

観測波長と配置を考慮したマルチスペクトルフィルタアレイの設計手法 Multispectral Filter Array Considering Transparent Wavelength and Arrangement

柳 悠大[†] 篠田 一馬[†] 長谷川 まどか[†] 加藤茂夫[†] 石川 雅浩[‡] 駒形 英樹[‡] 小林 直樹[‡]
Yudai Yanagi[†] Kazuma Shinoda[†] Madoka Hasegawa[†] Shigeo Kato[†]
Masahiro Ishikawa[‡] Hideki Komagata[‡] Naoki Kobayashi[‡]

1. はじめに

RGB 画像よりも多くのスペクトル情報を持つマルチスペクトル画像(MSI)は、照明によらない忠実な色再現や、人間の目視では認識できない分光レベルでの物体認識を可能とする。そのため、MSI はリモートセンシングでの利用や病理診断、青果物の糖度測定など、様々な分野での応用が期待されている。

MSI の撮影手法として、これまでに様々な撮影システムが提案されている[1]~[6]。これらの撮影システムは multi-camera-one-shot systems, single-camera-multi-shot systems, single-camera-one-shot systems の 3 つに大別される。multi-camera-one-shot systems は、複数のカメラと複数のフィルタを用い、各カメラがそれぞれ異なるバンドを観測することで、同時に複数のスペクトルを観測する方式である。この手法では短時間での撮影が可能であるが、撮影バンド数分のカメラとフィルタを必要とするため、機材のコストや消費電力が大きいといった問題がある。single-camera-multi-shot systems では 1 台のカメラを用いて、観測するバンドを変更しつつ、複数回の撮影を行うことで複数のスペクトルを観測する手法である。この手法では、撮影するバンド数だけ撮影を行う必要があるため、短時間での撮影が難しいという問題がある。single-camera-one-shot systems は、1 台のカメラを用いた 1 回の撮影で、画素ごとに異なるバンドを観測することにより、同時に複数のスペクトルを観測する手法である。この手法は、撮影機器のコストが小さく、瞬間的な撮影が可能であるが、高解像度での撮影が困難であるという問題がある。

本稿では、安価で簡便な MSI 撮影が行える、single-camera-one-shot systems に着目した。この撮影システムの一つに、マルチスペクトルフィルタアレイ(MSFA)を用いた撮影システムが提案されている。MSFA とはデジタルカメラなどに用いられているカラーフィルタアレイをマルチスペクトル用に拡張したもので、各画素位置につき 1 つのフィルタを配置したものである。MSFA を用いた撮影システムでは、一台のカメラによるワンショット撮影で MSI を取得することが可能である。図 1 に MSI 撮像処理を示す。この撮影システムで取得できる画像は、各画素につき 1 バンドずつの画素値のみを観測したモザイク画像である。そのため、MSI を取得するには、モザイク画像に補間処理を施すことで、観測していないバンド信号を得る必要がある。この補間処理の精度は、用いる補間処理手法に加えて、撮影に使用する MSFA によっても異なる。そのため、MSFA の設計手法についての研究[5]~[8]が行われている。

MSFA の例[7]を図 2 に示す。(a)には、5 種類のフィルタ

$f_1 \sim f_5$ の配置を、(b)には各フィルタの分光感度を示す。図に示したように MSFA の設計ではフィルタ配置と分光感度を考慮する必要がある。図中に示すように、MSFA は一般に、あるフィルタ配置パターンをブロックを繰り返し並べることで構成されている。本稿では、1 つのブロック内のフィルタ配置のことを単に、フィルタ配置と呼ぶ。MSFA の分光感度とフィルタ配置は MSI の復元精度に影響するため、分光感度の最適化により MSI の復元精度を向上させる紋野らの手法[7]や、フィルタ配置の最適化により MSI の復元精度を向上させる篠田らの手法[8]が提案されている。紋野らの手法は、図 2 に示すような、5 バンドを観測する MSFA の分光感度を最適化することで、取得する MSI の復元精度を向上させる手法である。この手法では、複数の教師データを基に MSI の復元精度がもっとも高くなる分光感度の中心波長と波長範囲を総当たりで求める。篠田らの手法は、観測波長が事前に決まっていることを前提とし、観測波長の中心波長に応じて、フィルタ配置を最適化することで MSI の復元精度を向上させる手法である。バンド間相関を利用した補間処理を施す場合、近くにある画素同士が観測した波長は、なるべく波長間の距離が離れている方が補間処理精度が高くなるという考えに基づきフィルタ配置を決定する。そこで、空間的に近い位置にあるフィルタ同士の中心波長の差が大きくなるようにフィルタ配置を行うことで MSFA の設計を行う。しかし、これらの手法には問題点がある。まず、紋野らの手法の問題点は、MSFA のフィルタ配置が固定であるということが挙げられる。撮影対象によっては 5 バンド以上のバンドを観測したほうが MSI の復元精度が高くなる場合や、分光感度の変化に伴いフィルタの配置を変更したほうが MSI の復元精度が高くなる場合などが考えられる。篠田らの手法の問題点は、観測波長の中心波長を既知の情報として与えなければならないという点が挙げられる。植生解析や糖度測定など、観測し

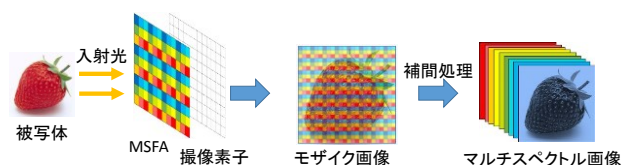
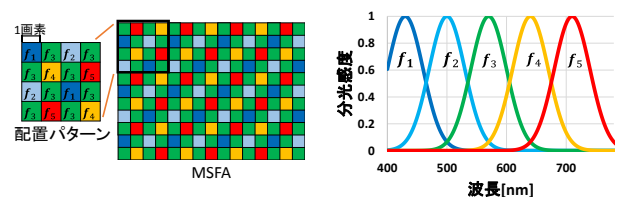


図 1 MSFA を用いた MSI 撮像処理



(a)MSFA のフィルタ配置 (b)各フィルタの分光感度

図 2 MSFA の例

[†] 宇都宮大学大学院工学研究科
Graduate School of Engineering, Utsunomiya University
[‡] 埼玉医科大学 保健医療学部
Faculty of Health and Medical Care, Saitama Medical University

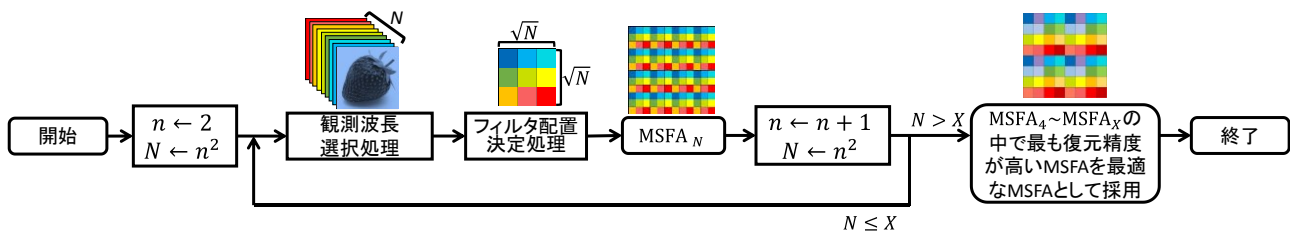


図 3 提案手法の流れ

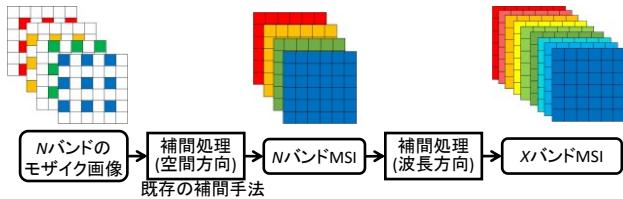


図 4 Xバンド MSI を復元する補間処理の流れ

たい波長があらかじめ決定している場合では、観測波長を事前に与えることができる。しかし、観測したい波長が多い場合や、広範囲にわたる波長帯をすべて観測したい場合などでは、観測したい波長をすべて観測する MSFA を作成すると、1 つの観測波長についての観測点が空間的に疎となってしまう、補間処理による復元が困難となる。そのため、観測する波長を選定する必要がある、このとき選択するバンド数や波長は MSI の復元精度が高くなるように選定することが重要となる。しかし、その手法は確立していないため、篠田らの手法では、観測波長を適切に設定することができない。

また、撮影対象が異なれば、それに応じて復元精度が高くなる MSFA は異なることが考えられるが、先に述べたように、紋野らの手法では、どのような撮影対象を想定した場合でも、観測波長数やフィルタ配置は不変である。また、篠田らの手法では、事前に与える観測波長が同じであれば、撮影対象に依存せずに MSFA が設計される。しかし、病理診断のように、撮影対象が特定のものに限られる場合、その対象を撮影したときの MSI の復元精度が向上する観測波長とフィルタ配置を決定し MSFA を設計することで、特定の対象を撮影するという条件下では、従来の手法よりも MSI の復元精度を向上させることができると考えられる。例えば、病理標本を single-camera-multi-shot systems で撮影した画像を原画像として用いれば、MSFA によるモザイク化とモザイク画像からの復元処理を計算機上で行うことで、病理標本のある MSFA で撮影したときの MSI 復元精度が確認できる。このことを利用し、復元画像の復元精度が高くなる MSFA を設計すれば、病理画像の撮影に特化した MSFA を設計することができる。全画素位置で全バンドの情報を持った原画像を必要とするため、設計の際に時間や機器コストがかかるが、一度 MSFA を設計すれば、病理診断用の MSFA として広く普及できる可能性がある。

そこで、本研究では、MSFA の観測バンド数と観測波長、そしてフィルタ配置を撮影対象に応じて最適化する手法を提案する。本手法では想定する対象を全画素位置で全バンド撮影した MSI (正解画像) を利用し MSFA の設計を行う。正解画像から MSFA に応じたモザイク画像を作成し、補間

処理を施すことで得た MSI と正解画像との平均二乗誤差 (MSE) が小さくなる MSFA を求める。実験により、提案手法により求めた MSFA を利用することで MSI の復元精度の向上が確認できたので報告する。

2. 正解画像を用いた MSFA 最適化手法

提案手法では、 X バンドの MSI を正解画像として利用して、特定の対象を撮影した時の MSI 復元精度が高くなる MSFA の設計を行う。提案手法の流れを図 3 に示す。観測バンド数 N に応じて、観測波長決定処理とフィルタ配置決定処理を行い、MSFA を作成する。この処理を、すべての観測バンド数 N に対して行い、 $MSFA_4 \sim MSFA_X$ を作成する。 $MSFA_4 \sim MSFA_X$ に応じて得られる復元画像と正解画像との MSE をそれぞれ算出し、MSE が最も小さくなる MSFA を最適な MSFA として採用する。ただし、観測バンド数 N は X 以下かつ整数の 2 乗値とする。これは本手法で作成する MSFA が、図中に示すように、サイズ $\sqrt{N} \times \sqrt{N}$ のブロック配置の繰り返しで構成されているものとするためである。

本手法では、 N バンドのモザイク画像から X バンド MSI を復元する必要がある。しかし、既存の補間処理手法 [1],[9] など、一般的な補間処理手法は、空間方向の補間のみを行うことで N バンドのモザイク画像から N バンド MSI を復元する手法であり、MSFA で観測されていないバンドは復元されない。そこで、本手法では図 4 に示すように、既存の補間処理に加え、波長方向の補間処理を施すことで X バンドの MSI を復元する。

観測波長決定処理とフィルタ配置決定処理については 2.1 節、2.2 節で説明する。

2.1 観測波長決定処理

観測バンド数 N が、取得する MSI のバンド数 X よりも小さいとき、モザイク画像から復元した N バンド MSI から、波長方向の補間処理により X バンド MSI を復元する必要がある。このとき、観測する N 個のバンドをどのように定めるかによって補間処理の精度は異なる。そこで、正解画像から N 個のバンドを取り出すことにより得られる N バンド MSI の中から、 X バンド MSI に復元したときの正解画像との MSE が最も小さくなる N バンド MSI を求める。ただし、この N バンド MSI は正解画像をモザイク化せずに作成した画像であるため、 X バンド MSI を復元する際には図 4 の波長方向の補間処理のみを行うものとする。

正解画像から取り出す N 個のバンドの組み合わせは XCN 通りあるため、バンド数によっては、全通りの探索は困難である。そのため、観測波長決定処理では、図 5 に示すように正解画像から 1 バンドずつ間引いていくことで N バンド MSI を作成する。 $I^{(n)}$ は n バンド MSI、 $I_i^{(n)}$ は $I^{(n)}$ から

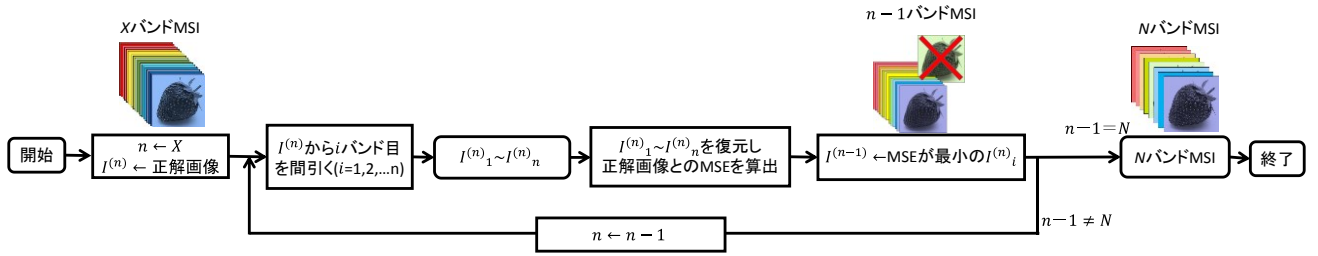


図5 観測波長決定処理の流れ

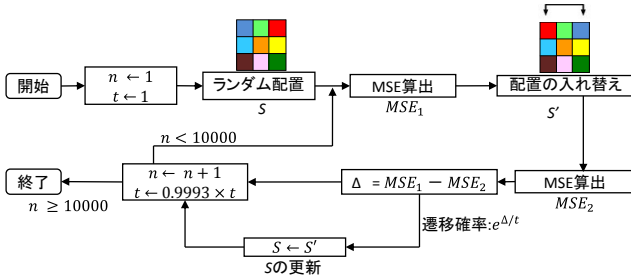


図6 SAによるフィルタ配置決定処理の流れ

i バンド目を除いた $n-1$ バンド MSI ($i=1, 2, \dots, n$), $f(I^{(n)})$ は $I^{(n)}$ を波長方向の補間により X バンドに復元して算出した MSE を表す。まず, $n=X$ とし, $I^{(n)}$ は正解画像とする。次に, 式(1) に示すように, $f(I_i^{(n)})$ が最小となる $I^{(n-1)}$ を求める。

$$I^{(n-1)} = \arg \min_{I_i^{(n)}} f(I_i^{(n)}) \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

最後に, $n \leftarrow n-1$ としてループする。以上の処理を $n=N$ となるまで繰り返すことで, N バンド MSI を求める。

2.2 フィルタ配置決定アルゴリズム

前節で求めた N 個のバンドを観測する MSFA に対し, フィルタ配置最適化を行う。復元画像と正解画像との MSE は, MSFA のフィルタ配置に応じて変化するため, Simulated Annealing(SA)[10]により MSE を最小化する配置を求める。SA によるフィルタ配置最適化アルゴリズムを図6に示す。 N 個のフィルタをランダムに配置した MSFA を S , S のランダムな 2 箇所のフィルタを入れ替えた MSFA を S' とし, 正解画像からそれぞれの MSFA に応じて得られるモザイク画像を作成する。これらのモザイク画像に空間方向と波長方向の補間処理を施すことで復元した X バンド MSI と正解画像との MSE をそれぞれ算出し, その比較結果に基づいて決まる確率 p で, S から S' へ状態遷移する。 S と S' から算出される MSE を MSE_1 , MSE_2 とすると, 確率 p は以下の式で表せる。

$$p(\Delta, t) = \begin{cases} 1 & (\Delta \geq 0) \\ e^{-\Delta/t} & (\Delta < 0) \end{cases} \quad (2)$$

$$\Delta = MSE_1 - MSE_2 \quad (3)$$

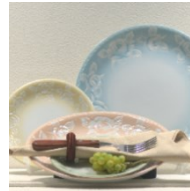
ここで t は SA のパラメータの温度を表し, この手法では, 反復回数 n に応じて以下の式で決定する。

$$t = 1 \times 0.9993^n \quad (4)$$

反復回数 n が 10,000 回になった時点までに作成された MSFA の中で, MSE が最小となる MSFA を最適化された MSFA として採用する。



(a) Toys



(b) Dishes



(c) Scarf

図7 使用画像

3. 実験と考察

3.1 実験条件

実験では, single-camera-multi-shot system で撮影した 3 枚の 16 バンド MSI を正解画像とし, 各画像について提案手法により MSFA を作成する。提案手法により作成した MSFA を用いてモザイク画像を作成し, このモザイク画像から補間処理により復元した MSI と正解画像との PSNR を評価尺度に提案手法の有効性を確認する。正解画像には, "Toys", "Dishes", "Scarf" の 3 枚の 16 バンド画像 MSI を使用する。3 枚の画像を sRGB 表示したものを図7に示す。これらの MSI は分光感度の中心波長が, 424, 448, 469, 482, 500, 517, 535, 554, 566, 584, 602, 622, 644, 666, 687, 720[nm]であるフィルタを用いて撮影された画像[11]である。本実験では, 空間方向の補間処理に Brauers らの手法[9]を, 波長方向の補間処理に Wiener 推定[12]を用いた。Wiener 推定で使用する自己相関行列には Markov 相関行列を利用した。ただし, 波長方向(1[nm]間隔)の相関係数 ρ は, 0.9995 とした[13]。

3.2 実験結果

図7に示した画像を正解画像として, 提案手法により MSFA を作成した。観測波長を図8に, 作成した MSFA を図9に示す。図中の番号はバンド番号である。また, 篠田らの手法により作成した, 16 バンド画像を撮影する場合の MSFA を図10に示す。篠田らの手法では, フィルタの中心波長と配置のみで最適な MSFA を決定するため, 分光感度

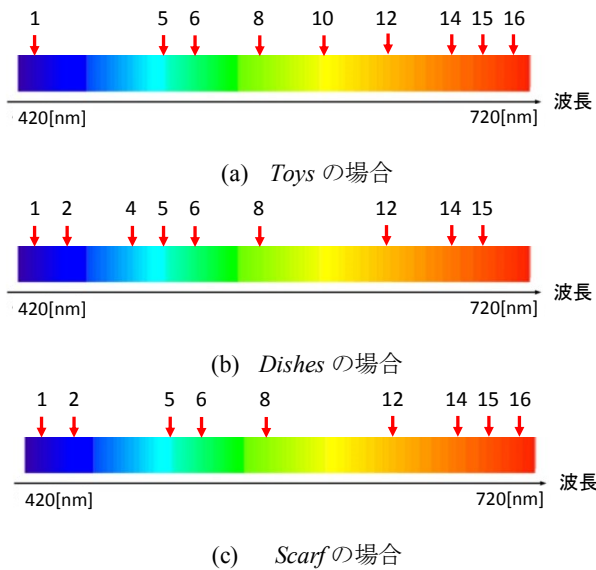


図8 提案手法により選択された観測波長



(a) Toys



(b) Dishes



(c) Scarf

図9 提案手法による MSFA



図10 篠田らの手法による MSFA(観測バンド数 16)

が同じであれば画像に依存せず同じ MSFA となる。各手法で作成した MSFA を比べると、提案手法で作成した MSFA の観測バンド数は 9 バンド、篠田らの手法で作成した MSFA の観測バンド数 16 バンドである。これは、提案手法では、正解画像に応じて、復元精度が高くなる観測バンド数を求めているためである。Toys を正解画像として、提案手法により MSFA を作成する過程で求めた、観測バンド数が 4, 9, 16 の場合の各 MSFA により得られる復元画像と正解画像との PSNR を表 1 に示す。復元画像の PSNR は、観測バンド数が 9 バンドのときに最も高くなった。また、図 8 および図 9 に示すとおり、他の正解画像でも同様に 9 バンドが最も PSNR が高い結果となった。しかし、バンド

表1 Toys における観測バンド数毎の復元画像の PSNR[dB]

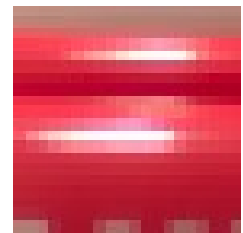
バンド数	提案手法
16	31.637
9	32.459
4	28.312

表2 各手法で得られる復元画像の PSNR[dB]

	提案手法	篠田らの手法
Toys	32.459	31.603
Dishes	30.814	29.830
Scarf	30.062	29.265



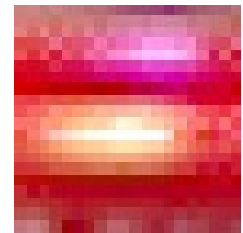
(a)拡大した部分



(b)正解画像



(c)提案手法での復元画像



(d)篠田らの手法での復元画像

図11 各手法による復元画像の拡大図(Toys)

数が同じであっても、正解画像が異なれば、構築される MSFA の観測するバンドや配置が異なることが確認できる。

それぞれの手法により構築した MSFA の評価を行うため、各 MSFA に応じて得られる復元画像と正解画像との PSNR を算出した。結果を表 2 に示す。表より、すべての画像において、提案手法の PSNR の向上が確認できた。また、”Toys”の正解画像と復元画像の拡大図を sRGB 表示した画像を図 11 に示す。図 11(a)の青い四角で示した部分を拡大した。図 11(b)~(d)はそれぞれ原画像、提案手法での復元画像、篠田らの手法での復元画像の拡大画像である。拡大画像を見ると、原画像で、光が反射している部分の赤色が、篠田らの手法での復元画像はオレンジ色になっている。一方、提案手法での復元画像は少し薄ピンク色になっているものの原画像に近い色になっていることが確認できる。以上の結果から提案手法の有用性が確認できた。

3.3 考察

実験では、すべての画像で提案手法の PSNR が向上した。この原因として、既存手法により求めた MSFA の観測バンド数が 16 バンドであるのに対して、提案手法は 9 バンドである点が挙げられる。16 バンドを観測する MSFA を用いた

1	12	10
7	5	16
14	9	3

図12 篠田らの手法によるMSFA(観測バンド数9)

表3 観測バンド数を9バンドとした時の
復元画像のPSNR[dB]

	提案手法	篠田らの手法	観測波長のみ最適化
Toys	32.459	31.589	32.385
Dishes	30.814	29.961	30.587
Scarf	30.062	29.554	29.938

撮影では、取得したモザイク画像に対して、空間方向の補間処理のみを施すことで、16バンドMSIを取得できるが、9バンドを観測するMSFAを用いた場合では、取得したモザイク画像に対して空間方向の補間処理を施すことで一度9バンドMSIを作成し、この9バンドMSIに更に波長方向の補間処理を施すことで16バンドMSIを取得する。MSFAの観測バンド数を減らすほど、波長方向の観測点が疎となるため、波長方向の補間処理精度は低下するが、1バンドあたりの空間方向の観測点が密となるため、空間方向の補間処理精度は向上する。提案手法では、観測バンド数を変更した際の、空間方向と波長方向の補間処理精度のトレードオフを考慮して観測バンド数を決定しているため、既存手法よりも高い復元精度となったと考えられる。

今回、提案手法によって求めたMSFAの観測バンド数は全て9バンドとなったことから、本実験で使用した正解画像に対しては、16バンドを観測するMSFAよりも、9バンドを観測するMSFAを用いた方が、高い復元精度が得られると考えることができる。一方で篠田らの手法でも、16バンドの中から適当な9バンドを選択しMSFAを作成することで、観測バンド数が9バンドのMSFAを構築することができる。そこで、16バンドからなるべく均等な波長間隔になるように9バンドを選択し、その9バンドを観測するMSFAを篠田らの手法により構築した。構築したMSFAを図12に示す。また、MSFAに応じて得られる復元画像と正解画像とのPSNRによる提案手法との比較結果を表3に示す。この場合でも提案手法のPSNRが向上していることが確認できた。これは、篠田らの手法がフィルタ配置のみを考慮した手法であるのに対し、提案手法では配置に加えて観測波長を考慮しMSFAを構築しているためであると考えられる。そこで、観測波長を考慮したことによる復元精度の向上を確認するため、波長選択のみ提案手法で行いフィルタ配置を篠田らの手法で求め構築したMSFAから得られる復元画像のPSNRを算出した。結果を表3に加えて示す。結果から、観測波長の最適化が提案手法におけるPSNRの向上に大きく貢献していることが確認できた。

4. 病理画像取得のためのMSFA構築

3章では、3枚の16バンドMSIを正解画像とし、提案手法によりMSFAの設計を行った結果、その有効性が確認できた。そこで本章では、提案手法の応用先として期待される、病理画像の撮影を想定したMSFAを作成し、実験によ

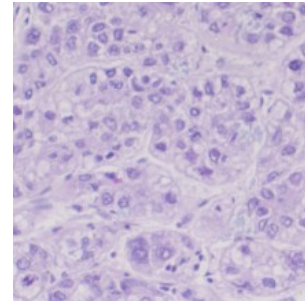


図13 16バンド病理画像“Pathological Image”

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

(a)観測バンド数16

1	9	16
7	12	2
14	4	11

(b)観測バンド数9

4	7
12	16

(c)観測バンド数4

図14 観測バンド数毎のMSFA

り提案手法の有用性を確認する。3章と同様に、作成したMSFAに応じて得られる復元画像と正解画像とのPSNRにより評価を行う。

4.1 実験条件

正解画像には、肝臓の組織切片を撮影した、16バンドの病理画像である“Pathological Image(PI)”を使用した。sRGB表示した画像を図13に示す。この画像はHematoxyline & Eosinで染色された肝臓組織(US Biomax, Hepatocellular Carcinoma Tissue Array, C054)を光学倍率10倍で撮影したもので、撮影にはオリンパス社製の光学顕微鏡BX53、CRi社製の液晶チューナブルフィルタVariSpec VIS、Point Grey社製のモノクロCCD Grasshopper 3を使用した。また、この画像は420~690[nm]の波長範囲を18[nm]間隔で16バンド観測したMSIである。補間処理は3節と同様の手法で行った。

4.2 実験結果

図13に示した画像を正解画像として提案手法によってMSFAを構築した。MSFAを構築する過程で求めた、観測バンド数が16, 9, 4のMSFAを図14に示す。また、観測バンド数が9, 4の時の観測波長を図15に示す。これらのMSFAに応じて得られる復元画像と篠田らの手法により作成したMSFAに応じて得られる復元画像のPSNRを表4に示す。結果より、すべての観測バンド数で提案手法のPSNRが高くなった。また、観測バンド数が9バンドの場合のMSFAが最もPSNRが高いことから、提案手法により求まる病理画像を撮影するためのMSFAは図14の(b)に示したMSFAとなる。

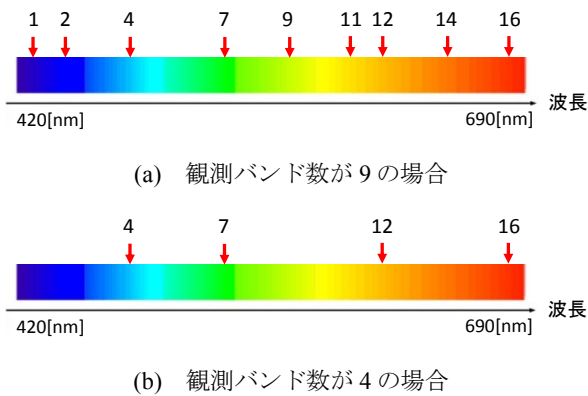


図15 選択された観測波長

表4 各手法での観測バンド数毎の復元画像のPSNR[dB]

バンド数	提案手法	篠田らの手法
16	32.409	32.356
9	33.648	33.246
4	31.498	29.498

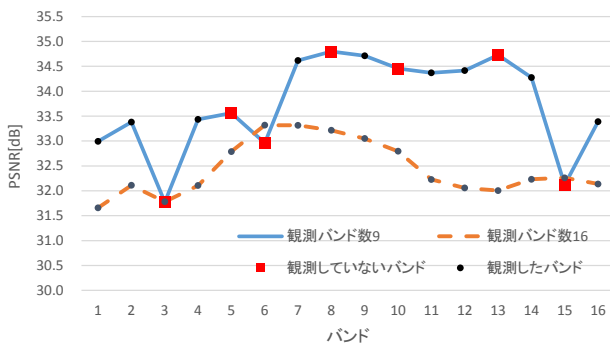


図16 各バンドのPSNR

4.3 考察

実験より、観測バンド数が9の場合の復元画像が最もPSNRが高いという結果になったが、各バンドの復元精度を見たとき、波長方向の補間処理により求めた、観測していないバンドについては、観測バンド数が16の場合の復元画像の方が高い可能性がある。そこで、観測バンド数が9の場合と16の場合のMSFAから得る復元画像について、それぞれ正解画像とのPSNRを各バンドで算出した。結果を図16に示す。観測バンド数が9の時、観測していないバンドは3, 5, 6, 8, 10, 13, 15バンドであるが、5, 8, 10, 13バンド目については、観測バンド数が9の場合の復元精度が高くなっている。また、3, 6, 15バンド目についても、復元精度が低くなっているが、観測バンド数16の場合と比べ大きくとも約0.5[dB]の差であることが確認できた。このことから、観測していないバンドについても多くの場合で復元精度が向上することが確認できた。以上の結果より、病理画像においても、提案手法により、観測するバンドやバンド数を決定することにより、復元精度を向上させることができると考えられる。

5. おわりに

本稿では、正解画像を用いてMSFAの観測バンド数、観測バンド、フィルタ配置の最適化を行う手法を提案した。実験より、提案手法によって構築したMSFAに応じて得られる復元画像のPSNRが既存手法よりも向上したことから、提案手法の有用性が確認できた。今後の課題としては、本稿とは異なる補間手法を用いた場合の実験・評価や、複数の正解画像からMSFAを構築する手法の検討、観測バンドごとに、MSFAに用いるフィルタの枚数を変更することなどが挙げられる。

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くださった、東京工業大学の方々に感謝する。

参考文献

- [1] Y. Monno, M. Tanaka, M. Okutomi, "Multispectral Demosaicking Using Adaptive Kernel Upsampling," Proc. of IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), pp.3218-3221, Sept. 2011.
- [2] X. Lin, G. Wetzstein, Y. Liu, and Q. Dai, "Dual-Coded Compressive Hyper-Spectral Imaging," IHH-MSP., pp.607-610, Oct. 2010.
- [3] A. Wagadarikar, N. P. Pitsianis, X. Sun, D. J. Brady, "Video Rate Spectral Imaging Using a Coded Aperture Snapshot Spectral Imager," Opt. Express, vol.17, pp.6368-6388, 2009.
- [4] 紋野雄介, 田中正行, 奥富正敏, "適応的空間-スペクトル基底を利用したRAWデータからの直接分光反射率推定," 電子情報通信学会論文誌 D, Vol. J96-D, No.8, pp.1811-1822, Aug. 2013.
- [5] L. Miao and H. Qi, "The Design and Evaluation of a Generic Method for Generating Mosaicked Multispectral Filter Arrays," IEEE Trans. Image Process., vol.15, no.9, pp.2780-2791, 2006.
- [6] L. Miao, H. Qi, R. Ramanath, and W. E. Snyder, "Binary Tree-based Generic Demosaicking Algorithm for Multispectral Filter Arrays," IEEE Trans. Image Process., vol.15, no.11, pp.3550-3558, 2006.
- [7] Y. Monno, T. Kitao, M. Tanaka and M. Okutomi, "Optimal Spectral Sensitivity Functions for a Single-Camera One-Shot Multispectral Imaging System," Proc. of IEEE ICIP, pp.2137-2140, Sept. 2012.
- [8] K. Shinoda, T. Hamasaki, M. Hasegawa and S. Kato, "Quality Metric for Filter Arrangement in a Multispectral Filter Array," Picture Coding Symposium, pp.149-152, Dec. 2013.
- [9] J. Brauers, and T. Aach, "A Color Filter Array based Multispectral Camera," Proc. of Workshop Farbbildverarbeitung, Oct. 2006.
- [10] S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt and M. P. Vecchi, "Optimization by Simulated Annealing," Science, Vol.220, No.4598, pp.671-680, May 1983.
- [11] H. Fukuda, T. Uchiyama, H. Haneishi, M. Yamaguchi, and N. Ohyama, "Development of 16-bands multispectral image archiving system," Proc. of SPIE, vol. 5667, pp. 136-145, 2005.
- [12] 村上百合, "分光反射率の推定理論," 日本写真学会誌, Vol.65, No.4, pp.234-239, Aug. 2002.
- [13] 村上百合, 家富邦彦, 山口雅浩, 大山永昭, "多点計測スペクトル情報を利用した色再現手法の比較評価," カラーフォーラム JAPAN2007 論文集, pp. 133-136, Nov. 2007.