CONFIDENTIAL EXTENDED ABSTRACT.
DO NOT DISTRIBUTE ANYWHERE.

複屈折万華鏡ハイパースペクトルイメージング

藤本 悠太 *1　藤原 和真 *1,a)　北野 和哉[1]　舩冨 卓哉[1]　向川 康博[1]

概要

本研究では, 万華鏡と複屈折媒体を組み合わせることで, 簡易かつスナップショット撮影を可能とする新たなハイパースペクトルイメージング (HSI) システム「複屈折万華鏡ハイパースペクトルイメージング」を提案する. 既存手法では像複製数に制限があるのに対し, 本手法では有効な像複製数を増加させつつ, 波長符号化の多様性を向上させることができる. 自作したプロトタイプを用いた実機実験を通じて, 実現可能性と有効性を確認した.

1. 緒論

ハイパースペクトルイメージング（HSI）は, 光の波長ごとの強度分布を取得する技術であり, 肉眼や一般的な RGB カメラでは識別が難しい対象の特徴を抽出可能にする. 特にスナップショット型 HSI は, 従来のスキャン方式では困難だった高速撮影を実現し, 動的被写体の観測にも適しているため注目を集めている. スナップショット型 HSI の実現手法は多様であるが [4, 7], 幅広い応用を視野に入れると, シンプルでありながら波長分解能を確保できる方式が望ましい. 既存手法は, 焦点面上に空間波長フィルタを設置する on-chip 型 [3,18–22] と, 市販カメラに対して着脱可能な add-on 型 [2,8,9,11,12,15,16] に大別される. on-chip 型は, 撮像面にフィルタ配列を配置する専用センサを用いる方式で, 小型・高機動性に優れる. 一方, add-on 型は既存のカメラに外付け光学系を追加する方式で, カメラ本体を改造せずに使用できるため, 柔軟性やコスト面で利点がある. しかし, on-chip 型がすでに実用化されているのに対し, 我々の知る限りでは add-on 型は未だ実用化に至っていない. add-on 型 HSI には, 像複製を用いない方式 [2,9,15] もあるが, システムサイズ, シーン依存性, 光学スループットに課題がある. 我々は, 像複製数の増加により波長分解能の向上の余地がある像複製手法に着目した. ここでいう「像複製」とは, 万華鏡などの鏡によってシーンの像を複数生成することを指す. しかし, 従来の方式では, 像複製数を増加させようとした場合, 次の 2 点のトレードオフが顕在化し, 実用化の障壁となっている.

(1) 像複製数とシステムサイズのトレードオフ：Manakov ら [11] は, 万華鏡を像複製器としてのみ用いることでの 9 の像複製と波長符号化のための追加のリレー光学系を組み合わせたマルチスペクトルイメージングを実現した. しかし, 追加のリレー光学系が原因となり, 像複製数を増加させようとした場合, システムの大型化が避けられない. また, CASSI [5,17] との組合せ例 [8] も同様のトレードオフを抱える.

(2) 像複製数と光学スループットのトレードオフ：Takatani ら [16] は, 鏡面にカラーフィルタを貼付して 4 の像複製と分光撮像を同時に実現し, リレー光学系なしでの HSI を実現した. しかし, 鏡面に貼付したカラーフィルタが原因となり, 像複製数を増加させようとすると, フィルタを複数回透過するために光学スループットが著しく低下する. 光学スループットとは, システムを通過できる光量を示す指標であり, 再構成精度や撮像品質に大きく影響する. プラズモニックフィルタを用いた近赤外 HSI の検討例 [12] でも, 同様のトレードオフが存在する.

本研究では, これら 2 つのトレードオフの緩和を目的として, 複屈折媒体と万華鏡を統合した「複屈折万華鏡ハイパースペクトルイメージング」を提案する. 具体的には, 万華鏡の鏡面に PET 樹脂製の複屈折媒体を貼付し, 偏光板で挟む構成とすることで, 鏡像ごとに異なる波長符号化を実現する. 複屈折媒体は, 偏光方向に依存して屈折率が異なる材料であり, 偏光板と組み合わせることで波長依存の光変調が可能となる. 本手法では, 各鏡像が異なる反射経路を通過することで, 異なる回数の複屈折変調を受け, 波長符号化の多様性を向上させる. この, 波長符号化はシステムサイズと独立であり, 複屈折変調の特性により光学スループットは大きく低下しない. このことから, 既存手法の抱える 2 つのトレードオフを緩和できる. 自作プロトタイプによる実機実験では, 30 の像複製による一点分光と 5 の像複製によるイメージングを通じて, 実現可能性と有効性, そして課題を確認した.

*Equal contribution
[1] 奈良先端科学技術大学院大学
[a)] fujiwara.kazuma.fj4@is.naist.jp

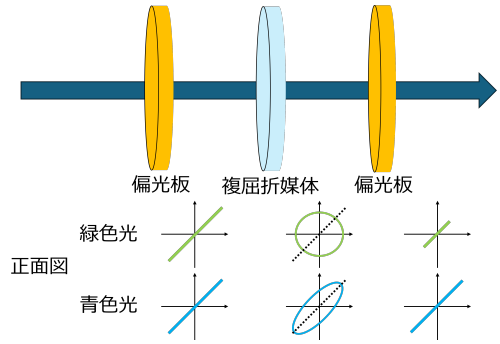


図 1: 複屈折媒体を用いた波長フィルタの概要．本研究の提案手法は既存手法 [1,13,14] をベースとしている．

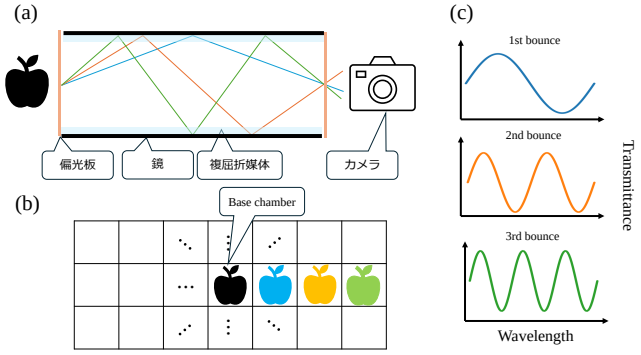


図 2: 提案手法の概要 (a) 光学系の断面図．(b) 撮影画像．中心の base chamber の周りに chamber が並んでおり，鏡像が投影される．(c) 反射ごとに位相差が増加し，分光透過率の周波数が増加する．

2. 手法

2.1 複屈折媒体を用いた波長符号化

複屈折を利用した空間波長フィルタによる HSI は，これまでにも複数提案されている [1,13,14]．セロハンテープ [13] や PET 樹脂板といった複屈折媒体 (図 1) は，進相軸と遅相軸の間で異なる屈折率を持つ．これにより厚さと屈折率差に応じた光路差が生じ，これは位相差 $\Delta\phi =$ 光路差 $\times 2\pi/\lambda$ として表現できる．1 枚目の偏光板を通過した直線偏光は，複屈折媒体を通過することで波長依存の楕円偏光に変換される．さらに 2 枚目の偏光板によって再び直線偏光へと変換されるが，この際の透過強度が波長ごとに変化する．これが波長選択性を持つフィルタとして機能する原理である．

2.2 複屈折万華鏡によるシーンの符号化

図 2に提案手法の概要を示す．4 枚の鏡を直方体状に配置し，各鏡面に複屈折媒体を貼付し，全体を 2 枚の偏光板で挟む構成をとる．これにより構成された複屈折万華鏡を通して撮影された画像には，多重反射による仮想視点からの鏡像が chamber として投影される [10]．この chamber の数はカメラの焦点距離に依存し，システムサイズには依存しない．視差を伴う各鏡像に対し，シーンが平坦かつランバート面であると仮定することで，base chamber（反射なし）との位置合わせが可能となる．シーンからの光は 1 枚目の偏光板で直線偏光となり，複屈折媒体を透過するたびに波長依存の位相差を受けて楕円偏光へと変化する．その後 2 枚目の偏光板を通過することで再び直線偏光となり，最終的な透過率は反射回数に依存して変化する．画素位置を x，chamber c における反射回数を N_c，1 回の透過での光路差を $M_c(x)$ とすると，位相差 $L_c(x,\lambda)$ は以下のように表される：

$$L_c(x,\lambda) = \frac{2\pi M_c(x) N_c}{\lambda} \tag{1}$$

実際の光路差は，複屈折媒質の屈折率，厚み，入射角に依存し，1 つの chamber 内でも空間的に変動する [6]．この位相差により得られる分光透過率 $t_c(x,\lambda)$ は次式で表される：

$$t_c(x,\lambda) = a\cos(L_c(x,\lambda)) + b \tag{2}$$

ここで定数 a, b は偏光板と複屈折媒体の角度に依存する．各 chamber c における RGB チャンネル $k \in r,g,b$ の符号化画像 $y_{c,k}(x)$ は，シーンの分光分布 $s(x,\lambda)$，RGB カメラの分光感度 $f_k(\lambda)$ を用いて以下のように表現される：

$$y_{c,k}(x) = \sum_{\lambda} s(x,\lambda) t_c(x,\lambda) f_k(\lambda) \tag{3}$$

2.3 最適化による分光分布の再構成

得られた符号化画像から分光分布 $s(x,\lambda)$ を再構成するため，以下の最適化問題を解く：

$$\hat{s}(x,\lambda) = \underset{s\geq 0}{\operatorname{argmin}} \left\{ \sum_{c} \left(y_{c,k}(x) - \sum_{\lambda} s(x,\lambda)\ t_c(x,\lambda)\ f_k(\lambda) \right)^2 + \alpha \left\| \nabla^2_{\lambda}\ s(x,\lambda) \right\|_2^2 \right\} \tag{4}$$

ここでは分光分布に非負制約を課し，波長方向の滑らかさに関する正則化を導入している．初期値を 0 とし，projected gradient descent により最適化を行う．

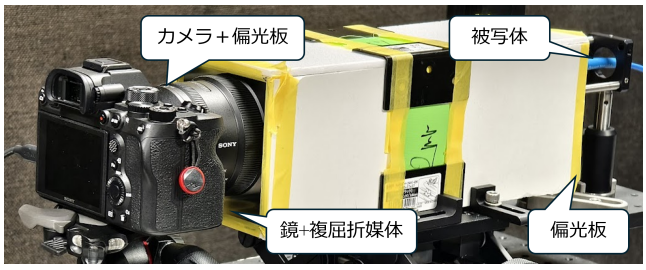
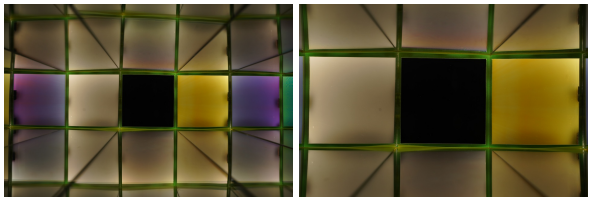


図 3: 実機検証に用いた光学系

3. 実機検証

3.1 実機実装

図 3に実環境実験に使用した光学系を示す．実験にお



((a)) f =24 mm　　((b)) f =40 mm

図 4: 異なる焦点距離のレンズを用いた際の撮影画像例

いては 9504 × 6336 画素のフルサイズ RGB カメラ (Sony α7R IV) と 14 mm の単焦点レンズ (SONY FE 14mm F1.8 GM) を用いた (図 3). 複屈折万華鏡は 10 cm × 10 cm × 30 cm のサイズで作成し, 鏡の上に厚さ (0.5 mm, 1.5 mm, 2 mm, 3 mm) が異なる PET 樹脂板 (サンデー PET PG1, 変性ポリエチレンテレフタレート) を貼付した. 2 枚の偏光板の配置について，平行ニコル配置の際は base chamber の画素値が飽和するため, 直交ニコル配置にした．片方の偏光板は万華鏡に接着し, もう片方の偏光板はレンズとイメージセンサの間に固定した.

キャリブレーションは以下の手順で行った。まず、複屈折万華鏡の分光透過率 $t_c(x, \lambda)$ は、特定波長の光をモノクロメータと拡散板を通して照射し、複屈折万華鏡あり／なしのそれぞれの観測画像において、位置合わせ後の輝度値の比率を画素ごとに求めることで算出した。また、RGB カメラの分光感度 $f_k(\lambda)$ は、モノクロメータ (Optometrics DMC1–03) からの光を拡散板と分光器 (Ocean Optics Maya 2000) に分岐させ、カメラの輝度値と分光器による計測値との比率から、相対的な感度波形を求めた。

本提案手法の像複製数はカメラのレンズの焦点距離にのみ依存し，システムサイズと独立である．この検証として，ズームレンズ (Tamron 20-40mm F/2.8 Di III VXD) を装着し, 24 mm,40 mm の焦点距離で撮影された画像を図 4に示す．結果から「像複製数とシステムサイズのトレードオフ」の緩和を確認できる．ただし，撮像素子の画素数は不変であることから，各 chamber に割り当てることができる画素数は像複製数とトレードオフの関係にある．そのため，システムサイズはほぼ一定とすることができたが，新たに像複製数と空間解像度の間にトレードオフが生じたことになる．

3.2　分光分布の再構成結果

本章では，実装した光学系を用いた一点分光およびイメージングの実環境実験を通じて，提案手法によるトレードオフ緩和の可能性を検証する．

一点分光

点光源を被写体とした実験により，「像複製数とシステムサイズのトレードオフ」の緩和と，本手法における一点分光の有効性を検証した．具体的には，キセノンライト (Ocean Optics HPX–2000) に対し，575 nm–625 nm と 612.5 nm–637.5 nm の 2 種類のバンドパスフィルタを通した光をディフューザに照射し，分光特性の異なる一点光源とした．

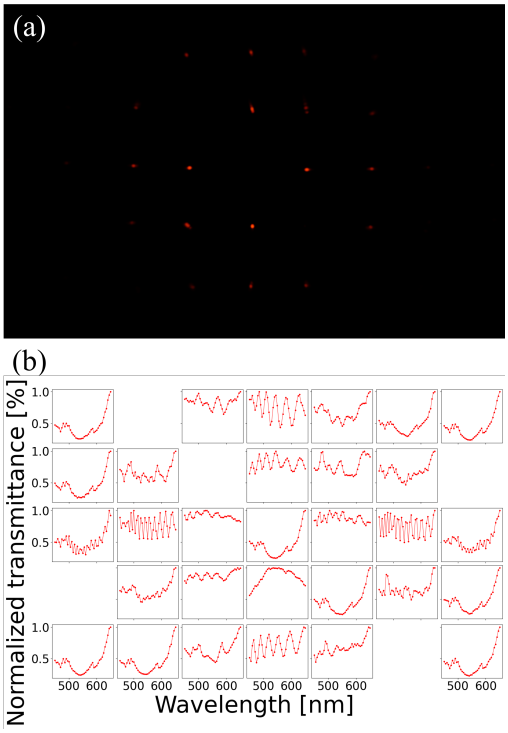


図 5: (a) 一点分光における符号化画像. (b) 検出した点における正規化した分光透過率. ただし, グラフが欠落している部分は検出に失敗している.

再構成精度の検証にあたっては，符号化画像から円検出により鏡像を抽出し，30 個の chamber を使用した．観測された鏡像の総数は 35 個であったが，鏡面の不整合によって一部は利用できなかったため，円検出に成功した 30 個のみを用いた．図 5に，(a) 撮影された符号化画像と，(b) 対象点における分光透過率を示す．この結果から，反射回数の増加に伴い透過スペクトルが多様に変化し，多様な波長符号化を実現できることが分かる．

図 7 に分光器 (Ocean Optics Maya 2000) によって得られたスペクトルとの比較を示す．ただし, 強度については最大値が 1 になるように正規化している．真値と比較して，ピークの波長 (CWL) と半値幅 (FWHM) に関して定性的な一致がみられ，特に半値幅が短い分光分布でも再構成が可能であることを確認した．今後は，波長符号化の多様性に関する定量的な評価や，さまざまな半値幅を持つ光源を用いた追加実験を通じて，波長分解能に関する検証を進める．

ハイパースペクトルイメージング

カラーチェッカーを被写体としたハイパースペクトルイメージングの実験により，「像複製数と光学スループットのトレードオフ」の緩和を確認した．光源の分光分布を gray

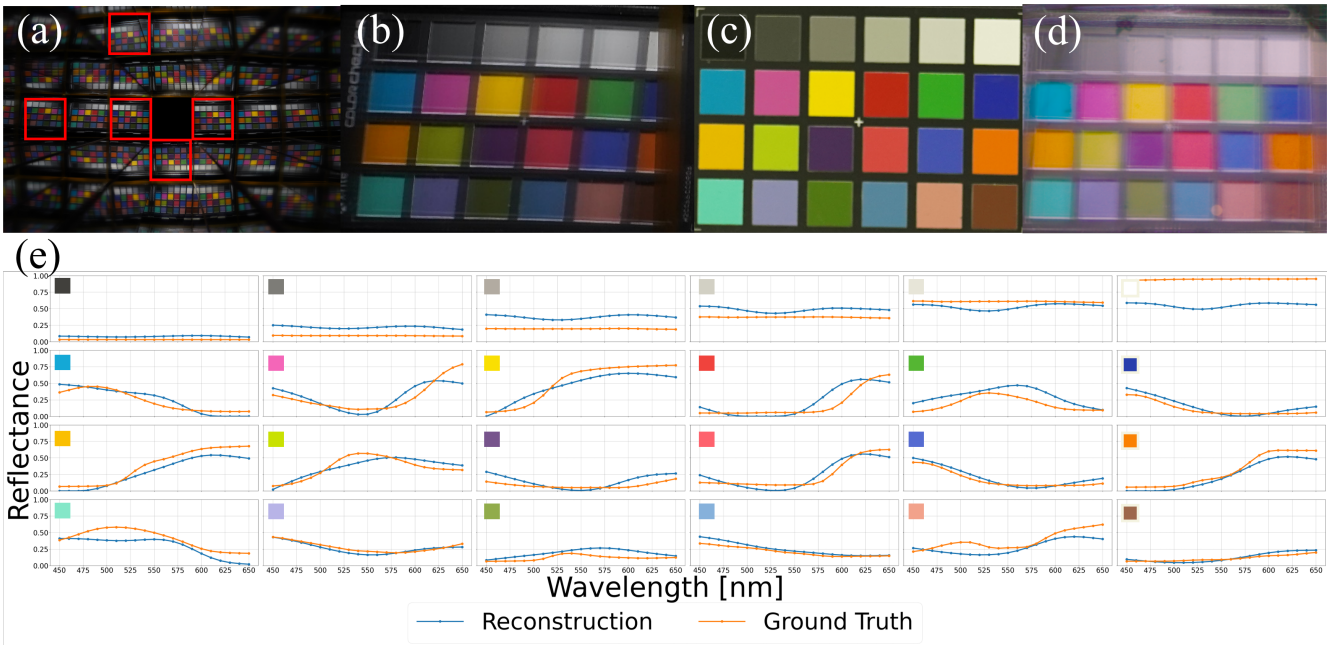


図 6: 実環境におけるカラーチェッカーの再構成結果. (a) 符号化画像. ただし赤枠の chamber を推定に利用している. (b) 符号化画像の拡大図. (c) リファレンス画像. (d) 再構成した RGB 画像. (e) 一点における分光分布の真値との比較.

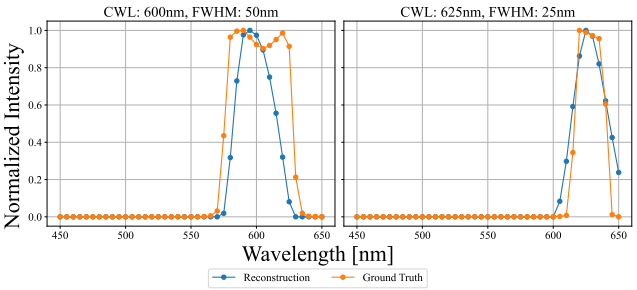


図 7: 一点分光の再構成結果

balance target から推定し, X-Rite ColorChecker Passport Photo 2 の分光反射率の再構成を試みた. その際, chamber の位置合わせについては, ArUco マーカを用いて変換行列を推定し, マーカ検出に成功した 5 個の chamber(図 6(a)) を分光分布の再構成に用いた.

図 6(e)の再構成スペクトルと真値との比較において，全サンプルの RMSE は 0.127, 緑, 赤, 黄のチップにおける RMSE はそれぞれ 0.131, 0.123, 0.115 であった. 3 つのチップのうち 2 つで，先行研究 [16] よりも良好な結果が得られた. 今回製作したプロトタイプおよびマーカ検出手法では 5 個の Chamber しか用いることができなかったが, 全 Chamber の画像図 6(a)から，反射回数の増加に伴っても複製像の明るさが大きく低下していないことが確認され, 高い光学スループットが維持されていることが確認できた. これにより，「像複製数と光学スループットのトレードオフ」の緩和が検証された.

ただし, 万華鏡を構成する鏡同士の繋ぎ目に起因する Chamber 内での画像の欠損により, 少なくとも base chamber から斜め四方向の位置にある chamber 群はハイパースペクトルイメージングへの利用が困難であることが確認された. また, 図 6(c)と比較すると，図 6(d)で示した再構成した画像にはぶれがみられ，これは位置合わせの不完全さに起因するとみられる. これらへの対応は今後の課題である.

4. 結論

本研究では, 万華鏡と複屈折媒体を組み合わせた, add-on 型スナップショット HSI 手法を提案した. 実機を試作することで，システムサイズを維持した状態で「像複製数と空間解像度のトレードオフ」に変換できることを示した. また，複屈折媒体を用いることで多様な波長符号化を実現できることを示すことで，「像複製数と光学スループットのトレードオフ」を緩和できることを定性的に確認した. 一点分光, ハイパースペクトルイメージングとして, 分光分布の再構成結果を評価し，提案手法の有効性を確認した. 今後, 本研究により顕在化した位置合わせを中心とした課題の克服と波長分解能や空間分解能に関する定量的評価実験の充実に取り組む.

謝辞

松浦光希と新宅慶騎に助言に対し深謝の意を表す. 本研究は, JSPS 科研費 JP23H00499 および JST CREST JPMJCR23N3 の支援を受けて実施された.

参考文献

[1] August, I., Oiknine, Y., AbuLeil, M., Abdulhalim, I. and Stern, A.: Miniature compressive ultra-spectral imaging system utilizing a single liquid crystal phase retarder, *Scientific reports*, Vol. 6, No. 1, pp. 1–9 (2016).

[2] Baek, S.-H., Kim, I., Gutierrez, D. and Kim, M. H.: Compact single-shot hyperspectral imaging using a prism, *ACM Trans. Graph.*, Vol. 36, No. 6 (2017).

[3] Bian, L., Wang, Z., Zhang, Y., Li, L., Zhang, Y., Yang, C., Fang, W., Zhao, J., Zhu, C., Meng, Q., Peng, X. and Zhang, J.: A broadband hyperspectral image sensor with high spatio-temporal resolution, *Nature*, Vol. 635, No. 8037, pp. 73–81 (2024).

[4] Ding, K., Wang, M., Chen, M., Wang, X., Ni, K., Zhou, Q. and Bai, B.: Snapshot spectral imaging: from spatial-spectral mapping to metasurface-based imaging, *Nanophotonics*, Vol. 13, No. 8, pp. 1303–1330 (2024).

[5] Du, H., Tong, X., Cao, X. and Lin, S.: A prism-based system for multispectral video acquisition , *2009 IEEE 12th International Conference on Computer Vision (ICCV)*, Los Alamitos, CA, USA, IEEE Computer Society, pp. 175–182 (2009).

[6] Gu, H., Chen, X., Zhang, C., Jiang, H. and Liu, S.: Study of the retardance of a birefringent waveplate at tilt incidence by Mueller matrix ellipsometer, *Journal of Optics*, Vol. 20, No. 1, p. 015401 (2017).

[7] Hagen, N. A. and Kudenov, M. W.: Review of snapshot spectral imaging technologies, *Optical Engineering*, Vol. 52, No. 9, p. 090901 (2013).

[8] Jeon, D. S., Choi, I. and Kim, M. H.: Multisampling compressive video spectroscopy, *Proceedings of the 37th Annual Conference of the European Association for Computer Graphics*, EG '16, Goslar, DEU, Eurographics Association, p. 467–477 (2016).

[9] Ji, Y., Tan, F., Zhao, S., Feng, A., Zeng, C., Liu, H. and Wang, C.: Spatial-spectral resolution tunable snapshot imaging spectrometer: analytical design and implementation, *Appl. Opt.*, Vol. 62, No. 17, pp. 4456–4464 (2023).

[10] Kawahara, R., Kuo, M.-Y. J. and Nobuhara, S.: Teleidoscopic Imaging System for Microscale 3D Shape Reconstruction, *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 20813–20822 (2023).

[11] Manakov, A., Restrepo, J. F., Klehm, O., Hegedüs, R., Eisemann, E., Seidel, H.-P. and Ihrke, I.: A reconfigurable camera add-on for high dynamic range, multispectral, polarization, and light-field imaging, *ACM Trans. Graph.*, Vol. 32, No. 4 (2013).

[12] Mas, A., Druart, G., Bouchon, P., Vincent, G., Favier, S., Compain, E. and Guérineau, N.: Three multispectral configurations of a snapshot kaleidoscope-based camera in long wavelength infrared spectral band, *Appl. Opt.*, Vol. 59, No. 26, pp. 7779–7791 (2020).

[13] Salesin, K., Seyb, D., Friday, S. and Jarosz, W.: Diy hyperspectral imaging via polarization-induced spectral filters, *2022 IEEE International Conference on Computational Photography (ICCP)*, IEEE, pp. 1–12 (2022).

[14] 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).

[15] Shi, Z., Chugunov, I., Bijelic, M., Côté, G., Yeom, J., Fu, Q., Amata, H., Heidrich, W. and Heide, F.: Split-Aperture 2-in-1 Computational Cameras, *ACM Trans. Graph.*, Vol. 43, No. 4 (2024).

[16] Takatani, T., Aoto, T. and Mukaigawa, Y.: One-shot hyperspectral imaging using faced reflectors, *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 4039–4047 (2017).

[17] Wagadarikar, A., John, R., Willett, R. and Brady, D.: Single disperser design for coded aperture snapshot spectral imaging, *Appl. Opt.*, Vol. 47, No. 10, pp. B44–B51 (2008).

[18] Wang, Z., Yi, S., Chen, A., Zhou, M., Luk, T. S., James, A., Nogan, J., Ross, W., Joe, G., Shahsafi, A. et al.: Single-shot on-chip spectral sensors based on photonic crystal slabs, *Nature communications*, Vol. 10, No. 1, p. 1020 (2019).

[19] Wu, X., Gao, D., Chen, Q. and Chen, J.: Multispectral imaging via nanostructured random broadband filtering, *Optics Express*, Vol. 28, No. 4, pp. 4859–4875 (2020).

[20] Xu, T., Wu, Y.-K., Luo, X. and Guo, L. J.: Plasmonic nanoresonators for high-resolution colour filtering and spectral imaging, *Nature communications*, Vol. 1, No. 1, p. 59 (2010).

[21] 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).

[22] Yang, J., Cui, K., Cai, X., Xiong, J., Zhu, H., Rao, S., Xu, S., Huang, Y., Liu, F., Feng, X. et al.: Ultraspectral imaging based on metasurfaces with freeform shaped meta-atoms, *Laser & Photonics Reviews*, Vol. 16, No. 7, p. 2100663 (2022).