H-007

光沢のある物体表面の分光反射率と法線の推定

北原　雅啓 †　　岡部 孝弘 ‡
Masahiro Kitahara　　Takahiro Okabe

1　はじめに

物体の見えは，物体表面の幾何学的特性だけでなく，光学的特性にも依存する．光沢のない物体表面上において観察される明るさは物体表面の**法線**と光源方向に，観察される色は物体表面の**分光反射率**と光源の分光分布に依存する．分光反射率は，ある波長を持つ光が物体表面に入射するときに，反射される割合を表したものである．分光反射率は，物体表面に固有の特性であり，relighting などの写実的画像生成だけでなく，物体認識や材質の識別などにも有用である．

マルチバンドカメラやマルチバンド光を用いて画像を撮影することにより色を詳細に解析する技術は，**分光イメージング**と呼ばれる．Park ら [7] や Han ら [4] は，シーンを異なる分光分布を持つ光源で照らしたときの色の変化を手掛かりにして，光沢のない物体表面の分光反射率を推定している．しかしながら，これらの手法では，光源の方向や位置を固定しているために，物体表面の法線を推定することができない．そのため，(i) 推定された分光反射率には，物体表面の法線と光源の方向の内積で決まるスケールの不定性があり，また，(ii) 光源の方向が変化するときの画像生成は不可能である．

一方，シーンを異なる方向の光源で照らしたときの明るさの変化を手掛かりにして物体表面の法線を推定する技術は，**照度差ステレオ**と呼ばれる．例えば，Woodham [9] は，物体表面の反射特性が Lambert モデルに従い，かつ，光源の明るさと方向が既知であると仮定して，最少で 3 枚の画像から法線と拡散反射率を推定している．実際には，陰（および，光沢のある物体については鏡面反射成分）の影響を考慮して，10 枚以上の画像が用いられることが多い．しかしながら，照度差ステレオでは，一般に，カラーカメラの RGB の各帯域における拡散反射率しか求めることができないため，光源の分光分布が変化したときの画像生成の精度に限界がある．

そこで本稿では，**分光イメージングと照度差ステレオを統合**して，光沢のない物体表面の分光反射率と法線の両方を推定する技術を提案する．提案手法では，Lambert モデルと分光反射率の低次元線形モデルを仮定して，様々な色・様々な方向の光源で物体を照明できるマルチスペクトル光源装置を用いて撮影した画像から，物体表面の分光反射率と法線を推定する．さらに，ロバスト推定を用いて，提案手法を光沢のある物体にも適用できるように拡張する．具体的には，RANSAC [2] を用いて，光沢のある物体表面で観察される鏡面反射成分を除去して，分光反射率と法線を頑健に推定する．

本研究では，マルチスペクトル光源装置を作成して実画像を用いた実験を行い，提案手法が光沢のない物体と光沢のある物体の両方に対して，分光反射率と法線を画素ごとに密に推定できることを確認した．本研究の主要な貢献は，分光イメージングと照度差ステレオを組合せることが，物体の幾何学的特性と光学的特性の両方のモデリングに有効であることを実験的に示した点である．

2　提案手法

2.1　反射モデル

Lambert モデルを仮定すると，平行光線に照らされた物体表面上のある点の画素値 i は

$$i = \int l(\lambda)\rho(\lambda)c(\lambda)d\lambda \; \boldsymbol{s}^\top \boldsymbol{n} \qquad (1)$$

で与えられる．ここで，λ は光の波長，$l(\lambda)$ は光源の分光分布，$\rho(\lambda)$ は分光反射率，$c(\lambda)$ はカメラの分光感度，$\boldsymbol{s}$ は光源の方向，$\boldsymbol{n}$ は法線である．提案手法では，光源の方向と分光分布，および，カメラの分光感度が既知であると仮定して，様々な色・様々な方向の光源下で観察される画素値を手掛かりにして，物体表面の分光反射率と法線を画素ごとに推定する．

分光反射率は，波長に関する連続関数であり，反射率が波長に依存してどのように変化するかを記述している．一般に，分光反射率の推定は，未知数（例えば可視光帯域における分光反射率を 5[nm] の分解能で推定しようとすれば 80 個程度）が多いために，不良設定問題・不良条件問題

†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研究院知能情報工学研究系

Copyright © 2014 by
The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers and
Information Processing Society of Japan All rights reserved.

に陥りやすい．そこで提案手法では，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，分光反射率を安定に推定する．具体的には，Parkkinen ら [8] による分光反射率の低次元線形モデルを利用する．彼らは，分光反射率の実データに対して主成分分析を適用して，任意の分光反射率が基底関数の線形結合

$$\rho(\lambda) = \sum_{k=1}^{K} \alpha_k b_k(\lambda) \tag{2}$$

で近似的に表現できることを示した．ここで，K は基底関数の数，α_k は線形結合係数，$b_k(\lambda)$ は基底関数である．なお，本研究では，Parkkinen ら [8] に従って，$K = 8$ とした．

式 (1) に式 (2) を代入すると，

$$i = \sum_{k=1}^{8} \alpha_k \int l(\lambda) b_k(\lambda) c(\lambda) d\lambda \ \boldsymbol{s}^\top \boldsymbol{n} \tag{3}$$

が得られる．したがって，分光反射率と法線の推定は，線形結合係数 α_k $(k = 1, 2, ..., 8)$ と法線 $\boldsymbol{n}$ の推定に帰着する．各画素あたりの未知数は，線形結合係数の 8 個と法線の 2 個を合わせて 10 個である *.

2.2 光沢のない物体の分光反射率と法線の推定

提案手法では，Ajdin ら [1] や Gu ら [3] と同様のマルチスペクトル光源装置を用いて，様々な色・様々な方向の光源下における画像を撮影する．光源装置は，P 個の光源クラスタからなり，各々の光源クラスタは Q 種類の異なる分光分布を持つ LED で構成されているとする．物体表面上のある点が，p 番目の方向 $(p = 1, 2, ..., P)$，かつ，q 番目の色 $(q = 1, 2, ..., Q)$ の光源に照らされているときのカラーカメラの r 番目のチャネル $(r = 1, 2, 3)$ の画素値 i_{pqr} を

$$i_{pqr} = \sum_{k=1}^{8} \alpha_k \int l_q(\lambda) b_k(\lambda) c_r(\lambda) d\lambda \ \boldsymbol{s}_p^\top \boldsymbol{n} \tag{4}$$

とする．この式を光源色 q とカメラのチャネル r に関して和をとると，

$$\begin{aligned} \hat{i}_p &= \sum_{q=1}^{Q} \sum_{r=1}^{3} \sum_{k=1}^{8} \alpha_k \int l_q(\lambda) b_k(\lambda) c_r(\lambda) d\lambda \ \boldsymbol{s}_p^\top \boldsymbol{n} \\ &= \hat{\rho} \boldsymbol{s}_p^\top \boldsymbol{n} \end{aligned} \tag{5}$$

が得られる．ここで $\hat{\rho}$ は，光源方向の添え字 p に依存しない未知のスカラーである．

*法線は長さが 1 の 3 次元ベクトルである．

行列を使って，式 (5) を

$$\begin{pmatrix} \vdots \\ \hat{i}_p \\ \vdots \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \vdots & \vdots & \vdots \\ s_{px} & s_{py} & s_{pz} \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{\rho} n_x \\ \hat{\rho} n_y \\ \hat{\rho} n_z \end{pmatrix}, \tag{6}$$

$$\hat{\boldsymbol{i}} = S(\hat{\rho}\boldsymbol{n}) \tag{7}$$

のように整理することができる †．これは，Woodham による古典的照度差ステレオと同様にして，法線を推定できることを意味している．一般に，光源の数が 3 よりも大きいときは，S の疑似逆行列を用いて，未知のスケールを含む形で

$$\hat{\rho}\boldsymbol{n} = \left(S^\top S\right)^{-1} S^\top \hat{\boldsymbol{i}} = S^{+} \hat{\boldsymbol{i}} \tag{8}$$

のように法線を推定することができる．法線が単位ベクトルであることから，法線は $\boldsymbol{n} = \hat{\rho}\boldsymbol{n}/|\hat{\rho}\boldsymbol{n}|$ のように決まる．

式 (4) に得られた法線を代入すると，分光反射率の線形結合係数 α_k に関する連立一次方程式

$$\begin{pmatrix} \vdots \\ i_{pqr} \\ \vdots \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} & \vdots & \\ \cdots & \int l_q b_k c_r d\lambda \ \boldsymbol{s}_p^\top \boldsymbol{n} & \cdots \\ & \vdots & \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \vdots \\ \alpha_k \\ \vdots \end{pmatrix} \tag{9}$$

が得られる．理論上は，上記と同様にして，疑似逆行列を用いて線形結合係数を推定することができる．実際には光源の数や種類によっては推定が不安定になることが知られているため，Park ら [7] や Han ら [4] と同様に，分光反射率が非負値であるとい拘束，ならびに，滑らかに変化するという拘束を課して線形結合係数を推定する．得られた係数を式 (2) に代入して，分光反射率が得られる．

2.3 光沢のある物体への拡張

光沢のある物体表面では，拡散反射成分だけでなく鏡面反射成分も観察される．鏡面反射成分の反射特性は Lambert モデルと大きく異なるために，鏡面反射成分は上記の提案手法による分光反射率と法線の推定を不正確にする．

そこで，ロバスト推定を用いて，提案手法を光沢のある物体にも適用できるように拡張する．具体的には，RANSAC [2] を用いて，物体表面上のある点に注目したときに，鏡面反射成分の支配的な画素（もしくはそのときの光源方向）を outlier（外れ値）とみなして除去して，分光反射率と法線を頑健に推定する．実際には，Mukaigawa ら [5] や Okabe ら [6] と同様に，以下の手続きにより法線を推定する．

†陰になっている画素は式 (5) を満たさないために，この式に含めない．実験では，画素値を閾値処理して陰を検出した．

Copyright © 2014 by
The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers and
Information Processing Society of Japan All rights reserved.

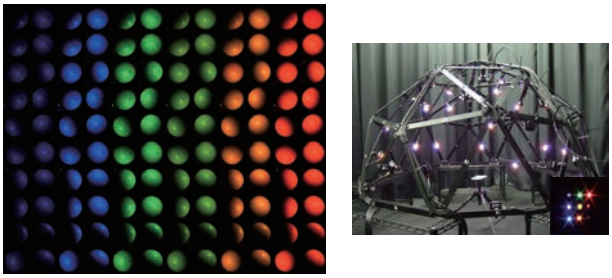


図 1: 木球の入力画像（左）とマルチスペクトル光源装置（右）．

最初に，P 個の光源方向から 3 個をランダムに選択して，これらの光源方向において観察される画素値から法線を推定する．言い換えると，式 (6) から 3 つの方程式（3 つの行）をランダムに選択して，逆行列を左からかけることで法線を推定する．このようにして推定された法線を，法線の正解候補の一つとする．

次に，法線の正解候補に対して，inlier の数を数える．具体的には，法線の正解候補がある光源方向における画素値と矛盾しない場合，つまり

$$|\hat{i}_p - \hat{\rho}\boldsymbol{n}^\top \boldsymbol{s}_p|^2 < \epsilon \tag{10}$$

を満たすときに，その光源方向を inlier とみなす．ここで ϵ は outlier を検出するために経験的に定める閾値である．

上記の 2 つのステップを繰り返して，多数の正解候補を求める．これらの正解候補のうち，inlier の数を最大とするものを最適な正解候補とみなす．最後に，最適な正解候補に対するすべての innlier を用いて，法線を再推定する．法線が推定されると同時に outlier も検出されるので，inlier のみに対して式 (9) を用いることで，分光反射率を頑健に推定することができる．

3 実験

3.1 マルチスペクトル光源装置

図 1 に，光源方向を 20（$P = 20$），光源色を 6（$Q = 6$）としたときの合計 120 枚の木球の画像（左）とマルチスペクトル光源装置（右）を示す．最初の 2 列が紫色の光源で照らしたときの画像，以下，青色，緑色，黄緑色，オレンジ色，赤色の光源で照らしたときの各々20 枚の画像であり，物体表面で観察される色が光源色に依存して変化する様子が分かる．また，同じ色の光源に照らされた 20 枚の画像に着目すると，物体表面で観察される濃淡が光源方向に依存して変化する様子も分かる．提案手法では，これらの画像を入力として，色と濃淡に基づいて，物体表面の分光反射率と法線を推定する．

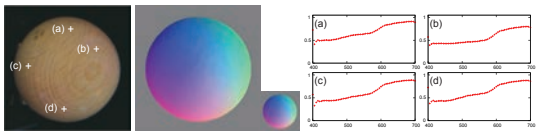


図 2: 木球の画像（左）と推定された法線（中央），および，分光反射率（右）．



図 3: カバの像の画像（左）と推定された法線（中央），および，分光反射率（右）．

3.2 定性的評価

図 2 に，木球の画像と推定結果を示す．ここでは，法線の (x, y, z) 成分を画像の (R, G, B) 値に線形にマップして表現している．法線マップの右下に挿入した参照球の法線と比較すると，提案手法を用いて法線をうまく推定できていることが分かる．右のグラフは，木球上の 4 つの点において推定された分光反射率である．この 4 点はいずれも木目から外れていて同様の分光反射率を持つと考えられるが，推定された分光反射率もほぼ一致しており，提案手法を用いて分光反射率をうまく推定できていることが分かる．

図 3 に，カバの像の画像と推定結果を示す．木球の場合と同様に，定性的には，提案手法を用いて法線と分光反射率をうまく推定できていることが分かる．なお，胴体や頭部の溝（黒い縞模様）では，反射率が小さく，また，相互反射の影響もあり，推定された法線は必ずしも正確ではない．また，分光反射率の推定結果は，溝でない箇所 (a)(b)(d) の反射率がほぼ一致していて，溝 (d) の箇所とは反射率が大きく異なることを示している．

3.3 定量的評価

提案手法の有効性を確認するために，定量的評価を行った．分光反射率に関しては，提案手法を用いてカラーチェッカーの分光反射率と法線を推定して，推定された分光反射率とスペクトロメータを用いて計測した分光反射率を比較した．図 4 に，推定値（赤の実線）と計測値（緑の破線）を示す．なお，右上のパネルについては，反射率が小さい

Copyright © 2014 by
The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers and
Information Processing Society of Japan All rights reserved.

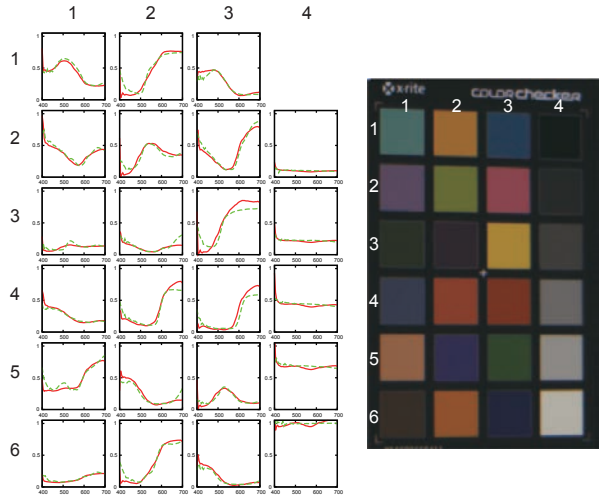


図 4: カラーチェッカーの分光反射率．提案手法による推定値（赤の実線）とスペクトロメータを用いた計測値（緑の破線）．

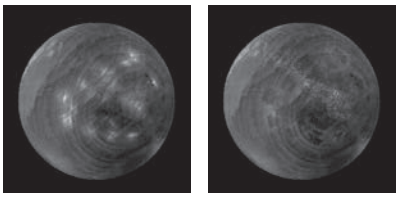


図 5: 木製の球の法線の誤差分布．ロバスト推定なし（左）とロバスト推定あり（右）．

ために陰とみなされて，推定値が得られていない．RMS 誤差の平均値は，400[nm] から 700[nm] の範囲で 0.057 であった．分光反射率の基底関数，ならびに，計測値の信頼性が低い短波長領域を除くと，425[nm] から 700[nm] の RMS 誤差は 0.039 であった．これらのことから，提案手法が分光反射率を正確に推定できていることが分かる．

図 5 に，ロバスト推定を用いなかった場合（左）とロバスト推定を用いた場合（右）の木球の法線の誤差マップを示す．画素値が大きければ大きいほど，推定された法線と真値との差の絶対値が大きい．木球は真球ではないことが見てとれるが，誤差の計算では木球を真球であると仮定した．したがって，ロバスト推定の有無で変化しない誤差は，木球の形状が真球から外れていることに起因すると考えられる．ロバスト推定を用いない場合に，表面反射成分の影響を受けて白いスポット状の誤差の大きな領域が現れるのに対して，ロバスト推定を用いることで，これらのスポット状の領域が消滅していることが分かる．誤差の平均値は，ロバスト推定を用いる場合と用いない場合で，真球からのずれも含めて，それぞれ 5.62° と 5.17° であった．したがって，定量的にも，提案手法が法線を正確に推定できることが分かる．

4 むすび

本稿では，分光イメージングと照度差ステレオを統合して，光沢のない物体の分光反射率と法線の両方を推定する手法を提案した．さらに，ロバスト推定を用いて，提案手法を光沢のある物体に適用できるように拡張した．マルチスペクトル光源装置を作成して実画像を用いた実験を行い，分光イメージングと照度差ステレオを統合することが，物体の幾何学的特性と光学的特性の両方のモデリングに有効であることを示した．光源の数や種類の最適化や鏡面反射成分のモデル化，および，相互反射の考慮などは，今後の検討課題である．

謝辞 本研究の一部は，JSPS 科研費（課題番号:25280057）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] M. Fischler and R. Bolles, “Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography,” *Communications of the ACM*, Vol. 24, No. 6, pp.381–395, 1981.

[3] J. Gu and C. Liu, “Discriminative illumination: per-pixel classification of raw materials based on optimal projections of spectral BRDF,” In *Proc. IEEE Conf. CVPR2012*, pp.797–804, 2012.

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

[5] Y. Mukaigawa, H. Miyaki, S. Mihashi, and T. Shakunaga, “Photometric image-based rendering for image generation in arbitrary illumination,” In *Proc. IEEE ICCV2001*, pp.652–659, 2001.

[6] T. Okabe and Y. Sato, “Object recognition based on photometric alignment using RANSAC,” In *Proc. IEEE CVPR2003*, pp.I-221–228, 2003.

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

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

[9] R. Woodham, “Photometric method for determining surface orientation from multiple images,” *Optical Engineering*, Vol. 19, No. 1, pp.139–144, 1980.

Copyright © 2014 by
The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers and
Information Processing Society of Japan All rights reserved.