

# 可視光外領域における ハイパースペクトルカメラの 分光放射輝度校正方法

澁谷 孝幸 (しぶや・たかゆき) \*1  
 秋葉 拓也 (あきば・たくや) \*1  
 岩永 敏秀 (いわなが・としひで) \*1  
 高良 洋平 (たから・ようへい) \*2  
 野呂 直樹 (のろ・なおき) \*2

\*1 地方独立行政法人東京都立産業技術研究センター / \*2 エバ・ジャパン(株)

## 要 旨

ハイパースペクトルカメラに対する分光放射輝度値校正に関して、可視光外領域における校正係数算出方法を考案し、検証した。校正係数の導出には輝度計と分光放射照度計を用いた。積分球光源を用いた均一輝度面に対して比較校正を行うことにより、380nm から 1000nm という可視光外の領域を含む波長範囲において、ハイパースペクトルカメラに対して分光放射輝度の校正係数を付与することが可能であることを実証した。比較校正に用いる光源出力および検出器の応答度が小さい領域では誤差が大きくなったものの、可視光範囲の校正係数は、従来法で導出した係数と良い一致を示した。

### 1. はじめに

ハイパースペクトルカメラは 1980 年代に A.F.H.Goetzらにより提案され、二次元で複数帯域のスペクトル情報を取得できることから、航空機等に搭載した地表リモートセンシング<sup>1)</sup>や、特定の果物の選定<sup>2)</sup>、スペクトル情報を用いた顔認識<sup>3)</sup>をはじめ、様々なアプリケーションに用いられている<sup>4-8)</sup>。ハイパースペクトルカメラの出力値は検出素子の応答特性や光学系に依存するため、異なる機種間やメーカー間のデータには一般的に相関がなく、同一機種内における相対値比較しかできなかった。分光放射輝度計を用いた比較校正により、出力値を分光放射輝度値などの物理量と紐づけることが可能になり<sup>9)</sup>、異なる機種やメーカー間におけるデータ比較や、試葉類デー

タベース活用などが期待されている。しかしながら、分光放射輝度計による比較校正では、校正可能な波長範囲が分光放射輝度計の波長範囲(概ね可視光 380nm から 780nm の範囲)に限定されてしまうという問題がある。ハイパースペクトルカメラは紫外線や赤外線の領域にも感度を有する機種が販売されているため、可視光以外の領域でも分光放射輝度の校正に対するニーズがある。本研究では、輝度計と分光放射照度計を用いることにより、可視光領域だけでなく、近赤外領域での分光放射輝度校正を行った結果について報告する。

### 2. 分光放射輝度の校正方法

従来の校正方法<sup>9)</sup>では、ある光源を観測した場合のハイパースペクトルカメラの出力カウント値を  $P_{hyp}(\lambda)$ 、比較校正に用いる分光放射輝度計の出力値を  $L_{ref}(\lambda)$ 、ハイパースペクトルカメラ出力カウント値を分光放射輝度に変換する校正係数を  $k_{hyp}(\lambda)$  とすると、 $k_{hyp}(\lambda)$  は(1)式のように表される。

$$k_{hyp}(\lambda)P_{hyp}(\lambda) = L_{ref}(\lambda)$$

$$k_{hyp}(\lambda) = \frac{L_{ref}(\lambda)}{P_{hyp}(\lambda)} \quad (1)$$

ただし、 $\lambda$  は光の波長である。先に述べたとおり、(1)式を用いてハイパースペクトルカメラの分光放射輝度校正値を算出する場合、その波長域は分光放射輝度計の出力波長域に制限されてしまう。

一方で、ハイパースペクトルカメラの分光放射輝度校正値の算出に、輝度計と分光放射照度計を用い

ることを考える。ある光源を観測した場合のハイパースペクトルカメラの出力カウント値を  $P_{hyp}(\lambda)$ 、比較校正に用いる輝度計の出力値を  $L_{ref}$ 、分光放射照度計の出力値を  $E_{ref}(\lambda)$ 、輝度計で観測する領域の分光放射輝度値を  $L_{ref}(\lambda)$ 、ハイパースペクトルカメラ出力カウント値を分光放射輝度に変換する校正係数を  $k_{hyp}(\lambda)$  とする。まず、輝度計の出力値  $L_{ref}$  と分光放射輝度値  $L_{ref}(\lambda)$  の関係は(2)式で表すことができる。

$$L_{ref} = Km \sum_{380}^{780} L_{ref}(\lambda) V(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

ただし、 $Km$  は最大視感効果度、 $V(\lambda)$  は分光視感効率である。一方、分光放射輝度  $L_{ref}(\lambda)$  と分光放射照度  $E_{ref}(\lambda)$  の関係は係数  $\alpha$  を用いて、

$$L_{ref}(\lambda) = \alpha E_{ref}(\lambda) \quad (3)$$

となる。(3)式を(2)式に代入すると、

$$\alpha = \frac{L_{ref}}{Km \sum_{380}^{780} E_{ref}(\lambda) V(\lambda) d\lambda} \quad (4)$$

(4)式を(3)式に代入すると、光源の分光放射輝度  $L_{ref}(\lambda)$  は

$$L_{ref}(\lambda) = E_{ref}(\lambda) \frac{L_{ref}}{Km \sum_{380}^{780} E_{ref}(\lambda) V(\lambda) d\lambda} \quad (5)$$

として、輝度  $L_{ref}$  と分光放射照度  $E_{ref}(\lambda)$  で記述することができる。結局、ハイパースペクトルカメラ出力カウント値を分光放射輝度に変換する校正係数を  $k_{hyp}(\lambda)$  は、

$$L_{ref}(\lambda) = k_{hyp}(\lambda) P_{hyp}(\lambda)$$

$$k_{hyp}(\lambda) = \frac{E_{ref}(\lambda)}{P_{hyp}(\lambda)} \frac{L_{ref}}{Km \sum_{380}^{780} E_{ref}(\lambda) V(\lambda) d\lambda} \quad (6)$$

となる。(6)式は、比較校正として輝度計と分光放射照度計を用いれば、ハイパースペクトルカメラに分光放射輝度値を値付けることが可能であることを示している。分光放射輝度計と異なり、分光放射照度計の波長感度域は、市販のものでも 250nm から 2500nm 程度まで有するものが市販されており、校正可能波長域の制限が従来の方法よりも大幅に広がることになる。

### 3. 実験系及び測定結果

ハイパースペクトルカメラへの分光放射輝度値校正用の光源として、2つの開口（ポート1、ポート2）を有する直径8インチの積分球を用いた。積分球の天頂内部には定格 150W のハロゲンランプが設置されており、この光源を点灯することで開口部は均一輝度面として機能するため、これをハイパースペクトルカメラ、輝度計、分光放射照度計で計測することにより、比較校正をおこなう。またポート1およびポート2で計測される輝度の偏差は約 0.6 % であり、ほぼ同一の輝度値を呈することから、2つの開口を用いた同時計測が可能である。積分球の外観を図1に、測定の設定アップを図2に示す。

ポート1およびポート2の前面にはレールがあり、各種計測器の測定基準面がそれぞれの開口前面に任

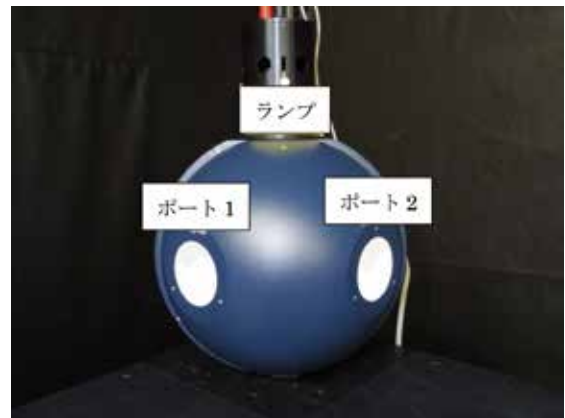


図1 積分球光源の外観図

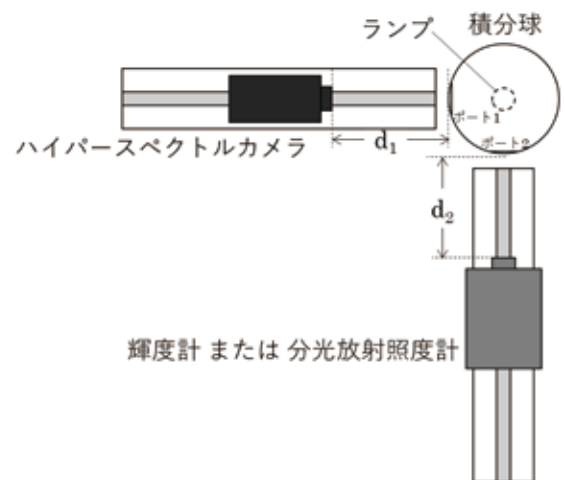


図2 実験系

意の距離で設置可能である。ポート1の前面にハイパースペクトルカメラを、ポート2の前面に輝度計または分光放射照度計を設置する。ハイパースペクトルカメラとポート1までの距離 $d_1$ および輝度計または分光放射照度計とポート2までの距離 $d_2$ はともに35mmとした。ハイパースペクトルカメラにはエバ・ジャパン社製NH-8(1200×1024ピクセル)、輝度計にはコニカミノルタ社製CS-200、分光放射照度計にはオーシャンフォトン社製のポリクロメータQE65000を用いた。ハイパースペクトルカメラと輝度計の焦点距離は無限遠に設定し、輝度計の視野角は1度とした。NH-8の測定可能波長域は380nmから1000nm、QE65000の測定可能波長域はおおよそ250nmから1040nmである。ハロゲンランプを点灯し、それぞれの計測器で測定を行った。輝度計の出力値は41052 cd/m<sup>2</sup>であった。分光放射照度計の出力値を図3に、(5)式により計算された積分球光源の分光放射輝度値を図4に、ハイパースペクトルカメラのカウント分布を図5に示す。ハイパースペクトルカメラのカウントスペクトルは、取得したカウントスペクトル分布の中心付近の平均値を代表して用いた。

得られた結果を用いて(6)式により算出した校正係数を図6に示す。実線が輝度計と分光放射照度計を

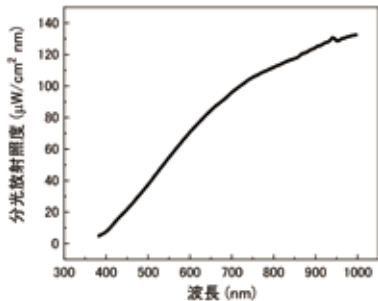


図3 積分球光源の分光放射照度スペクトル

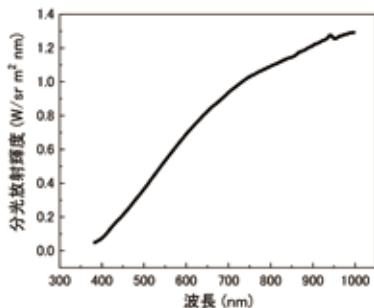


図4 積分球光源の分光放射輝度スペクトル

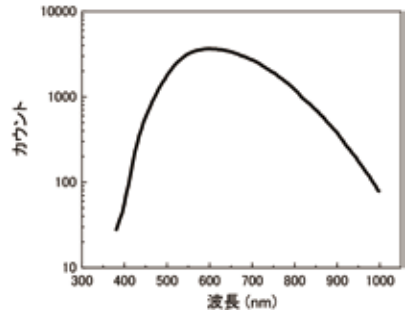


図5 ハイパースペクトルカメラで測定したカウントスペクトル

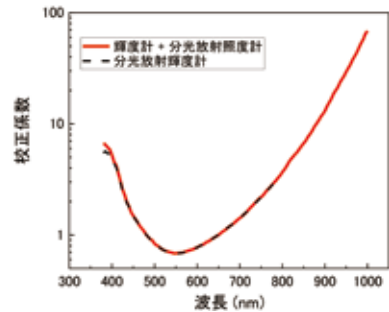


図6 ハイパースペクトルカメラに対する分光放射輝度校正係数

用いて算出した校正係数、点線が同様の条件で分光放射輝度計を用いて(1)式により算出した校正係数である。両者を比べると、概ね校正係数は一致しており、これまで算出ができなかった波長領域における校正係数の算出が可能であることを確認した。400nm以下の範囲で誤差が大きくなっているが、これは分光放射輝度値およびハイパースペクトルカメラカウントスペクトルの応答度が小さい領域であり、また積分球光源の光出力が小さい領域であることから、SN比が小さいことによる計算誤差が大き影響しているものと思われる。問題の解決策として、当該波長域で十分な光出力を有する光源による校正などが考えられる。

#### 4. 測定例

LED電球と白熱電球について、分光放射輝度を校正したハイパースペクトルカメラで測定した例を図7に示す。測定対象の外観は、図7左上に示すとおりで、図7左下は、ハイパースペクトルカメラで測定したそれぞれの電球の特定箇所での分光放射輝度である。また、図7(a), (b), (c)はそれぞれ、波長450nm, 560nm, 900nmにおけるハイパースペクトルでの測

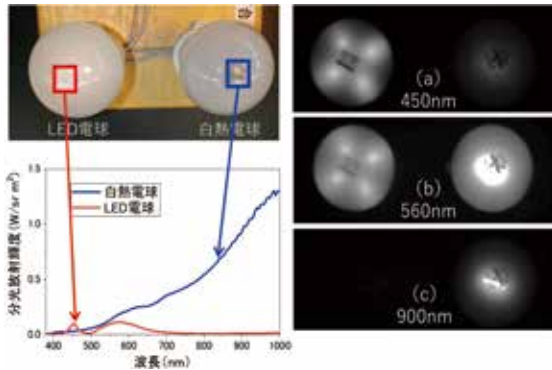


図7 分光放射輝度が校正されたハイパースペクトルカメラを用いた測定例

定結果である。このように、可視光範囲のみでなく赤外光の領域においても分光放射輝度の空間分布を計測することができるため、出力の絶対値が必要となる計測に有用であると考えられる。

## 5. まとめ

本研究では、ハイパースペクトルカメラの分光放射輝度校正に、輝度計と分光放射照度計を用いることで、これまで分光放射輝度計の感度波長域に制限されていた校正波長領域について、より幅広い波長範囲で校正係数の算出が可能であることを確認した。今回の手法により得られた校正係数は、従来手法である分光放射輝度計を用いた方法による校正係数と概ね一致していた。光源出力および検出器感度が小さくなる領域においては誤差が大きい結果となったが、当該領域で十分な光源を採用するなどにより、誤差は少なくなるものと考えられる。本手法により、これまで校正が難しかった可視光外における分光放射輝度値の校正が可能となり、医学やバイオなど各種分野での応用が期待されると考えられる。

## 参考文献

- 1) A.F.H. Goetz, et al.(1985) Imaging Spectrometry for Earth Remote Sensing. Science, 228, 1147-53.
- 2) OKAMOTO, Hiroshi; LEE, Won Suk. Green citrus detection using hyperspectral imaging. Computers and electronics in agriculture, 2009, 66.2: 201-208.
- 3) PAN, Zhihong, et al. Face recognition in hyperspectral images. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2003, 25.12: 1552-1560.
- 4) TAKARA, Yohei, et al. Remote sensing applications with NH hyperspectral portable video camera. In: *Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Remote Sensing Technology, Techniques and Applications IV*. International Society for Optics and Photonics, 2012. p. 85271G.
- 5) YAN, Lu, et al. Using hyperspectral image enhancement method for small size object detection on the sea surface. In: *Image and Signal Processing for Remote Sensing XXI*. International Society for Optics and Photonics, 2015. p. 96430H.
- 6) LU, Guolan; FEI, Baowei. Medical hyperspectral imaging: a review. *Journal of biomedical optics*, 2014, 19.1: 010901.
- 7) ELMASRY, Gamal, et al. Hyperspectral imaging for nondestructive determination of some quality attributes for strawberry. *Journal of Food Engineering*, 2007, 81.1: 98-107.
- 8) ELMASRY, Gamal; SUN, Da-Wen; ALLEN, Paul. Near-infrared hyperspectral imaging for predicting colour, pH and tenderness of fresh beef. *Journal of Food Engineering*, 2012, 110.1: 127-140.
- 9) Akiba T, Shibuya T, Maeda N, Takara Y, Juanyan L. Spectral radiance calibration method to hyperspectral camera: Proceedings of the Annual Conference of Illuminating Engineering Institute of Japan, Fukuoka, September 2019, 08-P-04.