

高い空間周波数を有する色彩信号に配慮した カラーデモゼイシング

Color Demosaicing That Takes Care of Local Areas Rich in High Spatial Frequencies

開 健 太 朗[†], 学生会員 高 橋 善 寿[†], 正会員 菊 池 久 和[†], 正会員 村 松 正 吾[†]

Kentaro Hiraki[†], Yoshihisa Takahashi[†], Hisakazu Kikuchi[†] and Shogo Muramatsu[†]

Abstract A color demosaicing method has been developed that effectively performs within local areas that are rich in high spatial frequency variations. Such areas are likely to cause strong artifacts after demosaicing because of the inherent difficulty in subsampling. In visually tolerable image restoration, the spatial correlation between different color components is exploited to consistently maintain favorable transitions in the component intensities. Missing primary color values on the Bayer pattern color filter array are estimated using an edge-directed interpolation of primary color difference signals. The local transitions of the primary color differences are then smoothed by spatially adaptive filtering. Experimental results showed objectively-good and visually-preferable performance in terms of PSNR, CIELAB color difference and visual appearance, particularly resulting in less false color.

キーワード：デジタルカメラ, カラーデモゼイシング, 単板式撮像デバイス, 偽色, 色差

1. ま え が き

デジタルカメラに使用される単板式撮像デバイスには、ベイヤー型¹⁾のカラーフィルタアレイ(以下、ベイヤー型CFA)が多く使用されている。撮像対象の物体光に対して帯域制限フィルタリング、色彩標本化センシング、色彩量子化を行ない、色彩標本を得る。図1に示すベイヤー型CFAを用いた撮像デバイスにより得られる色彩標本は、緑色が総画素数の1/2、赤色および青色がそれぞれ総画素数の1/4のみ保有する色彩モザイク画像となる。したがって、通常のカラー画像を得るには、各色彩の欠落情報を補間する必要がある。この色彩復元処理をカラーデモゼイシングと呼ぶ。

カラーデモゼイシングにおける問題点として、偽色やジッパーノイズ、シャープネスの低下、ショットノイズがある。偽色は原画像に存在しない色彩であり、主にシャープなエッジやコントラストの高い領域で発生する。ジッパーノイズは原画像には、存在しない点線状のアーチファクトであり、コントラストの高いエッジやコーナの角の部分に孤立点として現れることが多い。偽色とジッパーノイズが発生する原因は共通しており、不適切な色彩補間値によって各色彩信

R ₁₁	G ₁₂	R ₁₃	G ₁₄	R ₁₅
G ₂₁	B ₂₂	G ₂₃	B ₂₄	G ₂₅
R ₃₁	G ₃₂	R ₃₃	G ₃₄	R ₃₅
G ₄₁	B ₄₂	G ₄₃	B ₄₄	G ₄₅
R ₅₁	G ₅₂	R ₅₃	G ₅₄	R ₅₅

図1 ベイヤー型CFA
Bayer pattern CFA.

号の位相に差異が生じることである。シャープネスの低下は画像に視覚的な鈍りが生じることであり、二つの原因によるものである。一つ目は不正な色彩補間値による空間的な鈍りであり、二つ目は撮像時の帯域制限フィルタによる高周波成分の損失による鈍りである。ショットノイズは、画像全域に砂粒を撒いたような視覚効果である。昨今、イメージセンサの高画素化の実現によりシャープネスの確保は困難ではなくなりつつある。一方、単位センサーセルあたりの受光量低下に伴うショットノイズの発生が回避できない問題となってきた。以上のような問題点に対処すべく、色成分間の相関を考慮したカラーデモゼイシング手法^{2)~8)}が考案されている。Cokの考案したConstant hue based interpolation (CHBI)²⁾では色成分の比($R/G, B/G$)に局所的な連続性(定色相仮説)を仮定し色彩補間を行うことで、各色彩信号の位相差異の改善を図った。Hamilton, Adamsら

2007年3月30日受付, 2007年5月31日採録

[†]新潟大学 工学部

(〒950-2181 新潟市西区五十嵐2の町8050)

[†]Faculty of Engineering, Niigata University

(Ikarashi 2-8050, West Area, Niigata 950-2181, Japan)

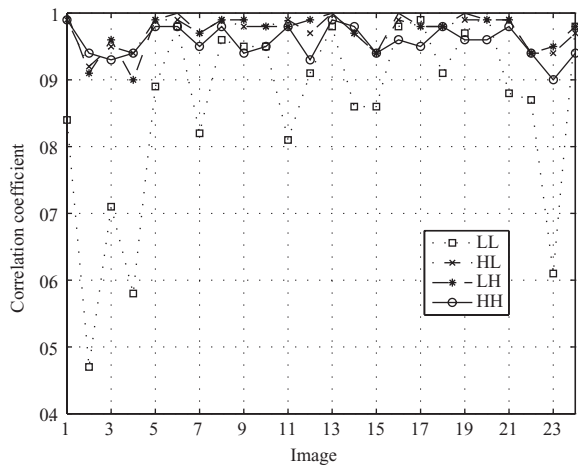


図 2 赤色と緑色の相関係数
Correlation coefficient between red and green
at different subbands.

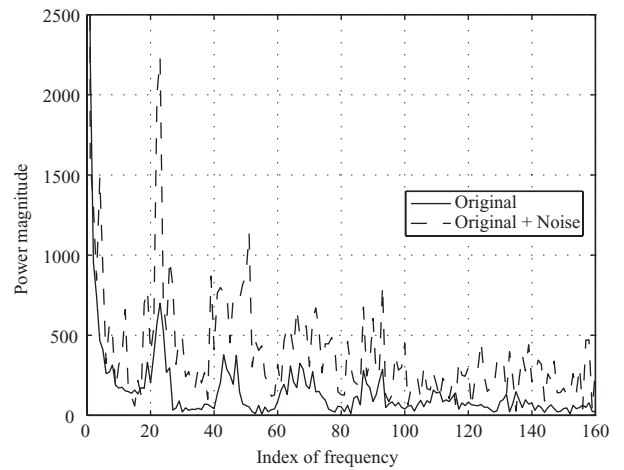


図 3 水平方向における赤色と緑色の原色差分信号の
フーリエパワースペクトル
Fourier power spectrum of the horizontal primary color
difference signal.

の考案した Adaptive color plane interpolation (ACPI)⁴⁾では欠落色彩位置におけるエッジ走査方向を垂直と水平のいずれかであると仮定する．空間的な勾配量の小さい方向に沿って色成分間の相関を仮定して補間を行うことによって，隣接画素と連続性の強い適切な色彩値を得ることができる．文献 9) において ACPI は，既存方法の中でも偽色やジッターノイズの発生が少なく色再現性など，総合的な観点で最も優れた方法の一つであると評価している．他にも Kimmel の考案した定色相補間反復法⁶⁾や Gunturk の考案した凸射影反復法⁷⁾などがあり，演算量は多いものの，色彩推定に優れた効果を示している．また最近，守谷らは局所的な色成分間の相関の有無を考慮し，既存方法では回避が困難であった色成分間の相関の弱い領域におけるアーチファクトの抑制を実現した¹⁰⁾．

エッジに沿った色彩補間は ACPI や勾配補間法⁵⁾など，他の研究でも多用されており，色彩推定に有効性を示しているが，デメリットも存在する．一つはナイキスト周波数以上の高い空間周波数を有する入力色彩信号に対しては，エッジの方向を正確に判定することができないことである．これは各色彩情報の標本化密度が低いため，保有している標本色彩値のみでは適切な空間勾配量の算出が困難となるためである．Wu らの考案した Primary-consistent soft decision (PCSD)⁸⁾では，エッジ方向の判定精度を高め，微細なラインエッジなどの高周波領域における偽色やジッターノイズの抑制を図った．しかし，コーナなどの水平および垂直のいずれのエッジ方向にも属さない空間構造においては，色彩補間値を算出する方法として不適切であり，アーチファクトの抑制は充分ではない．エッジ判定によって対処できない場合には，色彩補間値の算出に不正を伴い，視覚的に顕著な偽色やジッターノイズの発生を招くことになる．

そこで本稿では，エッジ判定をベースとした補間では回避が困難であった空間周波数の高い領域における色彩推定

を改善する．自然画像においては各色成分間の相関は強いものの，エッジ判定の不正によって引き起こされたノイズは各色成分間の相関を損ねることが多い．そこで復元画像における各色成分間の相関を維持することによってノイズの抑制を図る．具体的には色彩値の差分として原色差分を定義し，原色差分の復元に基づいて欠落色彩値の補間を行う．次に補間画像における色成分間の相関を保証すべく，補間画像を原色差分値に変換した空間で平滑化処理を行う．

2. 欠落色彩値の補間

ベイヤー型 CFA (図 1) によるモザイク標本化画像の欠落色彩値の補間を考える．緑色の保有色彩情報は総画素数の 1/2 であり，赤色および青色の 2 倍の色彩情報を保有する．赤色と青色の保有色彩情報は，それぞれ総画素数の 1/4 であり標本化密度が低く，緑色に比べて欠落色彩値の推定が困難であるので，標本化密度の高い緑色を最初に補間し，次に補間した緑色を参照して標本化密度の低い赤色と青色の補間を行う．図 2 は自然画像をウェーブレットサブバンドに分割し，周波数成分 LL, HL, LH, HH ごとの赤色と緑色の色彩値の相関係数を示す．局所的な色成分間の相関は高周波成分 HL, LH, HH において特に顕著である¹¹⁾¹²⁾．緑色と青色の色彩値，および青色と赤色の色彩値についても同様に相関が確認できる．ここで原色差分 (primary color difference) 信号 H を色成分の差分として，

$$H = (R - G, B - G) \quad (1)$$

と定義する． R, G, B はそれぞれ赤色，緑色，青色の色彩値を示す．局所的に色成分間の相関が強ければ，色成分の差分値 H は局所的には急変しないと期待することができる．図 3 は自然画像，およびエッジ判定を誤った補間によるノイズ画像の水平方向における赤色と緑色の原色差分信号のフーリエパワースペクトルであり，原色差分信号は低周波成分にエネルギーが集中している．なお，垂直方向

	$(r_{23} - G_{23})$	
$(r_{32} - G_{32})$	$(R_{33} - g_{33})$	$(r_{34} - G_{34})$
	$(r_{43} - G_{43})$	

図4 緑色欠落画素とその4連結近傍画素の原色差分値
Primary color difference values at a green-missing pixel and its 4-connected neighbors.

および青色と緑色の原色差分信号についても同様の特性を示す。通常、原色差分信号は低域通過特性を示すが、偽色やジッパーノイズの発生は、原色差分値に局所的な急変を伴っており、不正な高周波成分を有している。したがって、原色差分値の連続性と矛盾が生じないように、色彩補間を行うことで偽色やジッパーノイズの抑制を図る。

欠落色彩画素における適切な原色差分値を得るために考慮すべきことは次の2点である。第一に、エッジの方向を調べ、欠落色彩画素と連続性の強い方向における直近画素値を用いて補間を行うものとする。エッジ方向には、欠落色彩画素と連続性の強い画素が存在する可能性が高く、連続性の強い画素間では原色差分値の連続性も強いからである。第二に、エッジに沿っては原色差分値の連続性は比較的強いが、厳密には色成分の変化率は一定ではなく、欠落色彩画素との変化率が最も低い方位が存在すると仮定する。つまり、エッジに沿って原色差分値の連続性の強さに偏りがあるものとする。したがって、欠落色彩画素における原色差分値と、より連続性の強い原色差分が存在すると考えられる画素を選んで原色差分信号の復元を行う。以上のポイントを考慮し、欠落色彩画素における適切な原色差分信号の推定に基づき、欠落色彩値の補間を行う。

2.1 緑色の補間

緑色の欠落色彩画素では、赤色または青色の標本色彩値が存在し、東西南北4画素に緑色の標本色彩値が存在する。欠落色彩画素における標本色彩値が赤色と青色のいずれの場合においても同様の方法で補間を行うので、本節では、図1で赤色の標本色彩値が存在する位置の緑色 g_{33} を補間する場合を例に説明する。

最初に欠落色彩画素は、垂直または水平のいずれの方向の画素と連続性が強いかを色彩標本値間の差分を用いて調べる。水平方向の勾配量を調べるために次のような3行分の勾配量を

$$\delta H_n = |G_{21} - G_{23}| + |B_{22} - B_{24}| + |G_{25} - G_{23}| \quad (2)$$

$$\delta H_c = |R_{31} - R_{33}| + |G_{32} - G_{34}| + |R_{33} - R_{35}| \quad (3)$$

$$\delta H_s = |G_{41} - G_{43}| + |B_{42} - B_{44}| + |G_{43} - G_{45}| \quad (4)$$

と算出する。水平方向の勾配量は三つの勾配量の和として

$$\delta H = \delta H_n + \delta H_c + \delta H_s \quad (5)$$

と定める。垂直方向の勾配量を調べるために次のような3列分の勾配量を

$$\delta V_w = |G_{12} - G_{32}| + |B_{22} - B_{42}| + |G_{32} - G_{52}| \quad (6)$$

$(B_{22} - g_{22})$	$(b_{23} - G_{23})$	$(B_{24} - g_{24})$
$(b_{32} - G_{32})$	$(b_{33} - g_{33})$	$(b_{34} - G_{34})$
$(B_{42} - g_{42})$	$(b_{43} - G_{43})$	$(B_{44} - g_{44})$

図5 青色欠落画素とその8連結近傍画素の原色差分値
Primary color difference values at a blue-missing pixel and its 8-connected neighbors.

$$\delta V_c = |R_{13} - R_{33}| + |G_{23} - G_{43}| + |R_{33} - R_{53}| \quad (7)$$

$$\delta V_e = |G_{14} - G_{34}| + |B_{24} - B_{44}| + |G_{34} - G_{54}| \quad (8)$$

と算出する。垂直方向の勾配量はこれら三つの勾配量の和として

$$\delta V = \delta V_w + \delta V_c + \delta V_e \quad (9)$$

と定める。勾配量の小さい方向が、画素値の連続性が強く、原色差分の連続性の強い画素が存在すると判定する。

(a) $\delta H < \delta V$ のとき

欠落色彩画素は水平方向の画素と連続性が強いと考えられる。さらに、東西のいずれの画素と連続性が強いかを表す指標として次の勾配量

$$\delta W = |G_{21} - G_{23}| + |R_{31} - R_{33}| + |G_{41} - G_{43}| \quad (10)$$

$$\delta E = |G_{23} - G_{25}| + |R_{33} - R_{35}| + |G_{43} - G_{45}| \quad (11)$$

を調べる。東西の画素のうち、欠落色彩画素と連続性の強い画素が欠落色彩画素の原色差分値と連続性の強い原色差分値を有していると考えられる。欠落色彩画素と周辺画素の原色差分信号の様子を図4に示す。欠落色彩画素における原色差分値を、東西の画素のうち、欠落色彩画素と連続性の強い画素の原色差分に重きを置いた加重平均であると、次の式を仮定する。

$$R_{33} - g_{33} = \frac{\alpha_w(r_{32} - G_{32}) + \alpha_e(r_{34} - G_{34})}{\alpha_w + \alpha_e} \quad (12)$$

ここで、

$$\alpha_w = (1 + \delta W)^{-1} \quad (13)$$

$$\alpha_e = (1 + \delta E)^{-1} \quad (14)$$

$$r_{32} = \frac{R_{31} + R_{33}}{2} \quad (15)$$

$$r_{34} = \frac{R_{33} + R_{35}}{2} \quad (16)$$

と定める。 α_w は西側原色差分の重みであり、 α_e は東側原色差分の重みである。勾配量が小さいほど、重みは大きな値を示す。式(12)を g_{33} について解き、色彩補間値を

$$g_{33} = R_{33} - \frac{\alpha_w(r_{32} - G_{32}) + \alpha_e(r_{34} - G_{34})}{\alpha_w + \alpha_e} \quad (17)$$

と得る。

(b) $\delta H > \delta V$ のとき

欠落色彩画素は垂直方向の画素と連続性が強いと考えられる。さらに、南北のいずれの画素と連続性が強いかを表す指標として勾配量 δN と δS を調べ、(a)と同様に補間値を算出する。

(c) $\delta H = \delta V$ のとき

(a) と (b) の両方の場合において算出した色彩補間値の平均とする。

2.2 赤色と青色の補間

赤色と青色の補間については同様の方法で行うので、ここでは青色の補間方法について説明する。青色の補間位置は、同色色彩値が上下に存在する場合または左右に存在する場合、さらに補間位置が面心の位置に存在する場合の3種類がある。それぞれ図1において b_{23} , b_{32} , b_{33} を例に補間方法を説明する。青色の欠落色彩画素と周辺画素の原色差分値の様子を図5に示す。最初に b_{23} , b_{32} の補間を行い、次に b_{33} の補間を行う。

b_{23} と b_{32} について原色差分信号の連続性より、

$$b_{23} - G_{23} = \frac{(B_{22} - g_{22}) + (B_{24} - g_{24})}{2} \quad (18)$$

$$b_{32} - G_{32} = \frac{(B_{22} - g_{22}) + (B_{42} - g_{42})}{2} \quad (19)$$

が成り立つ。ここで g_{22} , g_{24} , g_{42} は既に算出されていることに注意する。式(18), (19)より色彩補間値は、

$$b_{23} = G_{23} + \frac{(B_{22} - g_{22}) + (B_{24} - g_{24})}{2} \quad (20)$$

$$b_{32} = G_{32} + \frac{(B_{22} - g_{22}) + (B_{42} - g_{42})}{2} \quad (21)$$

となる。

b_{33} について周囲4連結近傍の原色差分の平均より、

$$b_{33} - g_{33} = \frac{1}{4} \{ (b_{23} - G_{23}) + (b_{32} - G_{32}) + (b_{43} - G_{43}) + (b_{34} - G_{34}) \} \quad (22)$$

が成り立つので、

$$b_{33} = g_{33} + \frac{1}{4} \{ (b_{23} - G_{23}) + (b_{32} - G_{32}) + (b_{43} - G_{43}) + (b_{34} - G_{34}) \} \quad (23)$$

と補間を行う。

3. 偽色の低減

前節では原色差分値の復元に基づいて欠落色彩値の補間を行うことで、色成分間の相関を維持し、偽色やジッパーノイズの抑制を考慮した。しかしながら、単発的な補間のみでは偽色やジッパーノイズの抑制が不十分である。そこで本章では補間画像における原色差分信号の変化を平滑化し、低域通過特性の増長を促すことにより、偽色を低減する処理について述べる。原色差分修正処理は次のような手順とする。

1. 補間画像の色彩値を原色差分値に変換する。
2. 補間画像の高周波領域に位置する画素を検出する。
3. 検出した画素における原色差分値を平滑化修正する。
4. 処理3を数回反復後、原色差分値を色彩値に戻し補間画像を再構成する。

任意の画素位置 (i, j) のにおける原色差分値を

$$H_{ij} = (H_{Rij}, H_{Bij}) \quad (24)$$

と定義する。ここで、

$$H_{Rij} = R_{ij}(r_{ij}) - G_{ij}(g_{ij}) \quad (25)$$

$$H_{Bij} = B_{ij}(b_{ij}) - G_{ij}(g_{ij}) \quad (26)$$

であり、 $R_{ij}(r_{ij})$, $G_{ij}(g_{ij})$, $B_{ij}(b_{ij})$ は画素 (i, j) における色彩標本値または色彩補間値である。補間画像において高周波領域に該当すると判断した位置 i, j における原色差分値 H_{ij} を修正する。高周波領域に位置する原色差分のみを修正するのは次の二つの理由による。第一に自然画像の低周波成分における原色差分信号は、必ずしも低域通過特性であるとは限らず、平滑化処理を行うことで逆に原色差分信号の適切な空間構造を損なうおそれがある。第二にエッジ判定の不正に起因する偽色は、画像の高周波領域ほど生じやすく、低周波領域での発生は少ないからである。

高周波領域における画素は、判定位置を中心とした 3×3 の方形窓の範囲に含まれる緑色の標本色彩値の輝度変化の度合から検出する。緑色の標本色彩値の最大値と最小値の差分絶対値が閾値 T を超えるならば、判定位置が高周波領域であると判定する。例として、図1で G_{23} が得られている位置の場合は

$$\delta = |MIN - MAX| \quad (27)$$

ただし、

$$MIN = \min(G_{12}, G_{32}, G_{23}, G_{14}, G_{34}) \quad (28)$$

$$MAX = \max(G_{12}, G_{32}, G_{23}, G_{14}, G_{34}) \quad (29)$$

を調べ、 $\delta > T$ ならば高周波領域であると判定する。

H_{Rij} と H_{Bij} のいずれの原色差分値に対しても同様な方法で修正を行うので、原色差分値 H_{Rij} を例に説明する。修正原色差分値は

$$\hat{H}_{Rij} = \frac{\alpha_1 H_{Rij} + \alpha_2 \tilde{H}_{Rij}}{\alpha_1 + \alpha_2} \quad (30)$$

とする。ここで H_{Rij} は被修正原色差分値である。 \tilde{H}_{Rij} は、

$$\tilde{H}_{Rij} = \text{median}(H_{Ri-2,j-2}, \dots, H_{Ri+2,j+2}) \quad (31)$$

であり、修正する位置を中心とした 5×5 の方形窓の範囲に含まれる原色差分値 H_R を昇順に整列したときに中央に位置する値である。 \hat{H}_{Rij} は修正原色差分値であり、被修正原色差分値と整列中央原色差分値のいずれかに重きをおいた加重平均とする。整列中央原色差分値 \tilde{H}_{Rij} はシャープネスを保持しつつ空間的な平滑化を促進する作用がある¹¹⁾¹²⁾。しかし、中には色彩値に変換したときに輝度孤立点となり、ジッパーノイズを招く場合もある。そこで原色差分値を色彩値に変換したときに、輝度孤立点となるような原色差分値の重みを小さくする。実際には変換色彩値と近傍の標本

色彩値に差異の生じないような原色差分を重視するものとする．重み係数 α_1 と α_2 の決定方法を図 1 で緑色の標本色彩値 G_{23} が得られている位置における原色差分値の修正を例に説明する．原色差分値が \tilde{H}_{R23} , \tilde{H}_{B23} である場合，赤色と青色の色彩値は，

$$\tilde{H}_{R23} = r_{23} - G_{23} \quad (32)$$

$$\tilde{H}_{B23} = \tilde{b}_{23} - G_{23} \quad (33)$$

であるので，

$$r_{23} = G_{23} + \tilde{H}_{R23} \quad (34)$$

$$\tilde{b}_{23} = G_{23} + \tilde{H}_{B23} \quad (35)$$

と中央値ベースの仮変換値を算出できる．画素における色差値が H_{R23} , H_{B23} である場合の赤色と青色は r_{23} , b_{23} である．赤色と青色の変換色彩値を用いて，重み係数 α_1 と α_2 は，

$$\alpha_1 = \{1 + \min(|b_{23} - B_{22}|, |r_{23} - R_{13}|, |b_{23} - B_{24}|, |r_{23} - R_{33}|)\}^{-1} \quad (36)$$

$$\alpha_2 = \{1 + \min(|\tilde{b}_{23} - B_{22}|, |\tilde{r}_{23} - R_{13}|, |\tilde{b}_{23} - B_{24}|, |\tilde{r}_{23} - R_{33}|)\}^{-1} \quad (37)$$

と定める．ここで， α_1 と α_2 は原色差分を色彩値に仮変換したときに，近傍の色彩標本値のうち，変換色彩値と連続性の強い値が少なくとも一つ含まれているならば，大きな値をとる．修正された原色差分 (\hat{H}_{Rij} , \hat{H}_{Bij}) と標本色彩値を用いて復元画像を再構成する．赤色の標本色彩値が存在する位置の修正補間値は図 1 で R_{33} が存在する位置を例にとると，

$$\hat{g}_{33} = R_{33} - \hat{H}_{R33} \quad (38)$$

$$\hat{b}_{33} = \hat{g}_{33} + \hat{H}_{B33} \quad (39)$$

とする．緑色の標本色彩値が存在する位置の修正補間値は G_{23} が存在する位置を例にとると，

$$r_{23} = G_{23} + \hat{H}_{R23} \quad (40)$$

$$\hat{b}_{23} = G_{23} + \hat{H}_{B23} \quad (41)$$

とする．青色の標本色彩値が存在する位置の修正補間値は B_{22} が存在する位置を例にとると，

$$\hat{g}_{22} = B_{22} - \hat{H}_{B22} \quad (42)$$

$$r_{22} = \hat{g}_{22} + \hat{H}_{R22} \quad (43)$$

とする．

4. 性能評価

カラー画像をバイヤー型 CFA の色彩配列にモザイク化し，提案手法のカラーデモゼイシングを適用，色彩補間復元の性能評価を行う．原色差分信号の修正処理の反復回数は 5 回とし，処理中に用いる閾値 T は実験的に定めた結果，7.0 とする．性能評価に用いる画像は Circular Zone Plate (CZP) チャート (図 10)，ISO/JIS-SCID¹³⁾，および Kodak セット¹⁴⁾ を使用し，RGB 各色 8 ビットである．提案手法の色彩推定精度および色再現性の評価として，目視による主観評価と，PSNR および CIELAB 色差の客観評価とに分けて行う．さらにショットノイズへの耐性評価を行う．

4.1 主観評価

主観評価として，復元画像の目視による考察を行う．図 6 から図 9 に提案手法と既存方法の適応色平面補間法 (ACPI) による処理画像の一部を示す．偽色はコントラストが高く，かつ微細なエッジなどの高周波領域で発生しやすい．図 6 を見るとわかるとおり，ACPI では色彩推定が困難な高周波領域においても提案手法は効果を発揮し，偽色発生を抑制していることがわかる．図 7 は色成分間の相関がエッジを境にして低くなる画像領域についての処理結果である．(c) は原色差分信号をメディアンフィルタのみによって単純に平滑化した処理画像であり，(d) は提案手法による処理画像である．色成分間の相関が低い領域における原色差分信号を平滑化することは，ジッパーノイズの発生を招くが，提案手法はジッパーノイズの発生を低減することができた．しかし，ジッパーノイズ抑制の程度は充分ではなく，改善が必要である．

4.2 客観評価

客観評価として，推定補間値の原画像への忠実性および色再現性の観点から，PSNR (Peak Signal-to-Noise Ratio) および CIELAB 色差の二つの指標により評価を行う．PSNR は原画像と復元画像との 2 乗平均誤差が小さいほど高い数値を示す指標であり，一般に 40dB 以上で原画像と見分けがつかないほど忠実であり，30dB を下回るならば見るに耐えないといわれる．CIELAB 色差は，表示デバイスに依存しない知覚均等色空間として色彩評価に賞用されている．原画像と復元画像の各画素における色彩を $L^*a^*b^*$ 均等色に変換し，両者の距離を

$$\Delta E_{ab}^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (44)$$

として求める． ΔE_{ab}^* の識別閾値は観察対象，観察条件および個人の知覚能力に依存し，典型的な値も文献^{15) ~ 23)} によっても異なるが，例えば，0.3, 0.6, 1.0, 1.2, 2.3, 2.5, 3.0 または 5.0 よりも小さければ人間の目で色票大の色彩差異を見分けることが困難であるとされている．評価値として全画素の ΔE_{ab}^* の平均値と中央値を用いる．

はじめに表 1 に CZP チャートを用いて，提案手法と守

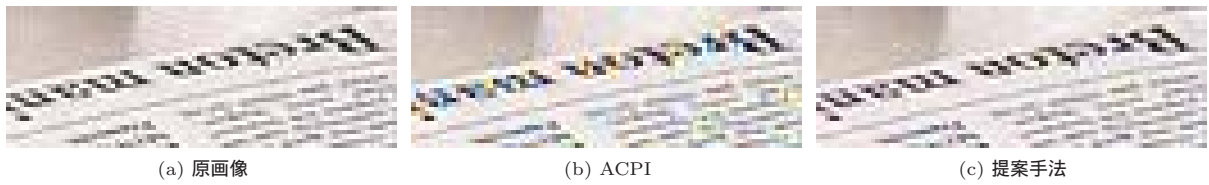


図 6 *Bicycle* (SCID) の復元画像の一部

Visual appearance of the color reproduction. A part of *bicycle*.

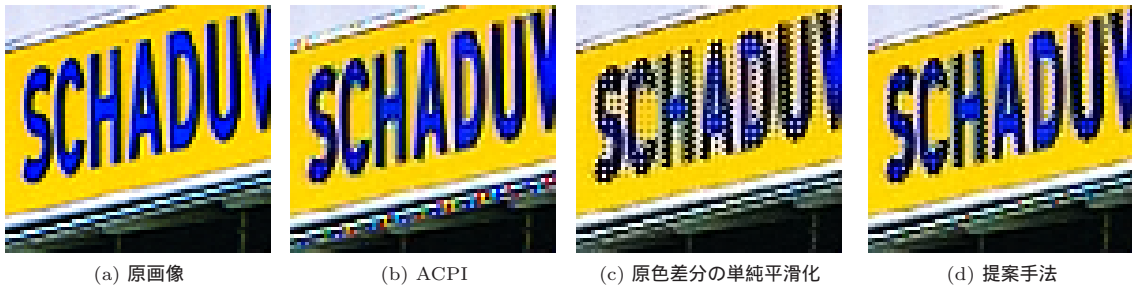


図 7 *Cafeteria* (SCID) の復元画像の一部

Visual appearance of the color reproduction. A part of *cafeteria*.

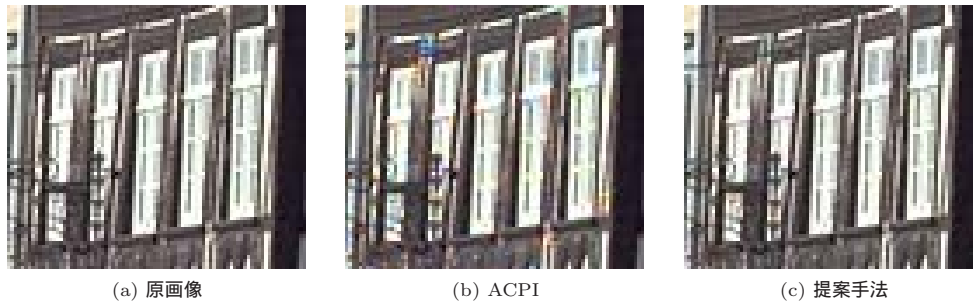


図 8 *Seifenfabrikation* (Kodak set) の復元画像の一部

Visual appearance of the color reproduction. A part of *seifenfabrikation*.

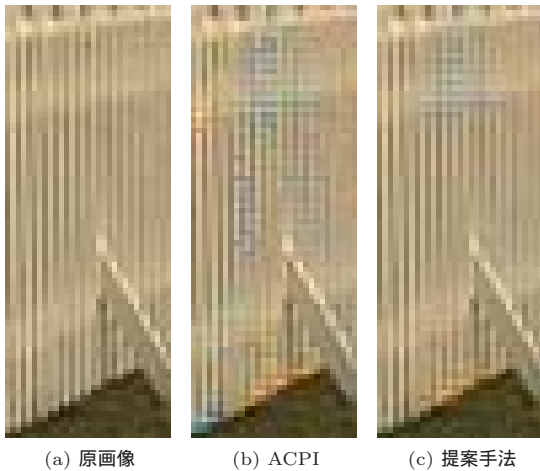


図 9 *Lighthouse* (Kodak set) の復元画像の一部

Visual appearance of the color reproduction.
A part of *lighthouse*.

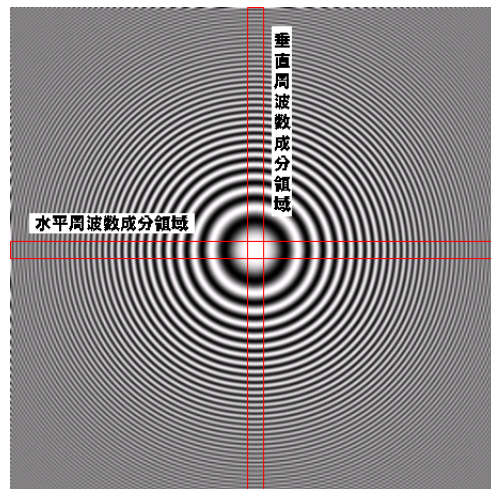


図 10 CZP チャート
Circular zone plate chart.

谷ら¹⁰⁾の方法および ACPI について空間周波数の高い成分を含む画像の PSNR を比較する。水平方向および垂直方向の各周波数成分領域と画像全域における PSNR を算出する。提案手法は、高い空間周波数帯の領域における色彩復元に優れており、既存の方法に比べて高い PSNR が得られていることがわかる。

表 2 に Kodak セット画像における提案手法と既存方法

による処理画像の PSNR を示す。提案手法は、既存方法に比べて全体的に高い PSNR を示しており、色彩推定精度が優れている。特に *brick wall*, *seifenfabrikation*, *mountain stream* など、シャープなエッジやコントラストの高い模様を多く含む画像において特に顕著な改善が認められる。

表 3 に Kodak セット画像に関する提案手法と既存方法による処理画像の CIELAB 色差の平均値と中央値を示す。

表 1 CZP チャートにおける PSNR in dB
Peak signal-to-noise ratio in dB measured on the CZP chart.

Analyzed area	Red			Green			Blue		
	Proposed	Moriya ¹⁰⁾	ACPI	Proposed	Moriya ¹⁰⁾	ACPI	Proposed	Moriya ¹⁰⁾	ACPI
Horizontal strip	27.09	22.8	25.22	29.95	28.0	26.90	26.68	22.2	24.62
Vertical strip	27.09	22.8	25.22	29.95	28.0	26.90	26.68	22.2	24.62
Whole image	20.45	N.A.	15.52	21.40	N.A.	16.15	20.48	N.A.	15.51

表 2 Kodak セットにおける PSNR in dB
Peak signal-to-noise ratio in dB on the Kodak set.

Image	Red			Green			Blue		
	Proposed	ACPI	PCSD	Proposed	ACPI	PCSD	Proposed	ACPI	PCSD
brick wall (768×512)	38.96	33.76	33.71	41.41	34.84	35.77	38.46	33.50	33.52
knob on door (768×512)	39.25	39.36	38.72	41.48	40.41	40.60	39.77	39.09	38.56
caps (768×512)	41.83	40.62	41.41	44.13	42.11	43.64	40.61	39.10	39.71
red riding hood (768×512)	38.12	39.20	39.07	40.47	40.22	40.55	40.00	39.34	39.35
motocross (768×512)	37.44	35.24	35.78	39.48	35.92	37.21	35.22	33.83	34.25
boat zentime (768×512)	39.67	35.09	36.58	42.18	36.08	38.41	37.75	34.32	35.56
window (768×512)	41.10	41.23	41.10	43.04	42.03	42.48	38.73	39.01	38.93
seifenfabrikation (768×512)	36.57	32.37	32.23	39.00	33.53	34.57	35.22	31.70	31.52
sailboats (768×512)	41.78	40.43	40.69	43.48	41.47	42.54	39.62	38.86	39.15
sailboat (768×512)	41.17	40.23	40.40	43.24	41.26	42.32	39.79	38.74	38.90
zentime at the pier (768×512)	38.96	36.32	36.43	41.49	37.18	38.29	38.82	36.00	36.27
beach couple (768×512)	42.44	40.72	41.37	44.73	42.29	43.57	41.31	39.71	40.22
mountain stream (768×512)	35.44	30.02	30.35	37.52	30.79	31.95	33.48	29.43	29.76
water rafting (768×512)	35.18	36.20	35.58	38.41	37.06	37.44	34.11	34.41	34.19
color girl (768×512)	37.27	37.21	37.36	40.30	39.16	39.82	38.61	37.40	37.74
land ahoy (768×512)	42.81	38.50	40.46	45.28	39.68	42.27	41.45	38.05	39.80
statue (768×512)	41.40	39.06	39.09	43.32	39.48	40.49	39.17	37.53	37.85
country style (768×512)	36.45	34.15	34.00	38.18	34.62	35.32	34.66	32.59	32.63
lighthouse (768×512)	40.21	37.15	37.04	42.46	38.22	38.87	38.50	36.30	36.18
six-shooter (768×512)	41.36	38.72	38.32	43.38	39.62	40.09	37.75	36.50	36.31
lighthouse view (768×512)	39.54	35.40	35.18	42.01	36.38	37.18	37.43	34.59	34.42
rustic (768×512)	37.27	36.52	36.06	39.76	37.90	38.19	36.11	35.41	35.12
parrots (768×512)	41.01	41.11	40.98	43.54	43.15	43.60	39.55	39.86	39.82
red gable (768×512)	34.30	32.27	32.93	36.80	33.33	34.73	32.27	30.48	31.16
Average	39.15	37.12	37.30	41.46	38.20	39.16	37.85	36.07	36.28

平均値に注目すると、提案手法は、既存方法に比べて全体的に低い色差を示し、かつ数多くの画像において 2.0 よりも低い値をとり、最大でも 3.0 を超えていない。中央値についてもほとんどの画像において、既存方法に比べて低い値を示し、原画像により忠実な色再現が得られている。画像によっては、提案手法が既存方法に比べて赤色および青色の PSNR が低下する場合と、CIELAB 色差の平均値と中央値が大きい値を示す場合が見られる。これらは赤色または青色の低周波成分を多く含む画像である場合が多く、標準化密度の低い赤色または青色の推定が、低周波成分における色成分間の相関の低下によってうまく行なえないことに起因する。

4.3 ショットノイズ耐性評価

ショットノイズの付加された画像は各色成分間の相関が低く、提案手法の色彩復元において色成分間相関との一貫性を維持することが色彩推定に効果がないばかりか、ノイズ成分を強調することにもなりかねない。そこで、提案手法の復元性能がどの程度のショットノイズレベルにまで有効であるかを検証する。ショットノイズ耐性の評価を行う上で、モザイク画像にノイズが付加された状態で通常の色彩補間性能をどれほど維持することができるかが重要であ

る。そこでショットノイズを白色ガウスノイズでモデル化し²⁴⁾、通常のもザイク画像および分散値を変化させた白色ガウスノイズを付加したモザイク画像にカラーデモゼイシングを行い、両者の間の PSNR を計測する。lighthouse をテスト画像とし、提案手法、ACPI、CHBI の各手法において、ショットノイズの標準偏差を変化させた場合の赤色、緑色、青色の PSNR 値の変化を図 11 に示す。提案手法、ACPI、CHBI とともにショットノイズレベルが高くなるにつれて色彩推定精度の低下を伴う結果となった。しかし 3 者の差は小さく、とくに提案手法と ACPI のショットノイズ耐性はほぼ同程度である。緑色については、CHBI のショットノイズ耐性が提案手法と ACPI に比べてわずかに高い結果となった。これは CHBI の緑色の補間は色成分間の相関を考慮していないため、ショットノイズの影響を受けにくいからである。

5. む す び

本論文では、原色差分信号の復元に基づくカラーデモゼイシング法を提案した。単板式撮像デバイスによる撮像方式においては、色彩標準化密度が低く、ナイキスト周波数以上の高い空間周波数を有する入力色彩信号に対しては、色

表 3 Kodak セットにおける CIELAB 色差
CIELAB color difference tested on the Kodak set.

Image	Average			Median		
	Proposed	ACPI	PCSD	Proposed	ACPI	PCSD
brick wall (768×512)	1.84	3.16	2.87	1.52	2.36	2.10
knob on door (768×512)	1.47	1.65	1.56	1.03	1.11	1.08
caps (768×512)	1.11	1.21	1.15	0.80	0.78	0.80
red riding hood (768×512)	1.57	1.67	1.59	1.18	1.20	1.19
motocross (768×512)	2.22	2.72	2.52	1.57	1.79	1.75
boat zentime (768×512)	1.61	2.32	1.94	1.25	1.45	1.34
window (768×512)	1.41	1.32	1.36	1.03	0.84	0.93
seifenfabrikation (768×512)	2.32	3.34	3.15	1.78	2.16	2.10
sailboats (768×512)	1.39	1.43	1.41	1.17	1.14	1.16
sailboat (768×512)	1.40	1.43	1.42	1.17	1.15	1.17
zentime at the pier (768×512)	1.57	2.06	1.87	1.20	1.29	1.23
beach couple (768×512)	1.14	1.29	1.22	0.94	0.97	0.97
mountain stream (768×512)	2.87	4.81	4.36	2.29	3.50	3.22
water rafting (768×512)	2.04	2.36	2.28	1.37	1.6	1.52
color girl (768×512)	1.60	1.79	1.66	1.09	1.11	1.11
land ahoy (768×512)	1.25	1.67	1.42	1.04	1.15	1.16
statue (768×512)	1.38	1.59	1.56	1.14	1.16	1.18
country style (768×512)	2.55	2.94	2.87	1.97	2.01	2.03
lighthouse (768×512)	1.58	2.08	2.04	1.26	1.4	1.43
six-shooter (768×512)	1.41	1.68	1.66	1.03	1.08	1.14
lighthouse view (768×512)	1.78	2.42	2.31	1.39	1.44	1.46
rustic (768×512)	2.17	2.25	2.29	1.63	1.53	1.63
parrots (768×512)	1.29	1.17	1.27	1.00	0.89	0.96
red gable (768×512)	2.28	2.73	2.60	1.32	1.36	1.38
Average	1.72	2.13	2.02	1.30	1.44	1.42

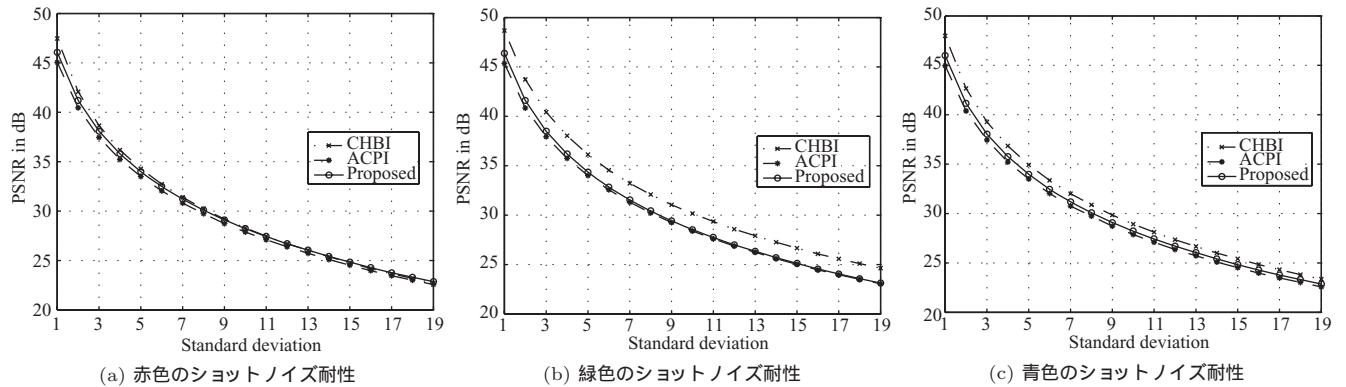


図 11 復元画像のショットノイズ耐性

Restoration robustness against the shot noise in the case of *lighthouse*.

彩推定が困難となるため、補間画像における色成分間の相関を維持することによって色彩推定の改善を図った。実験の結果、数多くの自然画像について PSNR および CIELAB 色差について、既存の方法に比べて良好な結果を得ることができた。復元画像の目視評価においても、シャープなエッジやコントラストの高い領域などの高周波領域において、既存の方法では不十分であった偽色の低減を確認することができた。

今後の課題の一つは、色成分間の相関の低い入力色彩信号についての色彩推定が充分ではないことである。したがって、色成分間の相関の低い領域においては、色彩補間式を色成分間の相関を用いない方法に改良すること、および原色差分値の修正処理領域をさらに厳密に限定するなどの工夫が必要である。また、ショットノイズの耐性については既存の方法とともに充分ではない。補間画像における色成分

間の相関を維持することは、ショットノイズの強調を促す効果を伴うため、今後考慮してゆく必要がある。

〔文 献〕

- 1) B. E. Bayer: "Color imaging array," U.S. Patent No.3 971 065 (1976)
- 2) D. R. Cok: "Signal processing method and apparatus for producing interpolated chrominance values in a sampled color image signal," U.S. Patent No. 4 642 678 (1987)
- 3) W. T. Freeman: "Median filter for reconstructing missing color samples," U.S. Patent No. 4 724 395 (1988)
- 4) J. F. Hamilton and J. E. Adams: "Adaptive color plane interpolation in single sensor color electronic camera," U.S. Patent No. 5 629 734 (1997)
- 5) C. A. Laroche and M. A. Prescott: "Apparatus and method for adaptively interpolating a full color image utilizing chrominance gradients," U.S. Patent No. 5 373 322 (1994)
- 6) R. Kimmel: "Demosaicing: Image reconstruction from color CCD samples," *IEEE Trans. on Image Processing*, 8, 9, pp. 1221-1228 (1999)
- 7) B. K. Gunturk, Y. Altunbasak, and R. M. Mersereau: "Color plane interpolation using alternating projections," *IEEE Trans.*

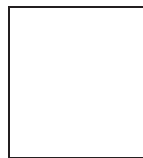
- on Image Processing, 11, 9, pp. 997-1013 (2002)
- 8) X. Wu and N. Zhang: "Primary-Consistent Soft-Decision Color Demosaicing for Digital Cameras," *IEEE Trans. on Image Processing*, 13, 9, pp. 1263-1274 (2004)
 - 9) R. Ramanath, W. E. Snyder, and G. L. Bilbro: "Demosaicing methods for Bayer color arrays," *J. Electronic Imaging*, 11, 3, pp. 306-315 (2002)
 - 10) 守谷 正太郎, 牧田 淳子, 久野 徹也, 杉浦 博明: "局所領域における色変化の分析結果に基づくデモザイキング," *映情学誌*, 61, 3, pp. 332-340 (2007)
 - 11) 開 健太郎, 高橋 善寿, 菊池 久和, 村松 正吾: "エッジ判定補間と色相変化の平滑化によるカラーデモゼイキング," *映情学技報*, 29, 74, pp. 37-40 (2005)
 - 12) 開 健太郎, 高橋 善寿, 菊池 久和, 村松 正吾: "色相値の復元を利用したカラーデモゼイキングの検討," *画像符号化シンポジウム, ラフォーレ修善寺*, P5-01 (2006)
 - 13) Japanese Standard Association: *Graphic Technology - Press Digital Data Exchange - Standard Colour Image Data (SCID)*, (1995)
 - 14) USA IMG0060: "Kodak Photo CD Sampler No. 3"
 - 15) 納谷 嘉信: *産業色彩学*, 朝倉書店, 東京 (1980)
 - 16) 山内 二郎, 金沢 寿吉 編著: *色彩科学ハンドブック*, 東京大学出版会, 東京 (1980)
 - 17) G. Wyszecki and W. S. Stiles: *Color Science: Concepts and Methods Qualitative Data and Formulae*, 2nd Ed., John Wiley, New York (1992)
 - 18) M. L. Mahy, V. Eyckdenm, and A. Oosterlinck: "Evaluation of uniform color spaces developed after the adoption of cielab and cieluv," *Color Res. Appl.* 19(2), 105-121 (1994)
 - 19) N. Katoh, K. Nakabayashi, M. Ito and S. Ohno: "Effect of ambient light on the color appearance of softcopy images: Mixed chromatic adaptation for self-luminous displays", *J. Electronic Imaging*, 7, 4, pp. 794-806 (1998)
 - 20) 三宅洋一: *デジタルカラー画像の解析・評価*, 東京大学出版会, 東京 (2000)
 - 21) 大田登: *色彩工学 第2版*, 東京電機大学出版局, 東京 (2001)
 - 22) A. Bovik, Ed: *Handbook of Image and Video Processing*, Academic Press, San Diego, CA (2000)
 - 23) 小松原仁: *均等色差空間に基づく色差式に関する研究 CIELAB 色空間の均等色差空間への適用変換式の開発*, 博士論文, 新潟大学 (2007)
 - 24) J. Nakamura (ed.): *Image Sensors and Signal Processing for Digital Still Cameras*, CRC Press, Boca Rato, FL, USA (2006)



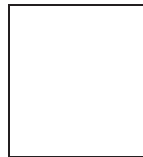
ひらき けんたろう
開 健太郎 2005年,新潟大学工学部電気電子工学科卒業.2007年,同大学院博士前期課程修了.現在,株式会社沖データに勤務.色彩信号処理の研究に従事.



たかはし よしひさ
高橋 善寿 2003年,新潟大学工学部電気電子工学科卒業.2005年,同大学院博士前期課程修了.現在,同大学院博士後期課程在学中.画像情報,色彩信号処理の研究に従事.学生会員.



きくち ひさかず
菊池 久和 1976年,新潟大学大学院修士課程修了.同年,富士通(株)入社.1979年から新潟大学工学部電気電子工学科に勤務.1997年,同大工学部電気電子工学科教授.主として映像符号化や色彩信号処理,情報通信工学に関する研究に従事.工学博士.正会員.



むらまつ しょうご
村松 正吾 1995年,東京都立大学大学院修士課程修了.1999年から新潟大学工学部電気電子工学科に勤務.2001年,同大工学部電気電子工学科助教授.主としてスケーラブル映像符号化,情報通信工学に関する研究に従事.工学博士.正会員.