

リアルタイム分光偏光同時イメージングに関する研究（延長）

研究代表者

篠田 一馬

宇都宮大学・工学部・基盤工学科・准教授

1 はじめに

分光画像や偏光画像の撮影はこれまで様々な方法が開発されているが、いずれも機材の小型化が難しく複数回の撮影を要するため、分光と偏光の同時撮影は複雑な光学系が必要となる。文献[1]では、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。文献[2]では、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-L2 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が検討されている。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が求められる。

分光偏光画像のワンショット撮影をフィルタアレイによって実現する方法として、文献[3]では、理想的な光学透過特性を持つデバイスを想定し、分光フィルタアレイと偏光フィルタアレイを積層する場合のフィルタアレイの感度決定方法について理論的に言及している。文献[4]では、ワイヤグリッドの向きによる偏光透過特性の調整およびサブ波長構造による分光透過特性の調整を CMOS 上で行う方法について提案している。これらはいずれも画素ごとに異なる直線偏光成分を撮影することを前提とし、直線偏光子に相当するデバイスを画素ごとに 0, 45, 90, 135 度のいずれかの方向に傾けている。この直線偏光子は対象角度以外の偏光成分を除去する役割があるが、同時に、所望の測定波長範囲においてオールパスフィルタとなっていることが求められる。また、逆に、分光透過特性を調整するためのカラーフィルタ部分においては、偏光特性に関して影響を与えないことが求められる。これらの制約から、従来の分光偏光画像の撮像系は観測波長帯が制限されていることが多い。

本研究では、分光偏光画像のワンショット撮影を実現する方法として、図 1 に示す通り、フォトニック結晶の光学異方性を利用したフィルタアレイを開発し、モノクロ CCD に成膜した試作機を開発した上で、分光偏光画像を単一の撮影画像から復元することで、世界初となるリアルタイム分光偏光画像撮影およびリアルタイム画像復元の実現可能性を示す。提案法はフィルタアレイの材料の特性と画像復元処理（デモザイク）の両方を融合して検討する点に新規性があり、非常に広帯域に感度を持ったフィルタを利用できるため入射光量が多く、短時間かつ単一露光で様々な分光偏光成分が混在した画像を撮影できる。さらに、一回の行列積で様々な分光偏光成分を復元できるため、画像の表示や解析自体もリアルタイムで行える可能性がある。本期間では、2019 年度電気通信普及財団助成の成果を応用し、31 波長・4 偏光・RGB 画像を 60fps で同時に撮影・表示するカメラシステムを実際に構築することを目指す。本成果によって画像情報通信の技術発展と新たな産業創出が見込め、当分野の発展への貢献が期待できる。

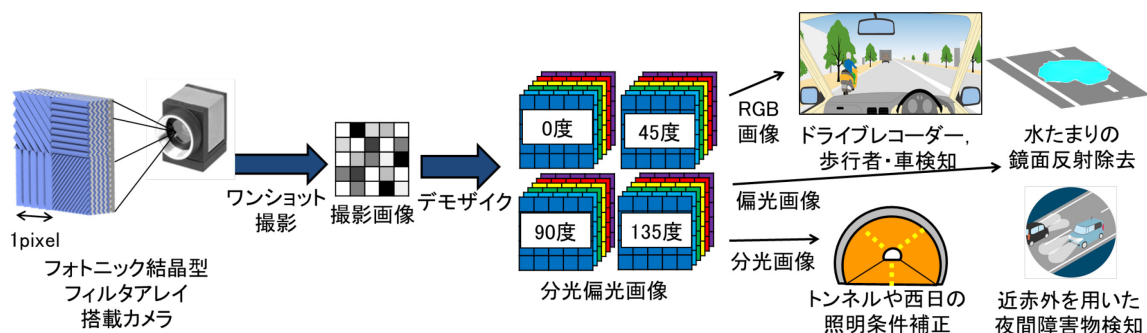


図 1: リアルタイム分光偏光カメラの概要と応用例

2 フォトニック結晶型分光偏光フィルタアレイおよびデモザイクの原理

光学多層膜に光の波長オーダーの周期的な構造変調を加えることで、多層膜に入射する光の透過率制御や偏波選択機能の付加が可能であることが知られている。特に、高屈折率膜と低屈折率膜からなる三角波状の多層膜を形成し、膜厚・格子周期・膜材料をそれぞれ調整することで波長選択フィルタを実現する方法が提案されており [5, 6], フォトニック結晶型波長フィルタ (PhCF) と呼ばれている。PhCF は、光の波長に相当するナノ微細構造を有する多層膜で、図2のような波状構造を持つ。この多層膜は、格子間隔を変えることで透過感度を移動できる (様々な分光フィルタを同じ材料で作成できる) と共に、水平偏光と垂直偏光で透過感度が異なる特徴を持つため、格子方向を変えることで偏光フィルタの役割を同時に持つことが可能となる。そこで、イメージャの画素ごとに異なる格子間隔と角度を持つようなフィルタアレイを開発し、画素ごとに異なる分光および偏光成分が一回の露光で撮影できる可能性がある。提案するフォトニック結晶型分光偏光フィルタアレイは、モノクロイメージャの表面に接着することで、ワンショット分光偏光カメラを容易に実現できる。このカメラでワンショット撮影されたグレイスケール画像は、画素ごとに様々な波長帯および偏光成分が混在した値となるため、デモザイクが必要となる。そのため、撮影システムを線形モデルと仮定し、その逆問題を解くことで、入射光の波長帯ごとのストークスパラメータを推定するデモザイク法を提案する。このストークスパラメータからは 0, 45, 90, 135 度の各直線偏光成分における分光画像や無偏光な RGB 画像を求められる。

イメージャの観測画素値 $g_{x,y}$ は、イメージャの感度 t_λ 、フィルタの 0 度感度 $[u]_{x,y,\lambda}^0$ および 90 度感度 $[u]_{x,y,\lambda}^{90}$ 、格子構造の角度 $\theta_{x,y}$ 、および入射光のストークスパラメータ $s_{x,y,\lambda} = [s_0 \ s_1 \ s_2]^T_{x,y,\lambda}$ によって式 (1) のように定まる。

$$g_{x,y} = \frac{1}{2} \sum_{\lambda} t_{\lambda} \begin{bmatrix} [u]_{x,y,\lambda}^0 + [u]_{x,y,\lambda}^{90} \\ ([u]_{x,y,\lambda}^0 - [u]_{x,y,\lambda}^{90}) \cos 2\theta_{x,y} \\ ([u]_{x,y,\lambda}^0 - [u]_{x,y,\lambda}^{90}) \sin 2\theta_{x,y} \end{bmatrix}^T s_{x,y,\lambda} = \frac{1}{2} \sum_{\lambda} t_{\lambda} m_{x,y,\lambda} s_{x,y,\lambda} \quad (1)$$

このモデルは画素ごとに独立であると仮定し、 x, y, λ の三次元要素を行方向の一次元に展開する。

$$\mathbf{g} = \mathbf{T}\mathbf{M}\mathbf{s} = \mathbf{T}\mathbf{M}\mathbf{P}\mathbf{f} = \mathbf{H}\mathbf{f} \quad (2)$$

ここでは、空間方向の画素サイズを (X, Y) 、測定バンド数を L とし、 $\mathbf{g} \in \mathbb{R}^{XY}$ は $g_{x,y}$ を $y \rightarrow x$ 優先で行方向に展開したベクトル、 $\mathbf{T} \in \mathbb{R}^{XY \times XYL}$ は $1/2 [t_{\lambda 0} \ t_{\lambda 1} \ \dots \ t_{\lambda L-1}]$ を $y \rightarrow x$ 優先で対角方向に展開した行列、 $\mathbf{M} \in \mathbb{R}^{XYL \times 3XYL}$ は $m_{x,y,\lambda}$ を $\lambda \rightarrow y \rightarrow x$ 優先で対角方向に展開した行列、 $\mathbf{s} \in \mathbb{R}^{3XYL}$ は $s_{x,y,\lambda}$ を $\lambda \rightarrow y \rightarrow x$ 優先で行方向に展開したベクトルである。さらに、 $\mathbf{f}_{x,y,\lambda} = [f_0 \ f_{45} \ f_{90}]^T_{x,y,\lambda}$ を 0, 45, 90 度偏光における分光画像とし、 $\mathbf{f} \in \mathbb{R}^{3XYL}$ は $f_{x,y,\lambda}$ を $\lambda \rightarrow y \rightarrow x$ 優先で行方向に展開したベクトル、 $\mathbf{P} \in \mathbb{R}^{3XYL \times 3XYL}$ はストークスパラメータ算出行列を対角成分にもつ行列とする。式 (2) の \mathbf{H} は既知の情報であるため、デモザイクはワンショット撮影画像 \mathbf{g} から入射光 \mathbf{f} を求める問題となる。一例として、復元画像の誤差二乗を最小化する制約のもとで、式 (3) の Wiener 推定によってデモザイクを行う方法が考えられる。

$$\hat{\mathbf{f}} = \mathbf{R}_f \mathbf{H}^T (\mathbf{H} \mathbf{R}_f \mathbf{H}^T)^{-1} \mathbf{g} = \mathbf{W} \mathbf{g} \quad (3)$$

ここで $\mathbf{R}_f \in \mathbb{R}^{3XYL \times 3XYL}$ は \mathbf{f} の自己相関行列であり、1 次のマルコフモデルを想定する。式 (3) は一回の行列積でデモザイクが可能となるため、ワンショット撮影と共にリアルタイム処理に有利な復元方法である。また、式 (2) における \mathbf{f} と \mathbf{g} は同じ画素サイズ (X, Y) を想定しているが、計算機上のメモリの制約や復元精度の向上を考慮し、それぞれ異なるサイズを適用することも可能である。

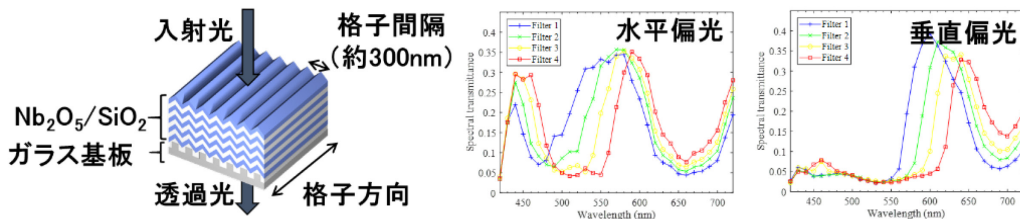


図2: 多層膜型フォトニック結晶の概念図と透過特性例

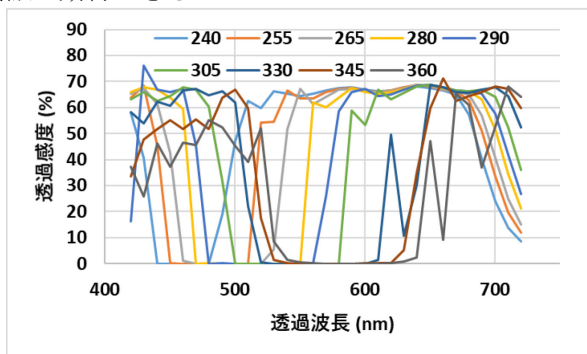
3 分光偏光カメラの試作

リアルタイム画像復元の実現可能性を示すために、まず高透過効率を持つフォトニック結晶の設計を検討した。本検討では、フォトニック結晶の層構造を従来よりも薄くし、リップルを許容する代わりに最大透過率の向上をねらう。膜材料は Nb205/SiO2 とし、格子間隔および格子構造は従来の製造条件を変えずに、40 層としていた層数を 20 層まで削減した。格子構造とその透過率の関係は事前に電磁界シミュレーションによって求め、設計パターンを決定している。成膜したフィルタの透過特性を図 3 に示す。図 3(a)には、電磁界シミュレーションで事前に求めた透過率の例を示している。まず図 3 で重要な点は、前年度は最大透過率が 0.3 から 0.4 程度であったものが(a)では最大 0.7, (b)では最大 0.9 程度まで改善している点である。膜構成の見直しによる透過率向上が効果的に達成できていることがわかる。また、図 3(b)は格子間隔を 5 種類変えてグラフをプロットしているが、20 層という従来の半分の薄さにもかかわらず、5 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、20 層まで削減しても、格子構造を変更することで、分光フィルタとして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アレイとして同時に動作する上に、膜構造を改良することで、最大透過率は 0.9 まで達成できることが確認された。

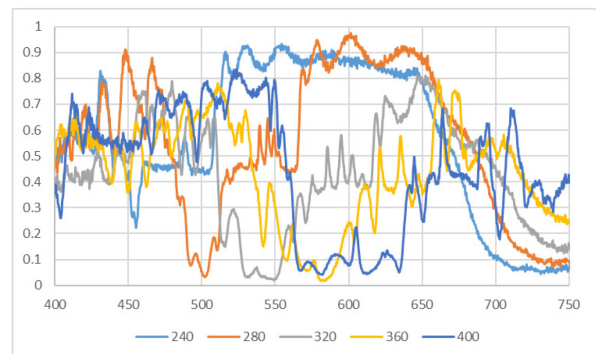
次に、16 種類の格子間隔を持つフォトニック結晶型フィルタアレイを製造し、モノクロイメージャに搭載することで分光偏光カメラの試作を行った。まず、格子間隔を 240 から 390nm を 10nm 間隔で計 16 種類、画素サイズは $4.65 \mu\text{m}^2$ としたフィルタアレイパターンの CAD データを作成する。その CAD データに従いベースとなる格子パターンの形成を電子線描画にて検討した。電子線描画には NIMS の装置を利用し、7 種類のテストパターン基板を作成した。次に、反応性イオンエッチングにより先ほどの描画パターンに従った微細格子を石英基板上に形成する。エッチングは CHF3 と N2 の混合ガスを用い、25 sccm, 3.0 Pa, 100 W, 7 分としている。格子が形成された石英基板上に自己クローニング法[7]による多層膜の成膜を行うことで、提案するフィルタアレイを製造した。

図 4(a)にその表面の電子顕微鏡画像を示す。図から、表面の微細格子構造に大きな乱れはなく、石英基板の格子間隔に従った波状構造を維持した成膜が行えていることが確認された。図 4(b)に試作カメラの外観を示す。使用したカメラは ARTRAY 社製モノクロ USB カメラ ARTCAM150P5-WOM, 使用したイメージャは SONY 社製 ICX205AL である。まず、イメージャ表面のカバーガラスを剥離し、CCD 部分を露出させる。次にフォトニック結晶型フィルタアレイと CCD のアラインメント調整をしながら、UV 硬化型接着剤にて接着する。最後にカバーガラスを戻し、モノクロ USB カメラに搭載させることで、分光偏光カメラの試作を行った。

多層膜型フォトニック結晶によるフィルタアレイの利点は、多層膜の格子構造が石英基板の格子形状で決まるため、成膜工程や膜材料を微小領域ごとに変える必要はない点である。成膜後の波状構造のパターンは電子線描画時の CAD データに従ったものであり、CAD データを編集するだけで様々なパターンを形成できる、つまり様々な分光偏光フィルタアレイを製造できるため、実用上は試作プロセスの簡素化および低価格化に貢献が期待できる。

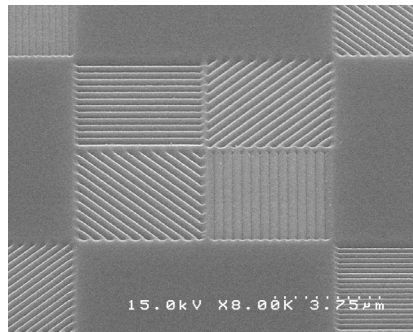


(a) 電磁界シミュレーションの結果



(b) 成膜されたフィルタの測定透過率

図 3: フォトニック結晶の分光特性。縦軸は透過率、横軸は波長、凡例は格子間隔。



(a) 成膜後の表面の電子顕微鏡画像



(b) 試作カメラ

図4: フォトニック結晶とカメラの概観

4 実験

開発カメラによって撮影された画像から、31 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。ソフトウェアは C++にて実装し、単一撮影画像 (Captured image) から Wiener 推定を行うことで、RGB 非偏光画像 (RGB non-polarized), RGB 偏光 0 度画像 (RGB 0 deg.), RGB 偏光 90 度画像 (RGB 90 deg.), また、400 から 700nm の波長における各偏光成分 (400nm non-polarized, 500nm 90 deg., 600nm 0 deg., 700nm 90 deg.) を同時に復元・表示する機能を実装している。撮影および復元解像度はいずれも 200x200 画素とし、フレームごとに独立に処理を行っている。

図5に、試作カメラをUSBケーブルにてノートパソコンに接続し、撮影画像からリアルタイムで画像を復元する様子を示す。図から、提案法のカメラで撮影されたモノクロ画像と同時に、特定の波長、特定の偏光、さらにRGB成分を可視化できることが確認された。開発カメラは小型 (5cm 角) であり、インターフェースはUSBケーブルのみから構成され、さらに計算性能がさほど高くないノートパソコン1台のみを使用するという、非常に安価かつ単純なシステムながらも、リアルタイム分光偏光同時イメージングを達成している。

開発カメラはフィルタの分光透過率が高く、露光量もRGBカメラと同程度まで確保できることから、シャッタースピードは1フレームあたり10msから20ms程度 (50から100fps) まで高速化しても十分に明るい画像が撮影できることが確認された。つまり、カメラ単体としてはリアルタイム駆動が可能な性能を有していることが確認された。しかし、デモザイクプログラムを含めたフレームレートは、ノートパソコンの環境下 (Visual Studio 2019 C++環境, Open MPによる並列化, Intel Core i7-1165G7 2.80GHz) では30fps前後にとどまった。このフレームレートは、ある程度高性能なCPUを搭載したパソコン、またはGPU環境下で動作させることで60fpsを達成できると思われるが、リアルタイムイメージングにおけるボトルネックがデモザイク処理にあることは明らかである。応用先のアプリケーションによっては30fps前後であっても問題ない場合も考えられるが、より高速なイメージングのためには画像処理速度の向上が主な課題となる。

また、分光偏光画像の精度にも課題が残っている。標準カラーチャートを撮影対象とし、その撮影および復元を行ったところ、分光反射率の復元誤差は11.9%、直線偏光時の復元誤差は5.2%であることが確認された。今後は分光反射率誤差を5%まで抑えることを目標とし、フォトニック結晶の透過率設計および復元処理の改良を検討する予定である。



図5: 実装したリアルタイム分光・偏光・RGB画像復元システム

【参考文献】

- [1] Y. Zhao, L. Zhang, D. Zhang and Q. Pana, "Object separation by polarimetric and spectral imagery fusion," Computer vision and Image Understanding, vol. 113, no. 8, pp. 855-866, 2009.
- [2] C. Fu, H. Arguello, B. M. Sadler, and G. R. Arce, "Compressive spectral polarization imaging by a pixelized polarizer and colored patterned detector," J. Opt. Soc. Am. A, vol. 32, pp. 2178-2188, 2015.
- [3] X. Tu and S. Pau, "Optimized design of N optical filters for color and polarization imaging," Opt. Express, vol. 24, pp. 3011-3024, 2016.
- [4] S. Junger, W. Tschekalinskij, N. Verwaal, and N. Weber, "Polarization and spectral filter arrays based on sub-wavelength structures in CMOS," SENSOR+TEST Conferences, pp. 161-165, 2011.
- [5] Y. Ohtera, T. Onuki, Y. Inoue, and S. Kawakami, "Multichannel Photonic Crystal Wavelength Filter Array for Near-Infrared Wavelengths," IEEE J. Lightwave Technol., vol. 25, no. 2, pp. 499-503, Feb. 2007.
- [6] Y. Ohtera, D. Kurniatan, and H. Yamada, "Design and fabrication of multichannel Si/SiO₂ autocloned photonic crystal edge filters," Appl. Opt., vol. 50, no. 9, pp.50-54, Mar. 2011.
- [7] T. Kawashima, K. Miura, T. Sato, and S. Kawakami, "Self-healing effects in the fabrication processes of photonic crystals," Appl. Phys. Lett., vol. 77, no. 16, pp. 2613-2615, 2000.

〈発表資料〉

題名	掲載誌・学会名等	発表年月
Direct estimation of NIR reflection spectra utilizing snapshot-type spectrometer with photonic crystal multi-spectral filter array	Applied Optics	2020年6月
Alignment-free filter array: Snapshot multispectral polarization imaging based on a Voronoi-like random photonic crystal filter	Optics Express	2020年12月