

未知で非一様な分光特性を持つ蛍光物体の法線推定

北原 雅啓¹ 岡部 孝弘¹ 佐藤 いまり²

概要: 蛍光を利用した照度差ステレオは、長波長領域に高い感度を持つカメラバンドと短波長の光源を用いることで、鏡面反射光などの非ランバート成分に対して頑健な法線推定が可能となる。しかし従来の手法は物体の分光特性が既知で一様であると仮定しており、法線を推定する前にカメラバンドや光源分光分布をシーンに合わせて設定する必要がある。そこで本研究では蛍光物体を対象として、未知で非一様な分光特性をもつ場合でも適用可能で、鏡面反射光に対して頑健に法線を推定可能な手法を提案する。具体的には、光源方向を変えて撮影した時の各点の輝度値変化のランバートらしさを評価する関数を提案して、多波長多方向光源下画像から最適な光源波長とカメラバンドの組み合わせを画素ごとに見つけることでこれを実現する。

1. はじめに

蛍光は植物や紙、衣類などの実シーン中でもよく観測される現象である [1]。反射光が入射光と同じ波長をもつものに対して、蛍光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。また、蛍光の明るさは光源方向ベクトルと法線ベクトルの内積 (照度) に比例する。

照度差ステレオ [14] は、光源方向を変えて撮影した複数枚の入力画像から物体表面の法線マップを推定する技術である。照度差ステレオや Shape from Shading [4] などといった物体形状の推定手法の多くは、物体表面の明るさが照度に比例するランバートモデルを仮定しているが、画像中に鏡面反射光などのランバートモデルに従わない成分が含まれる場合、形状復元の精度が悪化する。

Sato ら [11] や Treibitz ら [12] は従来の照度差ステレオや Shape from Shading が反射光から形状復元を行っていたのに対して、短波長の光源と RGB カメラを用いることで取り出された蛍光から物体形状の復元を行った。蛍光と反射光の分光分布の違いから、蛍光成分と鏡面反射を含む反射成分が分離可能となり、光沢を持つ物体表面であっても頑健な形状復元が可能となる。

しかし Sato らや Treibitz らの手法は対象となるシーンに二つの仮定を置いている。まず一つは、物体の蛍光吸収スペクトルや放出スペクトルといった分光特性が事前にわかっているという事である。蛍光吸収スペクトルと放出スペクトルは物体毎に異なるので、適切な光源分光分布やカメラバンドで観測しなければ蛍光を撮影することができ

ない可能性がある。そしてもう一つは、物体の分光特性がシーンで一様という事である。そのため複数の素材からなる被写体や、異なる分光特性を持つ複数の物体がシーン中に存在する場合、シーンの一部領域に対して適切な光源分光分布とカメラバンドが選択できたとしても、その他の領域にとってはそうではない可能性がある。

そこで本稿では、従来の蛍光照度差ステレオでは適用が困難であった未知で非一様な分光特性を持つ蛍光物体を対象として、鏡面反射光などの非ランバート成分に対しても頑健に法線を推定可能な手法を提案する。

具体的にはまず、光源方向を変えて撮影した際のある点の画素値の変化に着目する。画素値がランバートモデルに従う時に、複数方向の光源方向ベクトルを並べた光源方向行列と対応する画素値を並べた画素値ベクトルの結合行列のランクは3となる。この事実を利用して、本研究ではランバートらしさを判定する評価関数を提案する。

様々な色・方向の光源で蛍光物体を照射して RGB カメラで撮影した蛍光物体の多波長多方向光源下画像に対して評価関数を用いることで、光源色とカメラバンドの各組み合わせのランバートらしさを評価することができる。このため未知で非一様な分光特性を持つ蛍光物体であっても、ランバートモデルに近い画素値が得られる光源色とカメラバンドの組み合わせを用いて法線推定が可能となる。

さらに本研究では、光源色とカメラバンドの組み合わせを評価値の良いものから順に、複数を組み合わせた場合の画素値を評価関数に再び与えることで、法線推定に最も適した組み合わせを多波長多方向光源下画像から見つけ出し、法線推定に用いることで、より頑健な法線推定を実現

¹ 九州工業大学

² 国立情報学研究所

した。

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節で本研究で使用する蛍光物体モデルを紹介し、蛍光物体の法線を推定するために最適な光源色とカメラバンドの組み合わせを選択する手法を提案する。そして第4節で実験についての報告をして、最後に第5節でむすぶ。

2. 関連研究

照度差ステレオ [14] は光源方向を変えて撮影した複数枚の画像の陰影から物体表面の法線ベクトルを画素ごとに推定する手法である。また、古典的な照度差ステレオはランバート拡散反射光、つまり物体表面の明るさが照度に比例する反射光のみが観測されるシーンを仮定している。しかし現実のシーンにはこの仮定に従わないものが多く存在し、法線推定精度の悪化を招く。照度差ステレオを拡張する手法は明るさが照度に比例しない成分が含まれるシーン [3] や相互反射光 [9] を仮定する手法、光源方向が未校正である場合 [2] の手法など、数多く提案されているが、画像の明るさだけを用いて画像の色情報を考慮しない。しかし近年、多波長光源やカラー（マルチバンド）カメラなどを用いて得られる分光情報を利用して従来の形状復元技術を拡張する手法が提案されている。

Nam ら [8] や Liao ら [6] は物体反射率の波長依存性を利用して相互反射のモデルを解くことで、相互反射光に対して頑健に物体表面の法線を推定した。Takatani ら [13] は、物体の BRDF が波長によって異なることに着目して、複数のカラーフィルターを用いてそれぞれのフィルターごとに法線を推定した上で、物体上の異なる色の領域ごとに推定された領域の法線ベクトルを並べた行列を評価し、最適な法線を組み合わせる手法を提案した。しかし Takatani らの手法では領域のクラスタリングを必要とするため、画素毎に適用が出来ない。またこれらの手法は光源波長と観測波長が同じであると仮定している。これに対して我々の手法では光源波長と観測波長の両方を独立に考慮して、その両方を画素ごとに最適化している。

蛍光物体を対象として物体形状を推定する手法も提案されている。蛍光物質は光源中の特定領域の波長を吸収して物体固有のより長波長の光を放出し、吸収波長と放出波長のピークの差はストークスシフトと呼ばれる。ストークスシフトのため、短波長の入射光で物体を照射して長波長の帯域を観測することで反射光と蛍光が分離できる。鏡面反射光は入射光と同じ波長であるので蛍光を分離することで画像から取り除くことができる。

Sato ら [11] は、蛍光物体に短波長の光を入射して入射光よりも長波長の領域を観測することで、画像から分離された照度に比例する蛍光成分の明るさに基づいて物体の形状を推定した。また Treibitz ら [12] も Sato らと同時期に

同様な手法を提案している。従来は明るさ解析の分野で研究が進められてきた形状復元技術であるが、近年では光源の分光分布やカメラの分光感度を工夫する分光イメージング技術による拡張が注目されている。特に蛍光物体を対象とした形状復元技術では、反射光のみを仮定する手法ではランバート拡散反射より複雑なモデルや、多くの光源方向を必要としていた鏡面反射光や、相互反射光に対しても頑健にかつ容易に物体形状を復元できる。しかし蛍光物体の形状を推定する手法は、蛍光物体の分光特性が既知で、なおかつ一様である必要がある。

3. 提案手法

ある蛍光物体を撮影して得られる画素値には、その明るさがランバートモデルに従う拡散反射成分と蛍光成分に加えて、鏡面反射成分なども含まれる。画素値に鏡面反射成分が含まれる場合、画素値はランバートモデルに従わないため、一般に照度差ステレオによる法線の推定精度は悪化する。

画素値に含まれるランバートモデルに従う成分とそうでない成分の比は、光源波長・カメラ分光感度・被写体によって異なるため、照度差ステレオによって法線を推定するために適切な光源波長とカメラバンド選択することが有効であると考えられる。蛍光物体を対象とした場合、蛍光物質中の電子を励起する短波長の光源と蛍光を観測できる長波長領域に高い感度を持つバンドで被写体を観測すれば明るさが照度に比例しない鏡面反射光を含む反射光を蛍光と分離することが可能となり、頑健な法線の推定が期待できる。

3.1 蛍光物体モデル

蛍光物体は吸収した波長よりも長波長の蛍光を放出し、その明るさは照度に比例すると近似できる [11] [12]。一般的な蛍光物体では蛍光と共に反射光も観測され、その拡散反射成分の明るさもまた照度に比例すると近似できる。古典的な照度差ステレオは画素値が照度に比例すると仮定しているが、実際のシーン中にはこの仮定に従わない物体も多く存在する。

本研究では、平行光線によって照らされる蛍光物体表面上のある点の明るさを i として以下のモデルを使用する。

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

$$r = \int \rho(\lambda) l(\lambda) p(\lambda) d\lambda \mathbf{s}^\top \mathbf{n} \quad (2)$$

$$f = \int e(\lambda) p(\lambda) d\lambda \int a(\lambda') l(\lambda') d\lambda' \mathbf{s}^\top \mathbf{n} \quad (3)$$

ここで r 、 f は画像中の拡散反射成分と蛍光成分、 ϵ は画像中に含まれる鏡面反射光などの外れ値、 λ は光の波長、 $\rho(\lambda)$ は分光反射率、 $l(\lambda)$ は光源の分光分布、 $p(\lambda)$ はカメラの分光感度、 $\mathbf{s} = (s_x, s_y, s_z)^\top$ 、 $\|\mathbf{s}\|_2 = 1$ は光源方向ベクトル、 $\mathbf{n} = (n_x, n_y, n_z)^\top$ 、 $\|\mathbf{n}\|_2 = 1$ 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.

本研究では, 複数の光源方向 $d = 1, 2, \dots, D$, 複数の光源分光分布 (光源色) $c = 1, 2, \dots, C$ の下で RGB カメラ (3 バンド $b = 1, 2, 3$) により撮影した蛍光物体画像を入力とし, $T = \{\{1, 1\}, \{1, 2\}, \dots, \{c, b\}, \dots, \{C, 3\}\}$ とおく. ある光源方向 d とある光源色とカメラバンドの組み合わせ $t \in T$ における物体表面上のある点の観測画素値 i_{dt} は,

$$i_{dt} = r_{dt} + f_{dt} + \epsilon_{dt} \quad (4)$$

となる. 画素値に含まれる外れ値の比は光源色とカメラバンドの組み合わせによって異なる. 蛍光物質中の電子を励起する光源色 \hat{c} で被写体を照射して, 放出される蛍光の分光分布に対して高い感度をもつカメラバンド \hat{b} で観測をした場合, ϵ_{dt} の画素値 i_{dt} に対する比は小さくなり, 高精度に物体形状の復元が可能となる.

3.2 ランバートらしさの評価関数

物体表面上のある点の輝度値が照度に比例する場合, ある光源色 c とあるカメラバンド b の組み合わせ t で複数の光源方向 $d = 1, 2, \dots, D$ で被写体を照らした場合画素値を考えると, 得られる明るさベクトル $\mathbf{I}_t = (i_{1t}, i_{2t}, \dots, i_{Dt})^\top$ は,

$$\mathbf{I}_t = \begin{pmatrix} i_{1t} \\ i_{2t} \\ \vdots \\ i_{Dt} \end{pmatrix} = \alpha_t \begin{pmatrix} \mathbf{s}_1^\top \\ \mathbf{s}_2^\top \\ \vdots \\ \mathbf{s}_D^\top \end{pmatrix} \mathbf{n} = S^\top \mathbf{n} \quad (5)$$

となる. ここで α_t は物体表面の分光特性・光源の分光分布・カメラの分光感度によって決定される定数であり, 光源方向が変化しても一定であるため無視できる. さらに輝度値ベクトル \mathbf{I}_t と光源方向行列 S を結合した行列

$$A_t = \begin{pmatrix} i_{1t} & s_{1x} & s_{1y} & s_{1z} \\ i_{2t} & s_{2x} & s_{2y} & s_{2z} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ i_{Dt} & s_{Dx} & s_{Dy} & s_{Dz} \end{pmatrix} \quad (6)$$

を考える.

輝度値が照度に比例する場合, 任意の三次元ベクトル \mathbf{n} に対して $\mathbf{I}_t = S\mathbf{n}$ が成り立つ. つまり \mathbf{I}_t は S を成す三本の行ベクトル $\mathbf{S}_x, \mathbf{S}_y, \mathbf{S}_z$ の線形結合であるため, 行列 A_t のランクは 3 となり, k 番目の特異値 $\phi_k(A_t)$ は $k > 3$ で 0 となる. しかし, 観測される明るさに鏡面反射光や相互反射光 (その他にもノイズなど照度に比例しない成分) が含まれる場合は行列 A のランクは 3 より大きくなり, $k > 3$ であっても特異値は非 0 となる.

そこで本研究では, 行列 A_t のランクが 3 に近いかどうか, つまり光源方向を変えた時の明るさの変化 \mathbf{I}_t が照度

差ステレオの仮定に近いかどうかを判定するための評価関数 R_t を行列 A_t の特異値を用いて,

$$R(\mathbf{I}_t) = \frac{\phi_4(A_t)}{\phi_3(A_t)} \quad (7)$$

のように設計する. ここで $\phi_4(A_t)$ と $\phi_3(A_t)$ は行列 A_t の 4 番目と 3 番目の特異値である.

$R(\mathbf{I}_t)$ は \mathbf{I}_t が照度に比例するとき最小値となる 0 をとる. 光源色を変えて RGB カメラで画像を撮影した場合, それぞれの光源色とカメラバンド (RGB) の組み合わせをそれぞれ評価すると, 照度差ステレオによる法線推定に最適な光源色 \hat{c} とカメラバンド \hat{b} は,

$$\{\hat{c}, \hat{b}\} = \hat{t} = \arg \min_t R(\mathbf{I}_t) \quad (8)$$

となる. 最適な光源色 \hat{c} とカメラバンド \hat{b} で観測したときの明るさベクトル $\mathbf{I}_{\hat{t}}$ と光源方向行列 S から物体表面のベクトル $\hat{\mathbf{n}}$ は,

$$\hat{\mathbf{n}} = (S^\top S)^{-1} S^\top \mathbf{I}_{\hat{t}} \quad (9)$$

となる. さらに $\hat{\mathbf{n}}$ を長さが 1 になるように正規化する.

3.3 複数の組み合わせの選択

蛍光物体によっては, 比較的広い帯域に蛍光吸収・放出特性を持つ場合がある. さらに画素値中にはランダムな加法性ノイズが含まれている. そのため, ある単一の光源色とカメラバンドの組み合わせだけではなく, 複数の組み合わせの同時使用を許容することが蛍光を観測するために有効であると考えられる. 複数の光源色とカメラバンドの組み合わせで得られる画素値を平均することで, 広帯域に蛍光吸収・放出特性を持つ場合に対しても蛍光を上手く観測可能で, ランダムノイズの影響も軽減される.

ここで, 全ての光源色とカメラバンドの組み合わせ T を各組み合わせの評価値が良いものから N 個を選んだ部分集合 $T'(N) \subset T$ を考える. 評価値の良いものから順に複数の組み合わせを N 番目まで同時に使用した場合の評価値 m_N を

$$m_N = R \left(\sum_{t' \in T'(N)} \mathbf{I}_{t'} \right) \quad (10)$$

のように計算する. m_N を最小化する \hat{N} 番目までの組み合わせ

$$\hat{N} = \arg \min_N m_N \quad (11)$$

から照度差ステレオに最適な画素値ベクトル $\hat{\mathbf{I}}_N$ が以下のように求められる.

$$\hat{\mathbf{I}}_N = \sum_{t' \in T'(N)} \mathbf{I}_{t'} \quad (12)$$

そして法線は,

$$\hat{\mathbf{n}} = (S^\top S)^{-1} S^\top \hat{\mathbf{I}}_N \quad (13)$$

として求められる.

4. 実験

提案手法では、図3に示すような多波長・多方向光源装置を用いて撮影した蛍光物体画像を入力として、法線推定に最適な光源色・カメラバンドの組み合わせを画素ごとに自動的に選択して法線を推定する。本節では提案手法の有効性を確認するため、他の手法との比較実験を合成画像と実画像で行う。

比較する手法として今回は、式(13)による複数の光源色とカメラバンドの組み合わせを画素ごとに最適化する手法 (proposal), 式(9)による画素ごとに最も評価値の良くなる光源色とカメラバンドの組み合わせを用いる方法 (single), 光源色とカメラバンドの両方を考慮する必要があることを示すために、カメラバンドに関して画素値の平均をとった上で光源色を式(9)により画素ごとに最適化した方法 (mono), 画素ごとに最適化する有効性を示すために、光源分光分布よりも長波長に分光感度を持つカメラバンドの組み合わせを選択して、全ての点で同じ組み合わせで法線を推定する手法 (longer 1) (longer 5), そして古典的な照度差ステレオ (native) の場合の結果を示す。また longer 1 と longer 5 の違いは、光源分光分布よりも長波長に分光感度を持つという条件を満たす光源色とカメラバンドの組み合わせを何個使うかという事である。複数の候補が存在するため、光源分光分布とカメラ分光感度の組み合わせを重なりが少ない順 (よりピークが離れていると考えられる) にそれぞれ1つと5つを組み合わせさせて法線を推定した。

4.1 合成画像実験

提案手法の有効性を確認するために、図1に示す空間的に非一様な分光特性 (蛍光吸収スペクトル・蛍光放出スペクトル・分光反射率) と光沢をもつ蛍光物体の画像を合成して入力とした実験を行う。分光特性の設定には実物体のデータセット (蛍光特性 [7] と分光反射率 [10]) を用いた。光源色は6色、光源方向は球をカメラ側から照らす9方向、カメラは平行投影のRGBカメラを設定した。カメラの分光感度として、民生用のカメラ28種類のデータ [5] を用いる。さらに実画像実験に条件を近づけるために、合成した画像にガウスノイズ (256階調画像の時に標準偏差 σ が0, 1, 2, 4である場合を比較) を加えた。

図2は推定された法線ベクトルと、その推定誤差の大きさを可視化した結果 (ガウスノイズの標準偏差が $\sigma = 4$, カメラが28種類のうち Canon 1D mark III の場合の結果) である。可視化された誤差を見ると、古典的な照度差ステレオの場合 (native) や、光源色だけを最適化した場合 (mono) では入力画像中に鏡面反射光が存在する領域で推定精度が悪化していることが分かる。また、光源よりも長波長にピークを持つカメラバンドを組み合わせる手法

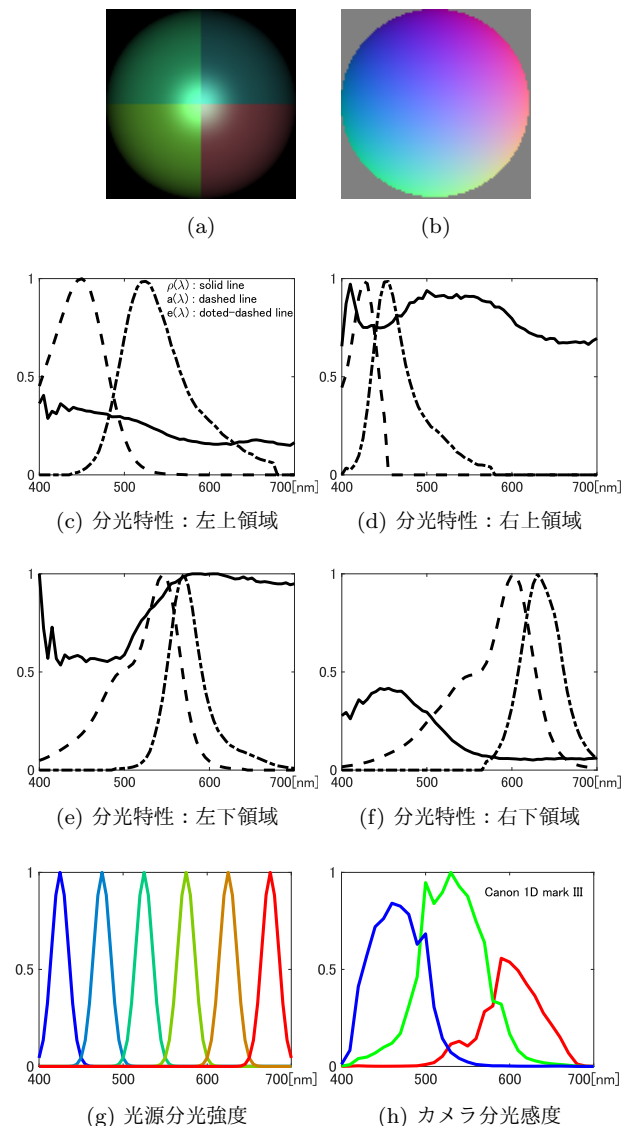


図1: 合成画像実験条件 : (a) 白色光下での蛍光物体, (b) 蛍光物体の法線, (c)(d)(e)(f) 各領域の分光特性, (g) 光源分光強度, (h) カメラ分光感度の一例

(longer 1) (longer 5) では、特に longer 1 で蛍光を観測できない領域が存在することで法線の推定精度が大きく悪化していることが分かる。一方, longer 5 の場合は蛍光を観測できているが不要でない組み合わせも使っていることで、鏡面反射光の影響が出ていると考えられる。これらの手法に対して提案手法 (proposal) (single) はいずれの領域でも比較的鏡面反射光の影響を排して法線が推定できているといえる。さらに複数の組み合わせ用いて法線を推定する場合 (proposal) は、単一の組み合わせだけを用いる場合 (single) よりも、ガウスノイズの影響と鏡面反射光の影響をともに低減できていることが分かる。表1は各手法で推定した法線の誤差をの28種類のカメラに関して平均した結果である。入力画像中のガウスノイズの標準偏差が $\sigma = 4$ である場合を除いて、提案手法 (proposal) が最も

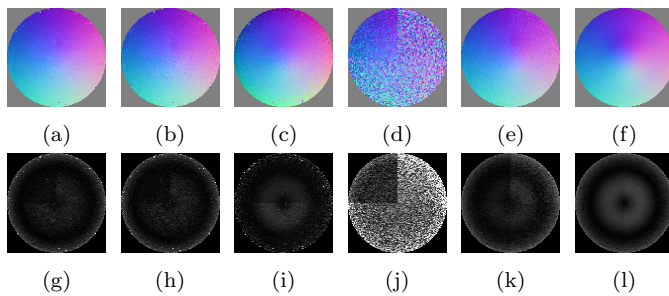


図 2: 各手法による法線推定結果と推定誤差 (0° から 90° を 0 から 255 にプロットして可視化), カメラ分光感度データ: canon 1D markIII, ガウスノイズの標準偏差: $\sigma = 4$. (a)(g)proposal, (b)(h)single, (c)(i)mono, (d)(j)longer 1, (e)(k)longer 5, (f)(l)native

良い推定精度となっている. $\sigma = 4$ の場合に mono が最も推定精度が良くなった理由として, 入力画像の SN 比がかなり悪いことと, 鏡面反射光の強度が小さいことがあげられる. mono の場合は, 入力画像をカメラバンドに関して平均してから最適化をしているため, 物体表面上の全域で提案手法と比較してガウスノイズの影響が抑えられ, また鏡面反射光の強度が小さかったため, ランバートモデルからの外れ値の影響が少なく済んだと考えられる.

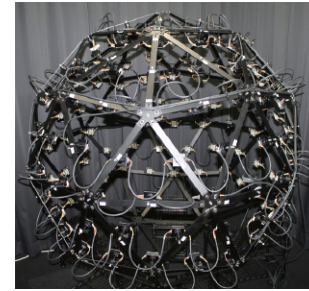
表 1: 推定された法線の誤差

	$\sigma = 0$	$\sigma = 1$	$\sigma = 2$	$\sigma = 4$
proposal	1.05°	2.03°	3.83°	8.27°
single	1.05°	2.16°	4.09°	8.58°
mono	4.46°	4.98°	5.47°	7.36°
longer 1	2.28°	11.41°	18.58°	28.29°
longer 5	3.71°	4.46°	6.02°	10.85°
native	6.39°	6.53°	7.55°	11.74°

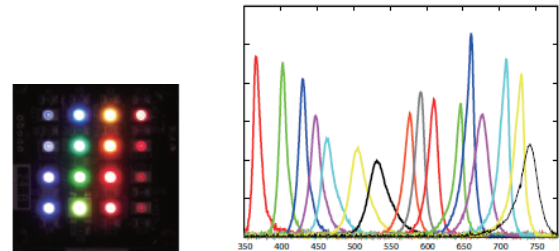
4.2 実画像実験

図 3 の多波長・多方向光源装置を用いて実際に撮影した画像 (光源装置の上半球 12 方向から可視光領域の 6 色で被写体を照らして撮影したカラー画像) を入力として, 実画像実験を行った.

図 4 は, 二種類の蛍光特性を持つ生地を巻き付けた筒を被写体とした実験結果である. 古典的な照度差ステレオの場合 (native) や, 光源色だけを最適化した場合 (mono) では鏡面反射光の影響で, 特に物体上部が歪んでいることが分かる. また, 光源よりも長波長にピークを持つカメラバンドを組み合わせる手法 (longer 1) (longer 5) では, 選択された組み合わせが適切とならない領域が存在することで形状復元結果が悪化していると考えられる. これらの手法に対して提案手法 (proposal) (single) では, いずれの領域の形状も歪みなく復元できていることが分かる. さらに複数の組み合わせを用いて法線を推定する場合 (proposal)



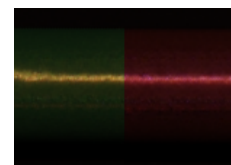
(a) 多波長・多方向光源装置



(b) LED クラスタ拡大図

(c) LED の分光分布

図 3: 128 方向に LED クラスタを持つ多波長・多方向光源装置 Kyutech Light Stage II. 上半球に配置された 12 方向の LED クラスタと可視光領域に波長のピークを持つ 6 色の光源を実画像実験の入力画像の撮影に用いる.



(a) 白色光下の蛍光物体

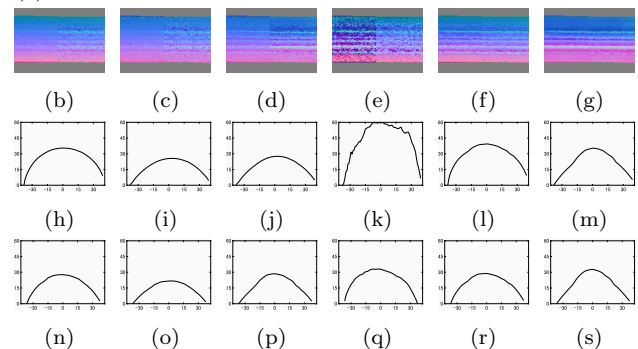


図 4: 各手法による法線推定結果と復元された筒 (異なる分光特性の 2 種類の蛍光布を巻き付けた物体) の形状: 上から, 法線ベクトル, 左側領域の形状, 右側領域の形状. 左から, proposal, single, mono, longer 1, longer 5, native.

は, 単一の組み合わせだけを用いて法線を推定する場合 (single) と比べて, 円筒のスケールを正しく復元できていることがわかる.

5. むすび

本稿では, 蛍光に基づく照度差ステレオを対象として, 多波長多方向光源装置を用いて撮影したカラー画像から,

法線推定に最適な光源色とカメラバンドの組み合わせを自動で画素ごとに選択する手法を提案した。提案手法によって、被写体の分光特性が未知であっても鏡面反射光に対して頑健に蛍光物体の法線推定が可能となる。そして合成画像と実画像による実験によって、画素ごとに最適な光源色とカメラバンドの組み合わせを選択することが蛍光物体の法線推定に有効であることを確認した。

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。

参考文献

- [1] K. Barnard, “Color constancy with fluorescent surfaces,” In *Color and Imaging Conference*, pp.257–261, 1999.
- [2] P. N. Belhumeur, D. J. Kriegman, and A. L. Yuille, “The bas-relief ambiguity,” *Inter National Journal of Computer Vision*, 35(1):pp.33–44, 1999.
- [3] S. Barsky and M. Petrou, “The 4-source photometric stereo technique for three-dimensional surfaces in the presence of highlights and shadows,” *PAMI*, 25(10):pp.1239–1252, 2003.
- [4] K. Ikeuchi and B. K. P. Horn, “Numerical shape from shading and occluding boundaries,” *Artificial intelligence*, 17(1–3), pp.141–184, 1981.
- [5] J. Jiang, D. Liu, J. Gu, and S. Susstruck, “What is the space of spectral sensitivity functions for digital color cameras?,” In *IEEE Workshop on Applications of Computer Vision*, pp.168–179, 2013.
- [6] M. Liao, X. Huang, and R. Yang, “Interreflection removal for photometric stereo by using spectrum-dependent albedo,” In *Proc. CVPR2011*, pp.689–696, 2011.
- [7] G. McNamara, A. Gupta, J. Reynaert, T. D. Coates, and C. Boswell, “Spectral imaging microscopy web sites and data,” *Cytometry Part A: the journal of the International Society for Analytical Cytology*, Vol. 69, no. 8, pp.863–871, 2006.
- [8] G. Nam and M. Kim, “Multispectral photometric stereo for acquiring high-fidelity surface normals,” *Computer graphics and applications 2014*, 34(6), pp.57–68, 2014.
- [9] S. Nayar, G. Krishnan, M. D. Grossberg, and R. Raskar, “Fast separation of direct and global components of a scene using high frequency illumination,” In *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, Vol. 25, No. 3, pp.935–944, 2006.
- [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] T. Trebitz, Z. Murez, B. G. Mitchell, and D. Kriegman, “Shape from fluorescence,” In *Proc. ECCV2012*, pp.292–306, 2012.
- [13] T. Takatani, Y. Matsushita, S. Lin, Y. Mukaigawa, and Y. Yagi, “Enhanced photometric stereo with multispectral images,” In *Conf. MVA2013*, pp.343–346, 2013.
- [14] R. Woodham, “Photometric method for determining surface orientation from multiple images,” *Optical Engineering*, Vol. 19, No. 1, pp.139–144, 1980.