

単板式マルチバンドカメラのための センサ感度最適化

北尾 俊博¹ 紋野 雄介¹ 田中 正行¹ 奥富 正敏¹

概要：近年、安価で簡便なマルチバンド画像撮影を実現する、単板式マルチバンドカメラが提案された。マルチバンドカメラでは、各バンドのセンサ感度の最適化が重要である。また、単板式マルチバンドカメラではマルチバンド画像を得るために、マルチバンドデモザイキング処理が必要である。しかしながら、これまでマルチバンドデモザイキング処理を考慮した、センサ感度の最適化の研究はほとんど行われていない。そこで、本論文では、単板式マルチバンドカメラのためのセンサ感度最適化手法を提案する。そして、提案手法により最適化されたセンサ感度の有効性をシミュレーション実験により確認する。

キーワード：単板式マルチバンドカメラ，センサ感度最適化，マルチバンドデモザイキング処理

1. はじめに

コンピュータビジョンの様々な応用で、マルチバンド画像の利用が注目されている。マルチバンド画像とは、4バンド以上の分光情報を観測した画像である。マルチバンド画像は、光の分光スペクトルについて従来の3バンド(RGB)画像より多くの情報を持つため、忠実な色再現や、高精度な分光反射率推定および物体認識などを可能にする。

これまでに様々なマルチバンドカメラが提案されている [1], [2], [3], [4], [5]。しかしながら、これらのマルチバンドカメラは複数台のカメラ、もしくは複数回の撮影を必要とし、高価、かつその使用が煩雑である。近年、安価で簡便なマルチバンド画像撮影を可能にする、単板式マルチバンドカメラが提案された [6], [7], [8], [9]。単板式マルチバンドカメラは図 1 に示すように、マルチスペクトルフィルタアレイ (MSFA: Multi-Spectrum Filter Array) と単板撮像素子を組み合わせることで実現される。単板式マルチバンドカメラでは、各画素につき 1 つのバンドの画素値情報しか得られない。そのため、マルチバンド画像を得るためには、マルチバンドデモザイキング処理が必要である [8], [9]。単板式マルチバンドカメラは現在広く普及している単板式 RGB カメラと同様に安価で簡便なマルチバンド画像撮影を可能にする。

マルチバンド画像により観測される分光情報は、マルチバンドカメラのセンサ感度により特徴付けられる。したがって、より有効な分光情報を得るためには、マルチバン

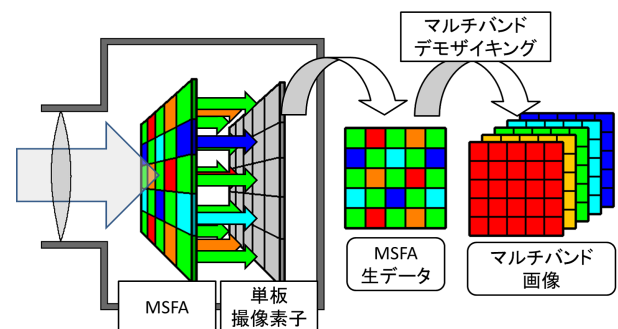


図 1 単板式マルチバンドカメラの概略図。

ドカメラのセンサ感度最適化が非常に重要である。これまでも、マルチバンドカメラのセンサ感度最適化手法はいくつか提案されている [10], [11], [12], [13], [14]。しかしながら、これらの最適化手法は、全ての画素で、全てのバンドの画素値情報が得られることを仮定しており、単板式マルチバンドカメラのセンサ感度最適化の研究はほとんど行われていない。単板式マルチバンドカメラから得られるマルチバンド画像の画質はマルチバンドデモザイキング処理の精度に大きく依存する。また、マルチバンドデモザイキング処理の精度は一般にセンサ感度の影響を受ける [15]。したがって、単板式マルチバンドカメラでは高精度なマルチバンドデモザイキング手法を考慮してセンサ感度最適化を行わなければならない。Parmar らは解析が容易な Wiener 推定によるデモザイキング手法を用いた単板式 RGB カメラのセンサ感度最適化手法を提案している [16]。しかしながら、Wiener 推定によるデモザイキング手法の精度は state-of-the-art のマルチバンドデモザイキング手法に比べ

¹ 東京工業大学
Tokyo Institute of Technology

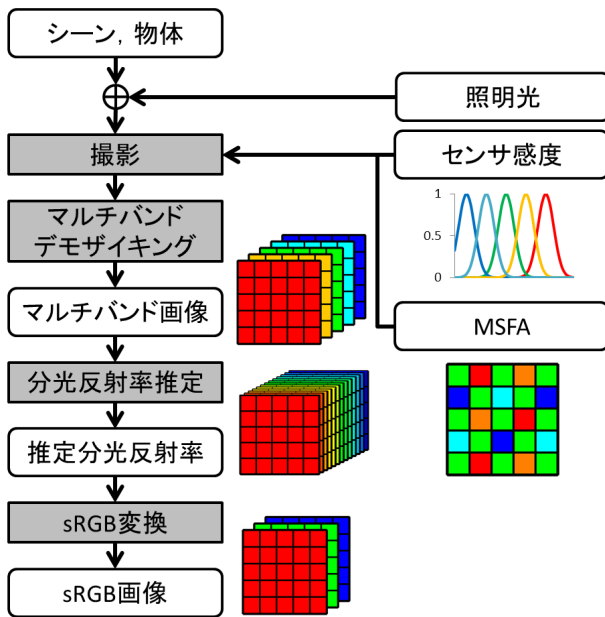


図 2 単板式マルチバンドカメラによる分光反射率推定及び sRGB 画像取得の流れ。

劣っている。

本論文では、高精度なマルチバンドデモザイキング手法を用いた単板式マルチバンドカメラのセンサ感度最適化手法を提案する。まず、高精度なマルチバンドデモザイキング手法を用いた単板式マルチバンドカメラをシミュレーションする。ついで、センサ感度をガウス分布を用いてパラメータ化する。真の分光反射率と、シミュレーションにより得られる推定分光反射率の誤差が最小となるパラメータを求め、分光反射率推定に最適なセンサ感度を得る。さらに、真の sRGB 画像と、シミュレーションにより得られる sRGB 画像との誤差が最小となるパラメータを求め、sRGB 画像取得に最適なセンサ感度を得る。そして、実験により、提案手法により得られたそれぞれの最適センサ感度の有効性を確認する。

2. 単板式マルチバンドカメラによる分光反射率推定

単板式マルチバンドカメラによる分光反射率推定および sRGB 画像取得の流れを図 2 に示す。物体表面で反射した照明光は MSFA を通して単板撮像素子に入射する。単板式マルチバンドカメラでは、各画素につき 1 つのバンドの画素値情報しか得られない。そのため、マルチバンド画像を得るためにはマルチバンドデモザイキング処理が必要である。得られたマルチバンド画像から分光反射率推定を行うことで、推定分光反射率を得る。また、sRGB 画像は、推定分光反射率を sRGB 変換することで得られる。

撮像素子の入出力特性が線形であり、観測ノイズを含まないと仮定すると、単板式マルチバンドカメラによる分光反射率推定の精度および sRGB 画像の画質は、照明光、

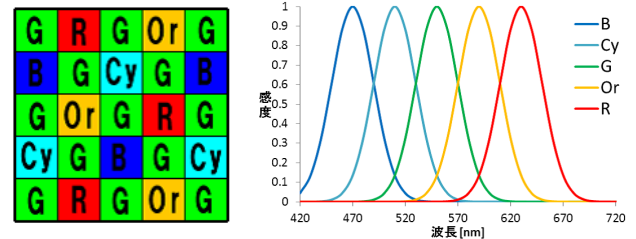


図 3 5 バンド MSFA と最適化するセンサ感度の概略図。

MSFA, センサ感度, マルチバンドデモザイキング手法, 分光反射率推定手法, の 5 つの要素の影響を受ける。本論文では、センサ感度以外の 4 つの要素は固定して考える。MSFA には、図 3 に示す 5 バンド MSFA を用いる [9]。以降、MSFA の各バンドを、短波長側から B, Cy, G, Or および R バンドと呼ぶことにする。マルチバンドデモザイキング手法には、Guided Filter を用いたマルチバンドデモザイキング手法 (GF デモザイキング) を用いる [9]。GF デモザイキングは非線形なアルゴリズムであるが、現在最も高い精度を挙げている。分光反射率推定手法には Park らの手法を用いる [4]。

3. 提案最適化手法

本論文では、分光反射率推定に最適なセンサ感度、および sRGB 画像取得に最適なセンサ感度を求めることを目的とする。それぞれのセンサ感度を、分光最適センサ感度、および sRGB 最適センサ感度と呼ぶことにする。図 4 に提案センサ感度最適化手法のアルゴリズムを示す。単板式マルチバンドカメラによる分光反射率推定は、真の分光反射率、照明光およびセンサ感度を引数とする非線形な関数として表される。シーンの真の分光反射率として、各画素位置ごとに、420-720 [nm] で 10 [nm] 刻みの分光情報を持つ、31 バンド画像を用いる。分光最適センサ感度は、分光反射率の真値と推定値の二乗誤差を最小化するように、以下のコスト関数を最小化することで求める。

$$E_{ref}(\theta) = \sum_k \sum_j \sum_i \left| \mathbf{r}_i^j - f(\mathbf{L}^k, \mathbf{r}_i^j, \mathbf{C}(\theta)) \right|_2^2, \quad (1)$$

ここで、 \mathbf{C} はセンサ感度を、 θ はセンサ感度のパラメータを、 \mathbf{r}_i^j は j 番目の 31 バンド画像の i 番目の画素位置における真の分光反射率を、 \mathbf{L}^k は k 番目の照明光を、 f は単板式マルチバンドカメラによる分光反射率推定を表す非線形な関数を、 N_j は j 番目の 31 バンド画像の画素数を、 N_r はセンサ感度最適化に用いる 31 バンド画像の数を、 N_L は考慮する照明光の数を、それぞれ表す。

同様に、sRGB 最適センサ感度は、以下のコスト関数を最小化することで求められる。

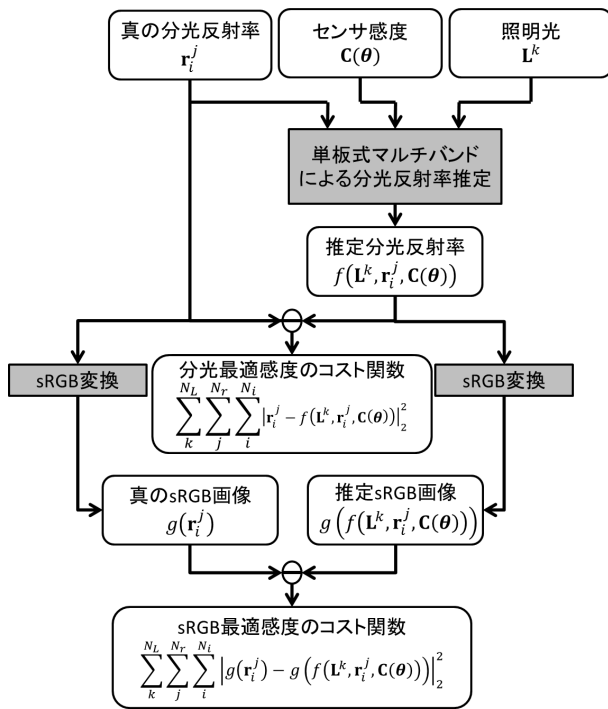


図 4 提案する単板式マルチバンドカメラのセンサ感度最適化の流れ。

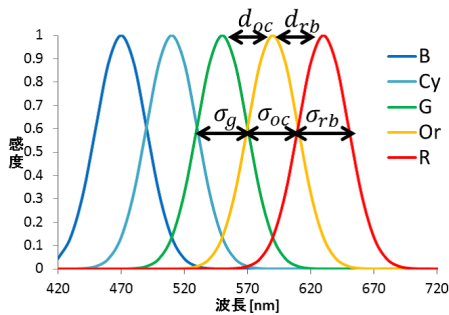


図 5 ガウス分布を用いたセンサ感度のパラメータ化。

$$E_{sRGB}(\theta) = \sum_k^{N_L} \sum_j^{N_r} \sum_i^{N_i} \left| g(r_i^j) - g(f(L^k, r_i^j, C(\theta))) \right|_2^2, \quad (2)$$

ここで、 g は分光反射率を sRGB 画像の画素値に変換する関数を表す。

提案手法では、非線形なマルチバンドデモザイキング処理を含むため、センサ感度の大域的な最適化を行うことは困難である。そこで、5 バンドのセンサ感度をガウス分布を用いてパラメータ化し、全探索により最適パラメータを求めることにより、センサ感度の最適化を行う。図 5 にセンサ感度のパラメータ化の方法を示す。まず、G バンドのピーク波長を 550 [nm] に固定し、標準偏差を σ_g とおく。ついで、Cy バンドと Or バンドの標準偏差を σ_{oc} と、Cy バンドと G バンドおよび Or バンドと G バンドのピーク波長間隔を d_{oc} と、B バンドと R バンドの標準偏差を σ_{rb} と、B バンドと Cy バンドおよび R バンドと Or バンドの



図 6 センサ感度最適化に用いた画像の例。31 バンド画像から、sRGB 画像に変換したもの。

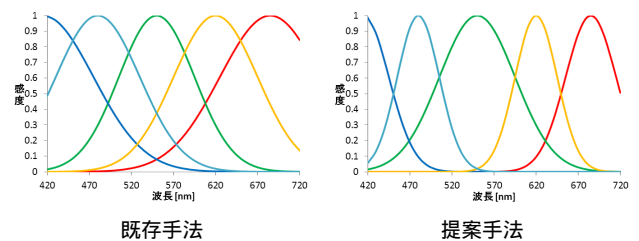


図 7 分光最適センサ感度。

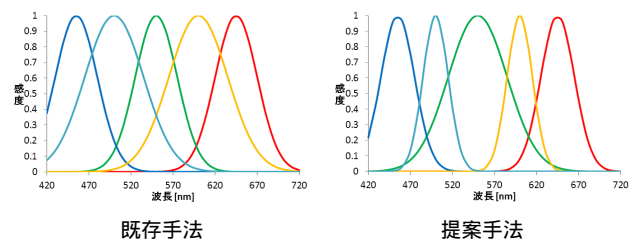


図 8 sRGB 最適センサ感度。

ピーク波長間隔を d_{rb} と、それぞれおく。

4. 実験結果

実験では、32 シーンに対する 31 バンド画像を真の分光反射率として用いた。これらの 31 バンド画像は、Varipec 液晶チューナブルフィルタ [17] を装着したモノクロカメラにより、420-720 [nm] で 10 [nm] 刻みで撮影された。全 32 シーンのうち、16 シーンをセンサ感度最適化に用いた。うち 5 シーンを図 6 に示す。最適化の際考慮する照明光は、理想的な白色光のみとした。パラメータの最適化は、5 パラメータをそれぞれ 5-85 の間で 5 刻みで変化させ、全探索することにより行った。

図 7, 図 8 にそれぞれ、提案手法および既存手法による分光最適センサ感度と sRGB 最適センサ感度を示す。ここで、MSFA を仮定しマルチバンドデモザイキング手法を考慮したセンサ感度最適化手法を提案手法と呼び、各画素において全てのバンドの画素値情報を得られることを仮定したセンサ感度最適化手法を既存手法と呼ぶことにする。

表 1 画像ごとの推定分光反射率の PSNR の比較 .

画像	既存手法	提案手法
Butterfly	36.59	38.78
ChinaCloth	31.62	32.52
Color	34.05	35.22
Doll	32.23	34.36
Flower	36.63	36.84
Hand	46.27	45.23
Stripes	31.81	33.12
Origami	34.96	36.85
Pink	30.04	33.21
SGchart	40.60	40.46
Wool	32.29	34.91
32 シーン平均	34.06	35.11

表 2 画像ごとの sRGB 画像の PSNR の比較 .

画像	既存手法	提案手法
Butterfly	40.39	41.36
ChinaCloth	37.71	38.59
Color	39.78	40.60
Doll	35.03	36.23
Flower	45.98	45.07
Hand	56.79	55.08
Stripes	36.80	38.00
Origami	37.25	38.62
Pink	33.54	35.07
SGchart	50.83	50.62
Wool	36.47	38.20
32 シーン平均	39.53	40.46

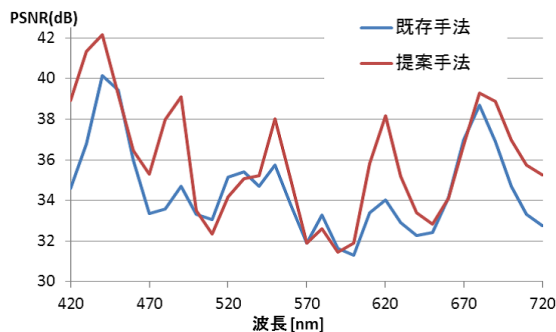


図 9 バンドごとの推定分光反射率の PSNR の比較 .

さらに、既存手法および提案手法により得られた最適センサ感度をそれぞれ用いた単板式マルチバンドカメラから得られる画像を比較した。全 32 シーンの 31 バンド画像を用いてシミュレーションを行い、定量的、主観的に評価した。

4.1 分光反射率推定への最適化における比較

既存手法および提案手法により得られた分光最適センサ感度の性能の比較を行う。

表 1 に画像ごとの推定分光反射率の PSNR の比較を示す。画像ごとの推定分光反射率の PSNR とは、画像ごとに、バンドごとの PSNR を全バンドで平均した値である。また、図 9 にバンドごとの推定分光反射率の PSNR の比較を示す。バンドごとの推定分光反射率の PSNR とは、バンドごとに PSNR を全画像で平均した値である。画像ごとに見ると、提案手法が既存手法より有効なシーンが多いことがわかり、32 シーンの平均でも既存手法を上回っていることが確認できる。また、ほとんどの波長で提案手法の方が精度よく推定できていることが認められる。

つづいて、31 バンド画像のバンド画像での主観評価による比較を行う。図 10 に Color の 490 [nm] と Wool の 620 [nm] のバンド画像による比較を示す。既存手法では、Color

表 3 バンドごとの sRGB 画像の PSNR の比較 .

手法	sRGB	sR	sG	sB
既存手法	39.53	34.23	40.72	40.10
提案手法	40.46	34.87	41.56	40.59

にあるエッジがにじみ、Wool の広範囲で著しいモアレが発生している。提案手法では、いずれも影響が抑えられていることが確認できる。

4.2 sRGB 画像取得への最適化における比較

既存手法および提案手法により得られた sRGB 最適センサ感度の比較を行う。

表 2 に画像ごとの sRGB3 バンドの平均 PSNR、表 3 に sRGB 画像のバンドごとの PSNR の比較を示す。sRGB 画像のバンドごとの PSNR とは、バンドごとに全シーンの画像に対し計算した PSNR である。分光反射率推定への最適化と同様、提案手法の方が既存手法より良好な PSNR を挙げているシーンが多いことが確認できる。バンドごとに見ると、すべてのバンドで提案手法が既存手法を上回っている。

つづいて、主観評価による比較を行う。図 11 に Butterfly と SGchart の sRGB 画像を示す。既存手法では、Butterfly の文字の著しい偽色、SGchart のエッジでの広範囲の滲みが発生してしまっている。一方、提案手法では、それらが大きく軽減されていることが確認できる。

5. むすび

本論文では、高精度な分光反射率推定および高画質な sRGB 画像取得を目的として、単板式マルチバンドカメラのセンサ感度最適化を行った。非線形な高性能マルチバンドデモザイキング手法を用いた単板式マルチバンドカメラのセンサ感度最適化手法を提案した。実験により、提案手法により得られた最適センサ感度が、単板式マルチバンド

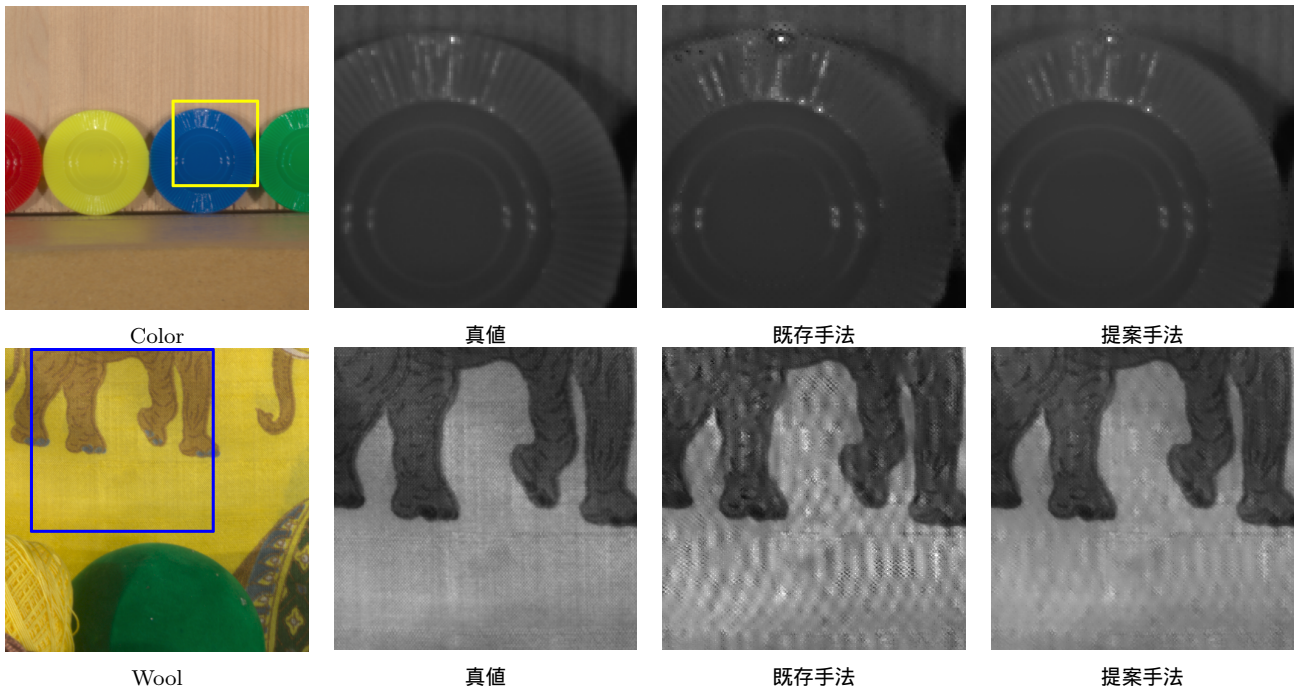


図 10 31 バンド画像のバンド画像の比較 . Color では 490 [nm] に対応するバンド画像 , Wool では 620 [nm] に対応するバンド画像である .

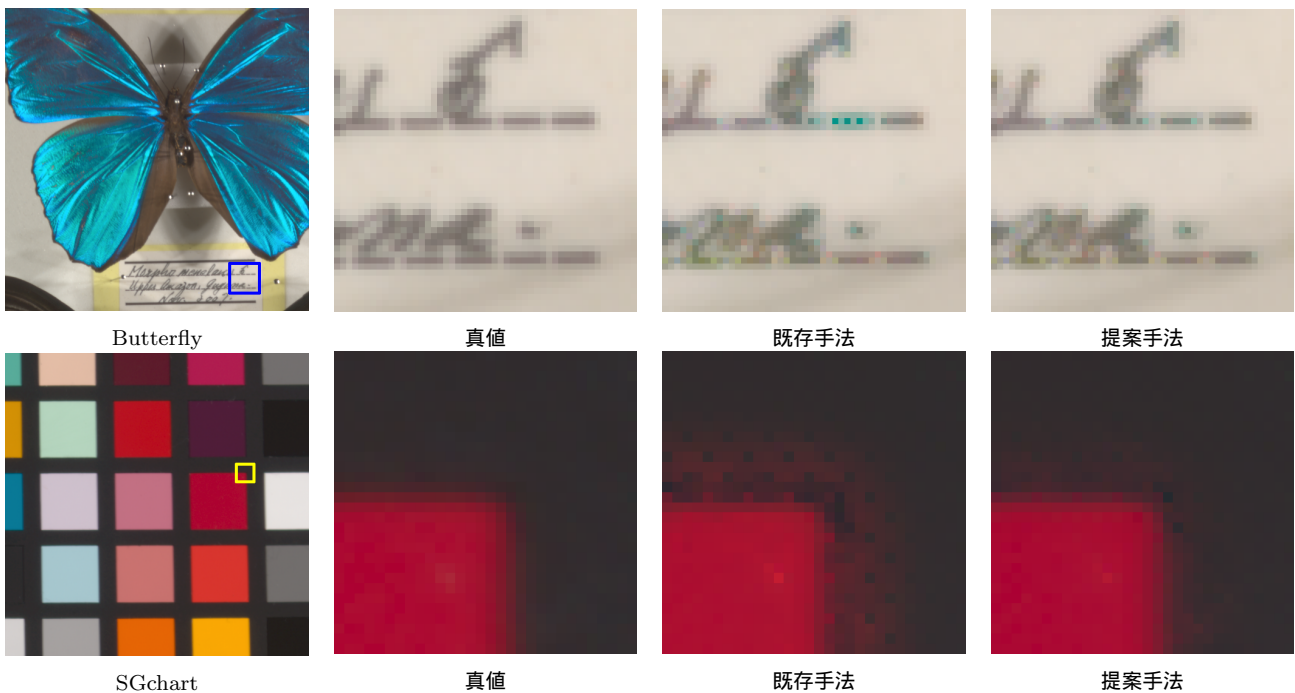


図 11 sRGB 画像の比較 .

カメラでの分光反射率推定および sRGB 画像取得において、有効に働くことを確認した .

参考文献

- [1] S. Han, I. Sato, T. Okabe and Y. Sato: *Fast spectral reflectance recovery using DLP projector*, Proc. of Asian Conf. on Computer Vision (ACCV), vol. 1, pp. 318-330 (2010).
- [2] C. Cui, H. Yoo and M. Ben-Ezra: *Multi-spectral imaging by optimized wide band illumination*, Int. Journal of Computer Vision, vol. 86, no. 2, pp. 140-151 (2010).
- [3] H. Fukuda, T. Uchiyama, H. Haneishi, M. Yamaguchi and N. Ohya: *Development of a 16-band multispectral image archiving system*, Proc. of SPIE, vol. 5667, pp. 136-145 (2005).
- [4] J. Park, M. Lee, M. D. Grossberg, and S. K. Nayar: *Multispectral imaging using multiplexed illumination*, Proc. of IEEE Int. Conf. on Computer Vision (ICCV), pp. 1-8 (2007).
- [5] K. Ohsawa, T. Ajito, H. Fukuda, Y. Komiya, H. Haneishi, M. Yamaguchi and N. Ohya: *Feature article six band HDTV camera system for spectrum-based*

- color reproduction*, Journal of Imaging Science and Technology, vol. 48, pp. 85-92 (2004).
- [6] L. Miao and H. Qi: *The design and evaluation of a generic method for generating mosaicked multispectral filter arrays*, IEEE Trans. on Image Processing, vol. 15, no. 5, pp. 2780-2791 (2006).
 - [7] L. Miao, H. Qi, R. Ramanath, and W. E. Snyder: *Binary treebased generic demosaicking algorithm for multispectral filter arrays*, IEEE Trans. on Image Processing, vol. 15, no. 11, pp. 3550-3558 (2006).
 - [8] Y. Monno, M. Tanaka, and M. Okutomi: *Multispectral demosaicking using adaptive kernel upsampling*, Proc. of IEEE Int. Conf. on Image Processing (ICIP), pp. 3218-3221 (2011).
 - [9] Y. Monno, M. Tanaka, and M. Okutomi: *Multispectral demosaicking using guided filter*, Proc. of SPIE, vol. 8299, (2012).
 - [10] M. J. Vrhel and H. J. Trussell: *Optimal color filters in the presence of noise*, IEEE Trans. on Image Processing, vol. 4, no. 6, pp. 814-823 (1995).
 - [11] O. Sharma, H. J. Trussell and M. J. Vrhel: *Optimal non-negative color scanning filters*, IEEE Trans. on Image Processing, vol. 7, no. 1, pp. 129-133 (1998).
 - [12] H. Haneishi, T. Hasegawa, A. Hosoi, Y. Yokoyama, N. Tsumura and Y. Miyake: *System design for accurately estimating the spectral reflectance of art paintings*, Applied Optics, vol. 39, no. 35, pp. 6621-6632 (2000).
 - [13] N. Shimano: *Optimization of spectral sensitivities with gaussian distribution functions for a color image acquisition device in the presence of noise*, Optical Engineering, vol. 45, no. 1, pp. 01320-1-01320-8 (2006).
 - [14] D. Y. Ng and J. P. Allebach: *A subspace matching color filter design methodology for a multispectral imaging system*, IEEE Trans. on Image Processing, vol. 15, no. 9, pp. 2631-2643 (2006).
 - [15] D. Alleysson, and S. Süsstrunk and J. Marguier : *Influence of spectral sensitivity functions on color demosaicking*, Proc. 11th Color Imag. Conf., pp. 351-357 (2003).
 - [16] M. Parmar and S. J. Reeves: *Selection of optimal spectral sensitivity functions for color filter arrays*, IEEE Trans. on Image Processing, vol. 19, no. 12, pp. 3190-3203 (2010).
 - [17] *Varispec*, <http://www.caliperls.com/products/microscopy-imaging-analysis/optical-components/varispec.htm>.