

## [研究助成 (A)]

# ヒトの視覚を広げる リアルタイム・マルチスペクトルイメージング技術の研究

Study of Real-time Multispectral imaging for supporting human vision

2181007



研究代表者

富山県立大学  
工学部 電気電子工学科

教授

大 寺 康 夫

## [研究の目的]

工業、農林水産業から医用計測に至るさまざまな産業分野では、対象を非破壊・非接触で計測する手法が求められている。計測項目が多様化し精度の要求も高度化するにつれ、これまでの熟練作業者の視覚に頼った検査には限界が来ている。本研究はこのような背景を踏まえ、ヒトの視覚能力をアシストするイメージングデバイスの研究に取り組むものである。特に感知できる波長域を波長 400 nm 以下の紫外域および 800 nm 以上の近赤外領域に拡大するとともに、任意の波長数、任意の波長分解能で、対象をリアルタイムに可視化できるセンサ技術・画像処理技術を開発することを目指す。

## [研究の内容, 成果]

本研究の核となるのは図 1 に示す、ナノフォトニック構造（多層膜型フォトニック結晶）からなるマルチスペクトルフィルタ (MSF) と、それが集積化された分光イメージセンサである。この MSF は波板状の誘電体多層膜からなり、格子ピッチの違いで透過スペクトルを制御する。光波長の 1/2 程度の格子ピッチパターンを、対角 1/2 インチ程度の面積で電子線レジストを塗布した石英基板上に描画し、RIE 加工後スパッタリングで  $\text{Nb}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$  多層膜を積層して

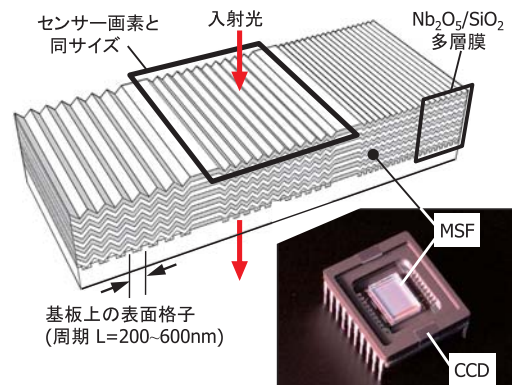


図 1 マルチスペクトルフィルタ (MSF) と分光センサの概念図

MSF を作製した。ここで電子線描画には文科省ナノテクノロジープラットフォーム所属の東北大学の実験施設の装置を利用した。パターン占有比率の高い大面積パターンを最短時間で描画するために、露光条件およびパターン命令を最適化し、期間中安定して描画実験ができるようになった。また後半の RIE とスパッタリングはかねて協力関係にある(株)フォトリテックス社に外注した。MSF と CCD は 1 画素以下の位置精度で、本学で構築した集積実験系にて集積化した。

続いて作製したセンサを使って MSF の透過スペクトルを測定した。結果を図 2 に示す。25 種類の異なる要素フィルタの特性を重ねて表示してある。(以後 25 チャンネル型、などと称する)。このように各透過率はわずかに異なり、しかも波長 400 nm から 1000 nm まで有限の値

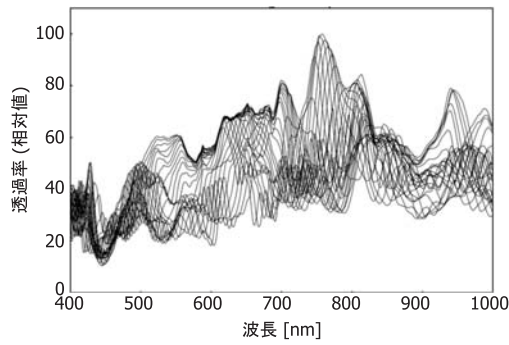


図2 25チャンネル型MSFの透過スペクトルの実測値

を有することが確認できた。

この透過スペクトルは一般的なバンドパス型ではなく、分布パスバンド型とも呼ぶべきものである。このような複雑なフィルタ群を透過した光の強度の組から入射した光のスペクトルを求めるには、ある種の逆問題を解く必要がある。我々は線形の逆問題解法の一つであるWiener推定を用いた。Wiener推定ではMSF直下のセンサ画素の輝度値を $g$ 、入射スペクトルの推定値を $f$ 、推定行列 (Estimator) を $W$ として、

$$f = W \cdot g$$

で $f$ が推定される。 $f$ と $g$ はいずれも列ベクトルである。 $W$ はMSF、照明、イメージセンサの感度を含む感度行列 $H$ と、到来スペクトルの教師データを元に作られた自己相関行列 $R_f$ 、そしてセンサの雑音統計行列 $R_n$ を使って、

$$W = R_f H^T (H R_f H^T + R_n)^{-1}$$

という形で表される。記号 $T$ は転置を表す。 $H$ はMSFのチャンネル数を行、波長を列とする横長の行列である。また自己相関行列 $R_f$ は以下の式で求められる。

$$R_f = \langle ff^T \rangle$$

ここに記号 $\langle \rangle$ は期待値を表す。限られた数

の事前測定値からスペクトルの母集団の期待値を推定するのは容易ではないので、本研究では以下の方法で近似した。すなわち、予め所定の数の実試料（以下に示す例では数種類の果物）を市場から調達し、その各場所での反射スペクトルを計測し、それらに主成分分析を施して統計情報を引き出した。続いてこのサンプル値と同じ平均値及び分散を持つように主成分スコアを正規分布に従って多数生成し、求めておいたローディングベクトルを使って仮想的な反射スペクトルを合成した。この方法で果物毎に計600本の反射スペクトルを人工的に生成し、そのうち100本を使って自己相関行列 $R_f$ を計算した。また残り500本をテストデータとして用いた（詳細は発表論文[1]を参照）。

一方、雑音統計行列 $R_n$ は各チャンネルの輝度値に重畳される雑音の分散を要素とする対角行列でよく近似することができる。我々の分光センサでは、事前の検討から雑音の主体は光ショット雑音であることが分かっている。光ショット雑音は検出器において光照射で発生した電子の数を $N$ とすると、その撮影毎のバラつき（分散）も $N$ となる性質を持つ。我々は予め、使用したイメージセンサ（SONY製CCD, ICX-205AL）の10bit出力時のカウント数とこの電子数の関係からセンサの飽和電荷量を求めておき、具体的な輝度値が電子数換算で何 $e^-$ に相当するかが分かるような換算式を作成した。この式を使って各チャンネルの輝度値 $g$ に対し重畳される光ショット雑音を推定した。

続いて図3に試作した分光センサに波長760

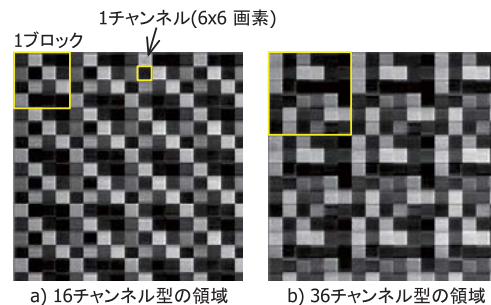


図3 波長760nmの単色光照射時におけるRaw画像の例

nm の単色光を分光器経由で照射して得られた生画像を示す。MSF はバンドパス型ではないので、このように単色光照射下であっても各チャンネルは有限の光強度を透過する。分光器の透過波長を 2 nm ずつ変えてこのパターンを撮影し、各チャンネルの透過率を算出して描いたのが図 2 のグラフである。

図 3 において、白線で囲った単位領域（例えば a）の 16 チャンネル型であれば縦横 4 チャンネルずつからなる正方形の領域）をブロックと呼んでいる。実際の測定では、あるブロックの輝度情報 ( $g$ ) が得られたとき、そこから Wiener 推定で入射したスペクトル  $f$  を推定する作業が必要となる。我々は実撮影画像を使った推定実験に先立ち、まず前述の要領で合成したテストデータ（テストスペクトル）を使って推定精度のシミュレーションを行った。具体的にはスペクトルが  $f$  で与えられるテストデータに対し、ショット雑音の重畳された各チャンネルの輝度値  $g$  を下式で生成する。

$$g = Hf + n$$

ここで  $n$  は雑音なしの  $g$  の電子数に応じた分散に従う光ショット雑音であり、電子数は十分多いとして（今回使用した CCD の飽和電荷量は約 15,000  $e^-$  なのでこの仮定は成立する）正規分布に従う乱数で生成した。次にこの  $g$  に推定行列  $W$  を掛けて、スペクトルの推定値を求め、その真値（最初に与えたテストスペクトル）との誤差を求めた。

この計算を 500 本のテストスペクトルそれぞれにつき 100 回繰り返し、誤差の RMSE (Root Mean Square Error) を評価した。

我々は農産業への応用を念頭に置き、複数の果物（りんご（ふじ）、りんご（王林）、バナナ、オレンジ、キウイフルーツ）について、いくつかの日に分けて、波長 550~900 nm 付近の赤色～近赤外波長域を対象にこの評価を行った。RMSE の結果を以下の表 1 に示す。なお試作

表 1 反射スペクトルの推定誤差の一覧

| 果 物     | RMSE [%] |
|---------|----------|
| バナナ     | 4.64     |
| りんご（ふじ） | 2.64     |
| キウイフルーツ | 1.23     |
| りんご（王林） | 2.51     |
| オレンジ    | 3.07     |

したフィルタのうち、25 ch 型で 1 つの ch の下に 36 個の CCD 画素がある領域を用いるものとした。すなわち複数の画素をビニング処理をすることで、実質的な飽和電荷量を 15,000  $e^-$  から 540,000  $e^-$  に拡大している。

表によれば、多くの果物で反射率の平均誤差はおおむね 3% 前後であることが分かった。このスペクトル推定には波長の走査などはしておらず、シングルショット（1 枚の画像の撮影）の計測で済んでいることに注意されたい。1 ショットの撮影に要する時間は 100 m 秒前後であり、実際の計測現場を勘案しても十分に短い。例えば 10 枚連続撮影してその平均値を取るなどすれば、より誤差は抑制できるものと思われる。

なお推定誤差はりんごを中心として、キウイフルーツでは少なくバナナ、オレンジで大きい傾向にあった。キウイフルーツについては固体及び計測箇所によるスペクトルの差が乏しい傾向が見られ、教師スペクトルとテストスペクトルが似通っていたため誤差が低い値となった。反対にバナナとオレンジでは個体ごとおよび日数経過に伴うスペクトルの変化が比較的大きく、教師スペクトルおよびテストスペクトルはバリエーションに富んでいた。このような自由度の大きい中から正しいスペクトルを推定しなければならぬため、誤差が増大したものと思われる。以上の結果は、後述する今後の見通しでも述べるように、Wiener 推定の 2 段階化 (Adaptive Wiener 推定) や、センサ画素値  $g$  の段階でのスクリーニングが対象の性質によっては必要になることを示唆している。

次にりんご（ふじ）とバナナの分光反射率の推定値の一例を図 4 に示した。上 2 つのグラフ

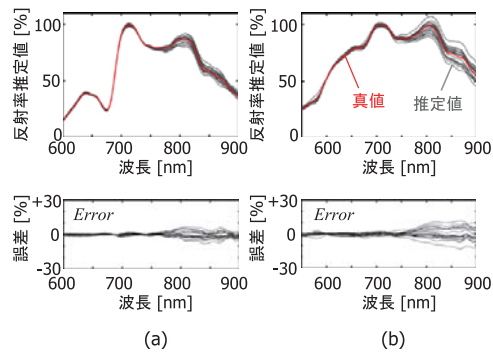


図4 果物の分光反射率の推定結果。(a)りんご(ふじ), (b)バナナ。上2つは分光反射率を, 下2つは真値との差を示す。

で赤の線はテストスペクトルのうち1つずつを, その他の灰色の曲線群は撮影毎に異なる光ショット雑音を重畳した輝度値から推定されたスペクトルである。下2つのグラフは誤差スペクトルである。いずれもスペクトルの概形は良好に復元できているのが分かる。ただし両者とも, 誤差は長波長側で相対的に大きい。これは撮影系の波長感度( $H$ )のうち, 特にCCDと照明の感度が長波長側で低いことに起因する。

次にこのセンサで単一ショットで取得が可能となった別の情報の例を図5に示した。同図(a)は対象物(りんご)の近赤外画像であるのに対し, (b)はそのハイパースペクトル散乱画像と呼ばれるものである。横, 縦の方向はそれぞれ空間位置(水平方向の), 波長に対応している。(b)では(a)に水平の破線で示した断面上の, 反射スペクトルの分布が表示されている。このような情報を可視化することで, スペクトルの面内分布が一度に把握できるという利点がある。

以上述べた通り, 本研究で, 我々のフォトニック結晶に基づく分光センサを使って対象物のスペクトル推定や可視化が可能となった。また上記の例は可視の長波長側(約600 nm)から近赤外(1000 nm)の範囲であったが, 図2に示す通りMSF自身の特性は青色から短波長側の紫外域や, 1000 nmより長波長域にも延びていることが確認できたため, 今後センサ部分に適切な素子を用いるか, 評価方法を工夫する

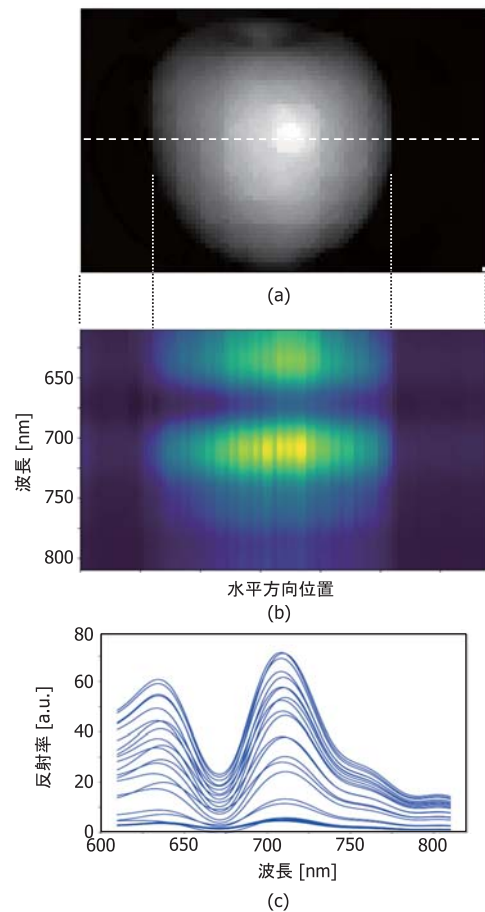
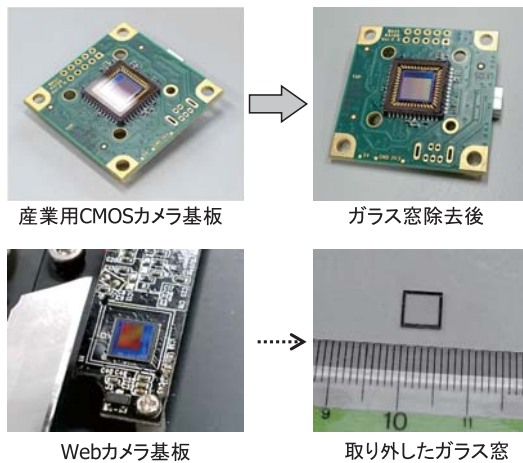


図5 本分光センサで可能となった別の撮影モードの例。(a)対象物の画像(りんご), (b)ハイパースペクトル散乱画像。aの画像に対し, 水平方向の位置を横軸, 水平破線に沿ったスペクトルの分布を縦軸として表現したもの。(c) aの水平破線上のいくつかの場所におけるスペクトル。

ことで, 当初の目的に掲げた紫外～近赤外対応の計測も問題なくできるものと思われる。なお説明では省略したが, 計測の波長域は対象物の性質に応じて自由に選択している。これにはカメラの外側に設置した長波長カットフィルタや短波長カットフィルタを用いた。これらの設定波長域を適宜変更することで, 例えば400 nm～700 nmなどのワイドバンドな計測も問題なく可能である。

以上述べた本デバイスによるスペクトル推定についてはOSA(全米光学会)のApplied Optics誌に投稿し, 掲載された(発表論文[1])。この論文はOSAの雑誌に掲載された当該月の全論文から2編のみ選ばれる, Spotlight in Opticsにも選出された。





(上段) ボードタイプ CMOS カメラへの適用例  
(下段) Web カメラ基板への適用例

図6 CMOS イメージセンサの前処理技術の検討結果

また以上のスペクトル推定の試みと並行して、市販の様々な CMOS イメージセンサ加工技術も確立した。図6には産業用カメラ基板、Webカメラそれぞれの窓を除去してMSF貼り合わせの直前の状態に加工したものである。加工後も正常に動作していることを確認した。これと我々のMSF技術を組み合わせることで、市販の多くのCMOSカメラをマルチスペクトル化できる見通しが立った。

#### [今後の見通し]

まず作製はしているものの計測の待たれてい

た、波長 400 nm～550 nm 付近の画像計測を実証する。またスペクトルの推定精度を改善するために、Adaptive Wiener 推定や  $g$  の段階での主成分分析によるクラスタリング等を検討する。またガラス窓を除去した様々なサイズの CMOS に MSF を実装し、本研究の有用性を実証していく。

#### [成果の発表、論文等]

- [1] Y. Ohtera and K. Shinoda: "NIR spectrum estimation utilizing photonic crystal distributed passband-type multiple filter array," *Applied Optics*, Vol. 58, No. 12, pp. 3166–3173, (2019).
- [2] Y. Ohtera: "GMR-type multi-channel wavelength filters for NIR spectroscopy," *Progress In Electromagnetic Research Symposium (PIERS 2018)*, Session 1A17-08: 50, p. 161, Toyama, August 1st, 2018 (Invited).
- [3] 大寺康夫: "傾斜膜厚型フォトニック結晶のスペクトル計測への応用," 電子情報通信学会エレクトロニクスシミュレーション研究会 (EST), 2018 年 9 月 6 日 (木), 沖縄県久米島町, EST2018-47.
- [4] 大寺康夫: "非周期サブ波長フォトニック構造を利用したスペクトルセンシング," 電子情報通信学会ソサイエティ大会, CS-1-7, 2018 年 9 月 12 日, 金沢大学 (依頼講演).