

# ハイブリッド撮像方式の検討

—カラーフィルタ方式+ダイレクト撮像方式—  
A Study of Hybrid Imaging Method  
—Color Filtering Method + Direct Imaging Method—

小松 隆†  
Takashi Komatsu

齊藤 隆弘‡  
Takahiro Saito

## 1. まえがき

単板カラー固体撮像方式には、カラーフィルタ方式とダイレクト撮像方式とがある。カラーフィルタ方式ではベイヤー色フィルタ配列が最もよく使われているが、Red, Blue画像と Green 画像とのサンプリングレートが異なり、特に、高精細な補間復元画像を生成する際に偽色を生じる原因となっている。一方、ダイレクト撮像方式は、R,G,B 各光がシリコンの異なる深さで減衰・光電変換される性質を利用して1画素毎に3つの色信号が得られる撮像方式である。しかしながら、R,G,B の色分離はシリコン内での各色の減衰特性のみによって決まるため、色再現性が問題となっている。我々は先に色フィルタ方式とダイレクト撮像方式とを併用した撮像方式を提案した[1]。本稿では、この撮像方式の色再現性について検討した。

## 2. 撮像方式の概要

Direct 撮像法は、シリコン内部を表層、中間層、深層の3つの層に分け、各層に蓄積された電荷を読み取ることで RGB の信号獲得している。表層、中間層、深層の各層で得られる信号のスペクトル分布を求めると図1となる。標準的なRGBのスペクトル分布と比較して全体的に広がっており、特に G 信号に相当する中間層のスペクトルの広がりが大きくなっている。Green は Blue と Red とに挟まれているため、シリコンの深さ方向の減衰特性だけでは分離が難しいことがわかる。

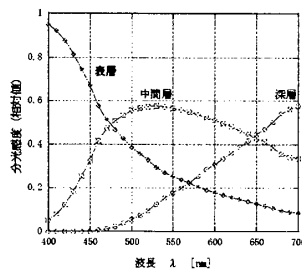


図1 Direct 撮像法のスペクトル特性

図2に提案方式の概念図を示す。各画素の表面には Green と Magenta との色フィルタが市松模様塗布されている。Green フィルタの下には従来の光電変換素子が配置され、この画素では green の色信号が観測される。Magenta 色フィルタの下には3層の direct 撮像素子が配置され、上層では Blue に相当する色信号を、下層では Red に相当する色信号を観測する。Magenta 色フィルタの分光透過特性は近似的に R+B となり、入力光から Green 成分が除去されたものとなっている。あらかじめ分離困難な Green 信号成分を除去することで、direct 撮像方式においても Blue 成分と Red 成分とを良好に分離することが可能になるものと考えられる。一方、Green 成分は direct 撮像

†神奈川大学工学部

‡神奈川大学ハイテクリサーチセンター

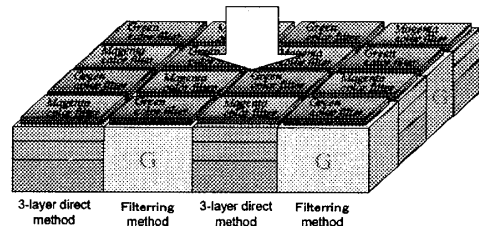


図2. 提案方式の概念図

方式では分離が困難なため、色フィルタ方式により単独に観測する。

## 3. 併用方式の分光感度と色再現性

### 3.1 提案方式の分光感度

図2の構造を想定したときに、観測される3色を  $\tilde{R}, \tilde{G}, \tilde{B}$  とすると、各々の分光感度は図3となる。図には比較のため、R,G,Bフィルタの相対分光感度も破線で示した。図3中の  $\tilde{R}, \tilde{B}$  の分光感度は、図1の深層、表層の分光感度と比較して、より Red と Blue の色フィルタの分光感度に近づいていることがわかる。しかし、 $\tilde{R}$  は Blue と Green の境界付近にも感度を持ち、 $\tilde{B}$  は Green と Red の境界付近にも感度を持っている。よって、観測された  $\tilde{R}, \tilde{G}, \tilde{B}$  をそのまま R,G,B 信号として使用することはできない。

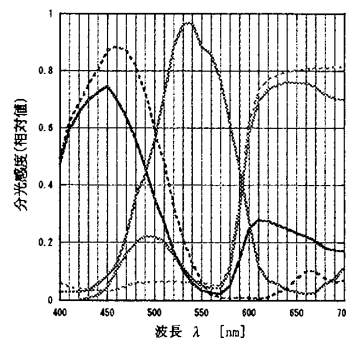


図3. 提案方式の分光感度

### 3.2 R,G,B 変換

観測された  $\tilde{R}, \tilde{G}, \tilde{B}$  値から本来の R,G,B 値に変換する処理は、カラーマッチングに相当する。本稿では、文献[2]の正則化法を用いたカラーマッチングによりカラー変換を行った。処理手順の概要を示す。

まず、撮像対象の分光反射率を表すベクトルを  $\vec{d}$  とする。提案方式の3つの分光感度表す行列を  $C$ 、観測される3信号値を  $\vec{q}$  とすると提案方式による撮像の過程は(1)式となる。

$$\vec{q} = C\vec{d} \quad (1)$$

同様に、RGB 原色フィルタの分光透過率を表す行列を  $F$ 、標準光源の下で観測された RGB 出力を  $\vec{p}$  とすると、

$$\vec{p} = F\vec{d} \quad (2)$$

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。

(1) 式を (3) 式と変形する。

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

ここで、 $C^T C$  は  $31 \times 31$  の正方行列で、その階数は高々3(<31)であり逆行列は存在しない。よって、正則化法を用いて  $\vec{d}$  値を求める。

ここでは分光反射率差分電力の最小化条件を正則化項として加え、式(4)を最小化する  $\vec{d}$  を求める問題と定式化する。

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

行列  $A$  は  $31 \times 31$  の (5) 式の帯行列である。

$$A = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & \dots & 0 \\ -1 & 2 & -1 & \dots & 0 \\ 0 & -1 & 2 & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & 2 & -1 \\ 0 & \dots & \dots & -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

(4) 式の解は (6) 式より求まり、(7) (8) 式と変形できる。

$$-C^T \vec{q} + C^T C \vec{d} + \lambda A \vec{d} = 0 \quad (6)$$

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

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

よって、観測値  $\vec{q}$  は (9) 式で RGB 原色値に変換される。

$$\vec{p} = F(C^T C + \lambda A)^{-1} C^T \vec{q} \quad (9)$$

### 3.3 色再現性の評価

提案方式の色再現性能は、Magentaフィルタを通過した信号を受けるダイレクトセンサの表層と深層との分光感度により左右される。表層と深層との最適な深さを決定する必要がある。本稿では以下の手順でこの最適化を行った。まず、ダイレクトセンサの受光領域を  $0 \sim 4.5 \mu\text{m}$  と仮定し、表層の光電変換領域を  $0 \sim d_1$  まで、深層の光電変換領域を  $d_2 \sim 4.5 \mu\text{m}$  と設定する。  $d_1$  と  $d_2$  が定まると表層と深層との分光感度を求めることができる。この分光感度を用いて、マクベスカラーチャートを撮像した時の観測値  $\vec{R}, \vec{G}, \vec{B}$  が求められる。3.2の色変換法により、観測値  $\vec{R}, \vec{G}, \vec{B}$  より原色 RGB 値が求まる。この RGB 値と、本来 RGB フィルタを用いたときに得られる真の RGB 値とを比較することで、色再現性を評価することができる。

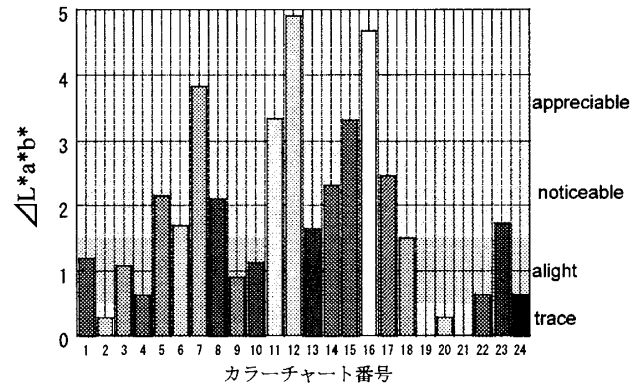


図4. 色再現性評価の結果

実際に行った最適化シミュレーションの手順を以下に示す。

1. 全体の深さを  $0 \sim 4.5 \mu\text{m}$  に固定し、この間を  $d_1, d_2$  という2つの深さを適当に初期値として設定する。
2. 与えられた  $d_1, d_2$  により、表層と深層との分光感度を計算する。
3. 分光感度よりマクベスカラーチャートを撮影したときの観測値  $\vec{R}, \vec{G}, \vec{B}$  を求める。
4. (9)式を用いて観測値  $\vec{R}, \vec{G}, \vec{B}$  を RGB 変換する。
5. RGB フィルタの分光感度より求めたマクベスカラーチャートの RGB 値と4. で求めた RGB 値との距離を  $L^*a^*b^*$ 空間で算出し、その総和を  $E_{\Delta Lab}$  とする。
6.  $d_1$  を固定し、もう  $d_2$  を  $d_2 - \alpha$ ,  $d_2 + \alpha$  と変化させ、変化させた深さに対して、分光感度、観測値  $\vec{R}, \vec{G}, \vec{B}$ , RGB 値,  $E_{\Delta Lab}$  を順に計算し、 $E_{\Delta Lab}$  が減少するように  $d_2$  を更新する。
7. 5. の操作を  $d_1, d_2$  交互に  $E_{\Delta Lab}$  の減少が無くなるまで繰り返す。

以上の最適化を行った結果、 $d_1 = 0.8 \mu\text{m}$  と  $d_2 = 1.2 \mu\text{m}$  とが定まった。図3は、このときの分光感度を、図4はマクベスカラーチャートの  $\Delta L^*a^*b^*$  を示したものである。この結果より、7, 11, 12, 15, 16 番の色では  $\Delta L^*a^*b^*$  が3以上の値となっており、現状では色再現性は十分とは言えない状況にある事がわかる。

### 4. むすび

ダイレクトイメージセンサとカラーフィルタとを併用する撮像方式の色再現性能について検討した。シミュレーションにより、マクベスカラーチャートの各色毎の再現性能を調べた。幾つかの色で、目立つほどの色差が生じる結果となった。今後、色変換法や、用いるカラーフィルタの最適化を行い色再現性を改善する必要がある。

#### 参考文献

- [1] 小松, 齊藤 「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」 第 3 回情報科学技術フォーラム, J-024, 2004 年 9 月
- [2] 小松, 齊藤 「カラーフィルタを併用した新しい Direct 撮像法の提案」 電子情報通信学会総合大会, D-11-68, 2005 年 3 月。