

令和 3 年 4 月 30 日現在

機関番号：12201
研究種目：基盤研究(C)（一般）
研究期間：2018～2020
課題番号：18K11368
研究課題名（和文）フォトニック結晶型フィルタアレイと圧縮センシングの融合による分光偏光イメージング

研究課題名（英文）Multispectral polarization imaging with photonic crystal filter array and compressed sensing

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） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、フォトニック結晶と圧縮センシングの融合により、対象物の分光画像と偏光画像を同時にワンショットで取得できる撮像系の実現を目指す。提案法では、フォトニック結晶を用いたフィルタアレイをモノクロCCDに搭載することでグレースケール画像をワンショットで撮影し、その画像からL1ノルム最小化による復元問題を解くことで、様々な波長情報と偏光情報を復元する。本研究期間では、フィルタ感度と復元手法の双方を圧縮センシングに基づき新たに開発し、実機上でワンショット撮影画像から無偏光分光画像、直線偏光強度画像、RGB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

単一多層膜かつ単一露光で分光と偏光を同時に撮影できることは、画像を利用したアプリケーションの発展にとって大きなインパクトとなり得る。提案カメラは、AI技術と組み合わせることで、これまでのイメージングでは実現不可能なアプリケーションを小型・安価・高速なカメラで実現できるようになる。例えば、光沢と模様の方を持つ金属表面の欠陥検出、粘膜光沢下の腫瘍を検出するカプセル型内視鏡診断、悪天候や夜間における車載カメラによる障害物検知などの技術イノベーションにより、超スマート社会（Society5.0）の実現に貢献が期待できる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we aim to realize an imaging system that can simultaneously acquire spectral and polarization images of an object in a single shot by combining photonic crystals and compressive sensing. In the proposed method, a photonic crystal filter array is mounted on a monochrome CCD to capture a gray-scale image in a single shot, and various wavelength and polarization information are recovered from the image by solving the restoration problem based on L1-norm minimization. In this research period, both the filter sensitivity and the restoration method were developed based on compressed sensing, and it was confirmed that the unpolarized spectral image, linear polarization intensity image, and RGB image could be restored from the one-shot image on the actual system.

研究分野：画像情報工学

キーワード：分光画像 偏光画像 圧縮センシング フィルタアレイ フォトニック結晶 画像処理

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

分光画像の撮影にはこれまで様々な方法が研究されているが、いずれも機材の小型化が難しく、複数回の撮影を必要とすることが問題となっている。簡単にワンショット撮影を実現する方式としては、画素ごとに異なる波長を透過するフィルタアレイによる撮影が検討されているが [1]、いずれも撮影波長帯は 10 バンド未満に限られている。一方の偏光画像の撮影にも同様の問題が見られ、フィルタアレイによる撮影 [2] では偏光素子の透過波長帯の情報しか得られないことから、単バンド画像としての運用が前提となっている。

分光および偏光情報は工業、農業、医療等の様々な分野で応用が期待されているため、近年ではそれらの両方を撮影する検討が進んでいる。文献 [3] では、分光制御用の可変素子 (LCTF) と偏光制御用の可変素子 (LCVR) を CCD 前方に直列接続し、それぞれの透過特性を交互に切り替えながら複数回撮影することで、撮影対象物の分光偏光画像 (偏光角ごとの分光画像、または波長ごとの偏光画像) を取得している。圧縮センシングでは、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の撮影が検討されている [4]。しかしいずれも光学系が複雑かつ複数回の撮影を必要としており、対象物の分光偏光画像を小型かつワンショットで取得できる撮像系 (光学系と信号処理系を含めた、画像取得に必要な全体の系) の提案はほとんどない。これを実現するためには、分光と偏光の双方を制御できる光学系と、光学系を考慮した信号処理系の両方を適切に設計する必要がある。

[1] Y. Monno et al., IEEE TIP, vol. 24, no. 10, pp. 3048-3059, Oct. 2015.

[2] 川上彰二郎他, 電子情報通信学会論文誌 C, J90-C, no. 1, pp. 17-24, 2007.

[3] Y. Zhao et al., National defense industry press (Springer), pp. 47-72, 2016.

[4] C. Fu et al., JOSAA A, vol. 32, issue 11, pp. 2178-2188, 2015.

[5] 大寺康夫他, 信学技報, vol. 106, no. 347, pp. 35-40, 2006.

[6] Y. Ono et al., CVPR, pp. 4090-4097, 2014

2. 研究の目的

本研究では、フォトニック結晶と圧縮センシングの融合により、対象物の分光画像と偏光画像をワンショットで取得できる撮像系の実現を目指す。フォトニック結晶の例を図 1 に示す。本研究で扱うフォトニック結晶は波状構造を持つ酸化物多層膜のことで、図 1 に示すとおり、その波状構造 (格子間隔と格子方向) を変えることで、分光および偏光透過特性を変えることのできるデバイスである。よって、画素ごとに格子間隔および格子方向をばらばらに変更することで、図 2 に示すように、画素ごとに透過特性が異なる分光偏光フィルタアレイを容易に実現することができる。モノクロ CCD に図 2 のフィルタアレイを搭載した上でワンショット撮影されたグレイスケール画像は、画素ごとに異なる分光かつ偏光特性を意味する値となるが、復元処理を行うことで分光偏光画像を復元することができる。分光偏光画像からは、偏光角ごとの分光画像、無偏光な分光画像、波長ごとの偏光画像、さらに RGB 画像も計算でき、ワンショットで従来の分光・偏光・RGB カメラの役割を同時に実現できる。

しかしこれを実現するためには、撮像系の透過特性と復元処理を相互に最適設計する必要がある。フォトニック結晶の透過特性は図 1 に示す通り非常に複雑なため、通常は安定している帯域 B しか利用されない問題があった。帯域 A は TE・TM 波とも感度が複雑で、これまではカットフィルタで切り捨てられていた情報である。しかし、圧縮センシングの観点から見ると、帯域 A は分光および偏光軸上のランダムな観測基底に利用できるため、A も含めた帯域で撮影された画像から L1 ノルム最小化による画像復元を行うことで、可視光を含む広い帯域で分光偏光情報を復元できる可能性がある。これまでの圧縮センシングは、ランダムな観測基底を実現するために、DMD やプリズム等の複雑な光学系を必要としていたが、本研究ではランダムな観測系をフォトニック結晶一つで実現できる。つまり、圧縮センシングの欠点 (光学系の複雑性) とフォトニック結晶の欠点 (感度の複雑性) をお互い補うことで、従来よりも優れた撮像系を目指す点に、本研究の独自性がある。

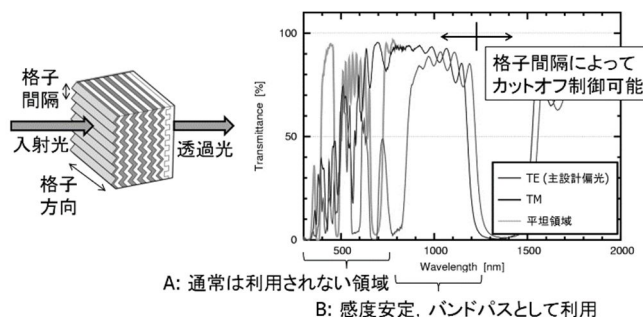


図 1: フォトニック結晶とその感度例

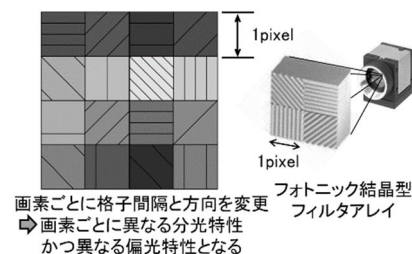


図 2: 分光偏光フィルタアレイの例

3. 研究の方法

復元された画像の画質を定量的に評価するためには、フィルタアレイによってマスクングされる前の原画像が必要となる。よって本研究では、まず図3に示す通り、ハイパースペクトルカメラと回転偏光子を利用した複数回撮影により分光偏光画像の原画像 x を取得した上で、計算機上でフィルタアレイによる撮影および画像復元を行う。まず実機で x を取得した後、フィルタアレイの感度をランダム性が高くなるよう設定し、撮影画像を $y = \Phi x$ により計算する。得られたワンショット撮影画像 y から $L1$ ノルム最小化による復元で分光偏光画像を推定し、原画像との誤差を評価する。本研究期間では、分光偏光画像を撮影するためのフィルタアレイの感度の最適化、および画像復元アルゴリズムを開発し、復元された分光偏光画像と原画像との誤差を5%以内に収めることを目標とする。そして、実際にフィルタアレイの実機製造を行い、その実現可能性も検証する。各課題と実験方法、実施時期の詳細は以下の通りである。

【課題1: 分光偏光画像の撮影 (平成30年4月～平成30年9月, 6ヶ月間)】

オリジナルの分光偏光画像を撮影するため、ラインスキャン型ハイパースペクトルカメラと直線偏光板を用いた撮影を行う。偏光子の回転角は0, 45, 90, 135度の4方向に設定し、それぞれの偏光角度における分光は420nmから720nmの範囲において16波長を撮影する。撮影対象は光沢を持つ陶器や金属、光沢を持たない色鉛筆等を想定している。実験には、偏光依存性の小さいハイパースペクトルカメラ、偏光撮影のためのワイヤグリッド偏光板と回転子、校正用のモノクロカメラと照明、および接続治具を新たに購入する予定である。

【課題2: フィルタアレイの設計製造 (平成30年10月～令和1年12月, 15ヶ月間)】

フォトニック結晶は格子間隔で透過波長を、格子方向で透過偏光を制御できるため、フィルタアレイは画素ごとに異なる格子間隔と格子角度をパラメータとして持つデバイスと想定できる。格子間隔と感度の関係性は事前に明らかになっているため、とりうる格子間隔の組み合わせを全通り探索し、(基底はスパース基底)のインコヒーレンスが最も小さいを採用することでフィルタアレイを決定する。その後、パターンに従いフィルタアレイの試作製造を行い、CCDに搭載した上で撮影評価を行う。

【課題3: $L1$ ノルム最小化を用いた画像復元 (令和2年1月～令和3年3月, 15ヶ月間)】

得られた y に対して x を求めた後、 x の $L1$ ノルム最小化問題を解くことで分光偏光画像の復元を行う。ここで x は4次元空間であるため、vectorial total variation を拡張した $L_{2,2,2,1}$ ノルム最小化による復元手法を開発し、復元された分光偏光画像と原画像の誤差を5%以内に収めることを目標とする。また、復元された分光偏光画像から、無偏光分光画像、無偏光RGB画像、波長ごとの偏光画像を求め、それぞれ画像として示すことを目標とする。得られた成果は、国内外の学会および国際誌への論文投稿によって公表する。

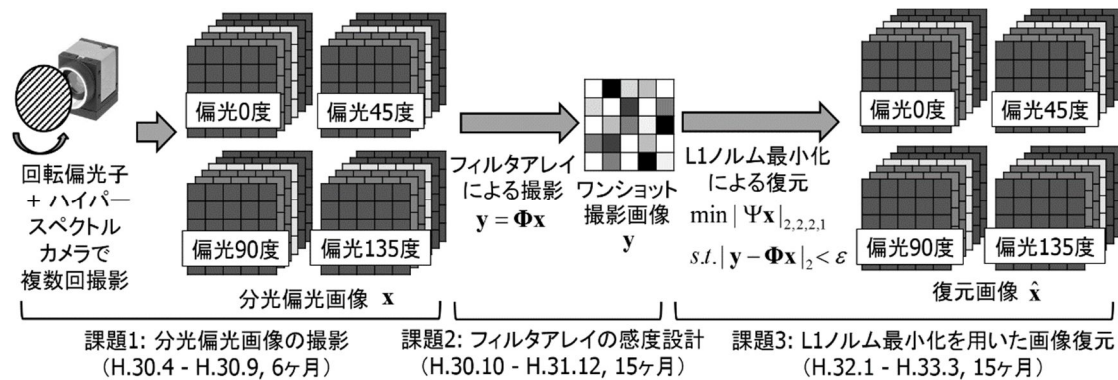
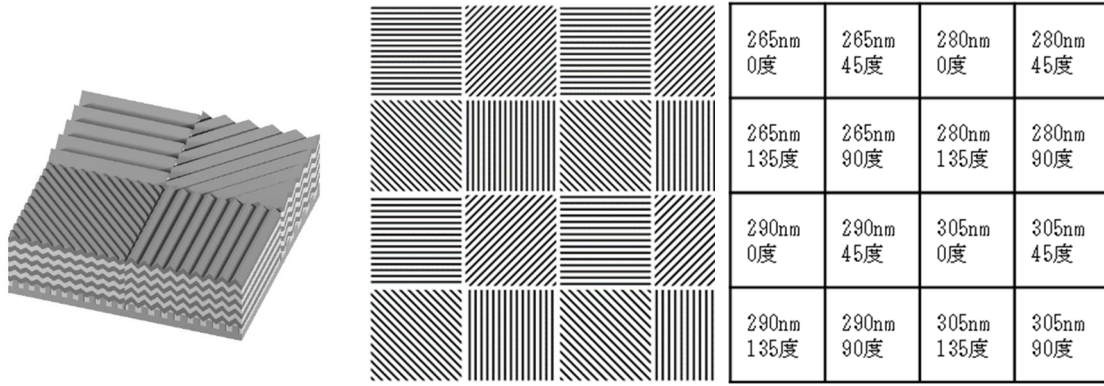


図3: 研究方法の全体像

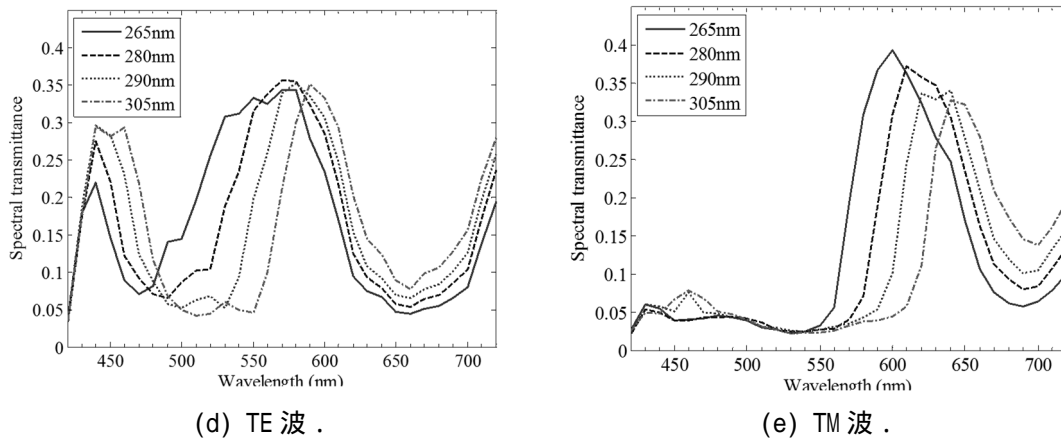
4. 研究成果

分光偏光画像の撮影について、当初はハイパースペクトルカメラの購入を予定していたが、研究協力者からの機材提供により無償で撮影を実施することが可能となり、当初の予定よりも精密な121バンド4偏光の分光偏光画像を撮影した。この画像から低ノイズかつ可視光に寄与する波長帯を選択し、以後テスト画像として用いた。

フィルタアレイの設計では、まずとりうる格子構造の組み合わせを全通り探索し、複数のフィルタアレイ候補を決定した。この過程において、格子構造とその感度の関係を電磁界シミュレーションによって求める必要があり、フォトニック結晶の専門家である富山県立大学の犬寺康夫教授と共同で検討を進めることにより、効果的にその設計パターンを決定することができた。図4に、設計した4x4画素のフォトニック結晶型フィルタアレイの配置および感度グラフを示す。



(a) 2x2 画素の成膜概念図 . (b) 4x4 画素のフィルタレイパターン . (c) 各格子の間隔と角度 .



(d) TE 波 . (e) TM 波 .

図 4: フォトニック結晶による分光偏光フィルタレイのパターンと透過特性 .

まず図 4 で重要な点は、TE 波と TM 波で異なる感度形状を実現している点である。これは、入射光の偏光状態によって透過する光の特性が変わること、つまり提案するフォトニック結晶が偏光フィルタとして動作することを意味している。さらに、格子構造を変えた 4 種類の透過感度を TE と TM 波でそれぞれ比較したところ、4 種類とも異なる感度形状になっていることがグラフからわかる。つまり、提案するフォトニック結晶は、格子構造を変更することで、偏光だけでなく分光フィルタとしても動作することを意味している。上記の測定結果から、提案するフォトニック結晶は単一多層膜にも関わらず、分光と偏光の両方のフィルタレイとして同時に動作することが確認された。つまり、単一多層膜をモノクロカメラに搭載するだけで、リアルタイム分光偏光同時撮影が実現できる可能性が確認された。

さらに、開発カメラによって撮影された単一のモノクロ画像から、16 波長 4 偏光角の分光偏光画像を同じ解像度で復元するためのデモザイク手法を開発し、ソフトウェアとして実装した。デモザイクは、分光偏光画像の空間、波長、偏光軸全ての相関性を考慮し、4 階テンソル空間における decorrelated vectorial total generalized variation と weighted nuclear norm のそれぞれをフィルタレイ撮影の制約の元で同時最小化することで、良好な画像を復元できることを確認した。本年度の成果は OSA に現在投稿中である。これに加え、当初は予定されていなかった農作物評価への応用検討、およびセンサの実機実装における製造容易性の向上に関する手法開発が期間内に完了した。

これまでの 3 年間の成果を集約すると、フィルタ感度と復元手法の双方を圧縮センシングに基づき新たに開発し、フォトニック結晶によるフィルタレイを搭載したワンショットカメラを試作した上で、撮影画像から無偏光分光画像、直線偏光強度画像、RGB 画像を復元可能であることが確認された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Ohtera Yasuo, Shinoda Kazuma	4. 巻 58
2. 論文標題 NIR spectrum estimation utilizing a photonic crystal distributed passband-type multiple filter array	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Optics	6. 最初と最後の頁 3166 ~ 3166
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/AO.58.003166	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kawase Maru, Shinoda Kazuma, Hasegawa Madoka	4. 巻 28
2. 論文標題 Demosaicking Using a Spatial Reference Image for an Anti-Aliasing Multispectral Filter Array	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Image Processing	6. 最初と最後の頁 4984 ~ 4996
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TIP.2019.2910392	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 -

1. 著者名 Kazuma Shinoda, Yasuo Ohtera, and Madoka Hasegawa	4. 巻 26
2. 論文標題 Snapshot multispectral polarization imaging using a photonic crystal filter array	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 15948-15961
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.26.015948	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kazuma Shinoda, Maru Kawase, Madoka Hasegawa, Masahiro Ishikawa, Hideki Komagata, Naoki Kobayashi	4. 巻 6
2. 論文標題 Joint optimization of multispectral filter arrays and demosaicking for pathological images	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Image Electronics and Visual Computing	6. 最初と最後の頁 13-21
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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5件（うち招待講演 5件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 篠田一馬
2. 発表標題 分光偏光イメージングとその病理診断応用
3. 学会等名 第11回バイオナノシステムズ研究会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazuma Shinoda
2. 発表標題 Snapshot multispectral imaging using a filter array
3. 学会等名 International Workshop on Image Sensors and Imaging Systems（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 篠田一馬
2. 発表標題 フォトニック結晶型フィルタアレイを用いた分光偏光カメラ
3. 学会等名 第19回情報フォトンクス研究グループ研究会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 篠田一馬
2. 発表標題 フォトニック結晶を用いたワンショット分光偏光カメラ
3. 学会等名 JST新技術説明会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 篠田一馬
2. 発表標題 フィルタアレイによる分光イメージングとその応用
3. 学会等名 第15回UUOサロン（招待講演）
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>ワンショット分光偏光カメラ http://www.is.utsunomiya-u.ac.jp/icl/index.php?Research%2FMultispectralPolarizationImaging</p>

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
---------	---------