

# オーバーラップした分光感度を用いる1画素多色撮像方式 のための RGB 原色生成

## Reconstruction of RGB Primary Colors for Imaging Schemes of the Multiple Colors of Each Pixel with Overlapped Spectrum Sensitivity

小松 隆<sup>\*1,\*2</sup>  
Takashi Komatsu

齊藤 隆弘<sup>\*1,\*2</sup>  
Takahiro Saito

<sup>\*1</sup> 神奈川大学・工学部  
Kanagawa University,

<sup>\*2</sup> 神奈川大学ハイテクリサーチセンター  
High-Tech Research Center, Kanagawa University

### 1. まえがき

固体カラー撮像素子の性能改善のための種々な方式が提案されている。1画素で3色の信号値を獲得可能な Foveon X3 方式 [1]や、4色フィルタを用いる SONY の方式 [2]などが挙げられる。RGB 原色フィルタ以外の色フィルタによって撮像された信号の場合や、4色以上の色フィルタで撮像された信号の場合、観測された信号値を RGB 原色値に変換する手法が必要となる。しかし、この変換は典型的な悪設定問題(ill-posed problem)である。本稿では、正則化法を用いてこの変換を実現する手法を提案する。

### 2. 任意の色フィルタで撮像された画像からの RGB 値の復元法

撮像対象物の観測位置における分光反射率を人間の可視光域で離散化し、波長の短いものから順に並べたベクトルを  $\vec{d} = (d_1, d_2, \dots, d_M)^T$  とする。一般に、N 種類の色フィルタの分光透過率を離散化し並べた  $N \times M$  行列を  $C$  とし、標準光源の下で観測されたフィルタ出力を  $\vec{q} = (q_1, q_2, \dots, q_N)^T$  とすると(1)式となる。

$$\begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \vdots \\ q_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \dots & c_{1M} \\ c_{21} & c_{22} & \dots & c_{2M} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ c_{N1} & c_{N2} & \dots & c_{NM} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_M \end{bmatrix} \quad (1)$$

同様に、RGB 原色フィルタの分光透過率を表わす  $3 \times M$  行列を  $P$ 、標準光源の下で観測された RGB 出力を  $\vec{p} = (r, g, b)^T$  とすると、

$$\vec{p} = P\vec{d} = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & \dots & r_M \\ g_1 & g_2 & \dots & g_M \\ b_1 & b_2 & \dots & b_M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_M \end{bmatrix} \quad (2)$$

よって、RGB 原色値の復元は、観測値  $\vec{q}$  が与えられたとき、 $\vec{p}$  を求めることに相当する。

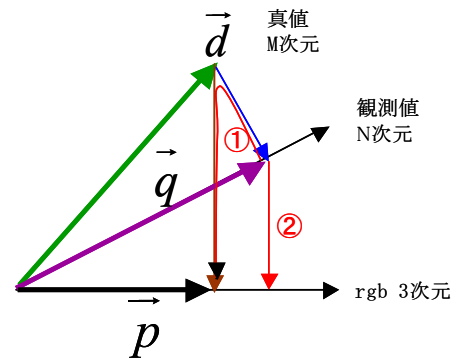


図1  $\vec{d}, \vec{q}, \vec{p}$  と RGB 復元処理の関係

$\vec{d}, \vec{q}, \vec{p}$  と RGB 復元処理との関係を概念的に示したものが図1である。撮像対象分光反射率ベクトル  $\vec{d}$  を N 次元観測空間に射影したものが  $\vec{q}$ 、RGB 3次元空間に射影したものが  $\vec{p}$  である。 $\vec{q}$  から  $\vec{p}$  を求める最も簡易な方法は、 $\vec{q}$  を  $\vec{p}$  に射影する方法②である。 $\vec{q}$  と  $\vec{p}$  とが極めて近い関係にあれば、この方法で良好な RGB 復元画像が得られる。しかし、 $\vec{q}$  と  $\vec{p}$  とが近い関係に無い場合、 $\vec{q}$  から  $\vec{d}$  を復元し、復元値から  $\vec{p}$  を求める①の処理が必要である。以下では、後者の復元法について検討する。

(1)式の左辺と右辺とを入れ替え、両辺の左から  $C^T$  を掛けると、

$$C^T C \vec{d} = C^T \vec{q} \quad (3)$$

ここで、 $C^T C$  は  $M \times M$  の正方行列で、その階数は高々  $3 (< M)$  であり逆行列は存在しない。よって、観測された信号値  $\vec{q}$  から  $\vec{d}$  を求める問題は典型的な悪設定問題となる。本稿では、正則化法を用いて、悪設定問題を良設定問題(well-posed problem)に変換することで、 $\vec{q}$  から  $\vec{d}$  を推定し、推定値を(2)式に代入して RGB 値を求める手法を提案する。

## 2.1 電力最小化

$\vec{q}$  から  $\vec{d}$  を推定する問題は、 $\min_{\vec{d}} \left[ \left\| \vec{q} - C\vec{d} \right\|^2 \right]$  を満たす  $\vec{d}$  を求めることと等価である。ここで、 $\vec{d}$  の電力を最小化条件に加えると(4)式となる。

$$\min_{\vec{d}} \left[ \left\| \vec{q} - C\vec{d} \right\|^2 + \lambda \left\| \vec{d} \right\|^2 \right] \quad (4)$$

(4)式は良設定問題となり、 $E(\vec{d}) = \left\| \vec{q} - C\vec{d} \right\|^2 + \lambda \left\| \vec{d} \right\|^2$

とおくと、(4)式の解は  $\frac{\partial}{\partial \vec{d}} E(\vec{d}) = 0$  より

$$-C^T \vec{q} + C^T C \vec{d} + \lambda I \vec{d} = 0 \quad (5)$$

$$(C^T C + \lambda I) \vec{d} = C^T \vec{q} \quad (6)$$

となる。 $\lambda \neq 0$  のとき  $C^T C + \lambda I$  は逆可能であり、 $\vec{d}$  は(7)式で求まる。

$$\vec{d} = (C^T C + \lambda I)^{-1} C^T \vec{q} \quad (7)$$

よって、観測値  $\vec{q}$  は(8)式で RGB 原色値に変換される。

$$\vec{p} = P\vec{d} = P(C^T C + \lambda I)^{-1} C^T \vec{q} \quad (8)$$

## 2.2 差分電力最小化

正則化法 2.1 に更に隣接する分光反射率差分電力の最小化条件を加えると(9)式となる。

$$\min_{\vec{d}} \left[ \left\| \vec{q} - C\vec{d} \right\|^2 + \lambda \left\| \vec{d} \right\|^2 + \mu \left\| A\vec{d} \right\|^2 \right] \quad (9)$$

ここで、行列  $A$  は  $M \times M$  の(10)式の帯行列である。

$$A = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & \dots & 0 \\ -1 & 2 & -1 & \dots & 0 \\ 0 & -1 & 2 & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & 2 & -1 \\ 0 & \dots & \dots & -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

(9)式の解は(11)式より求まり、(12)式と変形できる。

$$-C^T \vec{q} + C^T C \vec{d} + \lambda I \vec{d} + \mu A^T A \vec{d} = 0 \quad (11)$$

$$(C^T C + \lambda I + \mu A^T A) \vec{d} = C^T \vec{q} \quad (12)$$

(12)式は  $\lambda \neq 0$  または  $\mu \neq 0$  のとき  $C^T C + \lambda I + \mu A^T A$  は逆可能であり、 $\vec{d}$  は(13)式より求まる。

$$\vec{d} = (C^T C + \lambda I + \mu A^T A)^{-1} C^T \vec{q} \quad (13)$$

よって、観測値  $\vec{q}$  は(14)式で RGB 原色値に変換される。

$$\vec{p} = P\vec{d} = P(C^T C + \lambda I + \mu A^T A)^{-1} C^T \vec{q} \quad (14)$$

## 3. RGB 復元シミュレーション

提案方式の応用例として Foveon X3 方式で撮像された画像信号から RGB 原色信号を復元するシミュレーション実験

について述べる。X3 撮像方式はシリコンの光吸収係数が波長毎に異なることを利用して、1画素に対して3色の信号値を獲得する方式である。X3 では、シリコン内部に深さの異なる2つの絶縁層を設け、表層、中間層、深層に蓄積された電荷を読み取ることで3色の信号値獲得している。シリコン内の光の強度は  $I = I_0 e^{-\alpha x}$  で表される[3]。 $I_0$  はシリコン表面の光強度、 $\alpha$  は吸収係数、 $x$  は深さである。吸収係数は波長毎に異なる。図2はシリコンの深さと RGB 各々の信号の減衰率を示したものである。

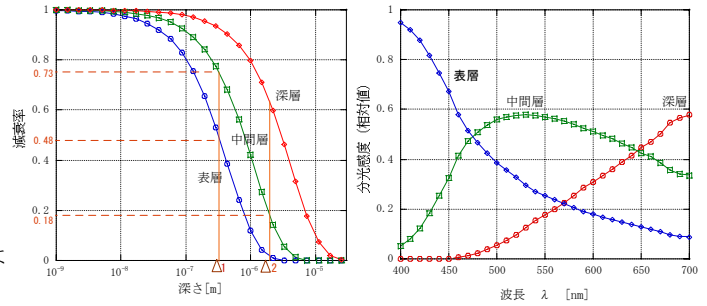


図2 シリコンの深さと RGB 信号の減衰率との関係

図2の  $\Delta_1, \Delta_2$  の位置に絶縁層を設けるものとする。各層に蓄積される電荷は、層内での各信号の減衰率に比例するものとする。表層・中間層・深層に於ける分光感度をシミュレーションにより求めることができる[4]。図3は、シミュレーションにより求めた分光感度である。図3の分光感度は明らかに RGB 原色フィルタの分光感度とは異なっている。よって、X3 方式で撮像された信号値は RGB 原色値に変換する必要がある。

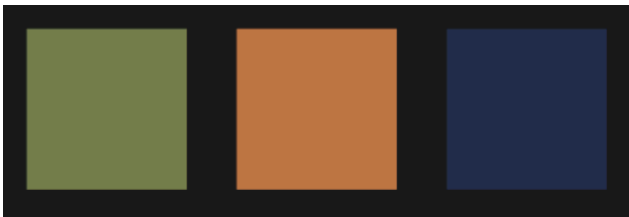
マクベスカラーチャートは人間の可視光域における分光反射率が詳しく調べられている[5]。ある色の 400nm ~ 700nm までの波長を 10nm 毎に 31 個並べた分光反射率ベクトルを  $\vec{d} = (d_1, d_2, \dots, d_{31})^T$  とする。X3 の分光感度行列を  $C$  とすると、2つの絶縁層の深さ  $\Delta_1, \Delta_2$  が与えられると、(15)式により  $C$  の各要素が定まる。ここで、 $\alpha_{\lambda i}$  は波長  $\lambda i$  の光に対するシリコンの減衰係数である。

$$\begin{cases} c_{1i} \sim 1 - e^{-\alpha_{\lambda i} \Delta_1} \\ c_{2i} \sim e^{-\alpha_{\lambda i} \Delta_1} - e^{-\alpha_{\lambda i} \Delta_2} \\ c_{3i} \sim e^{-\alpha_{\lambda i} \Delta_2} \end{cases}, i = 1, \dots, 31 \quad (15)$$

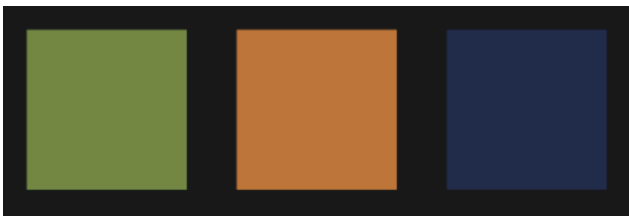
分光反射率  $\vec{d}$  と分光感度行列を  $C$  とから  $\vec{q}$  を計算により求めることができる。 $\vec{q}$  と  $C$  とを決定できれば、2.1 や 2.2 の条件を付加して RGB 原色値を復元することができる。シミュレーションにより、種々な  $\Delta_1, \Delta_2$  に対して 2.1 と 2.2 の手法により RGB 原色値を復元し、復元に最適な  $\Delta_1, \Delta_2$  を求めた。また、正則化条件 2.1 と 2.2 のパラメータ  $\lambda$  および  $\mu$  の最適値を求めた。表1に得られた最適値を示した。図4(a)は各パラメータを表1の最適値に設定したときの差分電力最小化条件を用いたときの復元画像であ

表1 提案方式で用いたパラメータ

	2.1 電力最小化	2.2 差分電力最小化
$\Delta_1$ [m]	$1.55 \times 10^{-6}$	$1.42 \times 10^{-6}$
$\Delta_2$ [m]	$2.22 \times 10^{-6}$	$2.53 \times 10^{-6}$
$\lambda$	0.00001	0.0
$\mu$	—	0.001



(a) 提案方式の復元画像 (差分電力最小化)



(b) 原画像(RGB原色フィルタ画像)



(c) 観測値を直接RGBに射影して得られる復元画像

図4 RGB復元処理画像

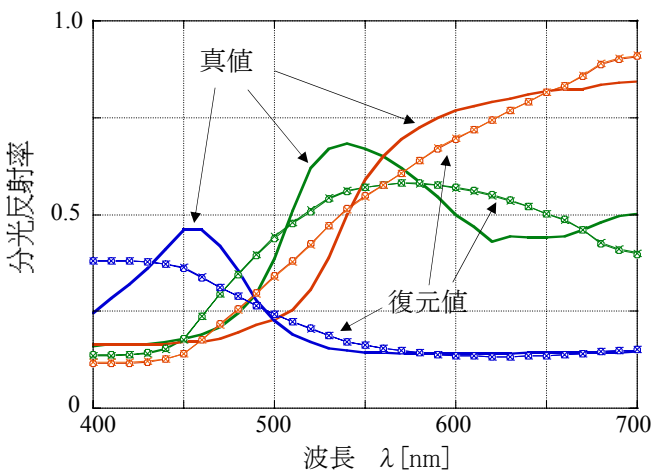


図5 復元の過程で得られる分光反射率

る。図 4(b)は RGB 原色フィルタを用いた撮像を想定してシミュレーションにより生成したマクベスカラーチャートの原画像である。両者を比較すると、概ね良好な復元画像が得られている。図 5 はカラーチャートの一部分であるが、チャート全体では緑色の再現性に若干の劣化が見られた。

また、図 4(c)には図 1 の②の方法で観測値  $\vec{q}$  を RGB に変換して得られた復元画像である。X3 方式の場合、②の方法では忠実な色再現が行えないことが分かる。

提案方式では、処理の過程で撮像対象の分光反射率の復元値が得られる。図 5 は図 4 の 3 色の分光反射率の復元値を図示したものである。図中の×印は電力最小化条件、○印は差分電力最小化条件により得られた結果である。また、太い実線は真の分光反射率である。この結果、提案方式では、真の分光反射率が有する細かな変動までは復元できていないが、概ね特性を近似する復元値がえられていることが分かる。また、電力最小化と差分電力最小化との差は僅かであった。RGB 復元画像の SN 比は、後者が若干優れていた。

#### 4. むすび

本稿では、RGB 原色フィルタ以外の色フィルタで撮像された信号値から、RGB 原色値を復元する手法を提案した。また、応用例として、提案法により Foveon X3 方式で撮像された信号を RGB に変換可能であることを示した。現在、4 色フィルタへの応用を検討中である。

これまで、カラー画像の撮像は RGB 原色フィルタを用いた方式が多く用いられてきた。今後、忠実な撮像のためには 4 色以上の色フィルタの利用が必要となる。一方、出力デバイスはプリンタ、CRT、LCD、プロジェクタ等多岐にわたり、その色特性は各々異なっている。本稿の提案方式は、撮像対象の分光反射率を推定する方式であり、RGB 画像の復元以外にも、各出力デバイスの特性を考慮した出力画像の生成、所謂カラーマッチングにも応用できる。また、復元された分光反射率の画像処理への応用も考えられる。

本研究は、文部科学省ハイテクリサーチセンター整備事業の助成の下に行われた。感謝の意を表す。

<参考文献>

- [1] [http://www.foveon.com/X3\\_tech.html](http://www.foveon.com/X3_tech.html)
- [2] <http://www.sony.jp/products/di-world/cyber-shot/ptl/index.html>
- [3] 米本, 「CCD/CMOS イメージ・センサの基礎と応用」 CQ 出版 2003 年 8 月.
- [4] 小松, 齊藤 「Foveon<sup>(R)</sup> X3<sup>TM</sup> 撮像方式の一検討」, 電子情報通信学会総合大会, D-11-69, 2003 年 3 月.
- [5] 大田, 「色再現工学の基礎」 コロナ社 1997 年 9 月.