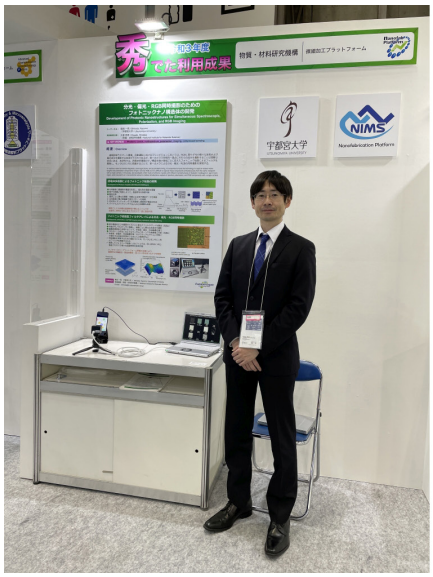
NanotechJapan Bulletin

本記事は , 文部科学省ナノテクノロジープラットフォーム事業 秀でた利用成果について紹介するものです .

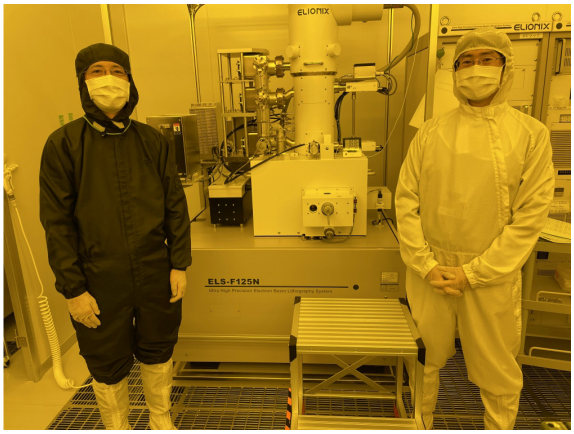
文部科学省ナノテクノロジープラットフォーム 令和 3 年度秀でた利用成果

分光・偏光・RGB 同時撮影のためのフォトニックナノ構造体の開発

宇都宮大学　篠田 一馬
物質・材料研究機構　大里 啓孝



宇都宮大学　篠田 一馬



（左）物質・材料研究機構　大里 啓孝,
（右）宇都宮大学　篠田 一馬

1．はじめに

IoT や AI 技術の発展に伴い，自動化技術を支えるカメラの果たす役割が多様化し，その重要度が高まっている．現行の多くのカメラは人が目で見たものと同じ色（RGB）を再現するという観点で製造されているが，近年のマシンビジョンにおいては，人が関知できない波長や偏光のセンシングが不可欠である．例えばスマート農業では，ドローンにハイパースペクトルカメラを搭載し，可視光から近赤外光の成分を解析することで，植生活性度や土壌の監視を行っている [1]．自動運転では，距離計測やナイトビジョン用途として近赤外光を，道路標識や路面の認識に分光による色補正を，また，路面の湿潤判断や濃霧時の視界改善に偏光を利用する検討が進められている [2][3]．これらの光情報のセンシングには，光電変換素子の前方に測定目標の光のみを透過するフィルタを設置することが一般的である．しかし，測定対象の成分が多いと光学系は複雑になり，複数のセンサやカメラ，または微細なフィルタアレイを必要とすることから，製造容易性，光学系の規模，撮影情報の統合のための後処理など，多くの課題が残っている．

本研究では，ナノ微細構造を持つ誘電体多層膜の光学特性を利用して新たなフィルタを開発することで，単一のカメラかつ単一の露光撮影で，RGB を含む複数の波長帯と偏光成分を同時に撮影する方法を検討している．本稿では，この同時撮影に関する技術的な解説に併せて，ナノテクノロジープラットフォームを利用するに至った経緯を紹介する．

2．コンピュテーショナルイメージング

特定の光情報をパッシブ型でイメージングする場合，一般的には光電変換素子の前方に色素や多層干渉膜を利用した透過型のフィルタを設置する．複数の成分を同時に観測する場合は，複数台のカメラを設置するか，または 1 台のカメラにおいてイメージャの画素ごとに異なるフィルタ（フィルタアレイ）を利用する．RGB 成分の撮影であれば，量産化技術が確立されているためフィルタ

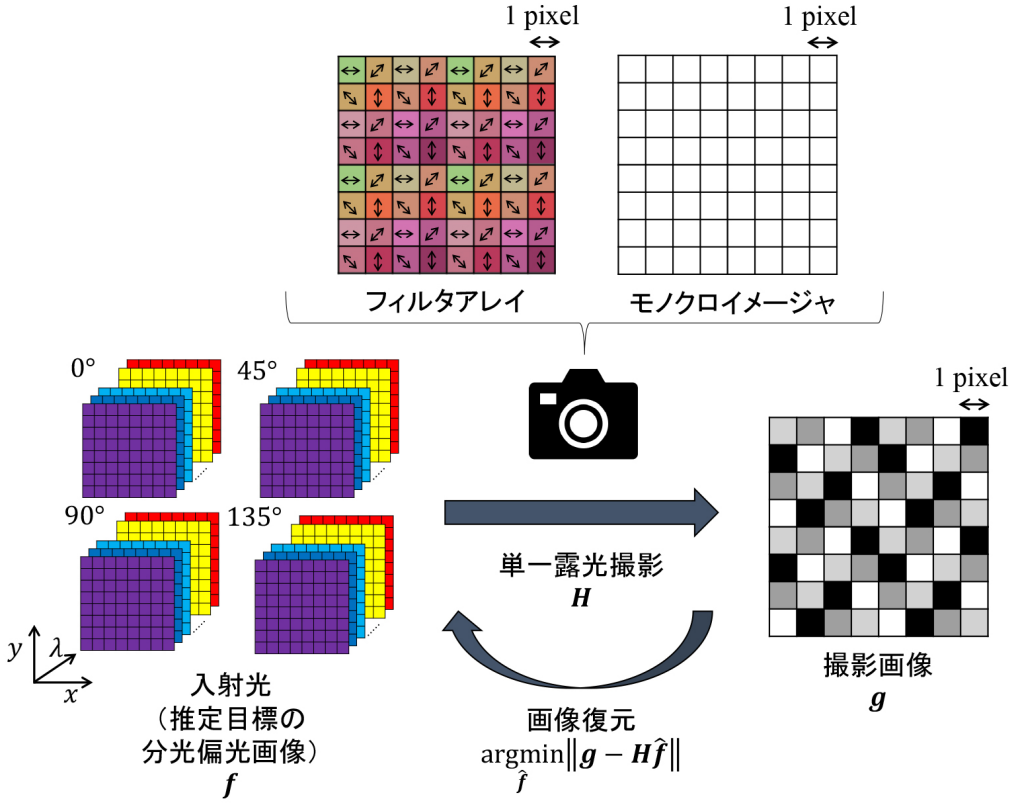


図 1　フィルタアレイによる分光偏光画像の撮影の概念図.

アレイ方式が広く採用されているが，異なる波長帯や偏光を同時にセンシングするためには，新たに色素を開発するか，多層干渉膜などの成膜プロセスを画素ごとに変える必要があり，コストの問題から開発例は極めて限られている [4][5].

この問題を解決する手段の一つとして，我々はコンピュテーショナルイメージングに着目している．コンピュテーショナルイメージングとは，光学系と信号処理系を統合した系とみなして設計することで，従来の撮像系にはない高機能性や多機能性を獲得するアプローチである．このアプローチをフィルタアレイによる観測に適用した概念図を**図 1** に示す．ここで，カメラに入射する光は空間・波長・偏光成分をそれぞれ離散化した四次元のデータ（測定目標の分光偏光画像）と想定した上で，同一解像度のフィルタアレイおよびモノクロイメージャで撮影し，同一解像度のモノクロ画像を一枚撮影する状況を想定する．測定目標の分光偏光画像を未知の N 次元ベクトル $\boldsymbol{f}$，フィルタアレイおよびイメージャを合わせた既知の感度特性を線形観測行列 $\boldsymbol{H}$，既知の撮影信号を M 次元ベクトル $\boldsymbol{g}$ とすると，フィルタアレイによる撮影は $\boldsymbol{g} = \boldsymbol{Hf}$ と表現できる [6]．ここで，$\boldsymbol{g} = \boldsymbol{Hf}$ の式から $\boldsymbol{f}$ を求めることがコンピュテーショナルイメージングにおける画像復元処理に相当する．もしフィルタアレイが理想的なバンドパスまたは直線偏光フィルタであるならば，モノクロ画像の各画素はある特定の波長または偏光を意味する測定値となるため，撮影信号の値から入射光の分光偏光情報を直接知ることができる．一方で，もしフィルタアレイの透過特性が多峰性を持っていたとしても，各画素の感度特性がそれぞれ一次方程式を解けるほどに独立（ランダム）であれば，$\boldsymbol{g} = \boldsymbol{Hf}$ の方程式を $\boldsymbol{f}$ について解くことで，入射光の分光偏光情報をある程度知ることができる（ただし，一般的な観測環境では解は一意にならないため，圧縮センシング理論 [7] を用いるなどの工夫が必要となる）.

つまり，画像復元処理を行う前提であれば，観測光学系は必ずしも理想的なバンドパスや直線偏光フィルタを用いる必要はなく，各画素の透過特性の線形独立性が確保できればよいことになり，フィルタアレイの開発自由度が大幅に向上する.

3．誘電体多層膜によるフォトニック結晶

分光偏光フィルタアレイの製造容易性と透過特性の多様性を両立する方法として，我々はフォトニック結晶に着目している．異なる屈折率を持つ二種類以上の材料を光の波長スケールで周期的に配列させると，周期と同程度の波長の光はブラッグ反射するため，特異な光学特性を示す．このような光に対してバンドギャップを持つ構造体はフォトニック結晶と呼ばれ，導波路，共振器，分光器など様々な応用が期待されている．例えば 300nm 程度の周期で膜厚方向に積層した多層膜も可視光領域では一次元のフォトニック結晶と見なせ，また，平面基板の

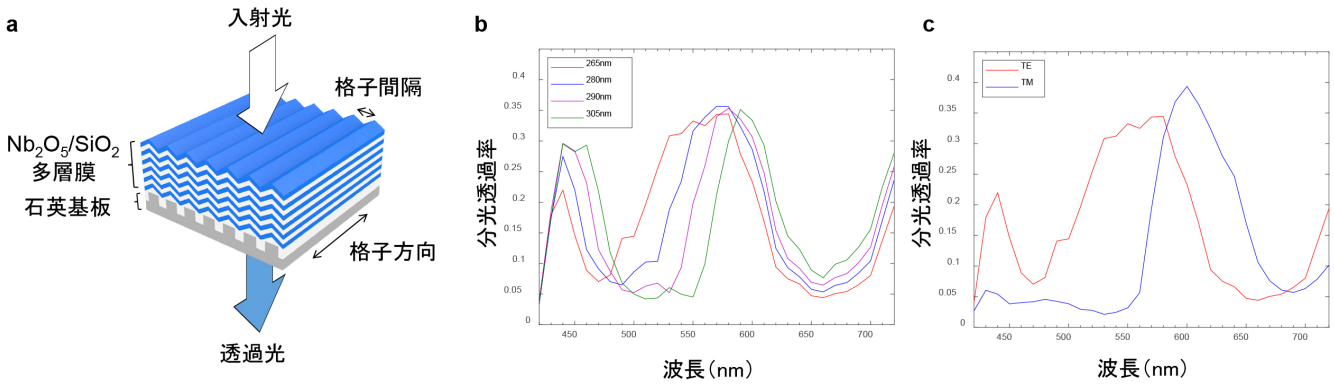


図 2　誘電体多層膜による二次元フォトニック結晶．a 概観図，b 格子間隔と TE 波透過特性，c TE 波と TM 波の透過特性．

二次元平面方向に周期的に屈折率の異なる構造体を並べたものは，典型的な二次元フォトニック結晶として知られている．

図 2 に，誘電体多層膜による二次元フォトニック結晶の実現例を示す [8][9][10][11]．これは凹凸のある基板上に高屈折率膜と低屈折率膜からなる多層膜を積層したものである．単純なスパッタリングで成膜した場合であっても数層は三角波の形状を維持するが，膜厚や層数が多い場合は自己クローニング法 [8][9] によって傾斜を維持している．この構造は，膜厚や膜材料を調整することでバンドギャップを移動できるだけでなく，基板の格子ピッチを変えることでもバンドギャップを移動できるため，その波長選択性や偏光選択性を利用した光学素子や偏光カメラが提案されている [12]．

図 2 の構造では膜厚方向および格子方向の周期に依存するバンドギャップが生じるものの，それ以外の光は基本的に透過するため，狭帯域なバンドパスフィルタ（または広範囲な波長帯で消光比が高い直線偏光フィルタ）の設計難度は高い．これは，二次元平面におけるホールアレイ型のフォトニック結晶を透過フィルタとして利用した場合も同様の傾向があり [13]，フォトニック結晶を特定の波長や偏光を観測するためのフィルタとして利用する例は限られていた．

しかし，**図 1** のコンピュテーショナルイメージングの考え方に基づいた画像復元処理を行う場合は，フィルタの減衰特性や多峰性は問題ではなく，透過特性の多様性を容易に確保できるかがキーとなる．その点，**図 2** のフォトニック結晶は，成膜材料，膜厚，層数は一定のまま，ベース基板の格子構造を変えるだけで，多様な透過特性を獲得できる．さらに，TE 波と TM 波で異なる透過特性を本質的に持つことから，格子の向きによって偏光成分の透過特性を制御できる．つまり図 2 のフォトニック結晶は，分光のための線形観測基底であると同時に，偏光のための線形観測基底でもあることから，分光偏光フィルタアレイとみなせる．よって，微細構造を画素領域ごとに変えたフォトニック結晶を製造してイメージャに搭載することで，広い波長範囲の分光と偏光を同時復元し，さらに可視光を含む場合は RGB 成分をも復元するイメージングを実現できる可能性がある．

4．ナノテクノロジープラットフォームの利用経緯

フォトニック結晶による分光偏光 RGB の同時イメージングの着想はスムーズに進んだものの，本プロジェクトの代表である篠田は情報工学を専門としており，プロジェクト開始当初の時点ではナノテクノロジーに関する知見はほぼ持ち合わせていなかった．初期のころは東北大学（現所属は富山県立大学）の大寺康夫教授に相談し，株式会社フォトニックラティスを始めとした複数のメーカーの協力の元，原理試作を進めていた．しかし分光偏光フィルタアレイは微細パターンの形状が特殊であり，成膜材料である Nb_2O_5 の成膜実績が少なかったことから，メーカーへの作業委託が思うように進まず，結局は自身で開発する必要が生じることとなった．その頃にナノテクノロジープラットフォームの存在を知り，東北大学において電子線描画装置を，産業技術総合研究所においてドライエッチング装置を用いた検証を自身で進め，最終的に物質・材料研究機構にて全製造工程を一括で検証できる可能性を見出した．同機構の大里啓孝氏にそれまでの経緯を相談したところ，わずか 1 週間で条件出しが完了し，1 か月程度で目標としていたフィルタアレイの基板試作が完了した．この迅速性は，実施機関の機器の性能だけでなく，運営スタッフの技術力の高さ，さらにナノテクノロジープラットフォーム事業の機関同士の連携によるものであり，単身では成しえなかった成果だと考えられる．

5．フォトニック結晶によるフィルタアレイの開発

図 3 に，フォトニック結晶の製造工程を示す．まず石英基板にレジストを塗布し，電子線描画にて格子パター

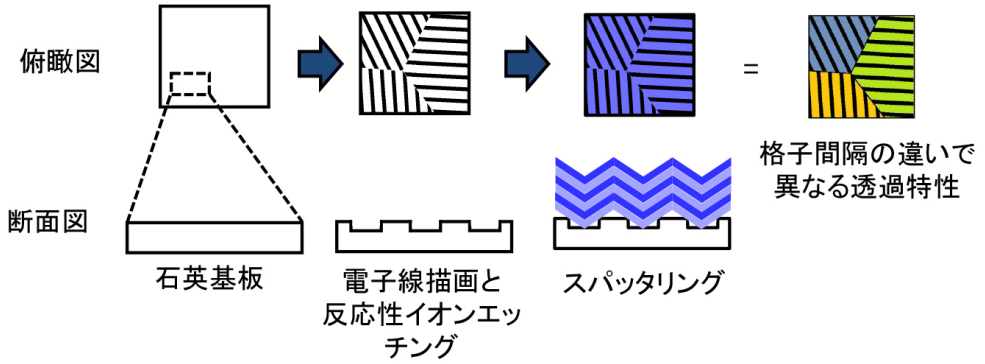


図 3　多層膜型フォトニック結晶の製造の流れ.

ンを転写する．この格子パターンは，搭載するイメージャの画素領域に合わせて格子間隔と角度をデザインするが，可視光のイメージングを想定するため，格子間隔はおよそ 240 から 390nm の範囲内とする．次に反応性イオンエッチングにてレジストをマスクとして深さ約 150 から 170nm の格子を形成する．最後に，Nb_2O_5/SiO_2 多層膜をスパッタリングする．完成したフォトニック結晶は，基板の格子構造の違いにより，異なる透過特性を示すことになる．

図 4 に，イオンエッチングまで完了した石英基板の電子顕微鏡画像を示す．実施機関による条件出しの結果，深さ約 150nm，周期約 240 から 390nm の微細格子構造が明瞭に形成されているのがわかる．**図 5** に，成膜後のフォトニック結晶表面の電子顕微鏡画像を示す．こちらも格子構造が明瞭に維持されており，かつ領域ごとに異なる格子が形成されていることが判断できる．

図 6 に，成膜したフォトニック結晶の光学顕微鏡画像を示す．この画像中のフォトニック結晶は全体が一枚の石英基板であり，(a) の領域は搭載イメージャの画素サイズである 4.65μm 四方ごとに異なる格子パターンを，(b) の領域は画素サイズに関わらずランダムな格子パターンを形成したものである．**図 6** の通り，このフィルタの微細格子構造とその空間パターンは電子線描画時のパターンデータにより容易に変更できるため，様々な分光・偏光フィルタを同時に製造できるだけでなく，イメージャの画素ピッチに合わせたフィルタアレイ [14]（**図 6**（a）の領域）や，その技術を応用してステンドグラス状のパターン（**図 6**（b）の領域）も製造できる．このランダムパターンは，イメージャの画素との位置合わせをせずともフィルタアレイとして作用するため，世界で初めて「位置合わせが不要なフィルタアレイ」という新しいイメージング方法を確立した [15].

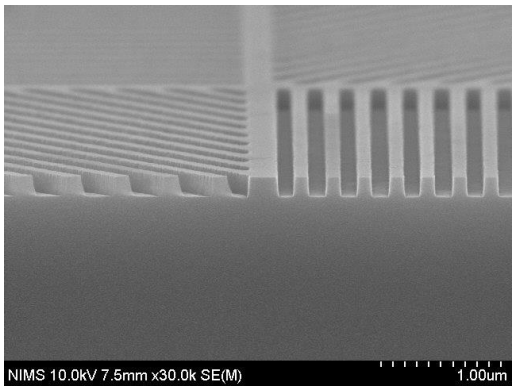


図 4　微細加工後の石英基板の電子顕微鏡画像.

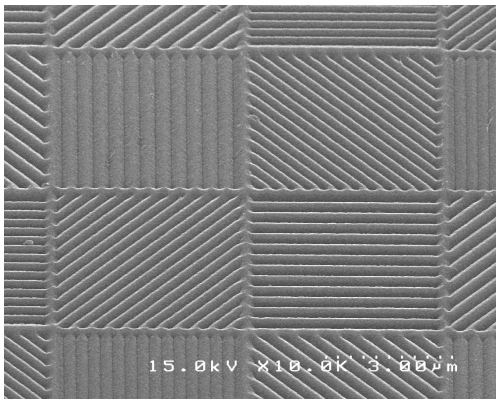


図 5　成膜後のフォトニック結晶表面の電子顕微鏡画像.

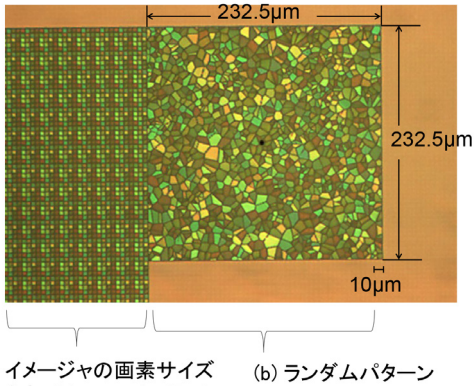


図 6　開発したフォトニック結晶の光学顕微鏡画像（20 倍）.
（a）は 4.65μm 四方の領域,
（b）はランダムな領域で格子パターンを変えたもの.

6．スナップショット分光偏光 RGB カメラの開発

図 6 の開発フィルタを市販のモノクロイメージャのセ

ンサ表面に UV 硬化にて搭載することで，分光と偏光を同時に撮影するカメラを製造した．規則的なフィルタアレイパターンの場合は搭載時に画素ピッチ精度の位置合わせが必要であるが，ランダムパターンであれば位置合わせは不要であり，代わりに搭載後の補正作業を必要とする．

開発カメラによる撮影信号は多波長かつ多偏光の成分が混在した信号となるため，コンピュテーショナルイメージングの考え方を応用し，撮影画像から各成分を復元するプログラムを作成した．復元画像をリアルタイムかつ同時に表示するアプリケーションを作成してデモンストレーションを行った様子を図 7 に示す．**図 7** の通り，420nm から 720nm の任意の波長帯成分，任意の直線偏光成分，さらに RGB 画像をリアルタイムに可視化するシステムを実現した．また，色味や各成分をわかりやすくするために，液晶画面に表示された水玉模様を撮影した際の撮影画像と 7 つの復元成分（非偏光 RGB，水平偏光 RGB，垂直偏光 RGB，非偏光 400nm，垂直偏光 500nm，水平偏光 600nm，垂直偏光 700nm）を**図 8** に示す．**図 8** の RGB 画像から各水玉の色味が判断できると同時に，波長ごとの成分の強弱がわかり，さらに，（液晶画面からの出射光のため）垂直偏光がほとんど観測されていないこともわかる．復元画像のノイズ削減は今後の課題であるが，複数の波長，偏光，RGB 成分をリアルタイムかつ同時に可視化するカメラを，極めて短期間で実現することができた．

図 7　分光・偏光・RGB の
リアルタイム同時撮影のデモンストレーション．

7．おわりに

本研究は，単一のカメラで多波長・多偏光・RGB を同時に復元できる可能性を世界で初めて示し，さらに，センサとの位置合わせが不要なランダムフィルタによるイメージングの概念を世界で初めて確立した．加えて，それらを実現するフォトニック結晶フィルタは，イメージャ領域全体に渡って同一素材かつ同一プロセスで製造できるため，多機能性・製造容易性・低コスト性を兼ね備えている．これらの成果は，実施機関の高度な微細加工技術と情報工学の知見が組み合わさることで初めて実現されたものであり，ナノテクノロジープラットフォーム事業による支援がなくては成しえなかった成果である．

今後は微細構造パターンとアルゴリズムの改良による画質改善を進めるとともに，量産化技術を確立し，スマート農業や自動運転，遠隔診断に向けた応用検討を行う予定である．

謝辞

本研究の一部は，文部科学省ナノテクノロジープラットフォーム事業（物質・材料研究機構 微細加工プラットフォーム，F-21-NM-0011）の支援を受けて実施された．物質・材料研究機構の大里啓孝氏と津谷大樹氏，富山県立大学の大寺康夫教授，株式会社フォトニックラティスの川嶋貴之氏，および基礎検討を実施した東北大学と産業技術総合研究所の関係者各位に深く感謝する．

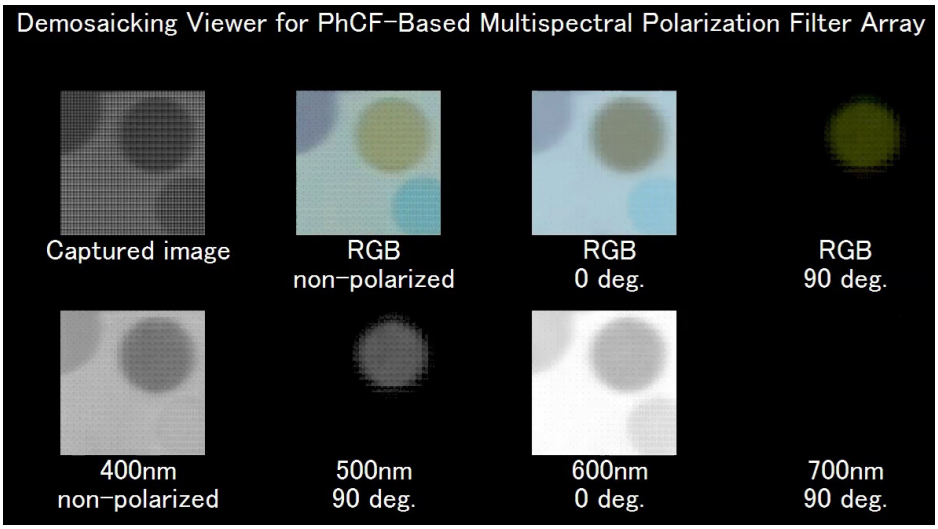


図 8　液晶画面に表示した水玉模様を撮影した際の復元画像．

また，本研究の一部は，科学研究費助成事業基盤研究（C）（18K11368，21K11952），JST A-STEP 機能検証フェーズ試験研究タイプ（VP30218088082），中島記念国際交流財団若手研究者研究助成，電気通信普及財団研究調査助成，村田学術振興財団研究助成の支援を受けて実施された．

参考文献

[1] “ 令和 3 年度農業分野におけるドローンの活用状況 ,” 農林水産省農産局技術普及課 (2021).
[2] Foresight Autonomous Holdings Ltd., CES 2021 Conference, Jan. (2021).
[3] N. A. Rubin, G. D'Aversa, P. Chevalier, Z. Shi, W. T. Chen, and F. Capasso, “Matrix Fourier optics enables a compact full-Stokes polarization camera,” Science, vol. 365, no. 6448 (2019).
[4] Y. Monno, S. Kikuchi, M. Tanaka, and M. Okutomi, “A practical one-shot multispectral imaging system using a single image sensor,” IEEE Trans. on Image Process. 24(10), 3048–3059 (2015).
[5] B. Geelen, C. Blanch, P. Gonzalez, N. Tack, A. Lambrechts, "A tiny VIS-NIR snapshot multispectral camera," Proc. SPIE 9374, Advanced Fabrication Technologies for Micro/Nano Optics and Photonics VIII, 937414 (2015).
[6] K. Shinoda, K. Yokoyama, and M. Hasegawa, "General demosaicking for multispectral polarization filter arrays using total generalized variation and weighted tensor nuclear norm minimization," Applied Optics 60(20), 5967-5976 (2021).
[7] D. L. Donoho, "Compressed sensing," IEEE Transactions on Information Theory, vol. 52, no. 4, 1289-1306 (2006).
[8] S. Kawakami, “Fabrication of submicrometre 3D periodic structures composed of Si/SiO_2,” Electron. Lett. 33(14), 1260–1261 (1997).
[9] T. Kawashima, Y. Sasaki, K. Miura, N. Hashimoto, A. Baba, H. Ohkubo, Y. Ohtera, T. Sato, W. Ishikawa, T. Aoyama, and S. Kawakami, “Development of autocloned photonic crystal devices,” IEICE Trans. Electron. E87-C(3), 283–290 (2004).
[10] Y. Ohtera, T. Onuki, Y. Inoue, and S. Kawakami, “Multichannel Photonic Crystal Wavelength Filter Array for Near-Infrared Wavelengths,” IEEE J. Lightwave Technol. 25(2), 499–503 (2007).
[11] Y. Ohtera, D. Kurniatan, and H. Yamada, “Design and fabrication of multichannel Si/SiO2 autocloned photonic crystal edge filters,” Appl. Opt. 50(9), 50–54 (2011).
[12] 川上 彰二郎 , 川嶋 貴之 , 井上 喜彦 , 本間 洋 , 佐藤 尚 , 太田 晋一 , 長嶋 聖 , 青木 孝文，“ フォトニック結晶偏光子を用いた偏光イメージングカメラの開発 ,” 電子情報通信学会論文誌 C, 90(1), 17-24 (2007).
[13] Z. Wang, S. Yi, A. Chen, M. Zhou, T. S. Luk, A. James, J. Nogan, W. Ross, G. Joe, A. Shahsafi, K. X. Wang, M. A. Kats, and Z. Yu, “Single-shot on-chip spectral sensors based on photonic crystal slabs,” Nat. Commun. 10(1), 1020 (2019).
[14] K. Shinoda, Y. Ohtera, M. Hasegawa, "Snapshot multispectral polarization imaging using a photonic crystal filter array," Opt. Express, 26(12), 15948-15961 (2018).
[15] K. Shinoda and Y. Ohtera, "Alignment-free filter array: Snapshot multispectral polarization imaging based on a Voronoi-like random photonic crystal filter," Opt. Express 28(26), 38867-38882 (2020).

（宇都宮大学　篠田 一馬）

NIMS
Nanofabrication Platform

【お問い合わせ】
微細加工プラットフォーム
NIMS 微細加工プラットフォーム
☎ 029-859-2797
E-mail　NIF-office(at)nims.go.jp

ホームページ
https://www.nims.go.jp/nfp/