

画像のデモザイキングにおける 特定周波数成分を対象とした Total Variation 最小化の検討

永井 亨憲¹ 白井 啓一郎¹ 宮尾 秀俊¹ 丸山 稔¹

¹ 信州大学工学部 (〒 380-8553 長野県長野市若里 4-17-1)

Image Demosaicking with Total Variation Minimization for Specific Frequency Band Components

Akinori NAGAI¹, Keiichiro SHIRAI¹, Hidetoshi MIYAO¹, Minoru MARUYAMA¹

¹Shinshu Univ., 4-17-1 Wakasato, Nagano 380-8553

Abstract: This paper describes about a method of image demosaicking that develops RGB images on digital cameras with a single image sensor. In single image sensors, one of R, G, and B colors is acquired on a pixel, and the other colors are interpolated and restored from neighboring color information. The restoration problem using mathematical optimization is designed so that the variance of restored luminance values are minimized over the whole image, i.e., designed as a total variation (TV) minimization problem. However, the effective TV regularization also has a trade-off problem that makes restored images blur. This problem is thought to be due to dealing with high frequency components of an image directly. Therefore, our method adds a set of filters that affect extract specific frequency band components for TV minimization. Although our method is still being examined, we show improved results obtained by applying some filters experimentally.

Key Words: image restoration, demosaicking, color filter array, total variation, specific filter

1 はじめに

デジタルカメラの画像センサの多くは単板式であり、画素ごとに RGB カラーのうちの色が記録され、残りの色は周辺画素の色情報から補間されて得られる。各色が記録される際には、図 1 に示されるようなパターンで記録され、カラーフィルタ配列 (CFA) と呼ばれるパターンで記録され、特に図中のパターンはベイヤー配列と呼ばれる。このようにモザイク状に間引かれた RGB 情報から、間引かれる以前の値像を推定して復元する処理をデモザイキングと呼ぶ。

一般的なデモザイキング方法はフィルタリングを用いた補間処理に基づく方法であり¹⁻³⁾、低周波数成分や高周波数成分を扱うフィルタを設計して組み合わせる。一方、より画質を高める試みとして、数値最適化に基いてモザイク状に間引かれる劣化過程を考慮して画像復元を行う方法が検討されており⁸⁾、本稿でも扱う。

画像復元に基づくデモザイキングでは、劣化前の画像データがもつ特徴を考慮し、復元した画像がその特

徴をもつように復元処理を行う。代表的なものには、輝度成分や色差成分の変化量に関する特徴がある。すなわち、画像は被写体ごとに多くの領域が単一色で平坦であり、領域の境界で急峻に色が変化する。数値的には輝度の変化量の総和 (Total Variation : TV) が小さくなる。この TV 値の最小化は、ノイズ除去やぼけ除去をはじめとする画像の復元処理において一般的に用いられるが、復元画像が本来よりも平滑化され、画像の高周波数成分に相当する模様が消失する問題がある。

提案法では上述の問題を解決するため、TV 最小化の対象から高周波数成分をフィルタリングで除外する方法を検討する。ただし、画像がモザイク状に間引かれて劣化する際、周波数領域では低周波と高周波数成分が混合するエイリアシングと呼ばれる現象が起こるため、補間処理に基づくデモザイキング^{1,3)}で用いられるような特殊なフィルタが必要になると考えられる。そこで本稿では、フィルタサイズ 3×3 の場合において経験的・実験的にフィルタ係数を与え、どのようなフィルタを用いれば復元画質が向上するかを調査し、

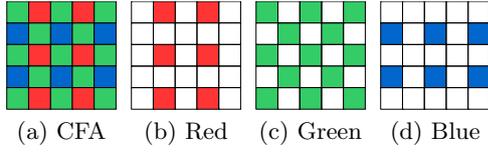


図 1: カラーフィルタ配列 (ベイヤー配列) とモザイク状に間引かれた画素値

その結果について述べる.

2 最適化に基づくデモザイクの基本的な定式化

本章では, 凸最適化に基づくデモザイクの基本的な定式化を示す. なお, Condat ら⁸⁾の方法を簡略化し, 行列形式の代わりにフィルタ形式の式で書き表したものとなる. 提案法に関わるのは式 (6) となる.

2.1 観測画像の劣化過程と目的関数

観測画像 (CFA) を Y と表し, データが間引かれる前の画像を X , RGB の各成分を $\{X_R, X_G, X_B\}$ と下付き文字を付加して表す. 次に, 間引く画素の位置に 0, 他は 1 をもつ二値マスクを用意する. 間引く画素の位置は RGB ごとに異なるため各マスクを $\{M_R, M_G, M_B\}$ と表す. これらを用いて, 画像 X から観測画像 Y を得るモデルを次式で表す.

$$\begin{aligned} Y &:= M_R \circ X_R + M_G \circ X_G + M_B \circ X_B \\ &= \sum_{c \in \{R, G, B\}} M_c \circ X_c \end{aligned} \quad (1)$$

ここで演算子 \circ は画素ごとの乗算を表す.

Y と M_c が与えられたもと X を求める問題を, その誤差の二乗和を最小化する問題として表す.

$$\arg \min_X \left\{ F(X) := \left\| Y - \sum_{c \in \{R, G, B\}} M_c \circ X_c \right\|_2^2 \right\} \quad (2)$$

ここで $\|X\|_p := (\sum_i |x_i|^p)^{1/p}$ を各画素 i の値 x_i を対象とした l_p ノルムと定義する. 以降の表記の簡略化のため, CFA をマスク処理した画像 $Y_c := Y \circ M_c$ を用意すれば, 上式は次式のように書き直される.

$$F(X) := \sum_{c \in \{R, G, B\}} \|M_c \circ (Y_c - X_c)\|_2^2 \quad (3)$$

ただし, 上式のみでは $X_c = Y_c$ の時に $F(X)$ の値が最小値 0 となり, マスクの値が 1 となる画素でしか X は求まらない.

2.2 色の高周波数成分がもつ相関を利用した正則化

画像中の模様は多くの場合陰影の変化によって生じ, 各色の輝度も陰影により同様に变化する. このため, 各色の信号波形は大まかな形状は異なるが, 細部の波形は似るという特徴をもつ. 言い換えると, 各色の高周波数成分には互いに相関があり, 水平方向と垂直方向への微分フィルタ $D_h = [0, -1, 1]$ と $D_v = [0, -1, 1]^T$ を用いて以下のように表せる.

$$\begin{aligned} D_h * X_R &\approx D_h * X_G \approx D_h * X_B \\ D_v * X_R &\approx D_v * X_G \approx D_v * X_B \end{aligned} \quad (4)$$

ここで演算子 $*$ はフィルタリング (相関計算) を表す. 式 (3) と同様に最適化に用いる場合は, 次のような正則化用の関数として表せる.

$$\begin{aligned} \Gamma_1(X) &:= \sum_{d \in \{h, v\}} \|D_d * (X_R - X_G)\|_1 \\ &+ \sum_{d \in \{h, v\}} \|D_d * (X_G - X_B)\|_1 \end{aligned} \quad (5)$$

ここで l_1 ノルムを用いるが, RGB のうち一色しかもたない領域では色の相関が薄れて誤差が増加するため, この影響を抑える目的がある. なお, 前述の従来法⁸⁾では, 上式 (5) のような単純な引き算による色差の代わりに, 色差変換 (YCoCg) を用いて色差成分に対して微分フィルタを施し, その l_1 ノルムを考慮する. すなわち, 色差成分に対する TV 最小化を考慮する.

2.3 近傍画素値の連続性を利用した正則化

画像は被写体ごとに多くの領域が単一色で平坦であり, 領域の境界で急峻に色が変化する. 数値的には輝度の変化量の総和 (TV) が小さくなる. この各色の輝度値に対する正則化用の関数は次のように表せる.

$$\Gamma_2(X) := \sum_{d \in \{h, v\}} \sum_{c \in \{R, G, B\}} \|D_d * X_c\|_1 \quad (6)$$

この正則化はデモザイク以外のノイズ除去やぼけ除去をはじめとする様々な画像復元問題で一般的に使用される.

2.4 全体の定式化と解法

以上に述べた目的関数と正則化用の関数を用いて, デモザイクの問題を次式で表す.

$$\arg \min_X F(X) + \lambda_1 \Gamma_1(X) + \lambda_2 \Gamma_2(X) \quad (7)$$

ここで λ_1 と λ_2 は正則化の強さを調整するパラメータとなる. 上式の各関数は凸関数となるため, 凸関数

最適化用の解法アルゴリズムを用いて解ける．例えば，主双対分離法⁸⁾や ADMM⁵⁾が利用できる．更に，式 (3) で示したようなマスク処理を含む場合は文献⁶⁾に示される ADMM 用の式変形を用いれば効率的に計算できる．詳細な解法については頁数の都合上省略する．

3 提案法および TV 用のフィルタの検討

前章の式 (6) で表される画素値に対する TV 正則化では，画像の高周波数成分が損なわれる問題がある．そのため，提案法では TV 正則化の対象から高周波数成分を除外することを考える．また，高周波数成分に対する正則化は式 (5) が担うと考えられる．

検討する方法は単純であり，式 (6) に対して次式のようにフィルタ K_c を加える．

$$\Gamma_2(X) := \sum_{d \in \{h,v\}} \sum_{c \in \{R,G,B\}} \|D_d * K_c * X_c\|_1 \quad (8)$$

どのようなフィルタ K_c を与えるかが問題となるが，まず考えられるものとしてはガウシアンフィルタがあげられる．画像 X_c の画素のうち，観測値 Y_c が存在する画素では値が求まりやすく，式 (5) の正則化 $\Gamma_1(X)$ を用いない場合は，図 1 に示した望ましくない格子パターン（ジッパー模様）が X_c に現れる．このような格子パターン用の線形補間フィルタとして奇数長・奇対称のローパスフィルタを利用できる．G および R と B の格子パターンにおいて，ある画素を中心とする近傍 3×3 の画素のパターンは図 2 のように与えられる．それぞれにおいて中心画素の値を周辺画素の平均値として補間するフィルタは次のようになる．

$$K_G := \begin{pmatrix} 0 & \frac{1}{4} & 0 \\ \frac{1}{4} & 1 & \frac{1}{4} \\ 0 & \frac{1}{4} & 0 \end{pmatrix}, K_{R,B} := \begin{pmatrix} \frac{1}{4} & \frac{1}{2} & \frac{1}{4} \\ \frac{1}{2} & 1 & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{4} & \frac{1}{2} & \frac{1}{4} \end{pmatrix} \quad (9)$$

フィルタ係数の合計が 1 となるように正規化すると，以下の 3×3 のガウシアンフィルタに代表される係数配置を得る．

$$K_G := \frac{1}{4} \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}, K_{R,B} := \frac{1}{16} \begin{pmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{pmatrix} \quad (10)$$

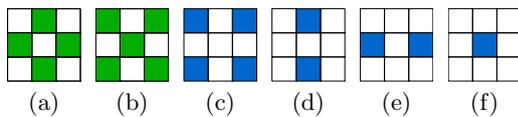


図 2: ある画素の近傍 3×3 の画素のパターン．緑色のパターン (a) と (b)，および，赤色と青色のパターン (c)~(f)

上記のガウシアンフィルタを用いた場合，図 2(b) と (f) のパターンでは中央の画素値が直接出力されるため，フィルタリング後の画像にはローパスフィルタの影響を強く受けた画素とそうでない画素が混在する．そのため，次のような各パターンに類似した係数配置をもつローパスフィルタを用意する．

$$K_G := \frac{1}{4} \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}, K_{R,B} := \frac{1}{4} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (11)$$

また，中心画素を加えたフィルタも考えられる．

$$K_G := \frac{1}{5} \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}, K_{R,B} := \frac{1}{5} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (12)$$

なお，各係数の合計値が 1 となるように正規化して用いる．

画素値が格子状に間引かれる場合，低周波数成分が高周波数成分に畳み込まれて混合し，本来は低周波数成分であったものが高周波数成分となる．そのため，式 (11) のローパスフィルタに対して 45 度傾けたハイパスフィルタを加えたものを用意する．

$$K_G := \frac{1}{20} \begin{pmatrix} 1 & 5 & 1 \\ 5 & -4 & 5 \\ 1 & 5 & 1 \end{pmatrix}, K_{R,B} := \frac{1}{40} \begin{pmatrix} 10 & 1 & 10 \\ 1 & -4 & 1 \\ 10 & 1 & 10 \end{pmatrix} \quad (13)$$

ここでローパスフィルタとハイパスフィルタの係数の調整は実験的に行った．更に，フィルタ係数の配置を変えながら実験を繰り返し，定量的に良い復元画質を与えるフィルタを以下のように得た．

$$K_G := \frac{1}{20} \begin{pmatrix} 1 & 5 & 1 \\ 5 & -4 & 5 \\ 1 & 5 & 1 \end{pmatrix}, K_{R,B} := \frac{1}{45} \begin{pmatrix} 10 & 1 & 10 \\ 1 & 1 & 1 \\ 10 & 1 & 10 \end{pmatrix} \quad (14)$$

本章では上述のフィルタを用いた画像復元結果を示す．

4 実験結果

デモザイキング用のテスト画像として一般的に用いられる Kodak の 24 枚の画像セット⁷⁾を用いてシミュレーションを行った．原画像を X とし，画素を間引いて観測画像 Y を作成した．なお，画像端の灰色領域を除外して用いた．表 1 に定量評価として PSNR（ピーク信号対雑音比）の平均値を示し，図 3 に定性評価として特徴の現れる箇所を示す．

表 3 では，上から順に，TV 正則化にフィルタ K_c を用いない場合 (Naive) と，式 (10)~(14) に示したフィルタを用いた場合の PSNR を示す．高い PSNR



図 3: 画質の定性的な比較. Kodak の画像セット⁷⁾ の No. 19 の画像. 赤枠部分がアーティファクト

表 1: PSNR による画質の定量的な比較

Algorithm	Red	Green	Blue	RGB
Naive	32.46	34.89	32.94	33.26
Gauss. Eq. (10)	34.12	38.29	35.55	35.59
Low pass Eq. (11)	35.43	39.31	36.76	36.80
Low pass Eq. (12)	34.30	37.84	35.66	35.62
Lo & Hi Eq. (13)	35.47	39.16	36.59	36.72
Lo & Hi Eq. (14)	35.38	39.77	36.79	36.86
Condat <i>et al.</i> ⁸⁾	39.35	40.95	37.79	38.58

値ほど画像の復元度が高いことを表す. また, 最下部に参考用に Condat ら⁸⁾ の手法を示す. この結果からは, 表の下部の手法のほうが高い PSNR 値となり, 格子パターンを反映したフィルタを用いた場合に復元画質が高まること分かる.

図 3 では, 左から順に前述の表のフィルタに対応した復元画像を示す. この図で着目する箇所は, 壁部分に現れた赤色と青色の偽色 (モアレ) と, 平坦箇所に現れた格子状のジッパー模様となる. モアレが顕著に現れたのは (b) のフィルタを用いなかった結果であり, 格子模様が顕著に現れたのは (c) のガウシアンフィルタを用いた結果となる. 傾向として, モアレが生じた画像では格子模様が少なく, 格子模様が生じた画像ではモアレが少なくなるトレードオフが見られる. この結果においては, モアレと格子模様の少なさに加えて PSNR 値の高さを備える (f) の結果が望ましいと著者らは考えている.

以上, 手短ではあるが, TV 正則化の対象となる周波数帯域を考慮することが画質改善の可能性をもつと考えられる.

5 まとめ

デモザイキングに対して TV 正則化を用いる際に問題となる高周波数成分の欠落について考え, TV 正則化の対象となる画像周波数を変化させるため, フィルタ処理を加える事を提案した. 今回は実験を通して経験的に定めたフィルタを用いたが, 今後の試みとしては, 最適化問題の式 (7) をフィルタ係数を求める問題として解き, どのようなフィルタが適切であるかを調査したいと考えている.

参考文献

- 1) D. Menon, S. Andriani, G. Calvagno: Demosaicing with directional filtering and a posteriori decision, *IEEE Trans. on Image Processing*, 16(1), 132-141 (2007).
- 2) X. Li, B. Gunturk, L. Zhang: Image demosaicing: a systematic survey, in *Proc. of SPIE*, 6822, 1-15 (2008).
- 3) N.-X. Lian, L. Chang, Y.-P. Tan, V. Zagorodnov: Adaptive filtering for color filter array demosaicking, *IEEE Trans. on Image Process.*, 16(10), 2515-2525 (2007).
- 4) L. Condat and S. Mosaddegh: Joint demosaicking and denoising by total variation minimization, in *Proc. of IEEE Int. Conf. on Image Process.*, 2781-2784 (2012).
- 5) S. Boyd, N. Parikh, E. Chu, B. Peleato, J. Eckstein: Distributed optimization and statistical learning via the alternating direction method of multipliers, *Foundation and Trends in Machine Learning*, 3(1), 1-122 (2010).
- 6) A. Matakos, S. Ramani, J.A. Fessler: Accelerated edge-preserving image restoration without boundary artifacts, *IEEE Trans. on Image Process.*, 22(5), 2019-2029 (2013).
- 7) R. Franzen, Kodak lossless true color image suite, <http://r0k.us/graphics/kodak/>, (2007).
- 8) L. Condat: A primaldual splitting method for convex optimization involving Lipschitzian, proximable and linear composite terms, *J. of Optimization Theory and Apps.*, 158(2), 460-479 (2012).