

---

# プレノプティック光学系を利用したマルチスペクトルカメラ

## Single-Snap-Shot Multi-Spectrum Imaging

---

増田 憲介\*      山中 祐治\*      丸山 剛\*\*      永井 祥\*\*  
Kensuke MASUDA      Yuji YAMANAKA      Go MARUYAMA      Sho NAGAI

---

### 要 旨

---

多バンドを用いた分光イメージング技術は、色・成分・温度など対象物の多くの情報を抽出することを可能とした画像情報多次元化の1つの手段である。これまで2次元画像の多バンド計測においては、フィルタ回転方式・グレーティング移動方式やプリズム分割方式が採用されてきた。しかし、画像を同時に取得できない、筐体をコンパクトにすることができないといった課題点が挙げられる。我々は、独自の微細光学技術および画像処理技術を融合させ、シングルスナップショットで高精度にマルチスペクトルイメージを取得できるカメラを開発した。カメラから得られた複数バンドの分光画像に重回帰分析手法を適用し、色度を推定した。サンプルとして工業用の色標を利用し、分光測色計との色度比較を行った結果、製造現場における色目視検査への適用可能性を確認した。

### ABSTRACT

---

Multi-bands imaging is a multi-dimensional technique that enables the capture of 2D color, component, and temperature information. Systems using rotating color filters and prisms have been established as normal techniques for acquiring spectral information. However, color filters rotation poses a barrier to real-time imaging, and with prisms, it is hard to make the camera more compact. Ricoh multispectral cameras use optical devices that can acquire spectral information in a single snapshot, together with an image processor that generates an image for each spectral band set. As a result, spectral distribution and chromaticity for particular wavelengths can be computed in real-time. This makes it possible to precisely acquire the desired color information.

---

\* リコー技術研究所 システム研究センター  
System Research & Development Center, Ricoh Institute of Technology

\*\* リコー技術研究所 フォトニクス研究センター  
Photonics Research & Development Center, Ricoh Institute of Technology

本稿は、映像情報メディア学会に帰属の著作権の利用許諾を受け、映像情報メディア学会誌, Vol. 48, No. 4 (2014) に掲載した論文を基に作成した。

## 1. 背景と目的

マルチスペクトル情報取得の手段として、測定対象のある1点を測定する場合には回折格子とラインセンサを用いた分光測色計が広く利用されている。一方、2次元の分光情報を得るためには、フィルタ回転方式<sup>1)</sup>およびプリズム分割方式<sup>2)</sup>と推定演算を組み合わせる手法や、グレーティングを移動する方式<sup>3)</sup>が採用されてきた。しかしながら、フィルタ回転方式やグレーティング移動方式では、異なるバンドの画像を同時に取得できない、すなわち動体イメージングが困難であるという課題が挙げられる。また、プリズム分割方式ではセンサがバンドの数だけ必要となるため、筐体の大型化や製造コストの増大という課題があった。

これらの課題に対し、筆者らはプレノプティックカメラ (Plenoptic Camera) と呼ばれる光学系に独自の微細光学技術および画像処理技術を融合させ、小型筐体かつシングルスナップショットで2次元マルチスペクトル情報を取得できるカメラを開発した。本稿では、開発したマルチスペクトルカメラのメカニズムおよびその性能について報告する。

## 2. プレノプティック光学系

プレノプティックカメラの“Plenoptic”とは、「完全な、全ての」を意味するラテン語の“plenus”と、「見え」を意味する“optic”から来ている。プレノプティックカメラはライトフィールド (Light Field) を取得する一手段である。ライトフィールドとは光の通過位置と通過方向の両方を含む情報である。この情報を利用することで、距離測定<sup>4)</sup>、リフォーカス<sup>5)</sup>、分光<sup>6)</sup>といった様々な機能に展開することが可能である。

開発したマルチスペクトルカメラは、プレノプティックカメラの技術をベースに、スペクトル推定精度の高い6バンドを組み合わせ、重回帰分析手法

を交えることで、2次元マルチスペクトル情報の同時取得機能を実現した。

以下に、プレノプティックカメラおよびマルチスペクトルカメラの原理について示す。

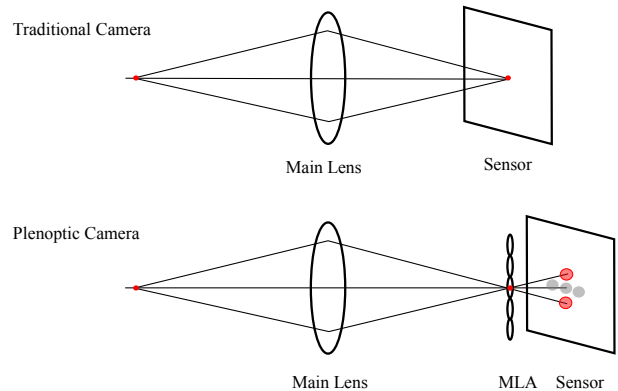


Fig. 1 Plenoptic Camera.

Fig. 1にプレノプティックカメラと通常カメラの違いを示す。通常のカメラにおいては、物体1点から放射状に広がった光がレンズによりセンサ面上に集光される。このとき、光の位置情報はセンサに記録されるが、メインレンズを通過してきた光の強度が積分されてしまうため方向情報は失われてしまう。プレノプティックカメラでは通常カメラにおいてセンサが配置される位置に、微小なレンズが並んだマイクロレンズアレイ (MLA) を配置することが特徴である。このような光学素子の配置とすることで、レンズの上部を通過してきた光はセンサ面上の下側に、中央部から直進する光はセンサ中央に、下部を通過してきた光はセンサ面上の上側に当たることになる。すなわち、通常カメラでは1点に集光され、分離が不可能な光の上・中・下の方向情報が、センサ面上の位置情報に変換され、把握できるようになる。

この原理を応用すれば、画像処理で光線追跡演算を施すことが可能となり、ボケた像を復元するデジタルリフォーカスなどの機能を実現することができる。プレノプティックカメラの技術構想は100年以上前<sup>7)</sup>からあるが、①近年のセンサの高解像度化、②微細光学素子製造技術の進歩、③画像処理の高速

化の3点が普及したことにより、近年注目されている。

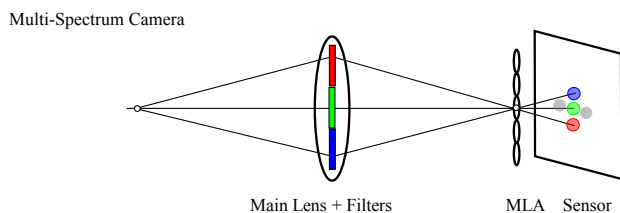


Fig. 2 Multi-Spectrum Camera using Plenoptic system.

プレノプティックカメラをマルチスペクトルカメラとして応用するためには、メインレンズ内にバンドパスフィルタを複数配置すれば良い (Fig. 2)。具体的には、Fig. 1で示した上・中・下光線の途中で分光特性の異なるバンドパスフィルタを配置することで、測定対象の1点に対する分光情報をセンサ上の別々の位置に保存することができる。

このような構成のプレノプティックカメラをベースとしたマルチスペクトルカメラを用いることで、2次元マルチスペクトル情報をシングルスナップショットで取得できることがわかる。また、従来手法に対して、動体のマルチスペクトルイメージングができる、筐体を小型にできる、部品コストを低減できるなどの点で優位性があるといえる。

### 3. プレノプティック光学系を利用したマルチスペクトルカメラ

#### 3-1 マルチスペクトルカメラの構成

##### 3-1-1 プレノプティック光学系の構成

マルチスペクトルカメラを構成するための光学設計条件について述べる。プレノプティックカメラベースのマルチスペクトルカメラを実現するためには、「Fナンバーマッチング」を満たす必要がある<sup>6)</sup> (Fig. 3)。Fナンバーマッチングとは、メインレンズの実効Fナンバーと、MLAの実効Fナンバーを一致させることである。具体的には、メインレンズの瞳

径を $D_L$ 、焦点距離を $f_L$ 、MLAの瞳径を $D$ 、焦点距離を $f$ とした場合、

$$\frac{f_L}{D_L} = \frac{f}{D} \quad (1)$$

を満たすことである。 $f_L \gg f$ であるとする、MLAからみて、メインレンズの絞り位置と像面が共役関係にあることがわかる。

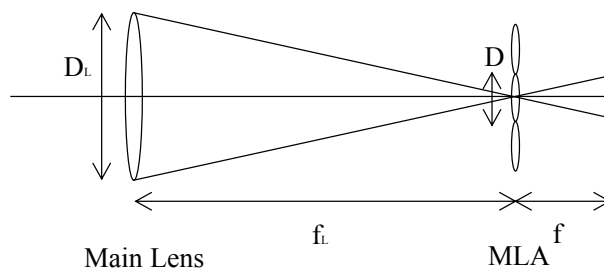


Fig. 3 F number matching of Plenoptic Camera.

#### 3-1-2 プレノプティック光学系を利用したマルチスペクトルカメラの構成

第1章でも述べたように、メインレンズに複数のバンドパスフィルタを組み込むことにより、本カメラをマルチスペクトルカメラとして利用できる。今回のマルチスペクトルカメラのバンドパスフィルタの数は6とした。各バンドパスフィルタの可視域における分光透過率特性をFig. 4に示す。

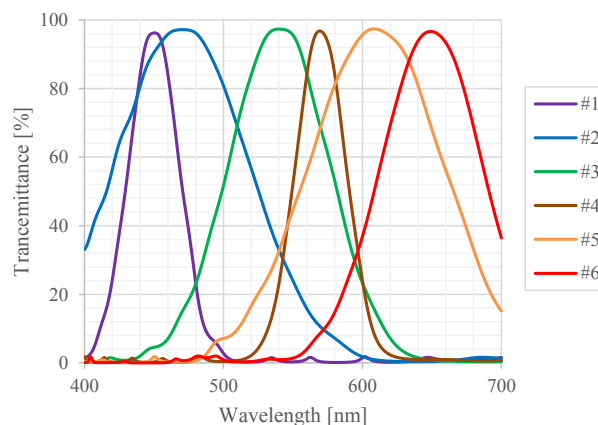


Fig. 4 Spectral transmittance of 6 filters.

またバンドパスフィルタは、メインレンズの絞り面に置く必要がある。上記設計条件のもと作製したマルチスペクトルカメラの外観をFig. 5に示す。フィルタ組込みレンズは、市販のCマウントレンズを分解し、絞り位置に6種類のバンドパスフィルタを配置することで構成されている。各バンドパスフィルタは中心角60度の扇型である。MLA実装センサはセンサのカバーガラスを取り除いたうえで、センサ上にMLAを接着した。



Fig. 5 Multi-spectrum Camera using Plenoptic System  
Left: Main Lens with multi-bands filters  
Right: Camera Sensor with MLA.

### 3-2 マルチバンド画像生成のための画像処理

液晶ディスプレイに表示した6色を被写体として (Fig. 6), マルチスペクトルカメラで撮影した画像を Fig. 7に示す。Fig. 7 (b) の拡大図からわかるように、マルチスペクトルカメラで撮影した画像はMLAにより結像されたフィルタの像の集合である。フィルタの像をここではマクロピクセルと呼ぶ。マクロピクセルはフィルタの分割パターンを反映して6つの領域に分かれている。

撮影画像を構成する全てのマクロピクセルについて、各領域のデータを抽出し、再構成することで6つのマルチバンド画像を生成することができる。Fig. 7の画像を再構成した結果をFig. 8に示す。Fig. 8のband 1からband 6の順に透過波長帯域が長くなっており、バンドごとに明るい位置が異なることがわかる。これは表示した色のスペクトルの違いを反映しているためである。

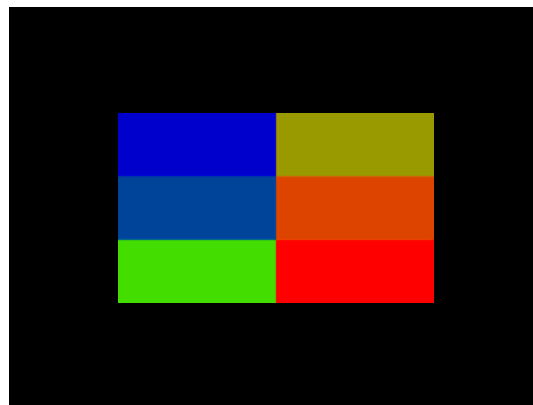


Fig. 6 Object displayed on LCD screen.

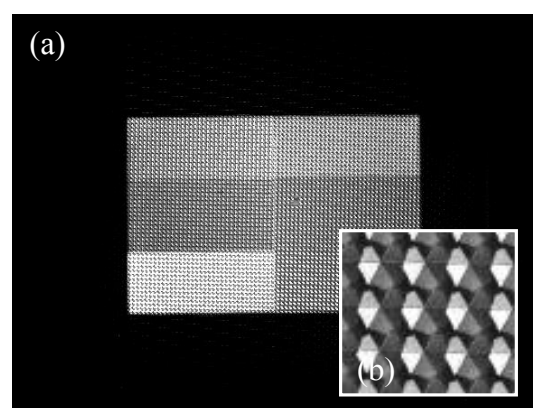


Fig. 7 (a) Captured image by Multi-spectrum Camera.  
(b) Close up image of Macropixels.

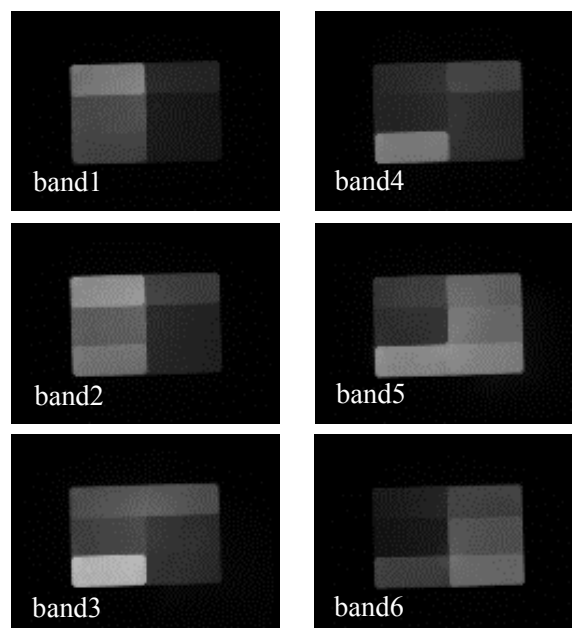


Fig. 8 Multi-band images.

## 4. マルチスペクトルカメラを活用した色度推定

### 4-1 カラーチェッカーを用いた回帰学習

マクロピクセルを構成する各領域のカメラ応答を用いてスペクトル推定を行う。本稿では、被写体の分光反射率を推定する。推定には重回帰分析の手法<sup>8)</sup>を用いた。回帰係数行列の算出に用いる被写体サンプルはカラーチェッカーの24色である (Fig. 9)。



Fig. 9 Color checker for regression prediction.

目的変数である分光反射率サンプルベクトルは分光測色計で測定した。説明変数のセンサ応答ベクトルはマクロピクセルを構成する6領域の画素値をそれぞれ平均して算出した。目的変数を $R$ 、説明変数を $V$ とすると回帰係数行列 $G$ は下記のように表せる<sup>5)</sup>。

$$G = RV'(VV')^{-1} \quad (2)$$

センサ応答 $v$ にこの回帰係数行列 $G$ を左から乗算することで、分光反射率推定を行うことができる。

$$\hat{r} = Gv \quad (3)$$

### 4-2 色標を用いた色度・スペクトル推定

標準白色板および社団法人日本塗料工業会が発行している色見本帳であるJPMA Standard Paint Colorsの赤 (F05-40X)、緑 (F32-70T)、青 (F69-40T) を測

定対象 (Fig. 10) として分光反射率推定性能を評価した。

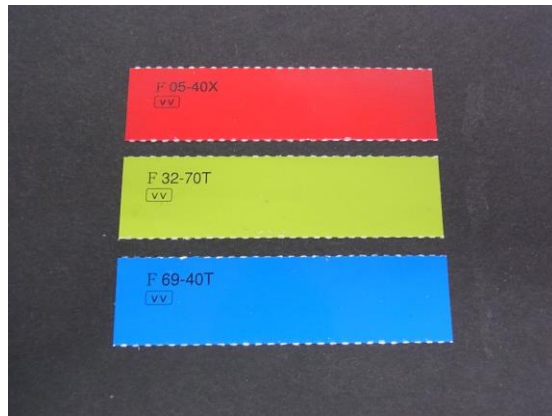


Fig. 10 Target Color patch (Red, Green, Blue).

マルチスペクトルカメラでそれぞれの被写体を撮影し、画像中央付近のマクロピクセルについて分光反射率推定を行った結果をFig. 11に示す。真値が破線、実線が推定結果である。真値はカラーチェッカーと同様に分光測色計で測定した。

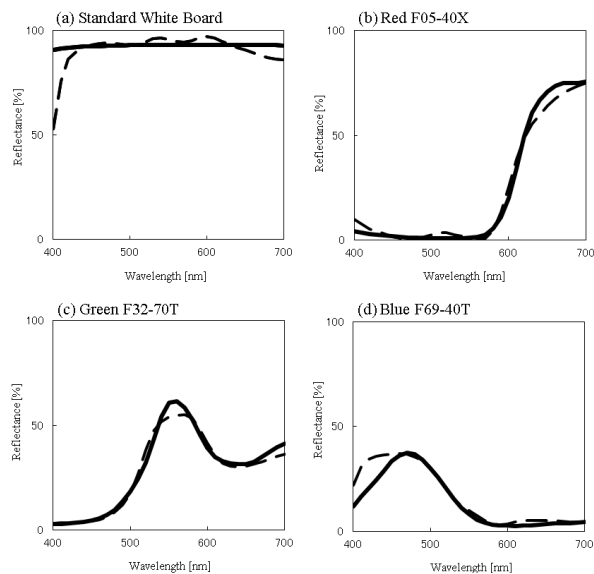


Fig. 11 Estimate results of spectral reflectivity (Solid: Estimate value, Dash: True value).

D65光源下を想定し $xy$ 色度図上に各被写体の色度をプロットした結果をFig. 12に示す。4つの被写体の真値に対する推定結果の色差 $\Delta E_{ab}$ の平均値は、

約2.5であった。推定演算を全てのマクロピクセルについて行うことで、1枚の画像から2次元マルチスペクトル情報の取得が可能となる。

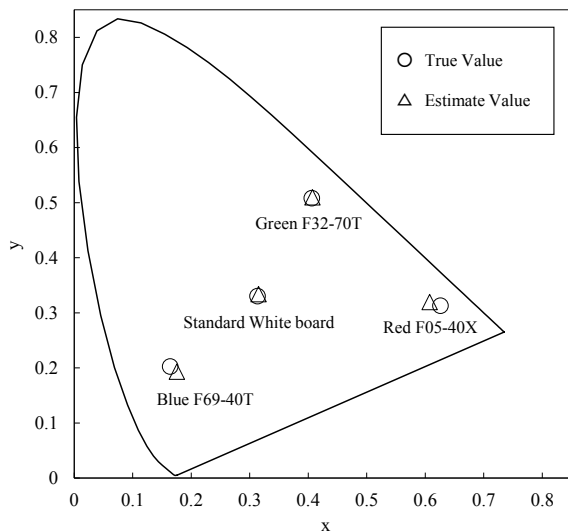


Fig. 12 Estimate results of chromaticity.

## 5. 結論

筆者らが開発したプレノプティック光学系をベースとしたマルチスペクトルカメラのメカニズムおよび性能について報告した。1度の撮影で2次元面のマルチスペクトル情報を取得できることが特長である。

アプリケーションの一例として、本マルチスペクトルカメラはファクトリーオートメーション (FA) の検査工程などに適用できると考えられる。具体的には、従来目視や複数回の点計測で検査を行っている工程の定量化、高速化に貢献できると考えている。一方、産業検査に適用するためには、よりスペクトル推定精度を上げる必要があり、学習に利用するサンプルデータ数の増加や、フィルターバンド数の増加が今後必要であると考えられる。

通常、光のスペクトルはヒトの眼では感知できないため、未だ気づかれていない応用が多く残されていると思われる。スペクトル情報の応用を掘り起こし、FAはもちろん、食品、医薬品、農業、セキュリティ分野など幅広い産業への応用を進めていく。

## 参考文献

- 1) M. Kretkowski, R. Jablonski, Y. Shimodaira: Development of an XYZ digital camera with embedded color calibration system for accurate color acquisition, *IEICE trans. on information and systems*, Vol. 93, No. 3, pp. 651-653 (2010).
- 2) M. Corbala, M. S. Milla, M. J. Yzuel: Color measurement in standard CIELAB coordinates using a 3CCD camera: correction for the influence of the light source, *SPIE Opt. Eng.*, Vol. 39, No. 6, pp. 1470-1476 (2000).
- 3) M. S. Kim et al.: Hyperspectral reflectance and fluorescence line-scan imaging for online defect and fecal contamination inspection of apples, *Sensing and Instrumentation for Food Quality and Safety*, Vol. 1, No. 3, pp. 151-159 (2007).
- 4) E. H. Adelson, J. Y. A. Wang: Single Lens Stereo with a Plenoptic Camera, *IEEE Trans. Patt. Anal. Machine Intell*, Vol. 14, No. 2, pp. 99-106 (1992).
- 5) R. Ng et al.: Light Field Photography with a Hand-held Plenoptic Camera, *Stanford Tech Report CTSR* (2005).
- 6) R. Horstmeyer et al.: Flexible Multimodal Camera Using a Light Field Architecture, *Proceedings of the IEEE International Conference on Computational Photography* (2009).
- 7) F. E. Ives: Parallax Stereogram and Process of Making Same, U. S. Patent 725,567 (1903).
- 8) 津村徳道, 羽石秀昭, 三宅洋一: 重回帰分析によるマルチバンド画像からの分光反射率の推定, *光学* (1998).