

## 4色フィルタによる分光画像の取得と分光反射率の推定

高階 香 浜本 隆之

東京理科大学大学院 工学研究科 〒102-0073 東京都千代田区九段北 1-14-6

E-mail takashina@isl.ee.kagu.tus.ac.jp

**あらまし** カラーカメラは3色で撮像するのが一般的である。これに対し本研究では、4種類のカラーフィルタを形成した単板イメージセンサにより、4色で撮像することを想定している。得られた4枚の分光画像より、画素ごとに最適な先見情報を用いて分光反射率の推定を行う方式を提案する。撮像に用いる4種類のフィルタは、RGBの3色に新たな分光透過特性を持つ1色を加える。追加する4色目のフィルタについて、分光反射率の推定精度を考慮し、最適な特性を検討する。

**キーワード** 分光反射率, カラーフィルタ, ノルム最小化, 主成分分析

## Acquisition of spectrum image with 4 color-filters image sensor and estimation of spectral reflectance

Kaori TAKASHINA

Takayuki HAMAMOTO

Graduate School of Engineering, Tokyo University of Science

E-mail takashina@isl.ee.kagu.tus.ac.jp

**Abstract** In this paper, we propose the method to estimate spectral reflectance using limited spectrum images obtained by single-sensor imaging. Although the number of color filters is three for most of normal cameras, we use four color filters which can be implemented on image sensor chip. The proposed method can estimate the spectral reflectance of each pixel from four spectrum images by using some foresight information of SOCS database. We show the experimental results to detect the characteristic of color filters and evaluate the proposed method using a real image data.

**Keyword** spectral reflectance, color filters, minimum norm, principal component analysis

### 1. はじめに

従来のカラーカメラは、人間の目の等色関数を模した3つの色情報を取得している。しかし、3色では人間の知覚した色を正確に再現することは困難であることが多い。そのため4色以上のカラーフィルタを用いたカメラが必要となる。中でも単板カラーカメラではRGBに1色を追加したものが検討されている[1][2]。4枚のカラーフィルタならばイメージセンサ上にモザイク状に配置することができ、その後のデモザイキング処理が容易であるからである。たとえば、ソニーでは人間の視覚特性により近付けるためエメラルドを[1]、東芝では感度を上げるためホワイトを4色目に採用している[2]。

本稿では、4色のカラーフィルタの分光透過特性について、分光反射率の推定に適したものを検討する。被写体の分光反射特性が分かれば、正確な色再現や、様々な環境下での色再現も可能となる。

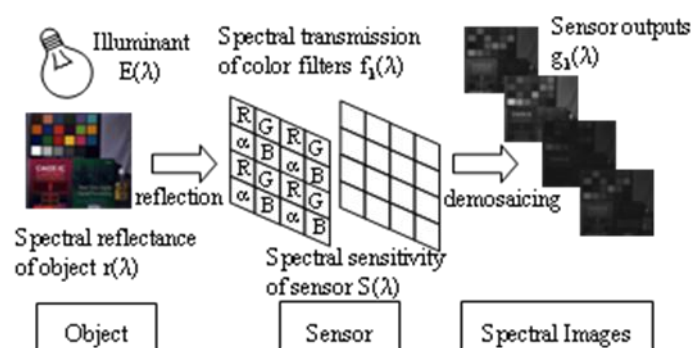


図1 分光画像取得の流れ

以下では、まず分光画像と被写体の分光反射特性の間に存在する、不良設定問題について述べる。次に、4色フィルタで被写体を撮像し得られる分光画像から、分光反射率を推定する方式について提案する。また、4つ目のカラーフィルタの分光透過特性は、実験により色差を最小にするものに決定する。さら

に、実画像に対するシミュレーションを行い、提案方式の有効性を評価する。

## 2. 被写体の分光反射特性とその推定

### 2.1 定式化

被写体の分光反射特性とは、ある被写体に光が入射したときの波長ごとの反射特性であり、後述する方式では4枚以上の分光画像から推定することができる。分光画像を取得するためには、カメラ、分光透過特性の異なる複数のフィルタ、物体を照射する照明光が必要である。

図1に分光画像取得の流れを示す。被写体の分光反射特性を  $r(\lambda)$ 、照射する照明光スペクトルを  $E(\lambda)$ 、フィルタの分光透過特性を  $f_k(\lambda)$ 、カメラの分光感度特性を  $S(\lambda)$  とする。単板カラーカメラから得られる信号値は以下の式で表せる。kはRGBの3フィルタと、追加する1フィルタ ( $\alpha$  とおく) を合わせた、4フィルタである。

$$\begin{aligned} g_R &= \int_{400}^{700} H_R(\lambda) r(\lambda) d\lambda & g_G &= \int_{400}^{700} H_G(\lambda) r(\lambda) d\lambda \\ g_B &= \int_{400}^{700} H_B(\lambda) r(\lambda) d\lambda & g_\alpha &= \int_{400}^{700} H_\alpha(\lambda) r(\lambda) d\lambda \end{aligned} \quad (1)$$

$$(H_k(\lambda) \equiv f_k(\lambda) E(\lambda) S(\lambda))$$

(1)式を、ノイズを  $\mathbf{n}$  とおいて離散的に表現すると

$$\mathbf{g} = \mathbf{H}\mathbf{r} + \mathbf{n} \quad (2)$$

となる。分光反射特性の推定とは、分光画像  $\mathbf{g}$  から(2)式の  $\mathbf{r}$  を推定することである。

### 2.2 不良設定問題

可視光領域の波長 400nm~700nm において、10nm ごとにサンプリングするとサンプル数は31となる。以後、これを分光特性の次元数と定義する。撮像時のフィルタの枚数は4枚であり、分光特性の次元に比べて小さい。よって(2)式における  $\mathbf{H}$  は正方行列とならず、推定は不良設定問題であるため、一般的に解は一意に定まらない。

## 3. 分光反射特性の推定方式の提案

被写体に対して最適な先見情報が分かっているならば、フィルタ数が少なくとも、ある程度の推定精度を得られる[3]。これまで、被写体の先見情報は、観測者があらかじめ1つ設定しておくことが一般的であった。しかし、分光画像では観測点が画素数だけ存在する。そのため1枚の画像に複数の被写体が含まれるときは、設定した先見情報に合わない被写体に対しては推定精度が低下する。様々な分光特性を有するので、画素ごとに最適な先見情報を逐次処理的に選択できれば、推定精度の向上につながる。

表1 先見情報として用いた SOCS のクラスとサンプル数

Class	No. of samples
skin	4255
flower	74
graphic	15312
paint	168
paints	114
printers	3928
photo	1152
textiles	1416

そこで、被写体の先見情報を、SOCS[4]と呼ばれる実際に存在する物体の分光反射率や透過率を収集したデータベースから画素ごとに選択し、先見情報を利用した推定処理[3][5]に適用する方式を提案する。表1に、先見情報として用いた SOCS のクラスとサンプル数を示す。あらかじめ、クラスごとに主成分分析を行い第4主成分までを算出しておく。以下に、提案方式AとBのフローをそれぞれ述べる。

#### 提案方式A

- ① まず、被写体の分光反射率の概形を知るために、先見情報を用いないノルム最小の推定法[3][5]により分光反射率  $\mathbf{r}_A$  を推定する。
- ② 次に、主成分を利用した方式[3][5]により表1に示したクラスごとに分光反射率 ( $\mathbf{r}_1$  から  $\mathbf{r}_8$ ) を推定する。さらに、①で求めた反射率  $\mathbf{r}_A$  と反射率  $\mathbf{r}_k$  ( $k=1\sim 8$ ) の絶対差分値を求め、小さい順にソートする。8個のクラスの中で上位  $th$  番目までのクラスを適用可能な先見情報とみなす。
- ③ 最後に  $th$  種類のクラスごとの推定結果の平均値を求め、これを最終的な分光反射率とする。

#### 提案方式B

- ① まず、主成分を利用した方式[3][5]により、表1に示した8つのクラスごとに、それぞれ分光反射率 ( $\mathbf{r}_1$  から  $\mathbf{r}_8$ ) を推定する。さらに得られた8種類の推定結果から、撮像に用いた光源下における XYZ 表色系の色度座標  $xyz$  値をそれぞれ求める。
- ② 次に、取得した4枚の分光画像のうち、RGBの3枚を用いて  $xyz$  値を算出する。なお、RGB表色系とXYZ表色系との関係は式(3)で表される[6]。

$$\begin{aligned} x &= \frac{0.49000r + 0.31000g + 0.20000b}{0.66697r + 1.13240g + 1.20063b} \\ y &= \frac{0.17697r + 0.81240g + 0.01063b}{0.66697r + 1.13240g + 1.20063b} \\ z &= \frac{0.00000r + 0.01000g + 0.99000b}{0.66697r + 1.13240g + 1.20063b} \end{aligned} \quad (3)$$

- ③ 分光反射率の推定結果  $r_1$  から  $r_8$  を①, ②で求めた xyz 値の絶対差分和が小さい順にソートする. ソートされた推定結果から, 上位  $th$  番目までのクラスを, 適用可能な先見情報とみなす.
- ④ 最後に  $th$  種類のクラスごとの推定結果の平均値を求め, これを最終的な分光反射率とする.

#### 4. 4色目のフィルタ特性の決定

分光画像の撮像に用いるカラーフィルタの特性を決定するために提案方式Aの実験を行う. 被写体には31次元の分光反射率を持つSOCSデータベースからクラス分けされたサンプルを用いる. ただし, 推定処理に必要な主成分を求めるために用いたサンプルは除く. 従来のRGBの3フィルタに追加するフィルタ $\alpha$ はガウシアン形状の分光透過特性とした. 図2にRGBフィルタと追加するフィルタの分光透過特性を示す. パラメータとして中心波長とバンド幅の2つを設定した. ここで, バンド幅とは, 半値幅のことである. 中心波長は5nmごとに400nmから700nmの範囲で変化させ, バンド幅は10nmごとに10nmから300nmの範囲で変化させた. また, 照明光には標準光源Aを用いた. 図3にイメージセンサの分光特性と標準光源Aのスペクトルを示す.

実験では, この条件において, 31次元の分光反射率が既知である被写体を4フィルタで撮像することを想定し, 4次元の分光情報を得る. これに, 提案方式を適用することで, 31次元の分光反射率を推定する. また, 今回提案方式における閾値 $th$ は3とした. 推定精度の評価は, CIE標準光源D65下における $L^*a^*b^*$ 空間での色差 $\Delta E^*a^*b^*$ で行った.

図4に4色目のフィルタの中心波長とバンド幅を変化させ推定処理を行ったときの平均色差を示す. 被写体にはそれぞれ (a) はpaints, (b) はflowerのクラスに属するサンプルで求めた. 図4より, paints, flowerどちらにおいても中心波長600nm付近ではバンド幅に関わらず平均色差が小さくなるのがわかる. また, 表2にクラスごとに平均色差が最小となる時のバンド幅と中心波長を示す. 表2より中心波長が600nm付近で色差が小さくなることは他のクラスでも共通していることがわかる. このことから4色目のフィルタはバンド幅を問わず中心波長600nm付近の特性を持つものを追加することが適当であると考えられる. そこで, 今回はバンド幅についてはR, Gフィルタでカットされるスペクトルを十分に補うように100nmとし, 中心波長は600nmとする. よって, 4色フィルタの透過率は図5に示すような特性に決定する.

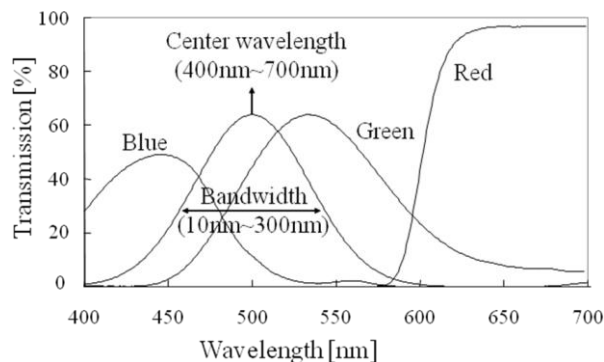


図2 RGB フィルタと追加するフィルタの分光透過特性

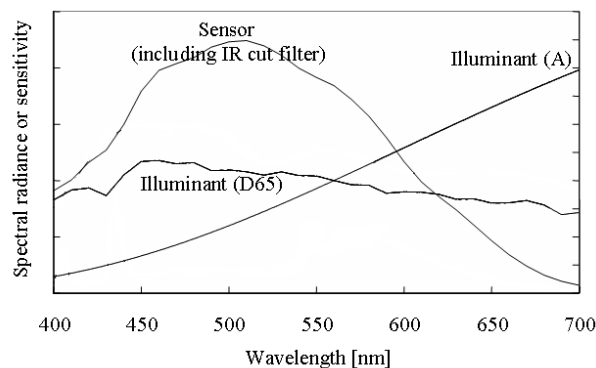


図3 センサの応答特性と照明光の分光放射輝度

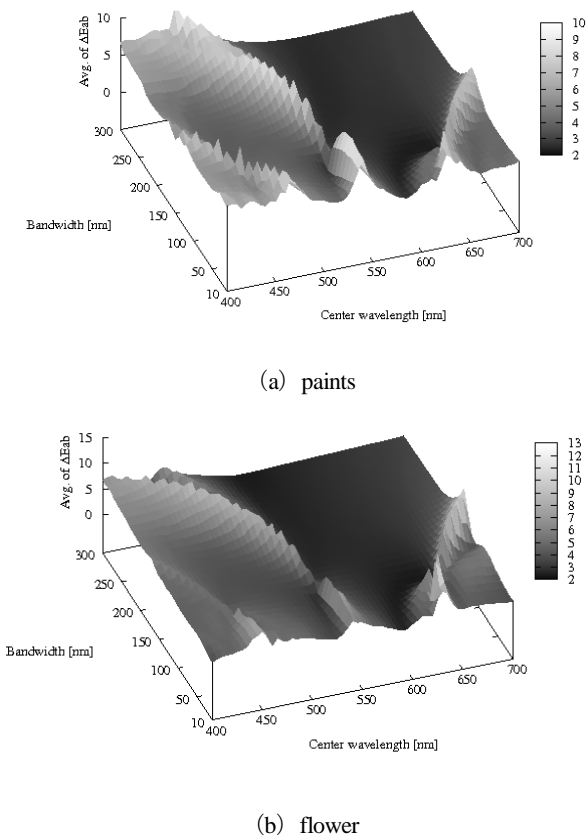


図4 4色目のフィルタの特性と再現した色差の関係

表2 追加するフィルタのバンド幅と中心波長に対する  
クラスごとの最小平均色差

class	Bandwidth [nm]		Center wave-length [nm]		$\Delta E_{ab}$	
	D65	A	D65	A	D65	A
Skin	160	90	595	635	0.24	0.46
flower	80	120	625	605	2.33	2.23
graphic	80	90	630	635	0.78	0.61
paint	80	100	635	610	1.13	0.83
paints	90	140	635	615	2.17	2.77
printers	70	90	605	605	1.35	1.30
photo	60	90	605	605	0.81	1.10
textiles	60	100	605	615	1.90	0.64
Krinov	70	90	615	610	1.47	0.94
leaves	100	120	665	655	1.21	1.24
Vrhel	70	100	615	615	1.20	1.03

## 5. シミュレーション結果

提案方式の評価のためにシミュレーションを行う。図5に示すような特性を持つ4枚のカラーフィルタを用いる。また、図3のセンサと標準光源Aを用いることとし、被写体には画素ごとに31次元の分光反射率が分かっている実画像を用いる。

シミュレーションでは、この条件において、31次元の分光特性を4次元に変換し、これに提案方式を適用することで、31次元の特性を推定した。色再現性の比較を視覚的に行うために、撮像光源とは異なるD65光源下でのRGB値を求め図6に示す。なお、正解画像は正しい分光反射率から再現した画像である。

## 6. まとめ

本稿では、4色フィルタを用いた単板カラーカメラから分光画像を得ることを想定して、被写体の分光反射特性の推定方式を提案した。また、撮像に用いる4色フィルタの分光透過特性を検討した。RGB3色に追加するフィルタの中心波長とバンド幅を変化させ、推定精度の推移を求めることにより、適した中心波長が存在することを確認した。

本方式は、照明光の分光分布を既知として扱っている。そのため、これが未知の場合についての検討が今後必要である。さらに、単板カラーカメラへの応用を考えて、デモザイキング処理の検討を行う。また、4枚目のフィルタの特性はデモザイキング処理による色再現についても考慮し、再検討する必要がある。

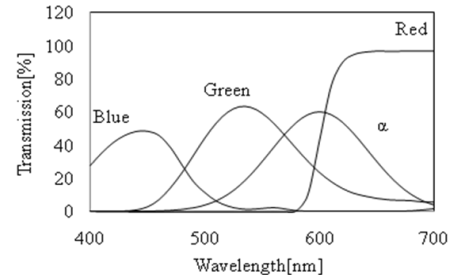


図5 分光画像取得のための4フィルタの特性



(a) 正解画像



(b) 提案方式A



(c) 提案方式B

図6 実画像を用いたシミュレーション結果

## 参考文献

- [1]ソニー株式会社,水倉貴美,加藤直哉,中島健,“画像装置”特開2007-97202
- [2]H. Honda, Y. Iida, G. Itoh, Y. Egawa, and H. Seki, “A novel Bayer-like WRGB color filter array for CMOS image sensor,”SPIE-IS&T/Vol.6492 64921J pp1-10.
- [3]村上百合: “分光反射率の推定理論,”日本写真学会誌,Vol.65, No.4, pp.234-239 (2002)
- [4] JIS TR X 0012, Japanese Industrial Association (2004)
- [5]三宅洋一: “分光画像処理入門,”東京大学出版会
- [6]池田光男: “色彩工学の基礎,” 朝倉書店