

岩石薄片を用いた不均一分光フィルタによる ワンショット分光撮像

藤本 悠太^{1,a)} 北野 和哉¹ 藤村 友貴¹ 船富 卓哉¹ 向川 康博¹

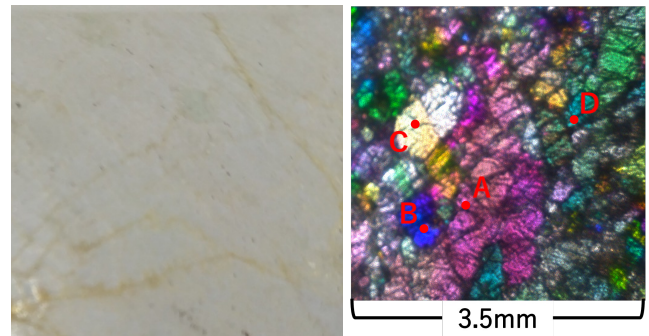
概要

本研究では、岩石薄片と偏光板を組み合わせた岩石フィルタによる簡易なワンショット分光撮像手法を提案する。岩石フィルタは、空間的に不均一な分光透過率を持つフィルタであり、シーン中の分光情報を複雑に符号化する。また、符号化を考慮した最適化手法を導入し、1枚の画像からシーンの分光画像を推定する。実環境で計測した岩石フィルタの分光透過率を用いた実験により分光撮像の実現可能性を示した。

1. はじめに

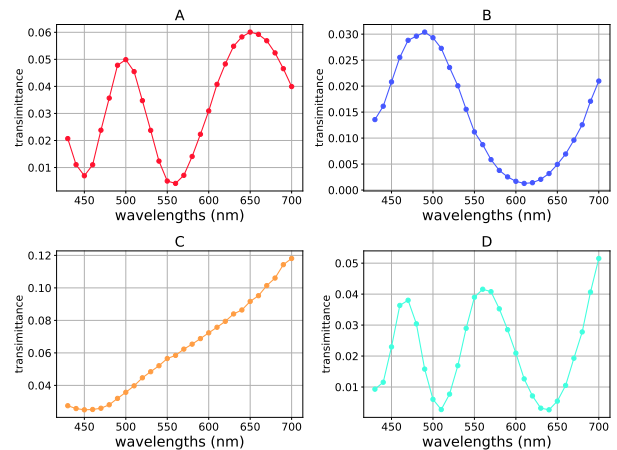
分光撮像とは、光の各波長に対する強度分布を取得する技術であり、人の目や一般的な RGB カメラでは識別が困難な特徴をシーンから得ることができる。応用例として、工場における外観検査や農作物の生育状況モニタリング、気象衛星画像の取得などのリモートセンシングに加え、惑星探査などに利用されている。

一般的な分光撮像の手法として、ラインスキャン方式とスナップショット方式が挙げられる [3]。ラインスキャン方式は、スリットを通して直線状の領域を切り取り、回折格子やプリズムによって光を波長方向に分解して、2次元のセンサ上に展開する。この方式は、光学系が複雑で高価であることや、一度の撮影に時間がかかることが問題である。一方で、スナップショット方式の分光撮像手法は、空間的に分光情報を撮影するため、ラインスキャン方式に比べて高速な計測が可能になる。その中でも、空間的に異なる分光透過率を持つ分光フィルタによってシーンの分光分布を符号化する手法 [4, 6, 8] は、深層学習やスパースモデリングによって1枚の符号化画像から分光画像を推定できる。これらの手法は、SLM [6] やファブリペローフィルタ [8] によって実現されるが、いずれも分光透過率を画素ごとに変化させるため精密な製造工程が必要であり、製造が困難である点や製造コストが高い問題がある。Zao [10] らは、簡易な方法として、インクの色を用いて空間的に異



(a) レンズライトの岩石薄片

(b) 岩石フィルタ



(c) A~Dにおける分光透過率

図 1: 岩石フィルタの概要

なるパターンをプリンターで印刷したフィルタを作成する方法を提案した。しかし、この方法はカラーフィルタの分光透過率がインクの分光透過率に制約される問題がある。

本研究は、岩石薄片が引き起こす自然由来の複雑な複屈折を活用することで、簡易な光学系でワンショット分光撮像を実現することを目的とする。岩石薄片と2枚の偏光板を組み合わせた不均一分光フィルタを用いた撮像と、撮像過程を考慮した最適化による分光画像の推定手法を提案する。本稿ではこのフィルタを「岩石フィルタ」(図 1)と呼び、2.1節においてその性質を述べる。また、推定に用いる最適化手法を「self-guided rank-1 reconstruction」と呼び、2.3節で議論する。

¹ 奈良先端科学技術大学院大学

^{a)} fujimoto.yuta.fy2@is.naist.jp

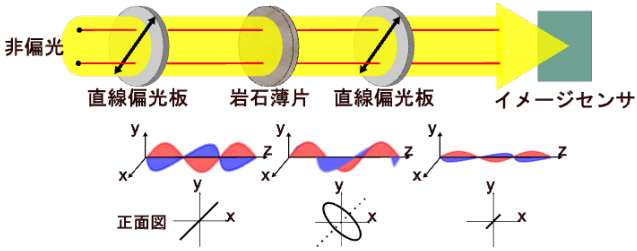


図 2: 岩石フィルタの仕組み

2. 提案手法

本章では、まず岩石フィルタの性質について述べ、次にシーンから入射する分光情報の岩石フィルタとイメージセンサによる符号化をモデル化することで問題設定を明らかにする。最後に、本研究で用いる符号化画像から分光画像の推定を行うための手法である self-guided rank-1 reconstruction について述べる。

2.1 岩石フィルタの分光透過率

図 2 に岩石フィルタの仕組みを示す。一般的にシーンの光は不規則な振動をする非偏光である。強度を規格化した入射光 I_{in} はストークスパラメータを用いて

$$I_{in} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \quad (1)$$

と表せる。1 枚目の直線偏光板を透過すると、入射光は直線偏光となる。簡便のために、直線偏光板の透過軸の角度は水平方向に対して $\pi/4$ であるとすると、この変化はミューラー行列によって次のように表される。

$$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

次に、直線偏光が透過する岩石薄片は複屈折媒体であり、光の振動が速く伝わる進相軸と遅く伝わる遅相軸がある。この時、入射光に発生する位相差と結晶の進相軸の方向は岩石薄片の粒子の組成によって異なる。画像座標 i における位相差を $\phi(i, \lambda)$ 、水平方向に対する進相軸の角度を $\theta(i)$ とおくと、透過光のストークスパラメータは

$$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & - & 0 & - \\ 0 & - & (1 - \cos \phi) \sin 2\theta \cos 2\theta & - \\ 0 & - & \sin^2 2\theta + \cos \phi \cos^2 2\theta & - \\ 0 & - & -\sin \phi \cos 2\theta & - \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ (1 - \cos \phi) \sin 2\theta \cos 2\theta \\ \sin^2 2\theta + \cos \phi \cos^2 2\theta \\ -\sin \phi \cos 2\theta \end{bmatrix}$$

となる。最後に、2 枚目の偏光板を透過した光の強度 I_{out}

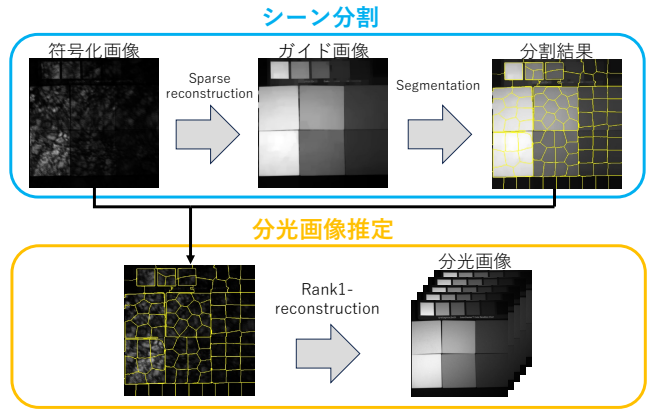


図 3: Self-guided rank-1 reconstruction の概要

は式 (2) と同様の変換を施すことで

$$I_{out} = \frac{1}{4}(1 + \sin^2 2\theta(i) + \cos \phi(i, \lambda) \cos^2 2\theta(i)) \quad (4)$$

と表せる。 I_{out} は岩石フィルタの分光透過率に相当し、粒子の組成が不均一であることから図 1(c)のように分光透過率も空間的に不均一に変化する。

2.2 シーンの撮像モデル

i を画像の座標、 λ を波長とし、シーンの分光分布を $S(i, \lambda)$ 、画素ごとに異なる岩石フィルタの分光透過率とイメージセンサの分光感度特性の積を $T(i, \lambda)$ とおくと、岩石フィルタで符号化撮影された画素値 $I(i)$ は以下の式で表される。

$$I(i) = \int S(i, \lambda)T(i, \lambda)d\lambda \quad (5)$$

このモデルを元に、ハイパースペクトルカメラを用いてキャリブレーションによって測定した $T(i, \lambda)$ と、符号化撮像で得られる $I(i)$ から $S(i, \lambda)$ を推定する。

2.3 Self-guided rank-1 reconstruction

1 枚の符号化画像から波長ごとの分光画像を推定する問題は不良設定問題である。この問題を緩和するために、Saragadam ら [6] は、ガイド画像を用いてシーンを分割し、複数の画素で共通する 1 つの分光分布を求めている。この手法は、不良設定問題を緩和するのに有効であるものの、ガイド画像の取得にはビームスプリッタと追加の RGB カメラが必要になる。本手法では、1 台のカメラで撮影された符号化画像から、ガイド画像の推定とシーンの分光画像の推定を行う。本手法の概要を図 3 に示す。

シーン分割 まず、シーンの分光画像の粗い推定として $S_g(i, \lambda)$ を以下の最適化問題を解くことで得る。

$$S_g(i, \lambda) = \underset{X}{\operatorname{argmin}} \sum_i \left(I(i) - \sum_{\lambda} X(i, \lambda)T(i, \lambda) \right)^2 + R_g(X) \quad (6)$$

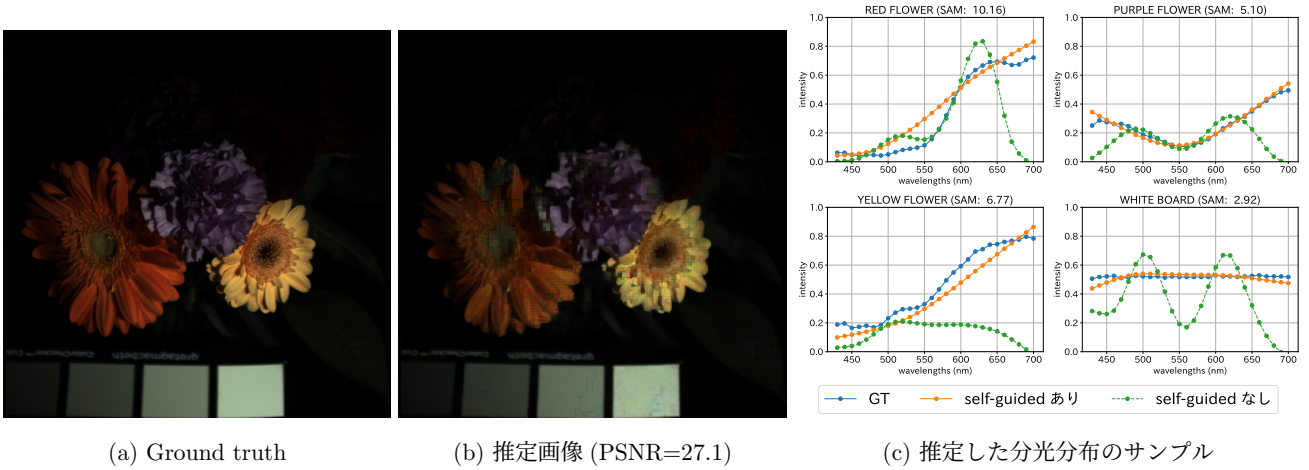


図 4: シミュレーション結果

ただし $R_g(X)$ は正規化項であり、波長方向の滑らかさを仮定する項と空間方向の L1 全変動項の線形和とする。

$$R_g(X) = \mu_{\text{spectral}} \|XD_\lambda\|_2^2 + \mu_{\text{spatial}} \|X\|_{TV} \quad (7)$$

式 (6) を解くために TwIST [2] を用いる。

次に、ガイド画像の画素値 $I_g(i)$ を以下から算出する。

$$I_g(i) = \sum_{\lambda} S_g(i, \lambda) \quad (8)$$

このガイド画像を用いて、SLIC [1] により領域分割を行う。

分光画像推定 あるスーパーピクセル p 内の全ての画素は、強度のみが異なる共通の分光分布 $b(p, \lambda)$ を持つという rank-1 の仮定 [5] を利用して、 p 内の画素 i_p の分光画像 $S(i_p, \lambda)$ を次のように表す。

$$S(i_p, \lambda) = I_g(i_p) b(p, \lambda) \quad (9)$$

ここで $b(p, \lambda)$ は以下の最適化問題を解くことで求める。

$$b(p, \lambda) = \underset{X}{\operatorname{argmin}} \sum_{i_p} \left(I(i_p) - I_g(i_p) \sum_{\lambda} X(p, \lambda) T(i_p, \lambda) \right)^2 + R(X) \quad (10)$$

$$R(X) = \mu_{\text{spectral}} \|XD_\lambda\|_2^2 \quad (11)$$

3. 実験

本章では、ハイパースペクトルカメラによって計測した岩石フィルタの分光透過率のデータを用いてシミュレーション実験と実環境実験を行う。これにより、本手法による分光撮像の実現可能性を評価する。

3.1 シミュレーション実験

実験環境 シーンの分光画像は、CAVE データセット [9]

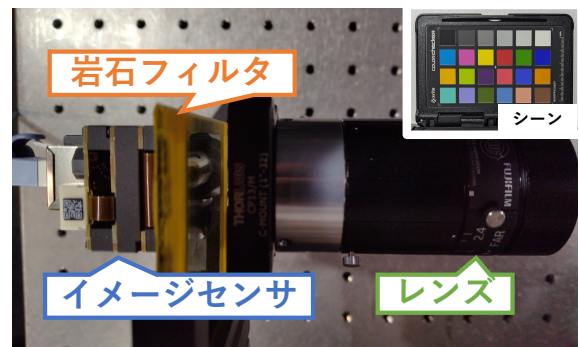
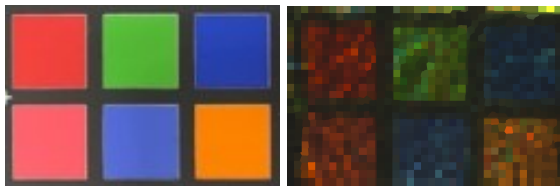


図 5: 実環境実験に用いた光学系

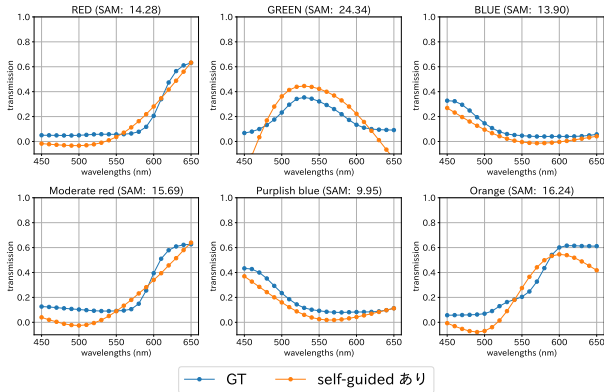
を使用した。画素数は 512×512 で、波長帯は 430 nm から 700 nm の 28 バンドのデータを使用した。また、イメージセンサの分光感度特性は、LUCID 製の PHX089S-CC を使用した。シーンの分光画像と岩石フィルタの分光透過率から符号化画像を作成する際に 2% のランダムノイズを加えた。さらに、パラメータ設定について、ガイド画像の推定の際には $(\mu_{\text{spectral}}, \mu_{\text{spatial}}) = (10^{-3}, 10^{-4})$ を、分光画像推定の際には $\mu_{\text{spectral}} = 10^{-2}$ に設定した。

実験結果 分光画像の真値から求めたガイド画像に対し、式 (6)、式 (8) により推定したガイド画像の PSNR は 24.7 であった。また、推定した分光画像の真値に対する PSNR は 27.1 であった。これは、先行研究 [8] の値と比べて光学系が簡易なものになった分、低い値になっている。

図 4(a), 4(b) は、分光画像の真値と推定値をそれぞれ RGB 画像に変換したものである。これらの結果より、概ね正しい推定ができていることがわかる。しかし、例えば画像右下の白板において青や紫として推定されている領域などに誤りが点在している。これは、式 (8) から推定したガイド画像の誤差が大きい領域では $b(p, \lambda)$ の推定の誤差も大きくなるため、スーパーピクセル内の全ての画素で誤差が発生することが原因である。この問題は、イメージセンサの前に置く岩石薄片の領域を調節することである程度対処で

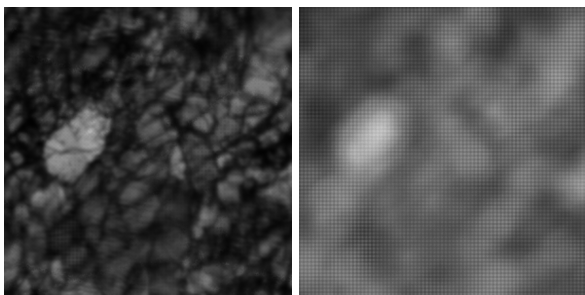


(a) RGB 画像 (b) 推定画像



(c) 推定した分光分布のサンプル

図 6: 実環境実験の結果



(a) シミュレーション画像 (b) 撮影画像

図 7: 標準白色板の符号化結果の比較

きると考えられる。

また、図 4(c)における 3つの花と白板からそれぞれ 1点、合計 4点における分光分布の真値と推定値を比較し、結果を図 6に示す。加えて、Spectral Angular Mapper(SAM)を用いて真値と self-guided ありの場合の分光分布の類似度を算出した結果も合わせて示す。SAM が小さいほど、推定値は真値に近いものになる。岩石フィルタは局所的には分光透過率に大きな変化がないため、self-guided なしの式 (6) のみからでは正しく分光分布の形状を推定できない。これに対し、self-guided rank-1 reconstruction によって 1つの分光分布の推定に広い領域を用いることができ、より高精度の推定が達成されている。

3.2 実環境実験

実験環境 図 5にあるような光学系を構築し。カラーチェッカーを用いて分光反射率の推定精度の評価を行った。イメージセンサは LUCID 製の PHX089S-CC

を、レンズは FUJINON 製の HF50XA-5M を使用した。またパラメータについて、ガイド画像の推定の際には $(\mu_{\text{spectral}}, \mu_{\text{spatial}}) = (10^{-3}, 1)$ を、分光画像推定の際には $\mu_{\text{spectral}} = 10^2$ に設定し、シミュレーション実験と比較して解の候補を強く制限した。さらに分光反射率を推定する前に LED 照明の影響を取り除くために、カラーチェッカーの分光反射率の真値を用いてホワイトバランス補正を行った。

実験結果 図 6(b)に推定した分光画像を RGB 画像に変換したものを示す。RGB 画像と比較した場合、図 4(b)に示したシミュレーション結果よりも大きなムラが見られる。また図 6(c)に、比較的正しく推定ができている 6つの点における推定値と真値を比較した結果を示す。推定結果において、対象物体には存在しない負の反射率を示すものがあり、こちらも図 4(c)と比較すると SAM が大きくなっている。この原因の 1つが符号化画像のぼけである。図 7に標準白色板を式 (5) によってシミュレーションした結果と実環境における撮影結果の比較を示す。実環境での符号化画像はシミュレーション画像と比べて強いぼけが見られる。これはイメージセンサ上のある一点に集光する光が岩石フィルタ上のある円状の領域を透過しているためだと考えられる。ぼけを補正するための計算処理の追加やぼけ自体が起こらないような光学系の構築が今後の課題である。

4. まとめ

本研究では、岩石薄片と 2枚の偏光板を用いて、簡易的なワンショット分光計測手法を提案した。従来手法では、空間的に異なる分光透過率を持つフィルタを作成するために精密な製造工程を必要としていたが、それを自然物である岩石を用いることで簡易に実現した。1節で述べた通り、分光撮像技術の導入に対する障壁である光学素子の製造の難しさや撮影の時間的な制約を解決することができると考えられる。本研究で提案する self-guided rank-1 reconstruction を導入することで、1つのカメラで符号化画像と十分な精度のガイド画像の取得を実現した。この方法は、デュアルカメラによって分光画像の推定を行う従来研究 [5-7] にも応用できる可能性がある。ただし、岩石フィルタによる分光撮像を実環境において十分な推定精度で行うためにぼけの補正を含めた計算処理を加える必要があることや、self-guided rank-1 reconstruction についても、初期推定として分光画像を推定するための不良設定問題を解く必要があるなど改善の余地がある。これらを踏まえ、実環境での推定精度の向上とガイド画像の推定手法の改善を今後の課題とする。

謝辞 本研究の一部は JSPS 科研費 JP23K16902 の支援を受けた。

参考文献

- [1] Achanta, R., Shaji, A., Smith, K., Lucchi, A., Fua, P. and Süsstrunk, S.: SLIC superpixels compared to state-of-the-art superpixel methods, *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, Vol. 34, No. 11, pp. 2274–2282 (2012).
- [2] Bioucas-Dias, J. M. and Figueiredo, M. A.: A new TwIST: Two-step iterative shrinkage/thresholding algorithms for image restoration, *IEEE Transactions on Image processing*, Vol. 16, No. 12, pp. 2992–3004 (2007).
- [3] Hagen, N. and Kudenov, M. W.: Review of snapshot spectral imaging technologies, *Optical Engineering*, Vol. 52, No. 9, pp. 090901–090901 (2013).
- [4] Nie, S., Gu, L., Zheng, Y., Lam, A., Ono, N. and Sato, I.: Deeply learned filter response functions for hyperspectral reconstruction, *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 4767–4776 (2018).
- [5] Saragadam, V., DeZeeuw, M., Baraniuk, R. G., Veer-araghavan, A. and Sankaranarayanan, A. C.: SASSI—super-pixelated adaptive spatio-spectral imaging, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 43, No. 7, pp. 2233–2244 (2021).
- [6] Saragadam, V., Rengarajan, V., Tadano, R., Zhuang, T., Oyaizu, H., Murayama, J. and Sankaranarayanan, A. C.: Programmable Spectral Filter Arrays using Phase Spatial Light Modulators, *2023 IEEE International Conference on Computational Photography (ICCP)*, IEEE, pp. 1–12 (2023).
- [7] Wang, L., Xiong, Z., Gao, D., Shi, G. and Wu, F.: Dual-camera design for coded aperture snapshot spectral imaging, *Applied optics*, Vol. 54, No. 4, pp. 848–858 (2015).
- [8] Yako, M., Yamaoka, Y., Kiyohara, T., Hosokawa, C., Noda, A., Tack, K., Spooren, N., Hirasawa, T. and Ishikawa, A.: Video-rate hyperspectral camera based on a CMOS-compatible random array of Fabry–Pérot filters, *Nature Photonics*, Vol. 17, No. 3, pp. 218–223 (2023).
- [9] Yasuma, F., Mitsunaga, T., Iso, D. and Nayar, S.: Generalized Assorted Pixel Camera: Post-Capture Control of Resolution, Dynamic Range and Spectrum, Technical report (2008).
- [10] Zhao, Y., Guo, H., Ma, Z., Cao, X., Yue, T. and Hu, X.: Hyperspectral imaging with random printed mask, *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 10149–10157 (2019).