

## 空間方向の勾配及びバンド間の相関を考慮したマルチスペクトル画像のデモザイキング手法 Demosaicking Method for Multispectral Image Based on Spatial Gradient and Inter-Channel Correlation

小川 衆<sup>†</sup> 篠田 一馬<sup>†</sup> 長谷川 まどか<sup>†</sup> 加藤 茂夫<sup>†</sup> 石川 雅浩<sup>‡</sup> 駒形 英樹<sup>‡</sup> 小林 直樹<sup>‡</sup>  
Shu Ogawa<sup>†</sup> Kazuma Shinoda<sup>†</sup> Madoka Hasegawa<sup>†</sup> Shigeo Kato<sup>†</sup>  
Masahiro Ishikawa<sup>‡</sup> Hideki Komagata<sup>‡</sup> Naoki Kobayashi<sup>‡</sup>

### 1. はじめに

一般的に、デジタルカラー画像の色表現には光の 3 原色である赤(R)、緑(G)、青(B)の波長域(バンド)が使用され、それらの組み合わせにより様々な色を表現する。しかし、この RGB 画像には表現可能な色の種類に限りがある。そこで、3 成分よりも多くのバンドを使用して表現されたマルチスペクトル画像(MSI)の利用が検討されている。MSI は RGB 画像に比べ、多くのバンドにより表現されていることから、植生画像の解析や青果物の糖度予測、病理画像診断等での利用が検討されている[1]。

MSI の撮影システムは、multi-camera-one-shot systems, single-camera-multi-shot systems, そして、single-camera-one-shot systems[2]の 3 方式に区分することができる。本稿では、Multispectral Filter Array(MSFA)と呼ばれる単板カラーフィルタを利用した、single-camera-one-shot systems による MSI の取得に注目する。MSFA とは、RGB 画像の撮影に使用される Color Filter Array(CFA)を基にした単板カラーフィルタであり、このフィルタを使用し撮影を行うことにより、1 画素に 1 バンドの信号のみを観測した画像(モザイク画像)を取得することができる。図 1 に Bayer 型の CFA 及び MSFA を示す。図 1 におけるアルファベットは各位置の観測値のバンドを示している。この撮影システムでは、MSFA を使用することにより、1 度の撮影でモザイク画像を取得することができるため、多眼カメラ等を使用する multi-camera-one-shot systems や、フィルタを取り替え複数回の撮影を行うことで MSI を取得する single-camera-multi-shot systems に比べ、安価かつ短時間に撮影を行うことができる。

このモザイク画像から各画素に全バンドの画素値をもつ画像を取得するには、デモザイキング処理と呼ばれる画素補間処理を施す必要がある。しかし、MSI は RGB モザイク画像に比べ、各バンドの観測値密度が疎であるため、精度の高いデモザイキング処理を行うことは困難となる。よって、精度の高いデモザイキング処理を行うためにはバンド内の観測値だけではなく、他バンドの観測値、延いてはバンド間の相関性の利用が必要となる。バンド間の相関性を



(a) Bayer 型の CFA (b) MSFA

図1 CFA と MSFA

<sup>†</sup>宇都宮大学大学院工学研究科

Graduate School of Engineering, Utsunomiya University

<sup>‡</sup>埼玉医科大学 保健医療学部

Faculty of Health and Medical Care, Saitama Medical University

利用するデモザイキング手法[3]-[11]は多く提案されており、J. Brauers らによる補間手法[4]では、補間対象画素における補間対象バンドと他バンド間の差分値を、周囲の画素におけるバンド間差分値から予測し、その予測値と補間対象画素における観測値を加算することにより補間値を算出する。しかし、バンド内の相関性を考慮せず、周囲のバンド間差分値による Bilinear 補間値を予測値としているため、バンド内のエッジが考慮されていない補間値が算出され、結果として復元画像に多くのジャギーが発生する。

そこで本稿では、RGB モザイク画像のデモザイキング手法である Local Directional Interpolation(LDI)[12]を MSI のデモザイキングへと拡張した、Multispectral LDI(MLDI)を提案する。MLDI は、バンド間の相関性及びバンド内の相関性を考慮した LDI を基にした手法であるため、ジャギーの発生が抑えられた高精細な復元画像を得ることができると考えられる。既存手法と提案手法との比較評価の結果から、デモザイキング処理後の復元画像の画質が向上したことを確認し、提案手法の有効性を確認したので報告する。

### 2. Local Directional Interpolation[12]

#### 2.1 概要

RGB 画像のデモザイキング手法である LDI の流れを図 2 に示す。図 2 において、 $R_{i,j}$  は画素 $(i,j)$ におけるバンド R の画素値を示している。LDI では、図 1(a)に示すような Bayer 型 CFA を使用し撮影されたモザイク画像を想定しているため、まず観測値密度が密であるバンド G を補間し(図 2 では③)、その補間値を利用することにより、バンド R, B を補間する。バンド R, B の補間では、補間対象バンドの観測値が存在する 4 画素に囲まれた中央に位置する画素を先に補間し(図 2 では④)、その後、残る画素を補間する(図 2 では⑤)。

LDI におけるバンド G の補間処理の流れを図 3 に示す。図 3 において、参照バンドとは補間対象画素と同じ位置に観測値が存在するバンドである。LDI では、式(1)の考え方を利用する。式(1)において、 $(i,j)$ は任意の画素の座標、 $(m,n)$ は $(i,j)$ の周囲 8 近傍に隣接する画素の座標を示している。

$$G_{i,j} - R_{i,j} \cong G_{m,n} - R_{m,n} \quad (1)$$

各バンドにおいて、観測値が存在する画素をそのバンドの観測画素とする。式(1)は、隣接する画素におけるバンド間の差分値には高い相関性があることを示しており、LDI はこの式に基づき、周囲の補間対象バンドの観測画素におけるバンド間差分値から、補間対象画素における補間対象バンドと参照バンド間の差分値を予測する。その際、参照バンドでは隣接する 2 画素における観測値の平均値を利用

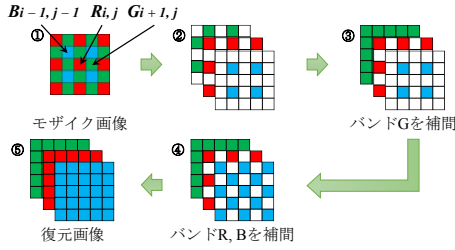


図2 LDIの全体の流れ

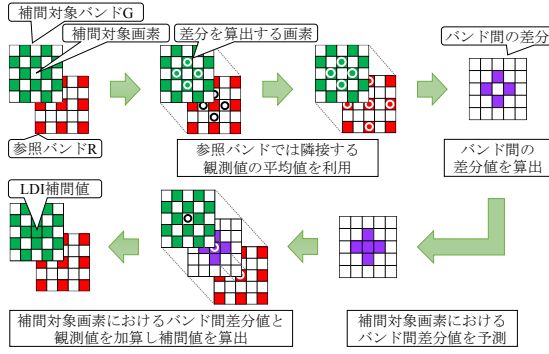


図3 LDIの補間処理の流れ(バンドGの場合)

する。また、LDIでは周囲のバンド間差分値に対し、それらを算出した画素が存在する水平、垂直の4方向、または斜めの4方向における勾配値による重み付けをすることで、バンド内の相関性を考慮したバンド間差分値を算出する。こうして得られた予測値に補間対象画素における観測値を加え、補間値を算出する。

## 2.2 補間アルゴリズム

### 2.2.1 バンドGの補間

まず、バンドGの補間を行う。補間対象画素を図2における画素 $(i, j)$ とすると、参照バンドはバンドRとなり、バンドGの観測画素が存在する方向は画素 $(i, j)$ から見て、北(n)、南(s)、西(w)、東(e)の4方向となる。式(2)から式(5)に各方向におけるバンドR, G間の差分値の算出式を示す。

$$d_{gr}^n = G_{i,j-1} - (R_{i,j} + R_{i,j-2})/2 \quad (2)$$

$$d_{gr}^s = G_{i,j+1} - (R_{i,j} + R_{i,j+2})/2 \quad (3)$$

$$d_{gr}^w = G_{i-1,j} - (R_{i,j} + R_{i-2,j})/2 \quad (4)$$

$$d_{gr}^e = G_{i+1,j} - (R_{i,j} + R_{i+2,j})/2 \quad (5)$$

次に、各方向におけるバンド内の勾配値を式(6)から式(9)により、算出する。

$$\nabla_{gr}^n = |G_{i,j-1} - G_{i,j+1}| + |R_{i,j} - R_{i,j-2}| + |G_{i-1,j} - G_{i-1,j-2}|/2 + |G_{i+1,j} - G_{i+1,j-2}|/2 + \varepsilon \quad (6)$$

$$\nabla_{gr}^s = |G_{i,j-1} - G_{i,j+1}| + |R_{i,j} - R_{i,j+2}| + |G_{i-1,j} - G_{i-1,j+2}|/2 + |G_{i+1,j} - G_{i+1,j+2}|/2 + \varepsilon \quad (7)$$

$$\nabla_{gr}^w = |G_{i-1,j} - G_{i+1,j}| + |R_{i,j} - R_{i-2,j}| + |G_{i,j-1} - G_{i,j-2}|/2 + |G_{i,j+1} - G_{i,j+2}|/2 + \varepsilon \quad (8)$$

$$\nabla_{gr}^e = |G_{i-1,j} - G_{i+1,j}| + |R_{i,j} - R_{i+2,j}| + |G_{i,j-1} - G_{i,j-2}|/2 + |G_{i,j+1} - G_{i,j+2}|/2 + \varepsilon \quad (9)$$

ここで、 $\varepsilon$ は勾配値が0とならないように加えられる正の整数である。これらの勾配値は各方向におけるバンド内の差分の絶対値の総和であるため、相対的な勾配値の大きさから、エッジの方向を判断することができる。よって、各方向の勾配を考慮した画素 $(i, j)$ におけるバンド間差分値 $\bar{d}_{gr}$ を、各方向における勾配値の逆数 $w_{gr}^{dir}$  ( $dir = n, s, w, e$ )によるバンド間差分値の加重平均から算出することができる。式(10)、式(11)にそれらの算出式を示す。

$$w_{gr}^{dir} = 1/\nabla_{gr}^{dir} \quad (10)$$

$$\bar{d}_{gr} = \frac{w_{gr}^n d_{gr}^n + w_{gr}^s d_{gr}^s + w_{gr}^w d_{gr}^w + w_{gr}^e d_{gr}^e}{w_{gr}^n + w_{gr}^s + w_{gr}^w + w_{gr}^e} \quad (11)$$

$\bar{d}_{gr}$ に観測値 $R_{i,j}$ を加えることにより、画素 $(i, j)$ におけるバンドGの補間値 $\bar{G}_{i,j}$ を算出する。以上の処理を全ての補間対象画素について同様に言い、バンドGを補間する。

### 2.2.2 バンドR, Bの補間

次にバンドR, Bの補間を行う。補間対象バンドをB、補間対象画素を図2における画素 $(i, j)$ とすると、バンドBの観測画素が存在する方向は画素 $(i, j)$ から見て、北西(nw)、北東(ne)、南東(se)、南西(sw)の4方向となる。ここでの参照バンドはバンドGとする。式(12)から式(15)に各方向におけるバンドB, G間の差分値の算出式を示す。式(16)から式(19)に各方向における勾配値の算出式を示す。

$$d_{bg}^{nw} = B_{i-1,j-1} - \bar{G}_{i-1,j-1} \quad (12)$$

$$d_{bg}^{ne} = B_{i+1,j-1} - \bar{G}_{i+1,j-1} \quad (13)$$

$$d_{bg}^{se} = B_{i+1,j+1} - \bar{G}_{i+1,j+1} \quad (14)$$

$$d_{bg}^{sw} = B_{i-1,j+1} - \bar{G}_{i-1,j+1} \quad (15)$$

$$\nabla_{bg}^{nw} = |B_{i-1,j-1} - B_{i+1,j+1}| + |R_{i-2,j-2} - R_{i,j}| + |\bar{G}_{i-1,j-1} - \bar{G}_{i,j}| + \varepsilon \quad (16)$$

$$\nabla_{bg}^{ne} = |B_{i+1,j-1} - B_{i-1,j+1}| + |R_{i+2,j-2} - R_{i,j}| + |\bar{G}_{i+1,j-1} - \bar{G}_{i,j}| + \varepsilon \quad (17)$$

$$\nabla_{bg}^{se} = |B_{i-1,j-1} - B_{i+1,j+1}| + |R_{i+2,j+2} - R_{i,j}| + |\bar{G}_{i+1,j+1} - \bar{G}_{i,j}| + \varepsilon \quad (18)$$

$$\nabla_{bg}^{sw} = |B_{i+1,j-1} - B_{i-1,j+1}| + |R_{i-2,j+2} - R_{i,j}| + |\bar{G}_{i-1,j+1} - \bar{G}_{i,j}| + \varepsilon \quad (19)$$

各方向における勾配値の逆数 $w_{bg}^{dir}$  ( $dir = nw, ne, se, sw$ )によるバンド間差分値の加重平均が、画素 $(i, j)$ におけるバンド間差分値 $\bar{d}_{bg}$ となる。式(20)、式(21)にそれらの算出式を示す。

$$w_{bg}^{dir} = 1/\nabla_{bg}^{dir} \quad (20)$$

$$\bar{d}_{bg} = \frac{w_{bg}^{nw} d_{bg}^{nw} + w_{bg}^{ne} d_{bg}^{ne} + w_{bg}^{se} d_{bg}^{se} + w_{bg}^{sw} d_{bg}^{sw}}{w_{bg}^{nw} + w_{bg}^{ne} + w_{bg}^{se} + w_{bg}^{sw}} \quad (21)$$

$\bar{d}_{bg}$ に $\bar{G}_{i,j}$ を加えることにより、補間値 $\bar{B}_{i,j}$ を算出する。以上の処理を全ての補間対象画素について同様に言う。補間対象バンドがバンドRの場合は、バンドBの観測画素を同様に補間する。そして、バンドR, Bにおける残された画素の補間はバンドGの補間と同様に行う。

### 3. Multispectral Local Directional Interpolation

#### 3.1 概要

本稿では、RGB モザイク画像のデモザイクング手法である LDI を MSI 用に拡張した、Multispectral LDI(MLDI)を提案する。図 4 に LDI から MLDI への拡張の概要を示す。図 1(b)を想定した 4 バンドのモザイク画像の場合、各バンドの観測値密度は図 1(a)を想定した RGB モザイク画像におけるバンド R, B と同様となるため、それらの補間式を利用することにより、LDI と同様の手順で補間を行うことができる。また、バンド R, B よりも各バンドの観測値密度が疎であるモザイク画像の場合にも、LDI におけるバンド R, B の補間式を観測画素の間隔に合わせ、利用する画素を変更することにより、LDI と同様の手順での補間が可能となる。

よって、MLDI では LDI と同様の補間手順を踏むために、MSFA のフィルタの配置パターンを画素  $2^x \times 2^x(x=1,2,\dots)$  と想定し、補間対象画素を順次選択する。MLDI の流れを図 5 に示す。  $t=2^{x-1}$ (図 5 では  $x=2$ ) とすると、MLDI では、まず各バンドにおける 4 つの観測画素  $(i\pm t, j\pm t)$  に囲まれた中央に位置する画素  $(i, j)$  を補間する(図 5 では③)。このとき、画素  $(i\pm t, j\pm t)$  が存在する斜めの 4 方向におけるバンド内の勾配を考慮する。次に、各バンドにおける補間された画素及び観測画素  $(p\pm t, q)$ ,  $(p, q\pm t)$  に囲まれた中央に位置する画素  $(p, q)$  を補間する(図 5 では④)。このとき、画素  $(p\pm t, q)$ ,  $(p, q\pm t)$  が存在する水平、垂直の 4 方向におけるバンド内の勾配を考慮する。最後に、  $t$  を  $t/2$  に更新し、  $t$  が 1 未満となるまで以上の処理を繰り返すことにより(図 5 では⑤)、観測画素以外の全ての画素を補間する(Step 1)。

しかし、Step 1 では周囲 4 近傍の勾配を考慮しているだけで、1 画素における補間処理の中で 8 近傍の勾配は考慮していない。また、補間対象画素におけるバンド間差分値を予測する際、離れた画素のみを参照しているため、観測

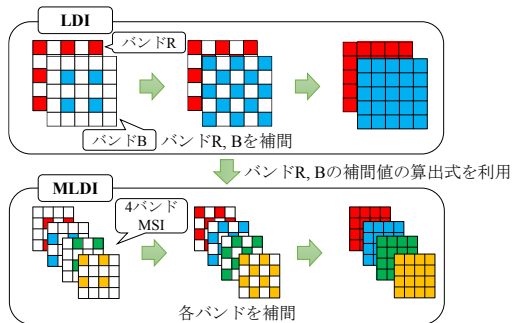


図 4 LDI から MLDI への拡張の概要

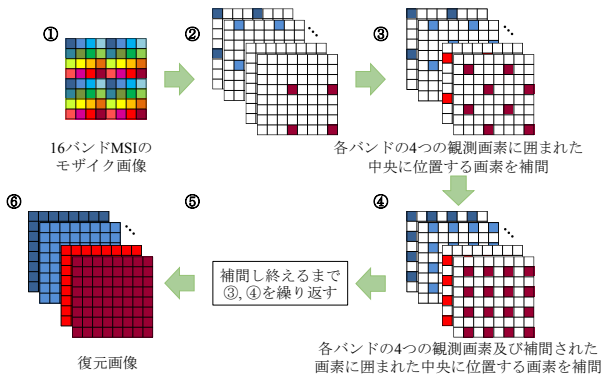


図 5 MLDI における Step 1 の全体の流れ

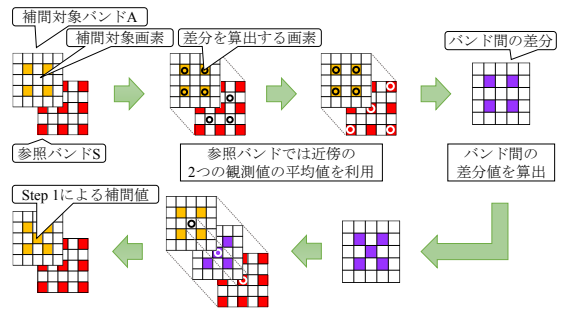


図 6 MLDI における Step 1 の補間処理の流れ( $t=1$ )

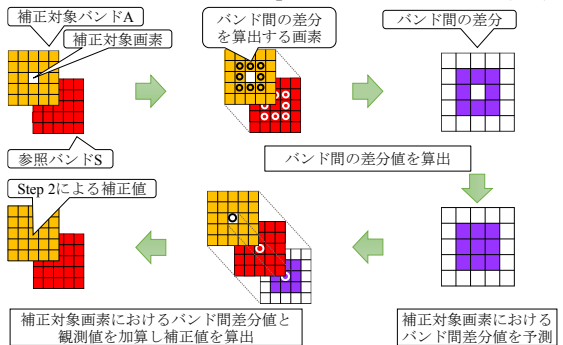


図 7 MLDI における Step 2 の補正処理の流れ

値密度が疎な MSI の場合、補間精度が低下する。バンド内の相関性を考慮した補間を行う場合、周囲 4 近傍だけでなく周囲 8 近傍の勾配及び画素を利用することで、より正確にバンド内のエッジの方向を考慮することができ、補間精度を向上させることができると考えられる。よって、周囲 8 近傍の画素及び勾配値を利用した処理を施すことにより、Step 1 による補間値を補正する(Step 2)。

図 6 に  $t=1(x=1)$  とした場合の Step 1 の流れを示し、図 7 に Step 2 の流れを示す。Step 1, Step 2 では、LDI と同様に、まず補間対象画素の周囲の画素における補間対象バンドと参照バンド間の差分値を算出し、次に、各方向におけるバンド内の勾配値を算出する。そして、勾配値の逆数によるバンド間差分値の加重平均を補間対象画素におけるバンド間差分値とし、その画素における観測値を加えることにより補間値を算出する。次節にて、補間対象バンドを A, 参照バンドを S, 補間対象画素を  $(i, j)$ ,  $(p, q)$  として詳述する。

#### 3.2 補間アルゴリズム

##### 3.2.1 Step 1

まず、4 つの観測画素  $(i\pm t, j\pm t)$  に囲まれた中央に位置する画素  $(i, j)$  を補間する。補間手順は図 6 に示している。方向  $nw$  におけるバンド A, S 間の差分値  $d_{as}^{nw}$  の算出式を式(22)に示す。

$$d_{as}^{nw} = A_{i-t, j-t} - (S_{i, j} + S_{i-2t, j-2t}) / 2 \quad (22)$$

同様に、各方向  $(ne, se, sw)$  におけるバンド間の差分値  $d_{as}^{ne}$ ,  $d_{as}^{se}$ ,  $d_{as}^{sw}$  を算出する。次に、各方向における勾配値を算出する。式(23)に方向  $nw$  における勾配値の算出式を示す。式(23)は式(16)を観測画素の間隔  $2t$  に合わせ、使用する画素を変更した式であり、それぞれの式における補間対象バンドと参照バンドを対応付けている。ここで、LDI ではバン

ド R, B の補間に、既に補間されたバンド G を参照バンドとして利用しているが、MLDI の場合、全バンドに対し同様の処理を行い補間するため、この時点で既に補間されたバンドは存在しない。よって、式(23)では、式(16)においてバンド R, G が利用されている部分は全て参照バンドを利用する。また、バンド G の補間値を使用する部分は参照バンドの Bilinear 補間値を使用する。式(23)において、 $\tilde{S}_{i,j}$  が画素  $(i,j)$  におけるバンド S の Bilinear 補間値である。

$$\begin{aligned} \nabla_{as}^{nw} = & |A_{i-t,j-t} - A_{i+t,j+t}| \\ & + |S_{i-2t,j-2t} - S_{i,j}| + |\tilde{S}_{i-t,j-t} - S_{i,j}| + \varepsilon \end{aligned} \quad (23)$$

同様に、各方向  $(ne, se, sw)$  におけるバンド内の勾配値を算出する。これらの勾配値の逆数  $w_{as}^{dir}$  ( $dir = nw, ne, se, sw$ ) によるバンド間差分値の加重平均が画素  $(i,j)$  におけるバンド間の差分値  $\bar{d}_{as}$  となる。式(24)にその算出式を示す。

$$\bar{d}_{as} = \frac{w_{as}^{nw} d_{as}^{nw} + w_{as}^{ne} d_{as}^{ne} + w_{as}^{se} d_{as}^{se} + w_{as}^{sw} d_{as}^{sw}}{w_{as}^{nw} + w_{as}^{ne} + w_{as}^{se} + w_{as}^{sw}} \quad (24)$$

$\bar{d}_{as}$  に観測値  $S_{i,j}$  を加えることにより、補間値  $\bar{A}_{i,j}$  を算出する。以上の処理を 4 つの観測画素に囲まれた中央に位置する全ての画素に対し、同様に行う。

次に、4 つの画素  $(p+t, q)$ ,  $(p, q+t)$  に囲まれた中央に位置する画素  $(p, q)$  を補間する。画素  $(p+t, q)$ ,  $(p, q+t)$  とは、バンド A の観測画素及び既に補間された画素である。方向  $n$  におけるバンド A, S 間の差分値の算出式を式(25)に示す。

$$d_{as}^n = A_{p,q-t} - (S_{p,q} + S_{p,q-2t})/2 \quad (25)$$

同様に、各方向  $(s, w, e)$  におけるバンド間の差分値  $d_{as}^s, d_{as}^w, d_{as}^e$  を算出する。次に、各方向における勾配値を算出する。式(26)に方向  $n$  における勾配値の算出式を示す。式(26)において、 $M_{p,q}$  はモザイク画像における画素  $(p, q)$  の画素値である。

$$\begin{aligned} \nabla_{as}^n = & |S_{p,q-2t} - S_{p,q}| \\ & + \sum_{k=1}^t (|M_{p,q-t+(k-1)} - M_{p,q+(t-(k-1))}|) \\ & + \sum_{k=1}^t (W_k |M_{p-k,q-2t-M_{p-k,q}}|) \\ & + \sum_{k=1}^t (W_k |M_{p+k,q-2t-M_{p+k,q}}|) + \varepsilon \end{aligned} \quad (26)$$

式(26)は式(6)を観測画素の間隔  $2t$  に合わせ、使用する画素を変更した式であり、それぞれの式における補間対象バンドと参照バンドを対応付けている。また、補間対象バンドや参照バンドではないバンドを使用している部分は、バンド平面状の同様の箇所における差分値を算出できるように、モザイク画像の画素値を利用する。ここで、勾配値はバンド間差分値に対し重み付けを行うための値であり、それらの重み付け係数は各方向における勾配値間の相対的な大きさにより決定される。よって、より多くのバンド内の差分値を利用することにより、適切な勾配値及び重み付け係数が算出されると考えられる。そこで、MLDI では LDI から単純に拡張するだけでは利用されない画素間の差分値も利用する。式(26)の第 2 項について考えると、 $t = 4$  とし

た場合、 $|M_{p,q-4} - M_{p,q+4}|$  以外に  $|M_{p,q-5} - M_{p,q+3}|$ ,  $|M_{p,q-6} - M_{p,q+2}|$ ,  $|M_{p,q-7} - M_{p,q+1}|$  等の方向  $n$  に関する差分値を加えることで、エッジをより正確に考慮した勾配値を算出する。

同様に、各方向  $(s, w, e)$  におけるバンド内の勾配値を算出する。ここで、 $W_k$  ( $k = 1, 2, \dots, t$ ) は総和が 0.5 となる重み付け係数であり、式(27)により算出される。式(27)において、 $\sigma$  はパラメータである。

$$W_k = \frac{\exp(-k^2/(2\sigma^2))}{2 \sum_{i=1}^t \exp(-i^2/(2\sigma^2))} \quad (27)$$

これらの勾配値の逆数  $w_{as}^{dir}$  ( $dir = n, s, w, e$ ) によるバンド間差分値の加重平均が、補間対象画素におけるバンド間差分値  $\bar{d}_{as}$  となる。式(28)にその算出式を示す。

$$\bar{d}_{as} = \frac{w_{as}^n d_{as}^n + w_{as}^s d_{as}^s + w_{as}^w d_{as}^w + w_{as}^e d_{as}^e}{w_{as}^n + w_{as}^s + w_{as}^w + w_{as}^e} \quad (28)$$

$\bar{d}_{as}$  に観測値  $S_{p,q}$  を加えることにより、補間値  $\bar{A}_{p,q}$  を算出する。以上の処理を 4 つの観測画素及び補間された画素に囲まれた中央に位置する全ての画素に対し、同様に行う。

以上の操作を、 $t$  を  $t/2$  に更新し、 $t$  が 1 未満となるまで繰り返すことにより、全画素、全バンドについて補間する。その際、モザイク画像の画素値を利用していた部分は全て補間対象バンドの値を利用する。

### 3.2.2 Step 2

Step 1 における補間値の精度を向上させるために、その補間値に対し、周囲 8 方向における勾配を考慮した補正処理を行う。Step 2 では、図 7 に示すように周囲 8 近傍の画素  $(\pm 1, \pm 1)$ ,  $(\pm 1, j)$ ,  $(i, \pm 1)$  におけるバンド A, S 間の差分値から、画素  $(i, j)$  における差分値を予測し、その予測値に観測値  $S_{i,j}$  を加えることにより、補正值を算出する。方向  $nw$  におけるバンド A, S 間の差分値の算出式を式(29)に示す。

$$d_{as}^{nw} = A_{i-1,j-1} - S_{i-1,j-1} \quad (29)$$

同様に、各方向  $(ne, se, sw, n, s, w, e)$  におけるバンド間の差分値  $d_{as}^{ne}, d_{as}^{se}, d_{as}^{sw}, d_{as}^n, d_{as}^s, d_{as}^w, d_{as}^e$  を算出する。次に、斜め及び水平、垂直の 8 方向における勾配値をそれぞれ式(23)、式(26)と同様に算出する。その際、モザイク画像を利用する部分は補間対象バンドを利用し、 $t = 1$  とする。これらの勾配値の逆数  $w_{as}^{dir}$  ( $dir = nw, ne, se, sw, n, s, w, e$ ) によるバンド間差分値の加重平均が、画素  $(i, j)$  におけるバンド間差分値  $\bar{d}_{as}$  となる。式(30)にその算出式を示す。

$$\begin{aligned} \bar{d}_{as} = & (w_{as}^{nw} d_{as}^{nw} + w_{as}^{ne} d_{as}^{ne} + w_{as}^{se} d_{as}^{se} + w_{as}^{sw} d_{as}^{sw} \\ & + w_{as}^n d_{as}^n + w_{as}^s d_{as}^s + w_{as}^w d_{as}^w + w_{as}^e d_{as}^e) \\ & / (w_{as}^{nw} + w_{as}^{ne} + w_{as}^{se} + w_{as}^{sw} + w_{as}^n + w_{as}^s + w_{as}^w + w_{as}^e) \end{aligned} \quad (30)$$

$\bar{d}_{as}$  に観測値  $S_{i,j}$  を加えることにより、補間値  $\bar{A}_{i,j}$  を算出する。以上の処理を観測画素以外の全画素、全バンドについて同様に行う。



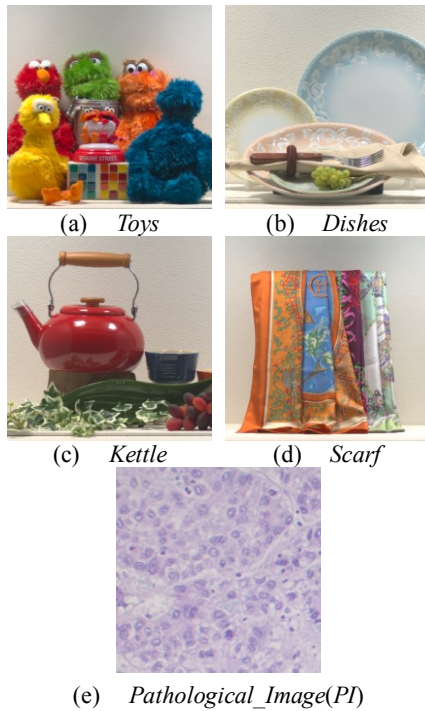


図8 テスト画像

4. シミュレーション

提案手法の有効性を確認するために、既存手法である Bilinear 補間法及び J. Brauers らによる補間手法[4]、提案手法である MLDI の比較評価を行った。MLDI では、 $\epsilon = 1$ ,  $\sigma = 0.5$  とした。テスト画像には、“Toys”, “Dishes”, “Kettle”, “Scarf”, そして、病理画像である “Pathological Image(PI)” の 5 枚の 16 バンド MSI を使用する。図 8 にテスト画像を示す。図 8 では、可視化のために 16 バンド MSI を RGB 画像へと変換している。“Toys”, “Dishes”, “Kettle”, “Scarf” の撮影に使用したカメラの分光感度特性を図 9 に示す。MSFA のフィルタの配置パターンは  $4 \times 4(x=2)$  画素とし、図 10 に示す 2 つの配置を想定した。図 10 では、短波長から長波長の順にバンドを番号付けしている。

本シミュレーションでは、フィルタを取り替え、複数回の撮影を行うことで MSI を取得する single-camera-multi-shot systems により得られた 16 バンド MSI から、想定する配置となるように画素値をサンプリングすることにより、想定するモザイク画像を取得する。そして、得られたモザイク画像に対しデモザイク処理を行うことにより、各手法による復元画像を取得する。補間品質の評価には、復元画像の目視評価と、原画像と復元画像との Peak Signal-to-Noise Ratio(PSNR)を用いた。図 10 の配置を想定した場合における、各手法による復元画像と原画像の PSNR を表 1, 表 2 に示す。表 1, 表 2 において、中の太字は各画像における PSNR の最大値を示している。また、原画像及び図 10(b)の配置を想定した場合における、各手法により取得された “Toys”, “Scarf” の復元画像の一部を拡大したものを図 11, 図 12 に示す。

表 1, 表 2 より、既存手法に比べ、配置 1 では “PI” 以外のテスト画像、配置 2 では全テスト画像において、提案手法である MLDI による復元画像の PSNR の向上が確認できる。また、バンド内の勾配を考慮せずにバンド間の相関性を考

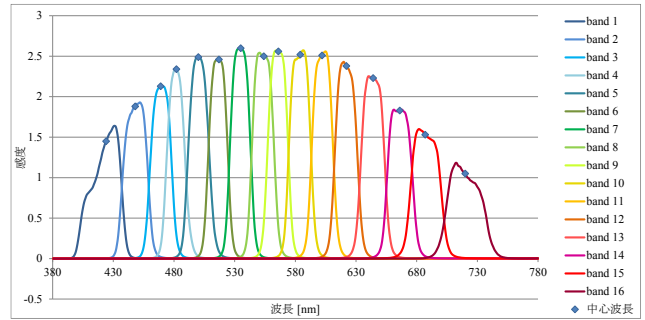


図9 撮影カメラの分光感度特性

1	2	3	4	1	9	3	11
5	6	7	8	13	5	15	7
9	10	11	12	4	12	2	10
13	14	15	16	16	8	14	6

(a) 配置 1

(b) 配置 2

図10 想定する MSFA のフィルタ配置パターン

表 1 配置 1 の場合の原画像と復元画像との PSNR[dB]

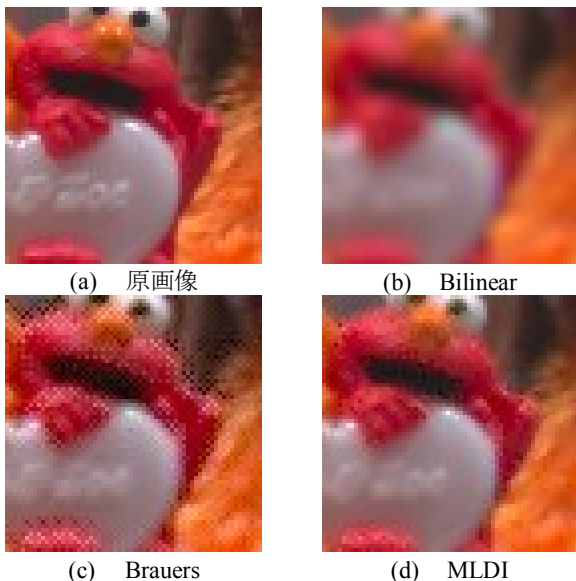
	Toys	Dishes	Kettle	Scarf	PI
Bilinear	29.46	27.32	26.70	28.10	<b>32.83</b>
Brauers	31.40	29.74	29.05	29.00	31.72
MLDI	<b>32.68</b>	<b>31.68</b>	<b>30.52</b>	<b>30.05</b>	32.02

表 2 配置 2 の場合の原画像と復元画像との PSNR[dB]

	Toys	Dishes	Kettle	Scarf	PI
Bilinear	29.44	27.31	26.66	28.09	32.82
Brauers	31.55	29.83	29.08	29.27	31.95
MLDI	<b>33.48</b>	<b>32.07</b>	<b>30.77</b>	<b>31.61</b>	<b>34.57</b>

慮した補間手法である Brauers らによる手法と比べると、図 10(a)の場合、最大で 1.9[dB]程度、配置 2 の場合、最大で 2.6[dB]程度の向上が確認できる。更に、図 11, 図 12 より、図 10(b)の場合、バンド内の勾配を考慮していない既存手法に比べ、バンド内の勾配を考慮した提案手法では全体的にノイズが低減し、特にエッジ部についてはジャギーが目立たなくなり、鮮明に復元されていることが確認できる。しかし、MLDI による復元画像は原画像に比べると、文字や模様等の細かな部分については十分に補間されていると言いがたい。MSI は糖度予測や病理画像診断等への利用を考慮しているため、より精度の高い復元画像の取得が必要であると考えられる。

また、配置 1 の場合、提案手法である MLDI は既存手法である Bilinear 補間に比べ、“PI”において PSNR が低下した。これは配置 1 が MLDI に適していないためであると考えられる。MLDI の Step 1 では、各バンドについて、4 つの観測画素及び補間された画素に囲まれた中央に位置する画素から順に補間する。その際、配置 1 では、バンド 1 を補間対象バンドとした場合、はじめにバンド 11 の観測画素を補間し、次にバンド 3, 9 の観測画素を補間するが、配置 2 では、はじめにバンド 2 の観測画素を補間し、次にバンド 3, 4 の観測画素を補間する。即ち、配置 1 では、補間対象バンドと中心波長が離れたバンドを参照バンドとした補間を先に行うのに対し、配置 2 では、中心波長が近いバンドを参照バンドとした補間を先に行う。補間対象バンドと中

図11 原画像及び各手法による“*Toys*”の復元画像の拡大図

心波長の近いバンドが参照バンドである場合、バンド間の中心波長が離れたバンドが参照バンドである場合に比べ、精度の高い補間を行うことができると考えられる。また、MLDIは先に算出した補間値を次の補間に利用するため、先に精度の高い補間値を算出するほど、その次の補間値の精度も向上する。よって、配置1は配置2に比べ、MLDIには不適であり、そのため、“*PP*”においてMLDIがBilinearのPSNRを下回ったと考えられる。

ただし、配置1によってMLDIが既存手法のPSNRを下回ったのは、“*PP*”についてのみである。これは“*PP*”に斑点状のテクスチャが多く存在し、それによりMLDIにおいて勾配値が適切に算出されず、バンド内の勾配が十分に考慮されていない補間値が算出されたためであると考えられる。また、配置2では、“*PP*”のPSNRが最も高く、MLDIと既存手法とのPSNRの差も最も大きいことから、“*PP*”における斑点状のテクスチャは、中心波長の近いバンド間において高い相関性があると考えられる。

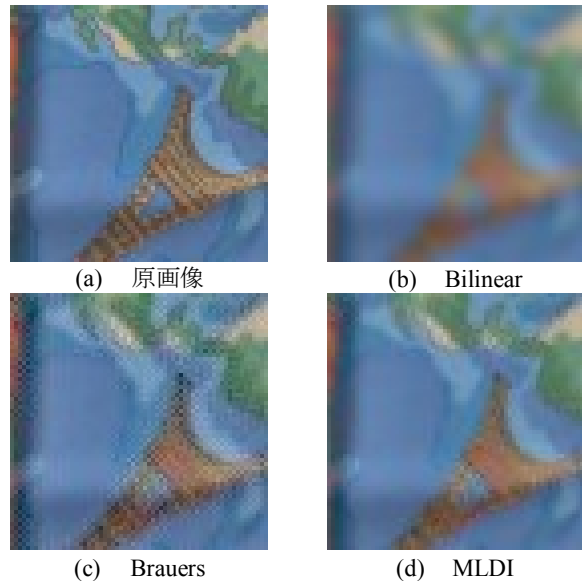
以上より、病理画像である“*PP*”は他の画像とは異なる画像構造をしており、バンド間及びバンド内の相関性を十分に考慮した補間処理が必要であると考えられる。

## 5. おわりに

本稿では、バンド間及びバンド内の相関性を考慮したRGBモザイク画像のデモザイクング手法であるLDIを基に、MSIのデモザイクング手法であるMLDIを提案した。

シミュレーションの結果より、提案手法は既存手法に比べ、概ね高いPSNRを示しており、その優位性を確認することができた。また、空間方向の勾配を考慮することで、既存手法に比べエッジ部を鮮明に復元することができた。しかし、本手法では想定するMSFAのフィルタの配置パターンが限定されており、バンドの重複も許していないため、Monnoらの手法[10]と同様の条件によるシミュレーション及び比較評価は困難であり、本稿では行わなかった。

今後の課題として、様々なMSFA及び画像への対応、及び文字等の細かな部分をより鮮明に復元することが挙げられる。そのためには、各バンドの中心波長を考慮した

図12 原画像及び各手法による“*Scarfy*”の復元画像の拡大図

MLDIの改良、及び画像の構造や種類による補間処理の切り替えの検討が必要であると考えられる。

## 謝辞

本研究はJSPS科研費15K20899の助成を受けたものである。また、本稿で使用した画像を提供して下さった、東京工業大学の方々に感謝する。

## 参考文献

- [1] 田代 充良, 村上 百合, 山口 雅浩, 小尾 高史, 大山 永昭, 阿部 時也, 八木 由香子, “マルチスペクトル病理画像に基づく染色濃度調整処理の実装方法に関する検討,” MEDICAL IMAGING TECHNOLOGY, Vol.26, No.4, pp.240-246 (2008).
- [2] Y. Monno, M. Tanaka, M. Okutomi, “Multispectral Demosaicking Using Adaptive Kernel Upsampling,” Proc. of IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), pp.3218 - 3221 (2011).
- [3] J. Kopf, M.F. Cohen, D. Lischinski, and M. Uyttendaele, “Joint Bilateral Upsampling,” ACM Trans. on Graphics, Vol.26 No.3, pp.96-1 - 96-5 (2007).
- [4] J. Brauers, T. Aach, “A Color Filter Array Based Multispectral Camera,” Proc. of Workshop Farbbildverarbeitung (2006).
- [5] X. Liang, W. Qiao, J. Yang, B. Xue, J. Qin, “Color Interpolation Algorithm of CCD Based on Green Components and Signal Correlation,” SPIE, Vol.8907, pp.890738-1 - 890738-8 (2013).
- [6] I. Pekkucuksen, Y. Altunbasak, “Edge Strength Filter Based Color Filter Array Interpolation,” IEEE Trans. on Image Process, Vol.21, No.1, pp. 393 - 397 (2012).
- [7] X. Chen, L. He, G. Jeon, J. Jeong, “Color Filter Array Interpolation by Successive Refinement over Color Channels Using Gradient Inverse-Weighted Filtering,” Optics Communications, Vol.318, pp 189-198 (2014).
- [8] X. Zhou, F. Yang, C. Zhang, C. Wang, “Improved Adaptive Demosaicking Using Directional,” The 9th International Conference on Computer Science & Education (ICCSE), Vol.1, pp.615-618 (2014).
- [9] 禧久 大輔, 紋野 雄介, 田中 正行, 奥富 正敏, “残差補間に基づく高精度カラーデモザイクング,” 第20回画像センシングシンポジウム, pp. IS1-40-1-7 (2014).
- [10] Y. Monno, M. Tanaka, M. Okutomi, “Multispectral Demosaicking Using Guided Filter,” Proc. of SPIE, Vol.8299, pp.829900-1-7 (2012).
- [11] K. He, J. Sun, X. Tang, “Guided Image Filtering,” Proc. of the 11th European Conf. on Computer Vision (ECCV), Vol.6311, pp.1-14 (2010).
- [12] L. Zhang, X. Wu, A. Buades, X. Li, “Color Demosaicking by Local Directional Interpolation and Nonlocal Adaptive Thresholding,” Journal of Electronic Imaging, Vol.20, No.2, pp.023016-1 - 023016-16 (2011).