

少数の画像からの物体表面の分光反射率と法線の推定

北原 雅啓[†]
Masahiro Kitahara

岡部 孝弘[‡]
Takahiro Okabe

1 はじめに

画像は、被写体の幾何学的・光学的な性質だけでなく、被写体を照らす光源や撮影に用いるカメラにも依存する。したがって、同一の被写体を撮影しても、光源やカメラが異なると、得られる画像もまた異なる。このような光源やカメラへの依存性は、画像に基づく認識や理解のタスクを困難にする。

分光反射率は、物体表面における入射光強度に対する反射光強度の割合を波長ごとに記述したものである。分光反射率は、物体に固有の特性であり、光源やカメラに依存しないため、物体認識などの CV への応用や照明シミュレーションなどの CG への応用に有益である。特に、RGB の 3 バンドの色情報のみを用いる場合に生じる条件等色の問題を解決することができる。

物体表面への入射光の分光照度が既知のとき、分光反射率は、各波長の反射光輝度を入射光強度で割ることで得られる。反射光の分光輝度は、スペクトロメータ、マルチスペクトルカメラ [8]、および、ハイパースペクトルカメラ [2] などを用いて計測・推定することができる。また、多波長光源を併用することで、3 バンドのカラーカメラを用いて分光反射率を推定することもできる [5, 3]。

しかしながら、入射光の照度は物体表面の法線に依存する。光源の位置・方向を固定して撮影を行う上記の手法では物体表面の法線を推定することができないため、上記の手法で得られる分光反射率には、未知の法線に起因するスケール倍の不定性がある。つまり、各画素の反射率が大きい（小さい）のか法線と光源方向の内積が大きい（小さい）のかを区別することができない。

そこで我々は、分光イメージング [5, 3] と照度差ステレオ [7] を組み合わせて、図 1 に示すような多波長・多方向光源下の画像から、物体表面の分光反射率と法線の両方を推定する手法を提案した [4]。具体的には、照度差ステレオによる法線の推定と分光イメージングによる分光反射率の推定を順に行う単純な手法が大量の画像を必要とするのに対して、最少で 9 枚の画像から分光反射率と法線を同時

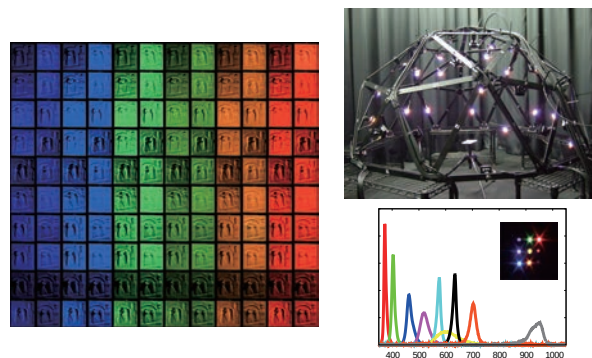


図 1: 多波長・多方向光源装置（右）を用いて撮影した石膏レリーフの画像（左）。

に推定できることを示した。また、9 枚の画像から推定を行う際に、光源の最適化が重要であることも示した。本稿では、上記の論文の内容にも触れながら、光源最適化の新たな手法を提案してその有効性を確認する。

本稿の構成は以下のとおりである。第 2 節で、多波長・多方向光源下の画像から分光反射率と法線を推定する手法を説明する。第 3 節では推定に必要な画像の枚数や光源の最適化について議論する。第 4 節で実験結果を報告して、第 5 節でむすぶ。

2 提案手法

2.1 反射モデル

ランバート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を観察したときの画素値 i は、

$$i = \int l(\lambda) \rho(\lambda) c(\lambda) d\lambda \mathbf{s}^T \mathbf{n} \quad (1)$$

のように表される。ここで λ は光の波長、 $l(\lambda)$ は光源の分光強度、 $\rho(\lambda)$ は物体表面の分光反射率、 $c(\lambda)$ はカメラの分光感度である。また、単位ベクトル $\mathbf{s}$ と $\mathbf{n}$ は、それぞれ光源方向と法線を表す。本研究では、光源の方向と分光強度、および、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と法線の両方を推定する。

[†]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知能情報工学研究室

分光反射率は、物体表面の反射率が入射光の波長に依存して変化する様子を記述したものである。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 [6] による分光反射率の低次元線形モデル

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

を利用する。ここで K は基底の数、 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、

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

が得られる。したがって、分光反射率と法線の両方を推定する問題は、分光反射率の結合係数 α_k ($k = 1, 2, 3, \dots, 8$) と法線を表す単位ベクトル $\mathbf{n}$ を推定する問題に帰着する。なお、各画素あたりの未知数は、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 分光反射率と法線の推定

図 1 のように、 Q 個の異なる分光強度を持つ LED からなる光源クラスタを P 個の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 番目の方向 ($p = 1, 2, 3, \dots, P$) で q 番目の分光強度 ($q = 1, 2, 3, \dots, Q$) を持つ光源下において観察するとき、カラーカメラの r 番目 ($r = 1, 2, 3$) のチャネルの画素値 i_{pqr} は

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

で与えられる。

提案手法では、分光反射率が非負であることを考慮するとともに滑らか拘束を課して、

$$\begin{aligned} \{\hat{\alpha}, \hat{\mathbf{n}}\} = \arg \min_{\alpha, \mathbf{n}} & \left\{ \sum_{(p,q) \in \mathcal{L}} \sum_{r=1}^3 \left[i_{pqr} - \sum_{k=1}^8 \alpha_k \int l_q(\lambda) b_k(\lambda) c_r(\lambda) d\lambda \mathbf{s}_p^\top \mathbf{n} \right]^2 \right. \\ & \left. + w \int \left[\sum_{k=1}^8 \alpha_k \frac{d^2 b_k(\lambda)}{d\lambda^2} \right]^2 d\lambda \right\} \\ \text{subject to } & \sum_{k=1}^8 \alpha_k b_k(\lambda) \geq 0 \end{aligned} \quad (5)$$

*法線は 3 次元単位ベクトルであることに注意。

のようにして分光反射率と法線を推定する。ここで、 $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_8)^\top$ は分光反射率の結合係数ベクトル、 $\mathcal{L}$ は推定に用いる光源の方向と分光強度の組合せである。

式 (5) の評価関数は分光反射率の結合係数ベクトル α と法線 $\mathbf{n}$ に関して双線形であることから、交互最小二乗法を用いて最適化を行う。つまり、一方を固定して他方に関して線形最適化を行うことを繰り返す。なお、初期値として、分光反射率は主成分に等しい $\alpha = (1, 0, 0, \dots, 0)^\top$ 、および、法線はカメラ方向に等しい $\mathbf{n} = (0, 0, 1)^\top$ の二つを試して、どちらも同様の結果になることを確認した。

3 光源の最適化

3.1 推定に必要な画像の枚数

多波長・多方向光源下の画像から物体表面の分光反射率と法線を推定するためには、以下の 3 つの条件を満たすように光源を設定する必要がある。

- (A) 物体表面上の各点は、少なくとも 4 枚の画像において光源に照らされる。つまり、各画素における方程式の数は未知数の数よりも大きい ($10 < 3 \times 4$)。
- (B) 交互最小二乗法により分光反射率の結合係数 α を更新するためには、物体表面上の各点は、少なくとも 3 種類の分光強度の光源に照らされる ($8 < 3 \times 3$)。
- (C) 交互最小二乗法により法線 $\mathbf{n}$ を更新するためには、物体表面上の各点は、少なくとも線形独立な 3 方向の光源に照らされる [7]。

我々はこれまでに、上記の条件を満たす最少の光源数を明らかにした [4]。具体的には、凸物体に対して、法線と光源方向のなす角度が鈍角の場合に生じる陰 (attached shadow) を考慮して[†]、最少で 9 枚の画像が必要であることを示した。我々の光源装置には、上記の 3 つの条件を満たす 9 光源の組合せが多数存在する。そこで本節の残りでは、最適な光源方向と光源色を選択する手法を提案する。

3.2 光源方向の最適化

Drbohlav と Chantler[1] 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。具体的には、画素値に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播を解析して、推定される法線の誤差を最小とする光源方向の組合せを求めている。しかしなが

[†] 閾値を用いた陰検出という実用上の理由から、法線と光源方向の内積がある閾値よりも小さいときに陰であるとみなす。

ら、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かった。

そこで提案手法では、Drbohlav と Chantler の手法を陰を考慮して拡張する。陰を考慮すると、画素値に加わるガウスノイズの分散を σ^2 としたときに推定される法線の誤差は

$$\sigma^2 \text{Tr} [\mathbf{S}^\top(\mathbf{n})\mathbf{S}(\mathbf{n})]^{-1} \quad (6)$$

のように表される。ここで行列 $\mathbf{S}(\mathbf{n})$ は、9 個の光源方向のうち、法線 $\mathbf{n}$ を持つ平面が陰にならないような光源方向の 3 次元縦ベクトルを横に並べた行列である。提案手法は、式 (6) の法線 $\mathbf{n}$ に関する期待値を最小とする光源方向の組合せを最適とみなす。

3.3 光源色の最適化

光源色に関しては、同一方向で異なる分光強度を持つ複数の LED を同時に点灯することを許容して、最適な光源色の組合せを求める。具体的には、上記の光源方向の最適化と同様に、

$$\sigma^2 \text{Tr} [\mathbf{R}^\top \mathbf{R}]^{-1} \quad (7)$$

を最小とする光源色の組合せを最適とみなす。ここで同時点灯を許容したときの分光強度を $l'_i(\lambda)$ ($i = 1, 2, 3$) とすると、行列 $\mathbf{R}$ の i 行 j 列成分は $R_{ij} = \int l'_i(\lambda)b_j(\lambda)c(\lambda)d\lambda$ で与えられる。なお、Park ら [5] は、同様の問題に対して、分光反射率の実データを用いた経験的なアプローチを提案している。

4 実験

4.1 最適な光源方向・光源色

図 1 に示した光源装置の 20 方向 ($P = 20$), 6 色 ($Q = 6$) の合計 120 個の光源から、前節の提案手法に基づいて 9 個の光源を選択した。図 2(a) の左に最良の光源方向を、右に最良の光源色を示す。(b) は最悪の光源方向・光源色である。光源方向は 3 次元ベクトルを xy 平面に射影して表しており、外側の円は $\theta = \pi/2$ に、内側の円は $\theta = \pi/4$ に対応している。選択された光源方向はシヤンの記号で表され、同じ記号は同じ光源色を持つ。光源色に関しては、3 種類の分光強度を RGB の実線で表している。

図 2 の (a) と (b) を比較すると、選択された光源方向は、最良の場合が比較的一様であるのに対して、最悪の場合は偏りがあることが分かる。光源色に関しては、最良の場合は 3 種類の分光強度のいずれもが、カメラの RGB の分光感度のうち複数のものと重なるように広がりを持つのに対

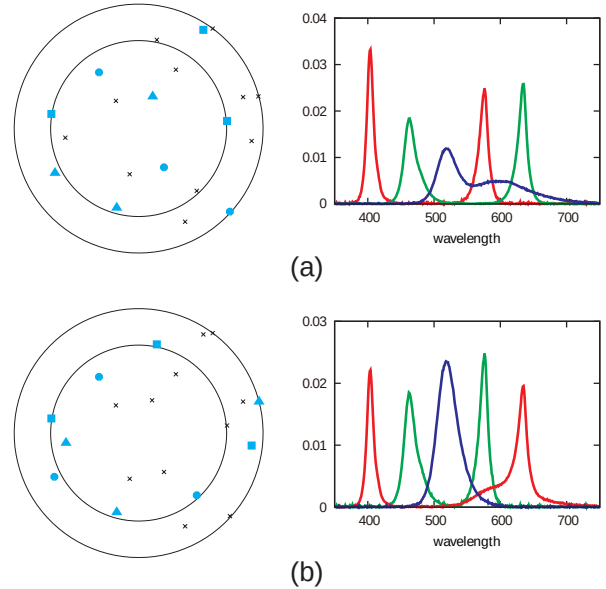


図 2: (a) 最良および (b) 最悪の光源方向・光源色。

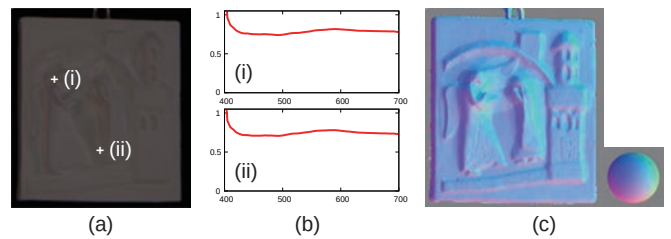


図 3: 分光反射率と法線の推定結果：石膏レリーフ

して、最悪の場合は広がりの小さい分光強度を含んでいることが分かる。

4.2 分光反射率と法線の推定結果

最良の方向・色の 9 個の光源下で撮影された画像から石膏レリーフの分光反射率と法線を推定した結果を図 3 に示す。図 3(b) に、(a) の 2 点 (i)(ii) において推定された分光反射率を示す。白色の単一素材からなる石膏レリーフは空間的に一様な分光反射率を持つと考えられる。2 点で推定された分光反射率がほぼ等しく、また、波長に関してほぼ一定の値を取っていることから、定性的には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(c) は、推定された法線の (x, y, z) 成分を (R, G, B) の画素値に線形にマップして可視化したものである。右下の参照球の法線と比較すると、定性的には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。

図 4 に木球の分光反射率と法線を推定したときの法線の推定結果のみを示す。図 4(b) が最良の光源方向・最良の光源色を用いたときの結果で、(c) は木球の形状が真球であ

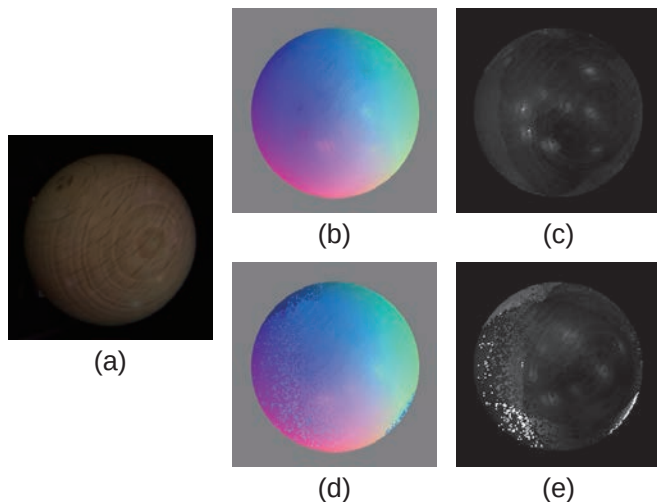


図 4: 法線の推定結果：木球

ると仮定したときの誤差[‡]を可視化したものである。(d)は最悪の光源方向・最良の光源色を用いたときの結果で、(e)はその誤差である。鏡面反射成分の影響を受けている箇所もあるが、最良の光源方向・最良の光源色を用いた場合の結果が優れていることが分かる。定量的には、前者の平均誤差が 5.47° で後者の平均誤差が 7.97° であり、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分かる。

図 5 にカラーチェッカーの分光反射率と法線を推定したときの分光反射率の推定結果のみを示す。グラフの赤の実線が正解値、緑の破線が最良の光源方向・最良の光源色を用いたときの結果、青の破線が最良の光源方向・最悪の光源色を用いたときの結果である。定量的には、前者の RMS 誤差が 0.060 で後者の RMS 誤差が 0.121 であり、提案手法を用いて最良な光源色を選択することが重要であることが分かる。

5 むすび

本稿では、分光イメージングと照度差ステレオを組み合わせて、多波長・多方向光源下の少数の画像から物体表面の分光反射率と法線の両方を推定する手法を提案した。特に、ノイズの伝播に基づいて、光源方向と光源色を最適化する手法を提案するとともに、実画像実験によりその有効性を確認した。非ランバート物体などへの拡張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。

[‡] 明るいほど誤差が大きい。

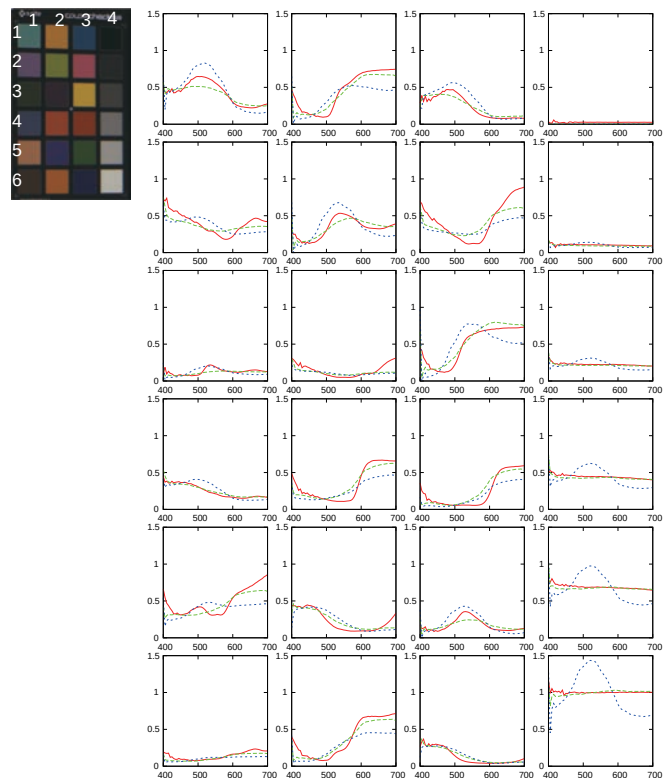


図 5: 分光反射率の推定結果：カラーチェッカー

参考文献

- [1] O. Drbohlav and M. Chantler, "On optimal light configurations in photometric stereo," In *Proc. IEEE ICCV2005*, pp.II-1707-II-1712, 2005.
- [2] N. Gat, "Imaging spectroscopy using tunable filters: a review," In *Proc. SPIE Wavelet Applications VII*, Vol.4056, pp.50-64, 2000.
- [3] S. Han and I. Sato and T. Okabe and Y. Sato, "Fast spectral reflectance recovery using DLP projector," *IJCV*, Vol.110, Issue 2, pp.172-184, 2014.
- [4] 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.
- [5] J.-I. Park and M.-H. Lee and M. Grossberg and S. Nayar, "Multispectral imaging using multiplexed illumination," In *Proc. IEEE ICCV2007*, pp.1-8, 2007.
- [6] J. Parkkinen, J. Hallikainen, and T. Jaaskelainen, "Characteristic spectra of Munsell colors," *JOSA A*, Vol. 6, No. 2, pp.318-322, 1989.
- [7] R. Woodham, "Photometric method for determining surface orientation from multiple images," *Optical Engineering*, Vol.19, No.1, pp.139-144, 1980.
- [8] M. Yamaguchi and H. Haneishi and H. Fukuda and J. Kishimoto and H. Kanazawa and M. Tsuchida and R. Iwama and N. Ohyama "High-fidelity video and still-image communication based on spectral information: natural vision system and its applications," in *Proc. SPIE-IS&T Electronic Imaging*, Vol.6062, 2006.