

アクティブ分光照明を用いた分光反射率推定法の検討

Consideration on Surface Spectral Reflectance Estimation Using Active Illuminant

吉村 昭彦 Akihiko Yoshimura 千葉大学大学院
 堀内 隆彦 Takahiko Horiuchi 千葉大学大学院
 富永 昌治 Shoji Tominaga 千葉大学大学院

Chiba University
 Chiba University
 Chiba University

Keywords: 分光イメージング系, アクティブ分光照明, プログラマブル光源, 分光反射率

1. はじめに

分光イメージング技術は視覚情報に関するあらゆる分野で有用で、種々の分光イメージングシステムがこれまで提案されてきた。著者らは、従来の分光イメージングシステムが有する問題点を解決するために、アクティブ分光照明を用いた高速分光イメージングシステムを開発してきた[1]-[4]。

本研究では、高速イメージングシステムの応用例として、物体の分光反射率をモノクロカメラの各画素において迅速に推定する方法を検討する。アクティブ分光照明を用いた分光反射率推定方法として、著者らは先行研究において、400nm～700nmの可視域において、10nm間隔の31次元狭帯域波長を照射する方法を提案した[1],[2]。また、佐藤らは、分光反射率を表現できる基底波形にオフセットを加えた正の基底波形とオフセットの組み合わせを照射し、画像取得後に減算する方法を提案した[5]。本稿では、これらの既存の2つの方法に加えて、基底波形を正負に分割し、正值と反転した負値の組み合わせを照射する方法を新たに提案し、各手法の優劣を実験で検証する。

2. 分光イメージングシステム

図1は、本研究で用いる分光イメージングシステムの実験系を示す。システムは、高速モノクロカメラ、プログラマブル光源(Optronic Laboratories OL490) [6]、リキッドガイド、および制御用のパソコンから構成される。プログラマブル光源の原理はキセノンランプ、グレーティング、DMDチップから構成されており、1024×768画素のチップが使われている。制御用パソコンによって、各基底照明の強度を決定し、生成された照明光はリキッドライトガイドを通じて照射される。照射タイミングと同期して、カメラは物体の反射光を獲得

する。本研究で使用するカメラは、モノクロCMOSカメラ(EPIX SV642M)であり、分解能は320×240, 10bitの量子化レベルで使用している。

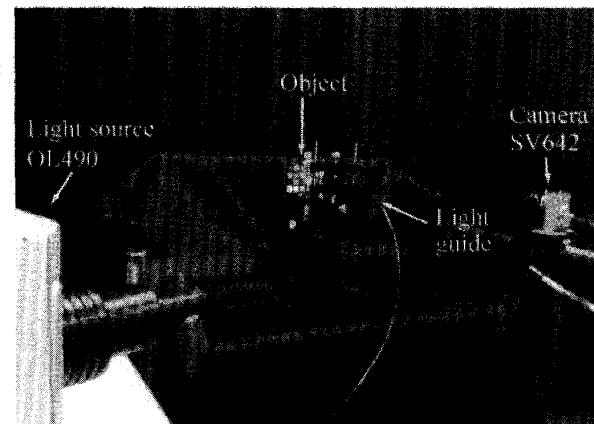


図1 分光イメージングシステムの実験系

3. 推定原理

本研究では、3種類の推定方法を検討する。

3.1. 狹帯域波形の照射

$S(\lambda)$ と $R(\lambda)$ を、それぞれ、分光反射率関数およびセンサの分光感度関数とする。物体表面がスペクトル $E(\lambda, t)$ の光源で照明されるとき、時刻 t_i におけるカメラ出力は、次式で記述できる。

$$O(t_i) = \int S(\lambda)E(\lambda, t_i)R(\lambda)d\lambda \quad (1)$$

我々は物体表面に依存しない項を、あらかじめ次式のように計算することができる。

$$c_i = \int E_{\lambda_i}(\lambda, t_i)R(\lambda)d\lambda \quad (2)$$

いま表面が狭帯域スペクトルで時系列的に照明される場合、表面分光反射 $(S(\lambda_1), S(\lambda_2), \dots, S(\lambda_n))$ はカメラ出力 $(O(t_1), O(t_2), \dots, O(t_n))$ の時系列から次式のように推定することができる[1],[2]。

$$S(\lambda_i) = O(t_i)/c_i \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

3.2 基底波形とオフセットの照射

分光反射率を表現する m 番めの直交基底 $\psi_m(\lambda)$ を考える。すなわち、任意の分光反射率 $S(\lambda)$ が、

$$S(\lambda) = \sum_{m=1}^M w_m \psi_m(\lambda) \quad (m=1, 2, \dots, M) \quad (4)$$

で表現できると仮定する。このとき、 m 番めのカメラ出力 $O(t_m)$ は、次式で記述できる。

$$\begin{aligned} O(t_m) &= \int S(\lambda) E(\lambda, t_m) R(\lambda) d\lambda \\ &= w_m \int \psi_m(\lambda) E(\lambda, t_m) R(\lambda) d\lambda \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、照明光源を

$$E_m(\lambda, t) = \psi_m(\lambda) / R(\lambda) \quad (6)$$

と設計することにより、 $O(t_m) = w_m$ となり、カメラ出力 $(O(t_1), O(t_2), \dots, O(t_n))$ の時系列から次のように推定することができる

$$S(\lambda) = \sum_{m=1}^M O(t_m) \psi_m(\lambda) \quad (m=1, 2, \dots, M) \quad (7)$$

ここで、一般に直交基底 $\psi_m(\lambda)$ は負値を生じ得るため、式(6)によって設計された光源を照射できない。そこで、照明光源に負値が生じないように、あらかじめ基底 $\psi_m(\lambda)$ にオフセット値 k を加算した基底を構築する。

$$\psi_m^*(\lambda) = \psi_m(\lambda) + k \quad (m=1, 2, \dots, M) \quad (8)$$

ここで、 $E_{\text{offset}}(\lambda, t) = k / R(\lambda)$ を照射したときのカメラ出力 $O(t_{\text{offset}})$ を求め、 $w_m = O(t_m) - O(t_{\text{offset}})$ とすることによって式(4)で推定する[6]。

3.3 基底波形の分割照射

本稿では、3.2 で述べた直交基底 $\psi_m(\lambda)$ を

$$\psi_m(\lambda) = \psi_m^+(\lambda) - \psi_m^-(\lambda) \quad (9)$$

で正負の要素 $\psi_m^+(\lambda), \psi_m^-(\lambda)$ にそれぞれ分解し、式(6)の $\psi_m(\lambda)$ に代入して設計された照明光源を照射してカメラ出力 $O^+(t_m), O^-(t_m)$ を求め、 $w_m = O^+(t_m) - O^-(t_m)$ とすることによって式(4)で推定する

4. 実験結果

3 章で述べた 3 種類の方法を用いて、X-Rite ColorChecker を対象として分光反射率推定を行った。3.1 の方法では、 $n=31$ とした。3.2 および 3.3 の推定方法で用いる直交基底 $\psi_m(\lambda)$ は、507 本の分光反射率データベースを構築し、その主成分 5 本を用いた。5 本の直交基底を図 2 に示す。3.2 の方法はオフセットとあわせて 6 種類の照明光源を照射し、3.3 の方法は負値をとる第 2 ～ 5 主成分はそれぞれ 2 種類の照明光源を必要とするところから、合計 9 種類の照明光源を照射した。

推定結果を分光反射率の RMSE 値として表 1 に

まとめる。3.3 章で提案した方法が、24 パッチの平均誤差および最大誤差とともに、最良の推定結果を得た。また、3.2 の方法は最小の照射回数であるが、3.1 とほぼ同程度の推定精度を得られることがわかった。図 3 に 3.3 章の方法による推定結果を示す。

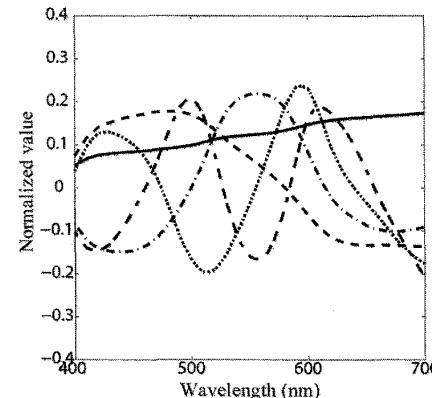


図 2 実験に用いた直交基底(5 本)

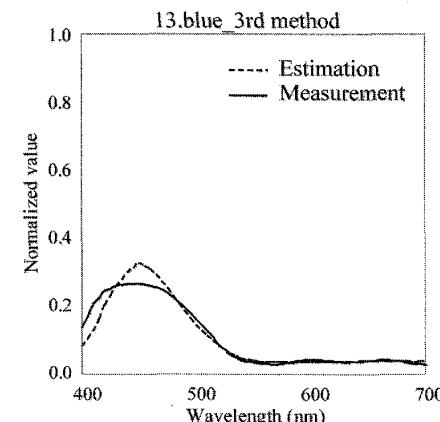


図 3 青パッチに対する提案手法の推定結果

表 1 推定結果(RMSE 誤差)

手法	平均誤差	最大誤差	照射数
3.1 章[1],[2]	0.0227	0.0463	31
3.2 章[6]	0.0228	0.0475	6
3.3 章(提案)	0.0190	0.0349	9

参考文献

- [1] 富永, 堀内, 柿沼, 日本色彩学会視覚情報基礎研究会, SIG-FVI-2009-9, pp.29-32, 2009.
- [2] S.Tominaga, T.Horiuchi and A.Yoshimura, Proc. IS&T/SPIE EI, pp.752809-1-8, 2010.
- [3] T.Horiuchi, H.Kakinuma and S.Tominaga, Proc. MCS'10, pp.529-534, 2010.
- [4] S.Tominaga, T.Horiuchi and A.Yoshimura, Proc. IS&T/SID'sCIC18, pp.160-165, 2010.
- [5] 佐藤, A.Subpa-Asa, 韓, 岡部, 佐藤, 第 16 回画像センシングシンポジウム, IS1-16, 2010.
- [6] A. Fong, B. Bronson and E. Wachman, SPIE Newsroom, 2008.