

ハイパースペクトル光源環境の計測と効率的表現

三浦 恵 岡部 孝弘

九州工業大学 大学院情報工学府 先端情報工学専攻

1 はじめに

物体の見えは、物体の幾何学的・光学的特性だけでなく、物体を照らす光源にも大きく依存する。写実的な画像の生成・合成のために、実シーンの全方位の光源環境を計測して画像の生成・合成に用いる技術は、Image-Based Lighting (IBL) [1] と呼ばれる。

従来の IBL では、3 バンドのカラーカメラを用いて光源環境を計測していた。しかしながら、3 バンドのカラーカメラは波長分解能が低いために、一般に、色の再現性に限界がある。例えば、分光分布の異なる光でも RGB 値が同じになってしまう条件等色 (メタメリズム) と呼ばれる問題が生じる。

Tominaga ら [3] は、6 バンドのマルチスペクトルカメラと魚眼レンズを用いて計測した光源環境に Wiener 推定を適用することで、空間 (方向) 分解能だけでなく波長分解能も高い全方位光源環境を復元している。しかしながら、Wiener 推定において自己相関行列をどのように準備するのかが自明ではなく、また、分光分布の高周波数成分の復元精度に限界がある。

そこで本研究では、IBL における色再現性の向上を目指して、ハイパースペクトルカメラを用いて実シーンの全方位光源環境を計測する。また、バンド数の増加に伴いデータ量も増加してしまうことから、光源環境の効率的な表現についても検討する。

2 提案手法

2.1 光源環境の計測

光源環境を計測したい位置に鏡面球を置き、鏡面球に映り込んだ光源を観察することで、全方位光源環境を計測する。従来研究 [1] が 3 バンドのカラーカメラを用いて鏡面球を撮影していたのに対して、本研究ではハイパースペクトルカメラを用いて鏡面球を撮影する。

計測した光源環境を、鏡面球に (θ, ϕ) の方向から入射する波長 λ の光の強度 $l(\theta, \phi, \lambda)$ として表現する。なお、鏡面球を中心とする球座標系における天頂角を θ ($0 \leq \theta \leq \pi$)、方位角を ϕ ($0 \leq \phi \leq 2\pi$) とし、400[nm] から 700[nm] までの波長を考える。

2.2 光源環境の表現

特異値分解を用いて、計測した全方位光源環境を圧縮する。具体的には、光源環境を $l(\theta_i, \phi_j, \lambda_k)$ ($i =$

$1, 2, 3, \dots, I$) ($j = 1, 2, 3, \dots, J$) ($k = 1, 2, 3, \dots, K$) のように離散化して、行が光源の波長に、列が光源の方向に対応する行列

$$\begin{pmatrix} \cdot & l(\theta_i, \phi_j, \lambda_1) & \cdot \\ \cdot & l(\theta_i, \phi_j, \lambda_2) & \cdot \\ \cdots & \vdots & \vdots & \cdots \\ \cdot & l(\theta_i, \phi_j, \lambda_K) & \cdot \end{pmatrix} \quad (1)$$

を構成する。この行列に特異値分解を適用して、波長に関する圧縮を行う。その結果、光源環境を

$$l(\theta, \phi, \lambda) = \sum_{n=1}^N c_n(\theta, \phi) b_n(\lambda) \quad (2)$$

のように表現することができる。ここで $b_n(\lambda)$ ($n = 1, 2, 3, \dots, N$)、 $c_n(\theta, \phi)$ 、 N は、それぞれ、基底関数、線形結合係数、基底関数の数である。この圧縮により、データ量をおよそ N/K に削減することができる。

なお、Judd ら [2] は、昼光の分光分布が少数の基底関数の線形結合で近似的に表現できることを示している。彼らの目的が、昼光に限定した様々なシーンの分光分布を、共通の基底関数を用いて効率的に表現することであるのに対して、我々の目的は、昼光に限定せずに、各々のシーンの全方位光源環境を、シーンに応じた基底関数を用いて効率的に表現することにある。

2.3 画素値の計算

計測した全方位光源環境、反射モデル、および、分光感度の積を波長と方向について積分することで、画素値を計算することができる。例えば、法線が $(0, 0, 1)^T$ のランバート面の画素値 I は、

$$I = \int \int \left[\int l(\theta, \phi, \lambda) \rho(\lambda) s(\lambda) d\lambda \right] \cos \theta \sin \theta d\theta d\phi \quad (3)$$

で与えられる。ここで $\rho(\lambda)$ は分光反射率、 $s(\lambda)$ は分光感度 (カメラの分光感度や等色関数) である。

式 (2) を式 (3) に代入すると、

$$I = \int \int \left[\sum_{n=1}^N c_n(\theta, \phi) \int b_n(\lambda) \rho(\lambda) s(\lambda) d\lambda \right] \times \cos \theta \sin \theta d\theta d\phi \quad (4)$$

が得られる。式 (3) の波長に関する積分（離散化すると K 回の和）が式 (4) の N 回の和に置き換わるため、計算コストはおよそ N/K に削減される。

3 実験

3.1 ハイパースペクトル光源環境

エバ・ジャパン社製のハイパースペクトルカメラ（波長分解能 5[nm]）を用いて鏡面球を撮影して、ハイパースペクトル光源環境を計測した。今回の実験では、400[nm] から 700[nm] の 61 バンド ($K = 61$) のデータを使用した。

計測した光源環境を濃淡画像に変換して、縦軸が天頂角 θ 、横軸が方位角 ϕ となるように展開したものを図 1 に示す。(a) から (g) のグラフに、対応する光源のある画素（方向）における分光分布を示す。左は暗室で天井の蛍光灯を点灯させて計測した光源環境であり、右は暗室で RGB の三色の電球を点灯させて計測したものである。前者が分光分布のほぼ等しい光源からなるのに対して、後者は分光分布の異なる 3 つの光源からなることが分かる。

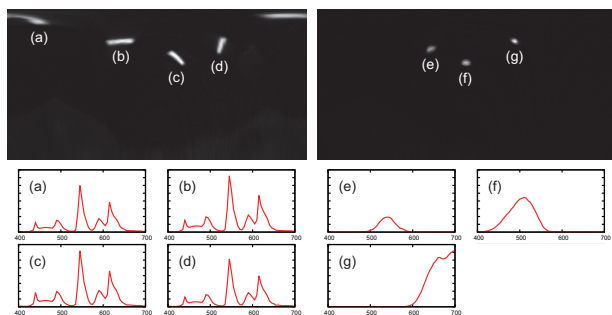


図 1: 計測した光源環境：蛍光灯と RGB 電球

3.2 画像生成

計測したハイパースペクトル光源環境を用いて画像を生成した。具体的には、分光反射率が既知のカラーチェッカーを被写体とし、式 (3) や式 (4) の分光感度を CIE 等色関数として、三刺激値を計算した。また、3 バンドのカラーカメラを用いる従来手法との比較のために、光源環境と分光反射率の各々を CIE 等色関数を用いて三刺激値に変換した後で、それらの積・和を取ることで比較画像を生成した。

図 2 と図 3 に、各々の光源環境における結果を示す。特異値分解による圧縮なしの正解画像 (a)、3 バンドのカラーカメラを仮定した比較画像 (b)、特異値分解による圧縮あり ($N = 5$) の画像 (c)、および、特異値の数を変化させたときの CIE-L*a*b*色空間における正解画像との色差 (RMSE) (d) である。いずれの光源環境においても、 $N = 5$ 程度で色差が十分に小さく

なった。各々の光源環境について、比較画像の色差が 4.72 と 4.80 であるのに対して、 $N = 5$ のときの提案手法の色差は 0.81 と 0.31 であることから、提案手法が有効であることが分かる。

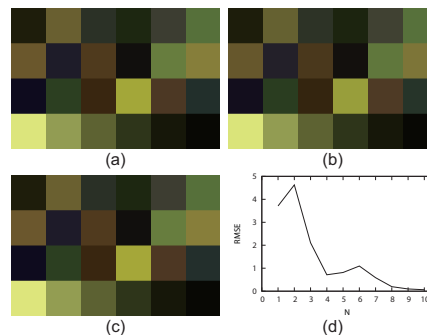


図 2: 生成画像と色差：蛍光灯

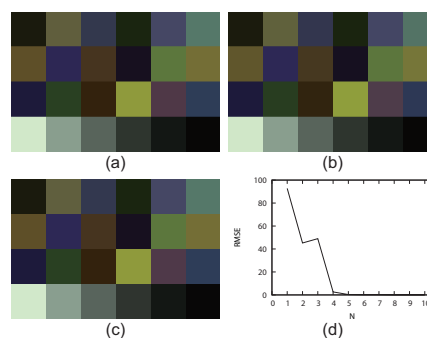


図 3: 生成画像と色差：RGB 電球

4 むすび

本稿では、IBL における色再現性の向上を目指して、ハイパースペクトルカメラを用いて全方位光源環境を計測することを提案した。また、バンド数の増加に伴うデータ量・計算コストの増加を軽減するために、特異値分解を用いた光源環境の効率的な表現を提案した。今後は、屋外を含む様々なシーンの光源環境の計測や、光源環境のより効率的な表現に取り組みたい。

謝辞 本研究の一部は、JSPS 科研費 (No. 25280057) の助成を受けた。

参考文献

- [1] P. Debevec, "Rendering synthetic objects into real scenes: bridging traditional and image-based graphics with global illumination and high dynamic range photography," In *Proc. ACM SIGGRAPH '98*, pp.189–198, 1998.
- [2] D. Judd, D. MacAdam, G. Wyszecki, H. Budde, H. Condit, S. Henderson, and J. Simonds, "Spectral distribution of typical daylight as a function of correlated color temperature," *JOSA*, Vol. 54, Issue 8, pp.1031-1040, 1964.
- [3] S. Tominaga, T. Fukuda, and A. Kimachi, "High-resolution imaging system for omnidirectional illumination estimation," *Journal of Imaging Science and Technology*, Vol. 52, No. 4, pp.40907:1–9, 2008.