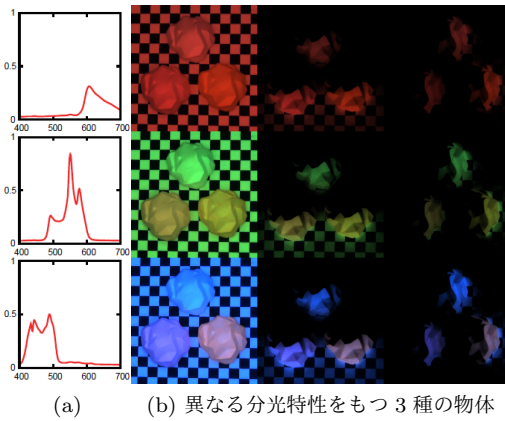


図4. 推定された分光特性と法線から生成された (a) に示す3色, 3方向 (正面, 下, 右から照射) の照明下の画像.

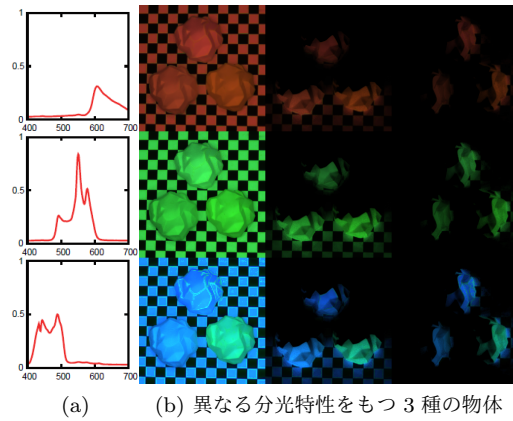


図6. 推定結果から蛍光色相を変化させて生成された (a) に示す3色, 3方向 (正面, 下, 右から照射) の照明下の画像.

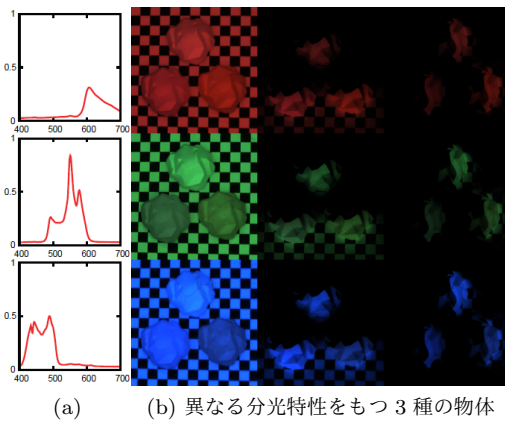


図5. 蛍光成分を除去して生成した (a) に示す3色, 3方向 (正面, 下, 右から照射) の照明下の画像.

参考文献

- [1] B. Ajdin, M. Finckh, C. Fuchs, J. Hanika, and H. Lensch, "Compressive higher-order sparse and low-rank acquisition with a hyperspectral light stage," *Technical Report WSI-2012-01*, Eberhard Karls Universität Tübingen, 2012.
- [2] K. Barnard, "Color constancy with fluorescent surfaces," In *Color and Imaging Conference*, pp.257–261, 1999.
- [3] Y. Fu, A. Lam, I. Sato, T. Okabe, and Y. Sato, "Separating reflective and fluorescent components using high frequency illumination in the spectral domain," In *Proc. CVPR2012*, pp.805–812, 2012.
- [4] Y. Fu, A. Lam, I. Sato, T. Okabe, and Y. Sato, "Reflectance and fluorescence spectral recovery via actively lit RGB images," In *J. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.38, Issue 7, pp.1313–1326, 2016.
- [5] J. Gu, and C. Liu, "Discriminative illumination: per-pixel classification of raw materials based on optimal projections of spectral BRDF," In *Proc. CVPR2012*, pp.797–804, 2012.
- [6] S. Han, Y. Matsushita, I. Sato, T. Okabe, and Y. Sato, "Camera spectral sensitivity estimation from a single image under unknown illumination by using fluorescence," In *Proc. ICCV2013*, pp.457–464, 2013.
- [7] A. Lam and I. Sato, "Spectral modeling and relighting of reflective-fluorescent scenes," In *Proc. CVPR2013*, pp.1452–1459, 2013.
- [8] M. Kitahara, T. Okabe, C. Fuchs, and H. Lensch, "Simultaneous estimation of spectral reflectance and normal from a small number of images," In *Proc. VISAPP2015*, pp.303–313, 2015.
- [9] Z. Murez, T. Trebitz, R. Ramamoorthi and D. Kriegman, "Photometric stereo in a scattering medium," In *Proc. ICCV2015*, pp.3415–3523, 2015.
- [10] J. Parkkinen, J. Hallikainen, and T. Jaaskelainen, "Characteristic spectra of Munsell colors," *JOSA A*, Vol. 6, No. 2, pp.318–322, 1989.
- [11] I. Sato, T. Okabe, and Y. Sato, "Bispectral photometric stereo based on fluorescence," In *Proc. CVPR2012*, pp.270–277, 2012.
- [12] Y. Zheng, I. Sato, and Y. Sato, "Spectra estimation of fluorescent and reflective scenes by using ordinary illuminations," In *Proc. ECCV2014*, pp.188–202, 2014.
- [13] R. Woodham, "Photometric method for determining surface orientation from multiple images," *Optical Engineering*, Vol. 19, No. 1, pp.139–144, 1980.

を提案した. 提案手法により従来手法では不可能な, 任意の光源分光分布・方向下での蛍光物体画像の生成が可能となり, 蛍光特性を変更することで質感の編集も可能となる. そして本稿では合成画像実験と実画像実験により提案手法の有効性を確認した.

本稿では分光特性と法線の推定に70方向11色の770枚の入力画像を用いた. しかし本研究の問題設定における未知数は, 分光反射率と蛍光吸収スペクトルの線形結合係数, 蛍光色相, 法線ベクトルの合計23個であり, 分光特性と法線の推定に必要な画像枚数はより少数であると考えられる. そこで今後は, 蛍光物体モデルの推定に必要な最少の入力画像枚数を明らかにすることで, より小規模な光源装置でも本研究と同様の問題を解決可能にすることを旨とする. さらに入力画像枚数の冗長性がなくなった場合, 蛍光物体モデルの推定誤差は, 各々の入力画像に含まれるランダムノイズの影響を受けやすくなるのが考えられるため, 画像を撮影する際の光源を工夫することで, ノイズに対して頑健な推定を実現する手法の開発も同時に進めたい.

謝辞

本研究の一部は, JSPS 科研費 JP16H01676, および, JP17H01766 の助成を受けた.