

令和 6 年 5 月 7 日現在

機関番号：12201
研究種目：基盤研究(C)（一般）
研究期間：2021～2023
課題番号：21K11952
研究課題名（和文）ランダムフォトリック結晶によるアライメントフリーな分光偏光同時撮像法の創出

研究課題名（英文）An alignment-free multispectral polarization imaging method using random photonic crystals

研究代表者
篠田 一馬（Shinoda, Kazuma）

宇都宮大学・工学部・准教授

研究者番号：50639200
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、ランダム構造を持つフォトリック結晶フィルタを開発し、モノクロイメージャに位置合わせをせずに搭載するだけで、単一カメラかつ単一露光撮影で分光・偏光・RGB画像を撮影できるイメージング方法を確立する。提案フィルタはセンサ平面上でフィルタをどのように移動・回転させても、そのランダム性からある特定の分光偏光フィルタアレイとして動作するため、位置合わせをせずに搭載するだけで目的のカメラが完成する。本研究期間では、フィルタパターンと画像復元手法の双方を新たに開発し、ワンショット撮影画像から高品質な分光偏光画像を復元可能であることが確認された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、アライメントフリーの概念・ナノマテリアル・情報処理を相補的に融合することで分光偏光RGBの同時イメージングを達成することに本研究の独自性がある。本研究の成果は、フィルタアレイの枠を超えた新たなイメージング体系を学術的に開拓することに創造性があることに加え、小型・安価・製造容易な分光偏光RGBカメラの実現可能性を同時に示すことで、自動運転や小型内視鏡への貢献が期待できる点に社会的創造性がある。

研究成果の概要（英文）：In this study, we develop a photonic crystal filter with a random structure and establish an imaging method that can capture spectral, polarization, and RGB images with a single camera and a single exposure by simply mounting the filter on a monochrome imager without alignment. The proposed filter works as a specific multispectral polarization filter array due to its randomness no matter how the filter is moved or rotated on the sensor plane, so that the desired camera can be completed by simply mounting the filter without alignment. In this research period, both the filter pattern and the image restoration method were newly developed, and it was confirmed that high-quality spectropolarization images can be restored from a mosaic image.

研究分野：画像情報光学

キーワード：画像処理 分光イメージング 偏光イメージング フィルタアレイ 圧縮センシング フォトリック結晶

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

RGB を超えた分光および偏光画像の撮影は、戦略的イノベーション創造プログラムの課題であるスマート農業や自動運転への貢献が期待されており、Society5.0 の実現に寄与する技術であるものの、実用上はその撮影方法に多くの課題が残っている。例えば、自動運転のための車載カメラでは、RGB による歩行者や障害物検知に加え、分光による色補正や偏光による悪天候時の視界改善が提案されているが、複数台のカメラを搭載することや画像の位置合わせが課題となっている(J. Kautz, CVPR 2018)。また、内視鏡の分光偏光撮影では、機材規模やプローブ構造の問題から(光導波路を曲げられない)硬性鏡への応用にとどまっている(J. Qi, Biomed. Opt. Express 2012)。分光偏光の同時撮影に関する提案としては、入射光をビームスプリッタで分離し、それぞれをカラーフィルタと偏光フィルタに通した上で二つの CCD で撮影する方法(Y. Zhao, Comput. vis. image underst. 2009)や、圧縮センシングを応用し、ランダムな観測基底による複数回撮影と L1 ノルム最小化による推定で分光偏光画像を取得する方法(C. Fu, J. Opt. Soc. Am. A 2015)が検討されているが、いずれも光学系が複雑かつ複数回の撮影を必要とする。画素ごとに異なる透過特性を持ったフィルタアレイにより対象物の分光偏光画像を撮影する試みもあるが(X. Tu, Opt. Express 2016)、バンドパスフィルタや偏光フィルタを単純に配列させるため、観測波長帯が制限されることに加え、二種類のフィルタを製造し μm 精度で位置合わせを行った上で積層する必要があり、製造容易性に課題が残る。

本研究構想の課題の本質は、「光学系の製造容易性を確保しつつ、分光・偏光・RGB を同時同一視点で撮影することができるか」という問いになる。現状ではそのような撮影方法は確立されていないため、分光・偏光撮影の応用展開を妨げる一つの要因となっている。

2. 研究の目的

本研究では、ランダム構造を持つフォトニック結晶フィルタを開発し、モノクロイメーჯャに位置合わせをせずに搭載するだけで、単一カメラかつ単一露光撮影で分光・偏光・RGB 画像を撮影できるイメージング方法を確立する。本研究で開発するフィルタは、図 1(a)のように、ランダムな微小領域(ポロノイセル)ごとに nm 精度の格子間隔と角度をランダムに変えたフォトニック結晶で、その微細格子構造の違いから微小領域ごとに異なる分光偏光透過特性を持つ。よってこのフィルタは図 1(b)のようなステンドグラス状に異なる色を持つ偏光フィルタの一種として見なせる。さらに、これを図 1(b)の白枠を境界としたモノクロイメーჯャに搭載すると、図 1(c)の通り画素ごとに異なる分光偏光特性を持つフィルタアレイと等価な特性となる。つまり、提案フィルタは図 1(a)の xy 平面上でフィルタをどのように移動・回転させても、そのランダム性からある特定の分光偏光フィルタアレイとして動作するため、位置合わせをせずに搭載するだけで目的のカメラが完成する。図 1(c)による撮影画像は様々な分光偏光成分が混在した複雑なデータとなるが、線形逆問題を解くことで、空間・波長・偏光成分を復元し、可視スペクトルから RGB 画像も生成できるイメージングとなる。

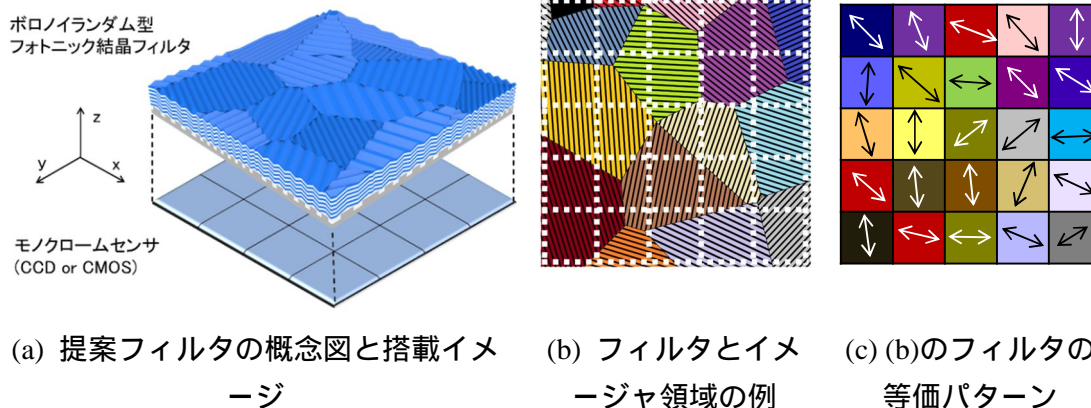


図 1 ランダムポロノイ型フォトニック結晶フィルタの概念図

3. 研究の方法

本課題では、理論検証（研究項目1）、試作機の製造（研究項目2）、感度計測と復元手法の開発・評価（研究項目3）を、それぞれ1年ずつ計3年で実施する。

研究項目1では、ランダムポロノイ構造を持つフォトニック結晶の光学特性を計算機上でシミュレーションし、実機試作に必要な多層膜構成を明らかにする。本研究項目では、空間・波長・偏光成分のランダム性が高くなるように図1(a)のパターンを決定するアルゴリズムを開発する。まず、ポロノイ領域（シードと面積）、格子間隔、格子角度をパラメータとしてランダムパターンを作成する。その上で等価パターンに変換し、電磁界シミュレーションにより多層膜の透過感度を画素ごとに求める。そのランダム性が高くなるようにパラメータを逐次更新し、最終的な成膜パターンを得る。

研究項目2では、研究項目1で得られたパターンに従って図2の手順に従いフィルタを製造する。まずベースの石英基板に電子線描画とエッチングによってパターンを転写し、Nb₂O₅/SiO₂多層膜を成膜する。この製造工程は物質・材料研究機構の共用機器利用にて申請者自身が実施する予定である。そして、製造したフィルタを市販のモノクロUSBカメラのイメージャにUV硬化にて接着することで、カメラの試作を行う。フィルタの製造可能性は事前に検証済みであり、図3に成膜表面の電子顕微鏡画像を示す。図から、ポロノイ構造をベースとし、破綻なくランダムな微細領域を形成していることがわかる。

研究項目3では、まず試作カメラの画素ごとの分光偏光特性を液晶可変波長フィルタにて測定する。その後、透過特性と撮影画像を元に線形逆問題を解くことで、単一撮影画像から分光偏光RGB画像を復元し、カラーチャートの反射率および偏光分離性について評価する。

1年目はシミュレーション用の計算機、2年目はフィルタとカメラの試作、3年目は透過特性評価に必要な機材を購入する予定である。申請者はこれまでフォトニック結晶搭載カメラを数台試作した経験があり、1台あたりの材料費と期間については100万円以内かつ1年以内であったことから、申請期間内かつ申請予算内で目標を達成できる可能性が高い。研究成果はNature PhotonicsまたはOSAやIEEEへ論文投稿を行い、学会発表を含め広く社会に発信する。

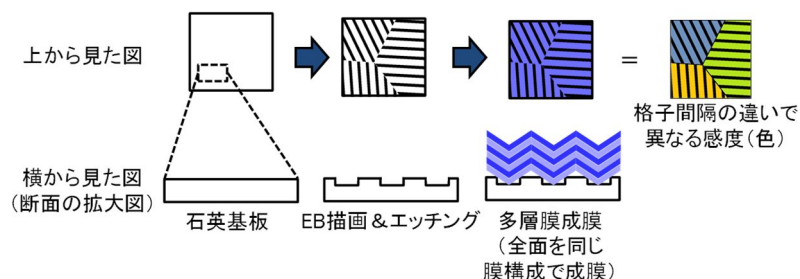


図2 フォトニック結晶の製造手順

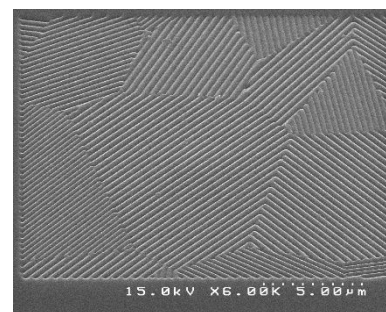
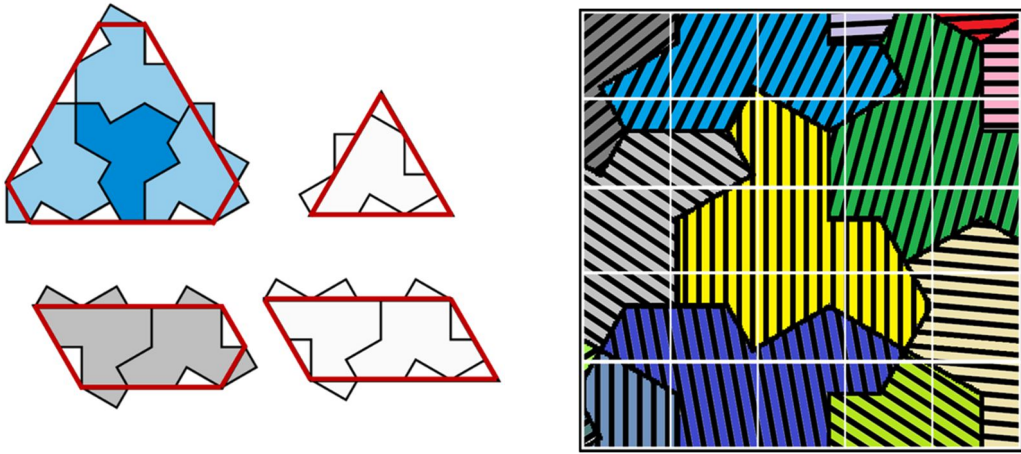


図3 事前検証（電子顕微鏡像）

4. 研究成果

あらかじめ設計していたポロノイ型ランダムフィルタアレイは、1つ1つのセルの形や大きさが違うため、1枚の画像内での復元精度に偏りが出してしまう問題点があった。そこで本研究では、1枚の画像内での復元の空間的偏差が少なくなる新たなランダムフィルタアレイとして、図4のhat型ランダムフィルタアレイを開発した。2次元の平面にタイルを隙間なく非周期的に敷き詰める研究は長年されており、特に1つの図形で充填できるかという未解決問題はEinstein(アインシュタイン)問題と呼ばれていた。これは2023年にSmithらが提案したhatタイル(D. Smith, 2023)により解決され、hatタイルのみで平面内を非周期的にタイリングできるだけでなく、並べ方に制限を加えなくても、図4(a)のメタタイル群を再帰的に配置することで、図4(b)のように非周期的にしか敷き詰められない性質を持つ。このパターンであれば各セルの面積と形状を変えることなく、任意の矩形領域内の合成透過特性のランダム性は変化しないため、ポロノイ型よりも空間的偏差が少ないパターンとなる。また、本パターンは図2における石英基板の描画パターンを変えるだけで実現できるため、フィルタ製造時の材料および製造プロセスを一切変更する必要がなく、コストの面でも実用性が高い。さらに、ランダムフィルタに適したデモザイクネットワークを新たに開発した。図5にそのネットワークを示す。入力の中間画像は(Wiener推定等による)一次補間画像であり、それをResNetベースの多段化された畳み込み層に通すことで、残差を得る。残差を入力画像に加えることで所望のデモザイク画像を得る構成となっている。



(a) 基本となるメタタイル (左上: H, 右上: T, 左下: P, 右下: F) (b) hat 型タイルの充填による周期性のないランダムフィルタのパターン
 図 4 hat 型タイルによるランダムフィルタパターン

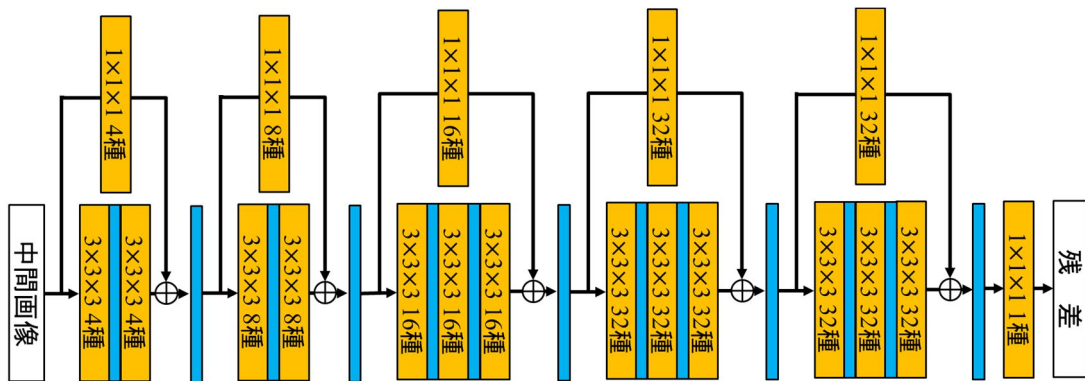


図 5 ランダムフィルタのためのデモザイクネットワーク



(a) 原画像 (b) 提案手法 (PSNR: 33.65 dB) (c) Wiener 推定 (PSNR: 25.39 dB)

図 6 復元画像の比較

提案法による画像復元実験を行った結果を図 6 に示す。提案法のような空間的に不規則なランダムフィルタはこれまで提案がないため、比較として線形逆問題を解くことでデモザイクを行う Wiener 推定による復元画像を図 6(c) に示す。図から明らかに提案手法の画質は高く、PSNR も大幅に改善していることがわかる。これはフィルタパターンの改良に加え、深層学習による分光偏光デモザイクを新たに開発したことで、波長、偏光成分の双方を利用した効果的な画質改善が達成されたと思われる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kazuma Shinoda, Kota Yokoyama, and Madoka Hasegawa	4. 巻 60
2. 論文標題 General demosaicking for multispectral polarization filter arrays using total generalized variation and weighted tensor nuclear norm minimization	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Optics	6. 最初と最後の頁 5967-5976
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/AO.426263	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 篠田一馬
2. 発表標題 分光・偏光・RGB画像の単一露光同時撮影
3. 学会等名 第150回オプティクス教育研究セミナー（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 篠田一馬
2. 発表標題 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
3. 学会等名 文部科学省ナノテクノロジープラットフォーム令和3年度利用成果発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 篠田一馬
2. 発表標題 スナップショット分光偏光カメラの開発
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第42回年次大会（招待講演）
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------