

デモザイキング技術を用いた高精細なマルチバンドカラー画像 入力方式に関する研究

代表研究者 齊藤 隆弘 神奈川大学 教授
共同研究者 小松 隆 神奈川大学 助手

目 的

撮像対象の忠実な色情報獲得のためには、1画素をRGBの三原色で表現する現行のカラー撮像方式では不十分であり、マルチバンド画像の入力技術が不可欠である。しかしマルチバンド画像を入力するためには、現状では規模の大きな画像入力システムが必要である。民生用のRGBカラーカメラでは、単板の固体撮像素子に色フィルタアレイを用いて獲得したモザイク状の画像信号にデモザイキング処理を施して、RGB三原色の画像の入力を行っている。本研究ではダイクロイックプリズムと色フィルタアレイを用いて、撮影した画像データからマルチバンド画像をデモザイク生成する方式を提案し、必要となる画像処理技術の開発を行った。

方 法

現在、画像入力には固体撮像素子が広く用いられている。固体撮像素子自身は分光感度を持たないため、マルチバンド画像を撮影するためには、撮像素子前面に所望のバンドパスフィルタを挿入する必要がある。撮像対象が静止している場合、フィルタを交換して撮影するという操作を繰り返すことで、マルチバンド画像の撮影が可能である。しかし、動画の撮像の場合や、静止画像の撮像においても対象が動いている場合、フィルタ交換方式は適用できない。カラーRGB撮像の場合、このような撮像にはダイクロイックプリズムを用いる3板撮像方式や、画素毎に色フィルタを塗布した単板カラーフィルタ撮像方式が用いられている。マルチバンド撮像の場合、バンド数が多いため、新たな撮像方式の検討が必要となる。ダイクロイックプリズムで入力信号を6バンドに分解し撮像する方式とすると、大きなダイクロイックプリズムが必要となる。一方、色フィルタを用いる単板方式とすると、1枚の撮像素子の上に6種類の色フィルタを配置しなければならず、1バンド当たりの標準化間隔が粗くなり、撮像画像の解像度の観点の問題となる。本研究では、ダイクロイックプリズム方式と色フィルタ方式とを併用する撮像方式を提案する。6バンドのマルチバンド画像を撮影する場合、まず、ダイクロイックプリズムで3帯域に分割し、各々をカラーフィルタ方式の撮像素子で撮影し、更に2バンドずつに分割する方式である。本研究ではこのような撮像方式を想定したときに必要となる信号処理技術について検討した。

本研究で提案する撮像方式を図1、図2に示す。図1はRGB3板カラー撮像方式と同様に、入力信号をダイクロイックプリズムで3つの帯域信号に分解する。ここでは、撮像

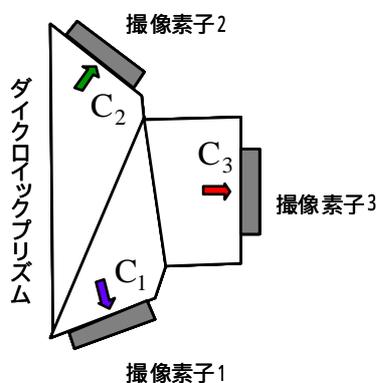


図1．3板撮像方式

b ₁	b ₂	b ₁	b ₂	b ₁
b ₂	b ₁	b ₂	b ₁	b ₂
b ₁	b ₂	b ₁	b ₂	b ₁
b ₂	b ₁	b ₂	b ₁	b ₂
b ₁	b ₂	b ₁	b ₂	b ₁

図2．カラーフィルタ撮像素子

素子に使用するバンドパスフィルタと同程度の鋭い遮断特性を有するダイクロイックプリズムの利用を想定している。プリズムでC₁、C₂、C₃の3帯域に分割された入力信号は、各々

1～3の撮像素子により撮像される。撮像素子1～3には、カラーフィルタ方式の撮像素子が用いられる。図2は撮像素子1に用いられるカラーフィルタ配列を表している。 $[b_1, b_2]$ はプリズムで分離された入力信号を更に2つの帯域に分離する色フィルタである。撮像素子2, 3にも同様に各々 $[b_3, b_4]$ と $[b_5, b_6]$ の色フィルタを用いた撮像素子を用いる。ダイクロイックプリズムの分光感度と各色フィルタの分光感度との概念図を図3に示す。

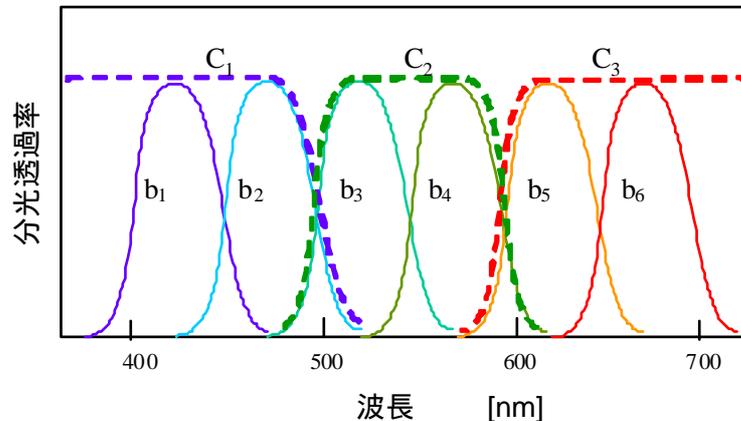


図3 . ダイクロイックプリズムと各色フィルタの分光感度の概念図

以下では、このような撮像方式を想定したときに必要となる信号処理アルゴリズムについて検討する。

固体撮像素子は撮像管のようなアナログデバイスとは異なり、標本化構造を有している。特に、提案する撮像方式は、図2に示すように市松模様の標本化構造となっている。図2の標本化構造の場合、各バンド画像は図4（右）の空間周波数帯域まで復元可能となる。

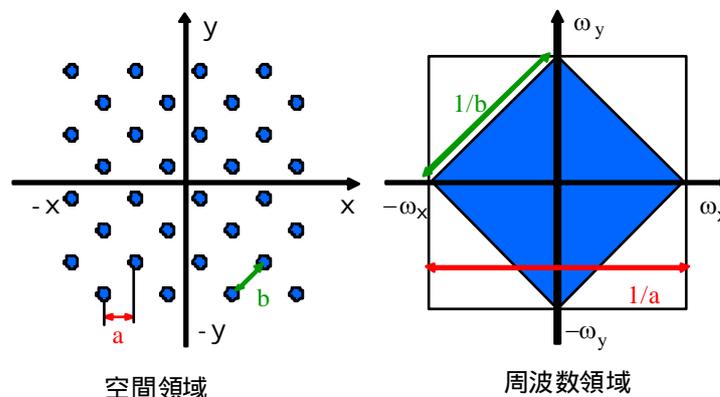
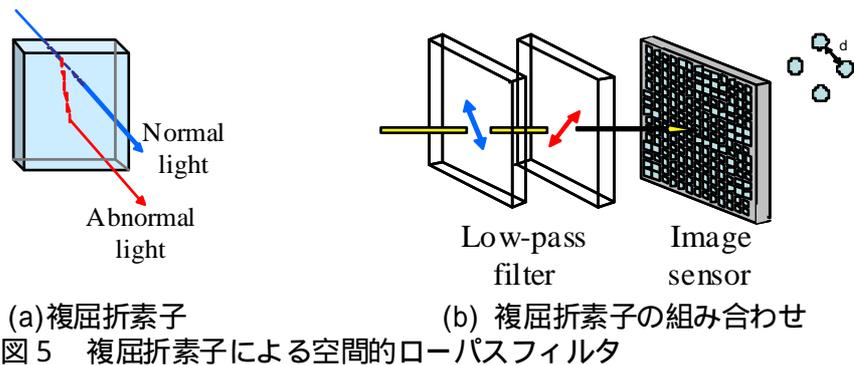


図4 . 標本化パターンと復元可能周波数帯域

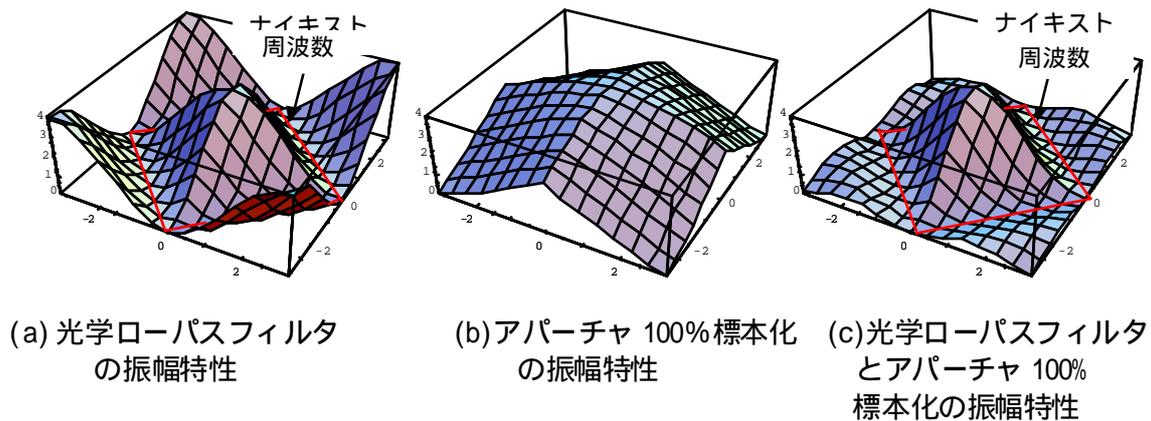
標本化の際に、図4の復元可能空間周波数帯域よりも高い周波数成分が入力信号中に含まれていると、折り返し歪みを生じる。よって、光学的ローパスフィルタによってナイキスト周波数を超える成分を除去しておく必要がある。このフィルタは複屈折素子を用いて実現することができる。複屈折素子は入力光を通常光と、通常光に対してある方向に一定の距離だけ位置ずれを生じた異常光とに分離する機能を有する光学素子である(図5 (a))。複屈折素子を図5 (b)に示すように2枚組み合わせることで、図4の復元可能帯域の外周にゼロ点を持つローパスフィルタを実現することができる。図5 (b)では対角方向に位置ずれを生じる素子と反対角方向に位置ずれを生じる素子とを組み合わせ用いている。位置ずれの大きさは共に対角(反対角)方向の標本化間隔 d と等しく設定する。



光学ローパスフィルタの遮断特性は式(1)と表され、振幅特性は図6(a)のようなものと

$$|H(x, y)| = 2 * \{1 + \cos(|x| + |y|)\} \quad (1)$$

なる。また、撮像素子の画素開口(アパーチャ)を100%と仮定すると、その振幅特性は図6(b)となり、両者の積の振幅特性図6(c)が実際の撮像の際の周波数振幅特性である。この図から明らかなように、ナイキスト周波数のところで振幅利得が零となるため光学的ローパスフィルタを挿入して撮像することで、折り返し歪みを減少させることができる。しかしながら、図6(c)の振幅特性は急峻な遮断特性を持っておらず、画面中央の直流成分の周囲ですでに減衰が起こっており、高い周波数成分ではかなり大きな減衰を生じていることがわかる。このため、撮像素子表面に結像した映像自体がすでにぼけたものとなっている。



このようにして観測された画像から、高精細な画像を得るためには、光学ローパスフィルタにより減衰してしまった周波数成分を本来の大きさに戻すシャープニングと呼ばれる処理が必要である。

一方、カラーフィルタ方式では、個々のバンド画像は市松状の画素値のみが観測され、残りの半数の画素値は観測されていない。したがって、観測されていない画素値を補間復元するデモザイクと呼ばれる処理が必要がある。この処理は画像の拡大補間問題である。

提案する撮像方式で必要となる信号処理は、観測画像のシャープニングを行い、同時に観測されていない画素値を補間復元するデモザイク法である。以下では、撮像過程をぼけ画像の標本化としてモデル化し、撮像信号から可能な限り原画像信号を復元するアルゴリズムを導出する。

カラーフィルタを用いた単板固体カラー撮像方式では、RGB信号間の相関を利用したデモザイク処理が行われている。例えば、Greenの観測されていない画素値を補間するためには、近傍のRedやBlueの画素値を用いてエッジ方向の推定を行ったり、勾配強調を行ったりしている。マルチバンド画像場合、一般にはRGB信号より隣接バンド間の相関は

高いと考えられる。しかし、マルチバンド画像撮像の本来の趣旨からすると、これまでのRGB撮像とは異なる対象物の撮像も想定する必要があり、バンド間相関を常に利用できるとは限らない。よって、各バンド画像は独立にデモザイキングする必要がある。バンド毎に独立にデモザイキングする場合、最適なデモザイキング法は、撮像処理をローパスフィルタリングとサブサンプリング処理と考え、その逆フィルタリング処理を行いながらデモザイキングを行う方式である。以下では、この方式を用いた補間復元方式を示す。

撮像の過程は式(2)で定式化される。

$$g = A \circ f \quad (2)$$

ここで、 f はモザイク標本化されていないあるバンド画像を表わし、 A は光学的ローパスフィルタによるリング処理とモザイク標本化処理を表わす。 g はあるバンドのモザイク標本化画像を表わす。

シャープニング補間復元処理は式(3)と定式化される。

$$f = A^+ \circ g \quad (3)$$

ここで、作用素 A^+ は、 A の擬似逆作用素を表す。この解は Landweber 型の繰り返しアルゴリズムを用いて求めることができる。式(3)を式(4)と変形する。

$$f = f + \varepsilon \cdot T \circ (g - A \circ f) \quad (4)$$

ここで、 ε はスカラ定数、作用素 T は観測空間中でモザイク状に標本化された g の画素を復元空間中で均一標本化された f の画素に変換する作用素である。式(4)を式(5)のように時間発展方程式の形式に変形すると、任意の初期画像 $f^{(0)}$ から開始して、繰り返し処理

$$f^{(n+1)} = f^{(n)} + \varepsilon \cdot T \circ (g - A \circ f^{(n)}) \quad (5)$$

を行うことで、シャープニング補間復元された画像 f の最適近似画像が得られる。

Landweber 型の反復法は、繰り返し演算が必要であり、カメラ内での行う処理としては演算量が多く、実時間処理が困難である。フーリエ変換領域に持ち込むことで、同様の処理を、反復演算を行うことなく実現できる。以下では、その手順を示す。

画像の撮像過程を(6)式と表現する。

$$\begin{aligned} g_{m,n} &= (s * f)(m,n) + b_{m,n} \\ , g &: \text{Observed sample image } N \times N \\ f &: \text{Continuous image to be recovered} \\ s &: \text{Bluer liner operator(point spread function)} \\ b &: \text{Gaussian noise} \end{aligned} \quad (6)$$

g はサイズ $N \times N$ の市松状標本化画像、 f は復元すべき連続画像、 s は光学ローパスフィルタによるぼけ作用素、 b は観測時に混入するガウス性雑音である。また (m,n) 標本化を表す。 g の離散フーリエ変換と、逆変換とを式(7)で定義する。

$$\begin{aligned} \hat{g}_{\xi,\eta} &= \sum_{m,n=0}^{N-1} g_{m,n} e^{i2\pi \frac{(\xi m + \eta n)}{N}}, (\xi,\eta) \in \left\{ -\frac{N}{2} + 1, \dots, \frac{N}{2} \right\}^2 \\ g_{m,n} &= \frac{1}{N^2} \sum_{\xi,\eta=-\frac{N}{2}+1}^{\frac{N}{2}} \hat{g}_{\xi,\eta} e^{i2\pi \frac{(\xi m + \eta n)}{N}}, (m,n) \in \{0,1,\dots,N-1\}^2 \end{aligned} \quad (7)$$

式(6)は、式(8)と表される。

$$\hat{g}_{\xi,\eta} = \sum_{k,l \in \mathbb{Z}} \hat{s}_{\frac{\xi}{N} + k, \frac{\eta}{N} + l} \cdot \hat{f}_{\frac{\xi}{N} + k, \frac{\eta}{N} + l} + \hat{n}_{\xi,\eta} \quad (8)$$

ただし、 $g_{m,n}$ は市松状標本化された画像のため、輝度値の観測されていない画素値にゼロを挿入した後にフーリエ変換を行い、 $\hat{g}_{\xi,\eta}$ を求めるものとする。雑音の項を無視すると、求めたい画像 $f_{m,n}$ の最適復元値は式(9)で求めることができる。

$$f_{m,n} \square \frac{1}{N^2} \cdot \sum_{\xi, \eta = -\frac{N}{2}+1}^{\frac{N}{2}} \left\{ \widehat{s}_{\xi, \eta} \cdot \widehat{g}_{\xi, \eta} \right\} \cdot e^{i2\pi \frac{(\xi m + \eta n)}{N}} \quad (9)$$

ここで、 $\widehat{s}_{\xi, \eta}$ は、ぼけ作用素 \widehat{s} の共役作用素を表し、 \widehat{s} は式(10)によりぼけ作用素 \widehat{s} のフーリエ変換を、復元可能帯域内に限定し、帯域外の成分をゼロに置き換えた作用素である。

$$\widehat{s}_{\xi, \eta} = \begin{cases} \widehat{s}_{\xi, \eta} & , \text{if } (-N+1 \leq \xi + \eta \leq N \ \& \ -N+1 \leq \xi - \eta \leq N) \text{ or } (\xi, \eta) = (0, N) \\ 0 & , \text{otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

実際にはナイキスト周波数付近の周波数成分は、極めて小さな値しか観測されず、雑音の影響を受けやすく、これらの値を復元することは困難である。よって、式(10)の帯域制限領域を混入雑音の量に応じて低周波数よりに狭める必要がある。

結 果

マルチバンド画像を撮像するための画像入力方式を提案し、この方式で必要となる信号処理アルゴリズムについて検討した。折り返し歪み混入を避けるため、標準化構造に応じた光学ローパスフィルタの挿入が必要となるが、このフィルタの影響により、撮像された画像自体がぼけたものになってしまう。そこで、信号処理によって減衰した高周波数成分を復元し、同時に観測されていない画素値を補間復元する Landweber 型の反復アルゴリズムと、フーリエ変換領域で、ぼけ作用素の逆フィルタ処理と補間とを行う方式とを示した。高い周波数成分が欠落していると、人は画像を見てぼけていると感じるが、直流成分に近い比較的低い周波数成分が減衰している場合にも同様にぼけた画像と知覚されてしまう。提案方式は、顔画像のようにさほど急峻なエッジ構造を含まず、ナイキスト周波数付近で小さな成分しか持たない画像のデモザイキングの際に有効に機能する。これは、光学ローパスフィルタの影響で減衰した直流分に近い周波数成分を本来の値に戻すことで、画像の精細度が向上することによる効果を示すものである。一方、撮像対象画像がステップ上のエッジのように、ナイキスト周波数を越える極めて高い周波数成分まで含む場合、提案方式の復元法を適用すると、画像の精細度は改善されるが、エッジ周辺でいわゆるギブス現象によるリングング歪みが発生する。Total Variation 正則化法を導入することで、リングング歪みの発生を抑圧し、かつナイキスト周波数を越える周波数成分を復元可能な拡大補間法が提案されている [1]。現在、この方式の検討を行っている。

参考文献

- 1) F. Malgouyres and G. Guichard, "Edge direction preserving image zooming: a mathematical and numerical analysis", SIAMJ. Num. Anal., 39, 1, pp.1-37(2001).
- 2) 山口雅弘「小特集 色再現 ナチュラルビジョン 多原色に基づく新しい映像」, 映像情報メディア学会誌, Vol. 58, No. 12, pp. 1722-1727, 2004年12月.

研究発表

- 1) T. Komatsu and T. Saito, "Demosaicking for a color image sensor with removal of blur due to an optical low pass filter", Proc. SPIE - IS&T Electronic Imaging '04, SPIE Vol. 5301, pp. 334-345, Jan. 2004.
- 2) 小松隆, 齊藤隆弘: "マルチスペクトル画像を用いたカラー画像入力方式の評価法の一検討", 映像メディア処理シンポジウム (IMPS2003), I-3-02, 2003年11月.
- 3) 小松隆, 齊藤隆弘, "A Note on Acquisition using RWB Color Filters for Single Image Sensors" 第2回 情報科学技術フォーラム, J-081, 2003年9月
- 4) 小松隆, 齊藤隆弘 "複屈折式光学ローパスフィルタの特性を考慮したデモザイキングの一検討" 映像情報メディア学会年次大会, 21-3, 2003年8月.

連絡先

〒222-1-8686 横浜市神奈川区六角橋 3-27-1 神奈川大学工学部電気電子情報工学科
 齊藤隆弘 saitot01@kanagawa-u.ac.jp / 小松 隆 komatt01@kanagawa-u.ac.jp