Vol.2017-CVIM-205 No.32
2017/1/19

少数の画像からの蛍光物体の分光特性と法線の推定

北原　雅啓[1]　岡部　孝弘[2]

概要：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統合して，多波長・多方向光源下の画像から，蛍光物体の分光特性（分光反射率と吸収スペクトル）と法線の両方を推定する手法を提案する．特に，物体表面で観察される陰の影響を考慮して，分光特性と法線を推定するのに必要な画像の枚数を明らかにするとともに，それらを少数の画像から頑健に推定するために，画素値のノイズを考慮して，最適な光源の色・方向の組合せを求める手法を提案する．提案手法により分光特性と法線の両方を推定することで，分光分布も空間分布も任意の光源環境における蛍光物体の画像生成が可能になる．

1. はじめに

蛍光は植物や紙，衣類など実シーン中でよく観測される現象であり，無作為に撮影されたシーンのうち 20%に蛍光成分を含む物体が存在するという報告もある [2]．蛍光成分を含む一般的な物体は，光源の波長に依存する反射光に加えて，光源波長に依存しない物体に固有の波長の蛍光を放出する．近年では蛍光物体に注目があつまっており，蛍光の光源波長への非依存性を利用して，従来は反射光を対象として行われていた物体の形状復元 [7][14][17][18] や，カメラ分光感度の推定 [8]，画像中の反射成分と蛍光成分の分離 [19] が行われている．また，蛍光物体の分光特性を分光イメージング [9][13][16] の枠組みで解析する研究も始まっている [4][5][11][20]．

蛍光物体に限らず，ある被写体を撮影した画像は，物体の分光特性と光源の分光分布に依存する色と，物体の形状と光源の空間分布に依存する明るさという二つの要素からなる．しかし，蛍光物体を対象としたコンピュータビジョン分野の研究は始まったばかりであり，画像の色，もしくは明るさのどちらか一方に着目した手法しか存在しない．

本研究では，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 [21] を組み合わせて，図 1 に示すような多波長 · 多方向光源装置を用いて様々な光源色 · 光源方向の下で撮影された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．

特に，本研究では物体表面で観測される陰の影響を考慮して，推定に必要な最少の入力画像枚数を導出し，少数の画像から蛍光物体の分光特性と法線を推定できることを示す．入力画像が少数になると一般に入力画像に含まれるノイズが推定結果に及ぼす影響が増大する．そこで，少数の画像から分光特性と法線を頑健に推定するために，入力画像を撮影する際に用いる光源の色と方向を最適化する手法を提案する．

本研究の主要な貢献は以下の 3 つである．

(i) 従来研究では扱えなかった蛍光物体の分光特性と法線の両方の推定
(ii) 蛍光物体の分光特性と法線の両方を推定するのに必要な入力画像枚数の導出
(iii) 光源色 · 光源方向の最適化による少数の画像からの頑健な推定の実現

本稿の構成は以下のとおりである．まず，第 2 節で関連研究をまとめ，第 3 節で蛍光物体の分光特性と法線を推定する手法を提案する．そして第 4 節で蛍光物体の分光特性と法線の推定に必要な最少の画像枚数を示し，第 5 節で入力画像を撮影する際の光源の最適化手法を提案する．第 6 節で実験結果についての報告をして，第 7 節でむすぶ．

2. 関連研究

物体形状の推定，分光特性の推定，および物体形状と分光特性の推定の三つに関して，関連研究を整理する．

2.1 物体の形状推定

ある特定領域の波長の光が蛍光物体に入射し吸収されると，蛍光物質の電子が励起状態となる．励起状態の電子が安定な基底状態に戻るときに，吸収した入射光エネルギーを光として放出するため観測される現象が蛍光である．吸

1 九州工業大学大学院情報工学府情報工学専攻
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

ⓒ 2017 Information Processing Society of Japan

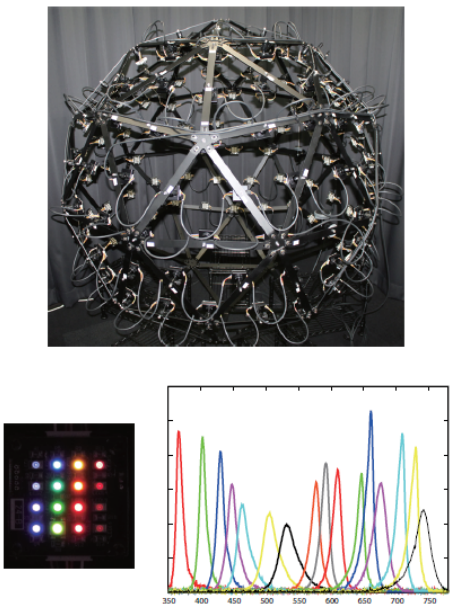

図 1 類似の光源装置 [1][6][12] よりも多数の光源色をもつ多波長・多方向光源装置 Kyutech Light Stage II と光源の分光強度.

収した入射光エネルギーの一部は熱エネルギーとして放出されるため，蛍光物質は入射光よりも長波長 (低エネルギー) にピークをもつ光を放出する．この蛍光吸収スペクトルと蛍光放出スペクトルのピークの差を Stokes シフトという．

物体の凹部では，反射光が物体表面上の他の点に入射する再帰的な反射 (相互反射) が起こりやすく，その複雑さゆえ画像の明るさからの物体形状推定が困難になる．しかし蛍光の場合は放出スペクトルが蛍光吸収スペクトルに重なることが少ないため，相互反射が生じにくい．また，Stokes シフトによって入射光と放出光のスペクトルが異なるため，多くの明るさ解析手法において精度低下の原因となる鏡面反射光 (入射光と同じスペクトルをもつ) を容易に分離可能である．

Sato らは，短波長の光を被写体に照射した際，RGB カメラで撮影を行うと，R バンド (短波長領域に関して低感度，長波長領域に関して高感度) において蛍光が支配的に観測されることを確認し，画像より分離された蛍光の明るさから照度差ステレオの枠組みで物体の法線を推定した [17]．また Treibitz らも照度差ステレオ (未較正照度差ステレオも含む)，Shape from Shading[10] といった三次元形状復元手法に蛍光を利用し，その有効性を確認した [18]．

Hullin らは，蛍光染料を溶かした液体中に物体を沈め，レーザー光を線状に照射することで，物体の形状推定を行った [7]．従来の，ライン走査レーザースキャナーによる三次元形状獲得は，物体からの反射光 (線) を観測していた．薄めた牛乳のような液体にレーザーによってライン光を入射すると，多重散乱するが，蛍光液体中では単一散乱となり，液中に蛍光の面ができる．Hullin らの手法では，この蛍光の面を遮る物体により生じる境界線を観測することによって，従来手法では困難であった，透明物体や半透明物体，ツヤのある物体の形状推定が可能になる．Murez らは，散乱媒質中に存在する蛍光物体に照度差ステレオを適用した [14]．散乱媒質中では，光源から発せられてた光の一部は散乱によって被写体に到達することなくカメラに達する (後方散乱光)．このため，通常は散乱媒質中での照度差ステレオ適用は困難であるが，Murez らは後方散乱光と蛍光の分光分布の違いを利用して，画像から物体から放出されたの蛍光を分離し，簡易な散乱のモデルを使用することで物体の法線を推定した．

以上は蛍光放出スペクトルの入射光への非依存性を利用して被写体の幾何形状を推定する研究である．しかし，蛍光の形状のみを求める手法では，画像の色解析ができない．そのため，任意の分光分布下での照明シミュレーションなどといった応用のためには，分光イメージング [9][13][16] の枠組みで，蛍光物体の分光特性を推定する必要がある．

2.2 物体の分光特性推定

複数の分光分布をもつ光源やマルチバンドカメラを用いて被写体を撮影する分光イメージング [9][13][16] の枠組みで，蛍光物体の分光特性を推定する研究が近年盛んに行われている．

Fu らは波長的に高周波な光源と，その逆位相の光源を物体を照射することで，蛍光と反射光を分離し，蛍光物体の分光反射率，蛍光吸収スペクトルに加えて蛍光放出スペクトルを推定した [4]．また Lam と Sato は，狭帯域光と広帯域光を被写体に照射し，カメラの前面に特殊なフィルターを取り付けて撮影をすることで蛍光物体の各分光特性を観測し，任意の分光分布下での被写体の見えの生成を行った [11]．上記の二手法は，入力画像の撮影に特殊な装置の用意が必要となるが，9 色の光源で被写体を照射し，一般的な RGB カメラで撮影した画像から，蛍光物体の分光特性の推定を行う Fu らの手法 [5] によって，蛍光物体の分光特性推定は以前よりも低コストで実現可能になった．

分光イメージングの枠組みで蛍光物体を対象とした研究は，いずれも物体の幾何形状や光源の空間分布を考慮していない．画像の明るさは物体の分光特性だけでなく，物体形状にも依存するため，蛍光物体の分光特性を取得しただけでは，任意の空間分布の光源下での再照明が不可能である．また，推定された分光特性には物体形状に由来する明るさの不定性が残る．つまり，明るさの違いが分光特性のスケールによるものか，あるいは物体形状によるものかが区別できず，物体認識などの応用の際に精度の低下につながる可能性がある．

2.3 物体の形状と分光特性の推定

Kitahara らは蛍光特性を持たない反射物体を対象とし

て，物体の分光反射率と法線の推定を行い，物体の任意照明下での画像生成などに有効であることを示した [12]．しかし，蛍光特性を考慮していないため，彼らの手法を蛍光物体に適用すると画像の色を正しく認識できない．

3. 提案手法

3.1 蛍光物体モデル

蛍光成分の明るさは拡散反射成分と同様に，光源方向と法線の内積に比例する．ある平行光線 p(光源方向 $\boldsymbol{s}_p$，光源分光分布 $l_p(\lambda)$) に照らされた蛍光物体表面上の点を観察したとき，あるカメラバンド q の画素値 i_{pq} は，

$$\begin{aligned} i_{pq} &= r_{pq} + f_{pq} \\ r_{pq} &= \int l_p(\lambda)\rho(\lambda)c_q(\lambda)d\lambda \boldsymbol{s}_p^\top \boldsymbol{n} \\ f_{pq} &= E_q \int l_p(\lambda)a(\lambda)d\lambda \boldsymbol{s}_p^\top \boldsymbol{n} \\ E_q &= \int e(\lambda)c_q(\lambda)d\lambda \end{aligned} \tag{1}$$

のように表現される．ここで r_{pq} は画像中の反射成分，f_{pq} は蛍光成分，λ は光の波長，$\rho(\lambda)$ は物体表面の分光反射率，$c_q(\lambda)$ はカメラ分光感度，単位ベクトルである $\boldsymbol{n}$ は法線，E_q は蛍光色相，$a(\lambda)$ は蛍光吸収スペクトル，$e(\lambda)$ は蛍光放出スペクトルを表す．

本研究では，光源の方向と分光分布，カメラの分光感度が既知であると仮定して，物体表面上の各点における分光反射率，蛍光色相，蛍光吸収スペクトル，法線を推定する．

分光反射率は，波長に依存する物体表面の反射率を記述した連続的な関数であるためそのまま推定しようとすると不良設定・不良条件問題に陥りやすい．そのため提案手法では，分光反射率の統計的性質に基づいて解空間を制限することで，分光反射率を安定的に推定する．具体的には，Parkkinen らによる分光反射率の低次元線形結合モデル [15]

$$\rho(\lambda) = \sum_{j=1}^{J} \alpha_j b_j(\lambda) \tag{2}$$

を利用する．ここで J は分光反射率の基底数，α_j は分光反射率の線形結合係数，$b_j(\lambda)$ は基底関数である．

さらに，蛍光物質がそれぞれの波長をどの程度吸収するのかを記述する蛍光吸収スペクトル $a(\lambda)$ も，分光反射率と同様にして，蛍光吸収スペクトルの低次元線形結合モデル

$$a(\lambda) = \sum_{k=1}^{K} \beta_k v_k(\lambda) \tag{3}$$

によって解空間を制限する．ここで K は蛍光吸収スペクトルの基底の数，β_k は蛍光吸収スペクトルの線形結合係数，$v_k(\lambda)$ は基底関数である．

式 (1) に式 (2) と式 (3) を代入すると，

$$\begin{aligned} i_{pq} &= r_{pq} + f_{pq} \\ r_{pq} &= \sum_{j=1}^{J} \alpha_j \int b_j(\lambda)l_p(\lambda)c_q(\lambda)d\lambda \boldsymbol{s}_p^\top \boldsymbol{n} \\ f_{pq} &= E_q \sum_{k=1}^{K} \beta_k \int v_k(\lambda)l_q(\lambda)d\lambda \boldsymbol{s}_p^\top \boldsymbol{n} \\ E_q &= \int e(\lambda)c_q(\lambda)d\lambda \end{aligned} \tag{4}$$

が得られる．したがって，蛍光物体の分光特性と法線を推定する問題は，分光反射率の線形結合係数 α_j と，蛍光吸収スペクトルの線形結合係数 β_k，蛍光色相 E_q と法線を表す単位ベクトル $\boldsymbol{n}$ を推定する問題に帰着する．

3.2 蛍光物体の分光特性と法線の推定

図 1 のように，異なる分光分布を持つ LED からなる光源クラスタを異なる方向に配置した多波長・多方向光源装置を用いて被写体を照明する．ある画素を p 番目の $(p = 1, 2, 3, \ldots, P)$ 光源下において観察するとき，RGB カメラの q 番目 $(q = 1, 2, 3)$ のチャネルの画素値 i_{pq} は式 (4) で与えられる．

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，

$$\begin{aligned} &\{\hat{\boldsymbol{n}}, \hat{\boldsymbol{\alpha}}, \hat{\boldsymbol{\beta}}, \hat{\boldsymbol{E}}\} = \\ &\arg\min_{\boldsymbol{n},\boldsymbol{\alpha},\boldsymbol{\beta},\boldsymbol{E}} \left\{ \sum_{p=1}^{P}\sum_{q=1}^{3} \left[i_{pq} - \left(r_{pq} + f_{pq} \right) \right]^2 \right. \\ &\qquad + w_r \int \left[\sum_{j=1}^{J} \alpha_j \frac{d^2 b_j(\lambda)}{d\lambda^2} \right]^2 d\lambda \\ &\qquad \left. + w_f \int \left[\sum_{k=1}^{K} \beta_k \frac{d^2 v_k(\lambda)}{d\lambda^2} \right]^2 d\lambda \right\} \\ &\text{subject to} \sum_{j=1}^{J} \alpha_j b_j(\lambda) \geq 0, \\ &\qquad \sum_{k=1}^{K} \beta_k v_k(\lambda) \geq 0 \end{aligned} \tag{5}$$

のようにして蛍光物体の分光特性と法線を推定する．ここで $\boldsymbol{\alpha}$ は分光反射率の線形結合係数ベクトル，$\boldsymbol{\beta}$ は蛍光吸収スペクトルの線形結合係数ベクトル，w_r は分光反射率の滑らかさ重み，w_f は蛍光吸収スペクトルの滑らかさ重みである．式 (5) 中の全ての未知数を推定するために，提案手法では，法線もしくは分光特性のどちらか一方を固定して，他方を推定することを推定結果が収束するまで繰り返す．法線を固定するときには Fu らの手法 [5] によって蛍光物体の分光特性を推定し，分光特性を固定するときには照度差ステレオによって法線を推定する．また今回は初期値として $\boldsymbol{n} = (0, 0, 1)^\top$(法線がカメラ方向を向いている) を用いた．

4. 推定に必要な画像の枚数

Parkkinen ら [15] に従い，式 (2) で $J = 8$，Fu ら [5] に従い，式 (3) で $K = 9$ とすると，蛍光物体表面上のある点で，分光特性と法線を推定するためには以下の条件を満たす必要がある．

(a) 分光反射率の推定のために異なる 3 色の光源で照らされている[*1]．
(b) 蛍光吸収スペクトルの推定のために異なる 9 色の光源で照らされている[*2]．
(c) 法線の推定のため線形独立な 3 方向の光源に照らされている．

条件 (b) が満たされると，条件 (a) は満たされる．凸物体の表面上の全ての点で，条件 (b) を満たすためには各光源色について 3 方向が必要となる[*3]．このことから，条件 (b) を凸物体表面上の全ての点で満たすために必要な画像枚数は $9 \times 3 = 27$ となる．

照度差ステレオによって，凸物体表面上の全ての法線を推定するためには被写体を 7 方向以上から照射する必要がある[*4]が，27 光源を別々の方向に配置することで実現可能である．

5. 光源の最適化

提案手法では，物体表面を最低でも 1 回以上照らせる 3 方向の光源方向セットを三組，また，3 色の光源分光組も三組用意し，それぞれの光源方向セットに，異なる光源分布セットを割り当て，蛍光物体を照射し撮影した入力画像から，提案手法により蛍光物体の分光特性と法線を推定する．これにより，実用上は 3 つの異なる分光分布を持つ LED で構成されるクラスタを 3 種，各 3 個ずつ用意すれば，蛍光物体の分光特性と法線が推定できることになる．

図 1 に示す多波長 · 多方向光源装置の光源から，上節で述べた条件を満たす光源の組み合わせの選択は無数に存在する．本節では，入力画像の画素値に含まれるノイズの法線 · 分光特性の推定結果への伝搬を考慮して，最適な組み合わせを求める手法について提案する．

5.1 光源方向の最適化

Drbohlav と Chantler は，照度差ステレオにおける光源方向の最適化について議論している [3]．入力画像の画素値に平均が 0 のガウスノイズが加わるときに，画素値から法線を推定する際のノイズの伝搬を解析して，推定される法線の誤差を最小とする光源方向の組み合わせを求めている．しかし，彼らの手法では，物体表面で観察される陰の影響を考慮していない．そこで，提案手法では Kitahara ら [12] と同様に Drbohlav と Chantler の手法を陰を考慮して拡張する．蛍光物体の分光特性を固定した場合，法線の推定は光源方向に関する連立方程式を解くことになる．そのため，画素値に加わるガウスノイズの分散を σ^2 としたときに，凸物体上の全ての点で推定される法線の，最大誤差は

$$\max_{\boldsymbol{n}} \sigma^2 \mathrm{Tr}[\boldsymbol{S}^\top(\boldsymbol{n})\boldsymbol{S}(\boldsymbol{n})]^{-1} \tag{6}$$

のようにあらわされる．ここで行列 $\boldsymbol{S}(\boldsymbol{n})$ は，9 個の光源方向のうち，法線 $\boldsymbol{n}$ を持つ点が陰にならないような光源方向の 3 次元横ベクトルを縦に並べた行列であり，9 個の光源方向の 3 次元横ベクトルを縦に並べた行列 $\boldsymbol{S}$ の部分行列である．光源方向数が少ない場合，式 (6) は一般に多くの光源方向を用いる場合よりも大きくなり，光源方向の最適化がより重要となる．そこで提案手法は，

$$\{\hat{\boldsymbol{S}}\} = \arg\min_{\boldsymbol{S}} \left\{ \max_{\boldsymbol{n}} \sigma^2 \mathrm{Tr}[\boldsymbol{S}^\top(\boldsymbol{n})\boldsymbol{S}(\boldsymbol{n})]^{-1} \right\} \tag{7}$$

となるような光源方向の組み合わせ $\hat{\boldsymbol{S}}$ を最適であるとする．

本研究で入力画像の撮影に用いる光源装置は，上半球に 64 個の LED クラスタを持つ．64 方向のうち 9 方向を選択する組み合わせは ${}_{64}C_9$ 通りとなり，全探索は不可能である．そのため本稿では，まず被写体として球を真上から撮影したときに，全ての点を 1 回以上照らせる三方向のセット (Triplet) を全て求めた．そして，

- 選択された 3 つの Triplet がそれぞれ重なりをもたない (合計で 9 方向が選択されている)
- 半球面上の全ての点を 3 方向以上から照らせている

という条件を満たす 3 つの Triplet をランダムに M 個選択し，式 (6) によって光源方向の組み合わせを評価する．そして M 通りの組み合わせの中で，最も評価値が小さくなる組み合わせを最適な組み合わせとみなした．

5.2 光源色の最適化

法線を固定して蛍光物体の分光特性を推定する場合，分光反射率の推定は光源の分光分布 · 分光反射率の基底関数 · カメラ分光感度の積の積分を係数とする連立方程式を，蛍光吸収スペクトルの推定は光源の分光分布と蛍光吸収スペクトルの基底関数の積の積分を係数とする連立方程式を解くことになる．そのため光源色に関しても上記の光源方向の最適化と同様に，入力画像中のノイズの推定結果への伝搬は，

$$\sigma^2 \mathrm{Tr}[\boldsymbol{R}^\top \boldsymbol{R}]^{-1} + \sigma^2 \mathrm{Tr}[\boldsymbol{F}^\top \boldsymbol{F}]^{-1} \tag{8}$$

となる．ここで，行列 $\boldsymbol{R}$ の $(p-1) \times 3 + q$ 行 j 成分は $R_{(p-1)\times q, j} = \int l_p(\lambda)\ b_j(\lambda) c_q(\lambda) d\lambda$，行列 $\boldsymbol{F}$ の p 行 k 成分

*1 カメラバンド毎に反射光に関して異なる方程式が得られるため 3 色 ×3 バンド (≥ 8) の方程式が得られる．
*2 蛍光吸収スペクトルに関する方程式はカメラバンドが異なっても同一なので蛍光吸収スペクトルの基底数と同数の光源色が必要．
*3 光源数が 2 の場合，遮蔽輪郭線上に必ず陰が生じる．
*4 物体表面上の全ての点を 3 方向以上から照射する必要がある．単位球の射影輪郭線の長さが 2π，平行光線下で照射される輪郭線の長さは，端部が陰として扱われるので $\pi - \delta$ となる．そのため 6 方向から被写体を照射しただけでは光源数が不足する [12]．

は $F_{pk} = \int l_p(\lambda)v_k(\lambda)d\lambda$ で与えられる．

本稿では，蛍光物体の分光特性を 400nm から 700nm の範囲で推定するため，図 1 に示す 16 色の LED のうち，この範囲に高い強度をもつ 12 色の光源色から，式 (8) を最小とする 9 色の光源色を探索し，最適な組み合わせとした．

6. 実験

本稿では，提案手法の評価のために，合成画像から蛍光物体の分光特性と法線を推定した．

光源の方向 · 分光分布は図 1 の多波長 · 多方向光源装置のデータを用いた．二通りの分光反射率 · 蛍光吸収スペクトル · 蛍光色相をもつ球の画像を，式 (1) により合成した．

本研究で提案する光源の評価関数の有効性を確認するために，式 (6) と式 (8) の評価関数が良くなる光源と悪くなる光源の下で撮影された入力画像に，ガウスノイズ (画像のスケールが 256 階調であるときに $\sigma = 0, 1, 2, 4$) を加えて，分光特性と法線の推定誤差を比較する．

6.1 光源方向最適化の効果

光源方向最適化の効果を確認するため，光源色を式 (8) を最小とする 9 色としたときに，光源方向を変えて推定された法線の推定精度を比較した．具体的には光源方向は全ての ${}_{64}C_9$ の組み合わせの中から，5.1 節に示す条件を満たす 3 つの Triplet(9 方向) を 30000 組評価し，

(a) 最も評価値が良い 9 方向の組み合わせ
(b) 5000 番目に評価値が良い 9 方向の組み合わせ

を比較した[*5]．

図 2 に $\sigma = 4$ の場合の法線の推定結果を，表 1 に推定された法線の定量的な誤差を示す．また，64 方向 12 色の光源下で撮影したガウスノイズの加えられていない画像から推定された法線の平均誤差は物体 1 と物体 2 で共に 0.00° であった．実験結果から，提案手法を用いて，最良な光源方向を選択することが重要であることがわかる．

表 1 提案手法による法線推定誤差

物体 1	$\sigma = 0$	$\sigma = 1$	$\sigma = 2$	$\sigma = 4$
(a)	7.97°	7.98°	7.97°	8.01°
(b)	8.44°	8.41°	8.39°	8.30°
物体 2	$\sigma = 0$	$\sigma = 1$	$\sigma = 2$	$\sigma = 4$
(a)	10.04°	10.07°	10.09°	10.25°
(b)	11.46°	11.51°	11.63°	11.95°

6.2 光源色最適化の効果

光源色最適化の効果を確認するため，光源方向を 6.1 節の最も評価値の高い 9 方向としたときに，光源色を変えて推定した分光特性の推定精度を比較した．具体的には，12 色の光源色のうち，式 (8) によって，

(c) 最も評価値が良い 9 色の組み合わせ
(d) 最も評価値の悪い 9 色の組み合わせ

を比較した．

図 3 と図 4 に $\sigma = 4$ の時の分光反射率と蛍光吸収スペクトルの推定結果を，表 2 に推定された分光反射率，表 3 に推定された蛍光吸収スペクトル，表 4 に推定された蛍光色相の RMS 誤差の全ての点に関しての平均を示す．また，64 方向 12 色の光源下で撮影したガウスノイズの加えられていない画像から推定された分光反射率の RMS 誤差の全ての点に関しての平均は物体 1 では 0.049，物体 2 では 0.072，蛍光吸収スペクトルの RMS 誤差の全ての点に関しての平均は物体 1 では 0.092，物体 2 では 0.143，蛍光色相の RMS 誤差の全ての点に関しての平均は物体 1 では 0.028，物体 2 では 0.472 であった．

実験結果から，提案手法を用いて，最良な光源方向を選択することが重要であることがわかる．

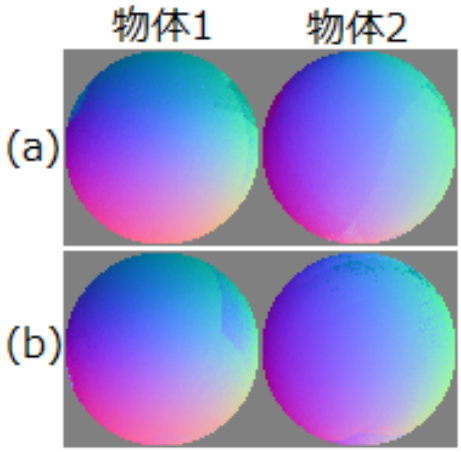

図 2 提案手法により推定された法線．法線ベクトルの xyz 成分を RGB に変換して可視化している．

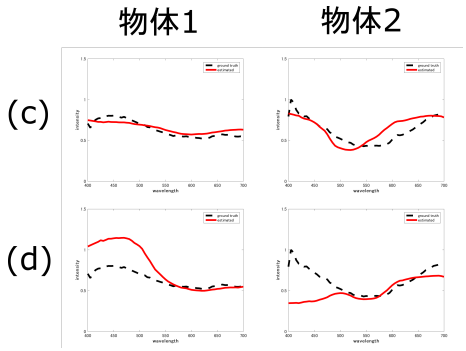

図 3 提案手法により推定された分光反射率と真値．

7. むすび

本稿では，光源の分光分布と方向を変えて撮影した少数枚の入力画像から，蛍光物体の分光特性と法線を推定する

*5 最も評価値が良くなる組み合わせと，最も評価値が悪くなる組み合わせを比較するのが本来は妥当であるが，最も評価値が悪くなる組み合わせの場合，球の表面上で法線を安定に推定できない点が現れるため今回はこのように設定した．

ⓒ 2017 Information Processing Society of Japan

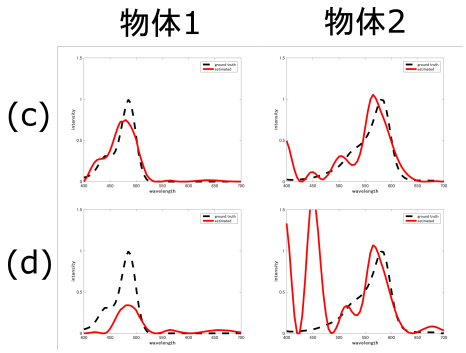

図 4　提案手法により推定された蛍光吸収スペクトルと真値.

表 2　提案手法による分光反射率推定誤差

物体 1	$\sigma = 0$	$\sigma = 1$	$\sigma = 2$	$\sigma = 4$
(c)	0.066	0.066	0.068	0.072
(d)	0.272	0.248	0.228	0.208
物体 2	$\sigma = 0$	$\sigma = 1$	$\sigma = 2$	$\sigma = 4$
(c)	0.078	0.079	0.082	0.091
(d)	0.204	0.205	0.207	0.214

表 3　提案手法による蛍光吸収スペクトル推定誤差

物体 1	$\sigma = 0$	$\sigma = 1$	$\sigma = 2$	$\sigma = 4$
(c)	0.119	0.121	0.125	0.137
(d)	0.246	0.235	0.224	0.220
物体 2	$\sigma = 0$	$\sigma = 1$	$\sigma = 2$	$\sigma = 4$
(c)	0.188	0.186	0.184	0.190
(d)	0.375	0.382	0.395	0.428

表 4　提案手法による蛍光色相推定誤差

物体 1	$\sigma = 0$	$\sigma = 1$	$\sigma = 2$	$\sigma = 4$
(c)	0.764	0.764	0.764	0.764
(d)	5.235	5.235	5.235	5.235
物体 2	$\sigma = 0$	$\sigma = 1$	$\sigma = 2$	$\sigma = 4$
(c)	0.500	0.500	0.500	0.500
(d)	5.401	5.401	5.401	5.401

手法を提案した．また，分光特性と法線の推定に必要な画像の枚数の導出も行い，入力画像を撮影する際に最適な光源の方向 · 色を求めるための評価関数を提案するとともに，実験によりその有効性を確認した．実画像実験による定量的な評価と，最適な光源方向 · 光源色の探索は今後の課題である．

謝辞

本研究の一部は，JSPS 科研費 (No. 25280057，および，No. 16H01676) の助成を受けた．

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] O. Drbohlav, M. Chantler, “On optimal light configurations in photometric stereo,” In *Proc. IEEE ICCV2005*, vol. 2, pp. 1707–1712, 2005.

[4] 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.

[5] 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, June 2016.

[6] 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.

[7] M. B. Hullin, M. Fuchs, I. Ihrke, H. -P. Seidel, and H. P. A. Lensch, “Fluorescent immersion range scanning,” In *J. ACM Trans Graph*, 27(3), pp. 87:1–87:10, 2008.

[8] 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.

[9] S. Han, I. Sato, T. Okabe, and Y. Sato, “Fast spectral reflectance recovery using DLP projector,” In *Proc. ACCV2010*, pp.323–335, 2010.

[10] K. Ikeuchi and B. K. P. Horn “Numerical shape from shading and occluding boundaries,” *Artificial intelligence*, 17(1–3), pp.141–184, 1981.

[11] A. Lam and I. Sato, “Spectral modeling and relighting of reflective-fluorescent scenes,” In *Proc. CVPR2013*, pp.1452–1459, 2013.

[12] 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.

[13] Y. Murakami, T. Obi, M. Yamaguchi, N. Ohyama, and Y. Komiya, “Spectral reflectance estimation from multiband image using color chart,” In *J. Optics communications*, 188. 1 pp.47–54, 2001.

[14] Z. Murez, T. Trebitz, R. Ramamoorthi and D. Kriegman, “Photometric stereo in a scattering medium,” In *Proc. ICCV2015*, pp.3415–3523, 2015.

[15] J. Parkkinen, J. Hallikainen, and T. Jaaskelainen, “Characteristic spectra of Munsell colors,” *JOSA A*, Vol. 6, No. 2, pp.318–322, 1989.

[16] J.-I. Park, M.-H. Lee, M. Grossberg, and S. Nayar, “Multispectral imaging using multiplexed illumination,” In *Proc. IEEE ICCV2007*, pp.1–8, 2007.

[17] I. Sato, T. Okabe, and Y. Sato, “Bispectral photometric stereo based on fluorescence,” In *Proc. CVPR2012*, pp. 270–277, 2012.

[18] T. Trebitz, Z. Murez, B. G. Mitchell and D. Kriegman, “Shape from fluorescnce,” In *Proc. ECCV2012*, pp.292–306, 2012.

[19] C. Zhang and I. Sato, “Separating reflective and fluorescent components of an image,” In *Proc. CVPR2011*, pp. 185–192, 2011.

[20] 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.

[21] R. Woodham, “Photometric method for determining surface orientation from multiple images,” *Optical Engi-*

ⓒ 2017 Information Processing Society of Japan

neering, Vol. 19, No. 1, pp.139–144, 1980.

ⓒ 2017 Information Processing Society of Japan