

カラー画像に生じる色収差の補正処理

日大生産工(院) ○中川 祐喜 日大生産工 目黒 光彦

1 まえがき

色収差は、異なった波長の光がレンズを通ったとき、異なった屈折率で屈折し同じ場所に収束しないことによって生じる。このため、色収差はエッジの周辺で生じやすい。色収差の起きている領域のことをフリッジという。また、色収差にはいくつかの種類があり、これはレンズシステムの特徴によって変わる。代表的なものにパープルフリッジがある。これはエッジの周辺が紫色になるもので、程度によってはかなり目立ってしまう。そのため、色収差の補正処理が必要になっている。

色収差を除去する方法に、イメージセンサの前にローパスフィルタを付けるものがある。ローパスフィルタによる除去法は主流になっている。しかし、ぼかすことになるため解像度が低下してしまう。そのため、最近ではローパスフィルタの無いカメラも出てきている。その他に、光学的補正による除去法がある。これは、異なった屈折率の複数枚のレンズを組み合わせて複数の異なった波長の光を同じ平面で収束させるものである。しかし、アポクロマティックレンズを用いても三つの異なった波長（赤、緑、青）しか同じ平面で収束させることができず、完全に色収差をなくすことはできない。また、この様な手法を使うとレンズが重くなったり、高価になる。そのため、画像処理による色収差補正も必要になっている。

画像処理による色収差補正手法には大きく分けてグローバルな手法とローカルな手法がある。グローバルな手法では、事前に固定パターンの模様を撮影し、それを元に色収差の程度を計算し補正する手法がある¹⁾。しかし、このような手法では、特定のレンズにしか対応できなかったり、局所的な色収差を補正することができなかったりする。そのため、近年ではローカルな手法が提案されている。

その一つにChang et alらの手法²⁾がある。これは、緑の推移に沿うように赤と青を補正した色収差補正処理後の画像と、原画像を高域強調し

た画像を、コントラストを元に求めた重みで足し合わせて色収差を補正するアルゴリズムである。この手法では、灰色の色収差補正画像と原画像を高域強調した画像を足し合わせるため、色収差補正画像の重みが大きい場所では黒ずんでしまう。また、すべての画素に対して色収差補正処理や重みの計算を行うため、計算負荷が大きくなっている。そのため、提案手法では色収差が起きているであろうエッジ部分にのみ、彩度の残るような色収差補正処理を行っている。また、誤補正による間違った色になった領域の低減と取り除けなかった色収差の補正を狙い、一部処理をもう一度行った。

2 既存の手法

原理的に色収差はすべてのエッジで発生し、平坦部では色収差が起っていないとみなせる。そのため、エッジ領域を求め、その部分にのみ処理を行う。これにより、色収差が起っていない場所で間違った画素値に補正してしまうことを避け、色収差を補正することができる。また、色収差が起きているであろう箇所にものみ処理を行うので、計算負荷が小さくなる。このような手法に、Chung et alらの手法³⁾がある。そのアルゴリズムを以下に示す。

まず、ソーベルフィルタを適用し、各色の勾配値を求める。この際、横方向と縦方向それぞれ求める。横方向の勾配値は以下のように求められる。縦方向も同様に求める。

$$E(i, j) = C(i-1, j-1) + 2C(i, j-1) + C(i+1, j-1) \\ - C(i-1, j+1) - 2C(i, j+1) - C(i+1, j+1) \quad (1)$$

ここで、 $E(i, j)$ は画素 (i, j) での勾配値を表し、 C は R, G, B 各色を表す。以降は、水平方向と垂直方向別々に処理していく。そのため、以下から水平方向のみを記す。

まず、エッジを求めるため、(1)式で求めた

G の勾配値の絶対値が閾値以上になるまでラスタスキャンを行い、閾値以上になった点を p と置く。式に表すと以下になる。

$$\begin{aligned} j &\leftarrow j+1 \quad \text{while } |E_G(j)| < T \\ \text{set } p &= j \quad \text{if } |E_G(j)| \geq T \end{aligned} \quad (2)$$

E_G は G の勾配値を表し、 T は閾値を表す。垂直方向の処理を行う時は、縦方向の G の勾配値を使う。(2)式よりエッジであろう画素 p が求められた。

このままではエッジの幅がわからないので、画素 p から左右に探索していきエッジの幅を求めていく。画素 p における G がエッジということは、画素 p 周辺の R, G, B いずれかの勾配値が閾値 T 以上の画素もエッジであると考えられる。そのため、 H を以下のように定義すると、 H が閾値 T 以上の場合、エッジ領域であると推定される。

$$\begin{aligned} H(x) &= \max\{\text{sgn}[E_G(p)] \cdot E_R(x), \\ &\text{sgn}[E_G(p)] \cdot E_G(x), \text{sgn}[E_G(p)] \cdot E_B(x)\} \end{aligned} \quad (3)$$

x は画素 p の周辺画素を表す。符号関数 sgn を使用しているのは、勾配値には正と負の値があるので、正の勾配と負の勾配を区別するために用いている。 $H(x) < 0$ の場合、画素 x では三色とも画素 p の G の勾配とは逆の符号の勾配を持つとわかる。 $0 \leq H(x) < T$ の場合、少なくとも一色は画素 p の G の勾配と同じ符号の勾配である。しかし、エッジとみなすには勾配値が小さい。 $H(x) \geq T$ の場合、少なくとも一色は画素 p の G と同じ符号で G の勾配値以上の勾配値を持つとわかる。そのため、 $H(x) \geq T$ を満たさなくなるまで左右に探索し、 $H(x) \geq T$ を満たした最後の画素を、画素 p の左右でそれぞれ $l(p), r(p)$ と置く。これにより、画素 p のあるエッジ領域は $l(p)$ から $r(p)$ の範囲であるとわかった。次のエッジ領域の探索は $r(p)+1$ の画素からラスタスキャンを始めていく。

以上より求めた領域に対し色収差補正を行っていく。色収差補正の手法に R, B の画素値を G の画素値と同じにするという手法を行うと、色収差はなくなるが補正した場所が灰色になってしまい、本来の色とはかけ離れた色

になってしまう。エッジ領域での大きな色差がフリッジの原因となっている。そのことより、エッジ領域の色差を適切な範囲に収めることで、色収差を補正していく。この適切な範囲は画素 $l(p)$ と画素 $r(p)$ における色差の範囲であるとした。色差の上限を画素 $l(p)$ と画素 $r(p)$ における最大色差とすることで、エッジ領域周辺の色と大きく変わることなく色差が小さくなり、フリッジの程度が小さくなる。また、色差の下限を画素 $l(p)$ と画素 $r(p)$ における最小色差とすることで、補正処理後が灰色に近くなってしまいうことを避けられる。この処理を R, B 別々に行う。これにより、本来の色とかけ離れてしまうことを防ぎつつ色収差を除去する事ができる。最終的な画素値は以下ようになる。

$$R_{out}(j) = \begin{cases} \min\{D_R[l(p)], D_R[r(p)]\} + G(j), \\ \text{if } D_R(j) < \min\{D_R[l(p)], D_R[r(p)]\} \\ \max\{D_R[l(p)], D_R[r(p)]\} + G(j), \\ \text{if } D_R(j) > \max\{D_R[l(p)], D_R[r(p)]\} \\ R(j) \quad \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

$D_R(\cdot)$ は $R(\cdot) - G(\cdot)$ で求められる G との色差を表す。式(4)によりエッジ領域に一定量の色差を残し、また大きすぎる色差にならないようにしている。 B_{out} も同様にして求める。 G は色収差が起こっていないと仮定しているため、特に処理は行わない。この後、縦方向の勾配値を用いて同様に垂直方向にも処理を行う。その結果が出力画像となる。

3 提案手法

まず、Chung et al らの手法³⁾による結果に対しソーベルフィルタで勾配を求める。そして、その勾配をもとに Chung et al らの手法³⁾と同様の手法で水平方向のみ補正処理を行う。その結果が出力画像となる。垂直方向も行ってしまおうと水平方向のみと比べ、定量的評価結果が悪くなった。また、誤補正による間違った色の領域も低減しなかった。

4 適用例

まず、人工的に色収差を発生させるため、

赤、青を縦横1ピクセル広げ、それに対し赤は $\sigma=0.5$ 青は $\sigma=1$ のガウシアンフィルタをかけぼかした。その内、右端と下端を除いたものを使い、色収差を発生させた。原画像と、色収差を発生させた画像が図1である。



(a)原画像 (b)色収差画像

図1

色収差画像の作成

色収差を発生させた画像に従来手法を適用させた結果が図2である。従来手法では、図2のように、間違った色に補正してしまった箇所がある。色収差を発生させた画像に提案手法を適用させた結果が図3である。閾値 T は図2,図3共に30とした。図2,図3より、従来手法で間違った色に補正してしまった箇所が改良されているとわかる。また、色収差も従来手法より補正されている。閾値 T を小さくすることでより色収差を取り除くことができるが、誤った色になってしまう箇所が多くなってしまふ。しかし、定量的評価では閾値 T が小さいほうが良い結果になった。そのため、閾値 T を小さくした場合の画像は載せず、定量的評価のみ閾値 T を小さくした場合をのせる。図4に、横軸に画素位置、縦軸に画素値をとった、図3の一部分での R,G,B 各画素値の画素位置に対する変化を示す。図4より、従来手法より提案手法のほうが原画像に近く、誤補正の程度が低く抑えられていることが分かる。また、カラー画像ではわかりにくいかもしれないので、原画像と処理結果後の画像の差の絶対値を2倍した画像を図5にのせる。図5からも、違いの大きな明るい箇所がより小さな暗い画像になっているので、改良されていることがわかる。定量的評価には式(5)で求められる MSE を用いた。 M,N は画像の縦横の各画素数を示し、 X は処理結果画像 Y は原画像である。また、より見た目の評価に近いと言われている式(6)で求められる $SSIM$ も用いた。 x,y は処理結果画像と原画像、 μ は平均、

σ は標準偏差、 σ_{xy} は x と y の共分散を示す。また、 $C1$ と $C2$ は正規化定数を表し、各 $(0.01 \times 255)^2$ と $(0.03 \times 255)^2$ を設定している。表1が色収差の起こっていない画像との MSE 、表2が色収差の起こっていない画像との $SSIM$ である。



(a)従来手法 (b)(a)の拡大画像

図2

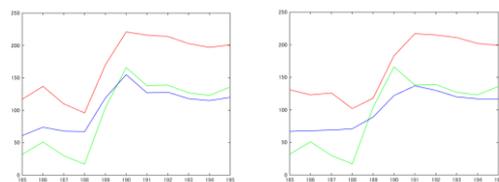
従来手法による結果



(a)従来手法 (b)提案手法

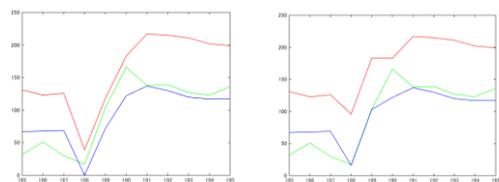
図3

従来手法と提案手法の比較



(a)原画像

(b)色収差画像

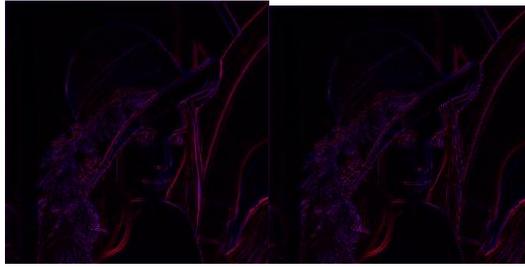


(c)従来手法

(d)提案手法

図4

図3の一部分での R,G,B 各画素値の画素位置に対する変化



(a)従来手法 (b)提案手法

図 5

原画像との差分

$$MSE = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (X(i, j) - Y(i, j))^2, \quad (5)$$

$$SSIM(x, y) = \frac{(2\mu_x \mu_y + C_1)(2\sigma_{xy} + C_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2)}. \quad (6)$$

表 1

色収差の起こっていない画像との MSE

	R	B
原画像	119.45	90.96
従来手法 ³⁾ T=30	95.79	85.11
提案手法 T=30	81.53	77.46
従来手法 ³⁾ T=10	70.29	68.20
提案手法 T=10	66.77	64.51

表 2

色収差の起こっていない画像との SSIM

	R	B
原画像	0.743	0.666
従来手法 ³⁾ T=30	0.751	0.671
提案手法 T=30	0.757	0.677
従来手法 ³⁾ T=10	0.766	0.696
提案手法 T=10	0.770	0.704

実際に撮影した色収差の起こっている画像に対しても処理を行った。その結果が図 5 である。図 5 より、フレージ領域も低減していて間違っただけの色も補正されている。これより、実際に撮影した際に生じた色収差に対しても有効であることがわかる。



(a)原画像

(b)提案手法

図 5

実写真おける補正処理後

5 まとめ

本報告では、従来手法の結果に対し、もう一度水平方向のみ処理を行う手法を提案し、提案手法が従来手法より良好な結果が得られることを確認した。

「参考文献」

1)John Mallon and Paul F Whelan., “Calibration and Removal of Lateral Chromatic Aberration in Images”, Pattern Recognition Letters, VOL.28, NO.1, pp125-135, 2007.

2)Joonyoung Chang, Hee Kang, and Moon Gi Kang., “Correction of Axial and Lateral Chromatic Aberration With False Color Filtering”, IEEE Transactions on Image Processing, VOL.22, NO.3, pp.1186-1198, 2013.

3)S.-W.Chung,B.-K.Kim,andW.-J.Song., “Removing chromatic aberration by digital image processing”, Optical Engineering, VOL.49, NO.6, pp.0670021-06700210, 2010.