

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 20 日現在

機関番号：12608

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26540080

研究課題名(和文) 高感度、低コストにマルチスペクトル画像を計測する新原理の開発

研究課題名(英文) Development of a new principle of multi-spectrum-image-sensor that reduces the cost and improves sensitivity

研究代表者

熊澤 逸夫 (Kumazawa, Itsuo)

東京工業大学・科学技術創成研究院・教授

研究者番号：70186469

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：従来のマルチスペクトルセンサの光利用効率を低下させる原因となっていたスリットやフィルタを排除した新しいマルチスペクトル計測の光学系とセンサ原理を開発し、その効果をシミュレーションと実際のハードウェアの試作を通じて検証してきた。スリットやフィルタを排除すると、近隣画素間の情報や波長バンド間の情報のクロストークが避けられず、各画素の受光量は近隣画素や異なるバンドの光量が混じり合ったものになるが、こうしたクロストークを計測後の数値的な信号処理により排除する手法を研究した。

研究成果の概要(英文)：We investigated a new principle of multi-spectrum-image-sensor that uses a very simple optical system but a sophisticated post-numerical-processing to compensate for the incomplete capability of the optical system. The conventional multi-spectrum-image-sensor has been using a slit to avoid cross talks from other part of the object. This slit blocks the most of the optical energy and causes the low photographic sensitivity of the multi-spectrum-image-sensor. The principle proposed in this study does not use the slit and improves the sensitivity remarkably. In addition, the optical system can be small and light enough for a drone to carry. However, the principle needs an innovative post-numerical-processing to remove the cross talks. Various form of such simplified optical systems are prototyped. In addition, the latest techniques for the inverse-problem or deconvolution are applied to remove cross talks for each prototypes.

研究分野：画像処理、画像認識、ユーザインターフェイス

キーワード：マルチスペクトル画像センサ 画像処理 マイクロプリズムアレイ 回折格子 分光 高感度 逆問題
不良設定問題

1. 研究開始当初の背景

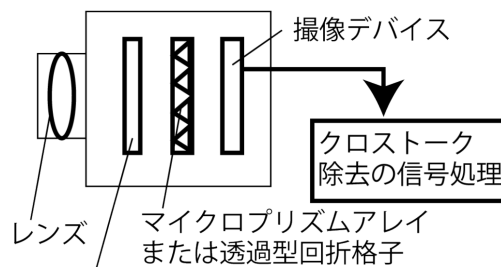
本研究の対象となるマルチスペクトル画像センサは、技術的に確立され、既に商用化もされている。特に近年では、ハイパースペクトルと呼ばれ、周波数解像度が高く、紫外線、赤外線までも含む広範囲なスペクトルを 5nm 程のバンド幅で計測できるハイパースペクトル画像センサが商用化され、人工衛星に搭載されて各種リモートセンシングに応用されている。しかしながら、身近な用途に使うには価格が高く、光学系の機構が複雑となるため、小型化しにくい。さらに現状技術の大きな欠点は、光利用効率が極めて低いことであり、フィルタ方式では、狭いバンド幅の光のみを通すフィルタを使用するため、原理上、大部分の光のエネルギーはフィルタに遮られて画像センサにまで到達し得ない。また透過型回折格子やプリズムで分光する方式では、異なる波長バンド間のクロストークを防止するために、事前に細いスリットに光を通す必要があり、スリットに遮られる大部分の光のエネルギーが失われてしまう。

以上の問題から、当センサは特殊な用途にしか利用できない状況にあるが、近年、マルチスペクトル画像計測技術に関するニーズは、日常身近なところまで広がりつつある。例えば、温暖化や異常気象、オゾン層の破壊等による環境変化の計測、日常生活の中で健康状態の監視、車の自動運転で人間や動物と背景の識別、さらに食品の鮮度と品質の診断、植物工場の農作物の健康状態のモニタリング等に、マルチスペクトル画像センサが有効であることが実証されている。

本研究では、以上の背景を踏まえ、日常生活の身近な場面で通常のカメラと同様の感覚で気軽に利用できる小型、低コスト、かつ光利用効率が高い(高感度な)マルチスペクトル画像センサが実用化できれば、それが社会の至る所に導入されて、人々の生活に大きく寄与できるという観点から、既存技術を根本的に見直して、日常生活の至る所で利用できる、低コスト、小型、簡易、高感度なマルチスペクトル画像センサの新原理を確立し、それを実用化することを目指してきた。

2. 研究の目的

本研究では、近年、リモートセンシングや植物工場の監視、車の自動走行等の用途に必要なが高まっているマルチスペクトル画像センサについて、従来技術よりも画期的に小型、低コスト化し、光利用効率(感度)を大幅に向上した、新しい計測原理を開発、実用化することを目的としている。本研究の着眼点は、従来、光学系において最小化すべく細心の注意が払われていた異なる波長バンド間のクロストークを、光学系の段階では生じること許容し、後段の信号処理で解消しようとする、新たな設計思想を取ることにある。クロストークを許容した結果、従来のマルチスペクトルカメラに不可欠であった、スリッ



光学的ローパスフィルタ

図1 本課題で開発するマルチスペクトル画像センサの原理図

トやフィルタが不要となり、光利用効率は格段に向上するとともにカメラのサイズとコストは大幅に縮小する。一般にクロストークによる混合がコンボリューションで表される場合には、その逆処理であるデコンボリューションによって混合前の情報に復元できるが、マルチスペクトル画像センサの場合には、画像上の位置によって光の混ざり方が変わるため、混合を単純なコンボリューションでは表せず、逆問題の設定が複雑となるため、クロストークの分離のために独自の手法を考案することになった。

3. 研究の方法

本研究で提案するマルチスペクトル画像センサの構成図を図1に示すが、本センサの光学系は、通常デジタルカメラの光学系とほぼ同様であり、相違点はカラーフィルタをマイクロプリズムアレイに置き換えている点だけである。このような簡単な光学系ではマイクロプリズムアレイの屈折光間にクロストークが生じるが、独自の信号処理技術でそれを除去することにより、前述したマルチスペクトル画像センサの問題点を一挙に解決することを試みてきた。研究室で製作でき

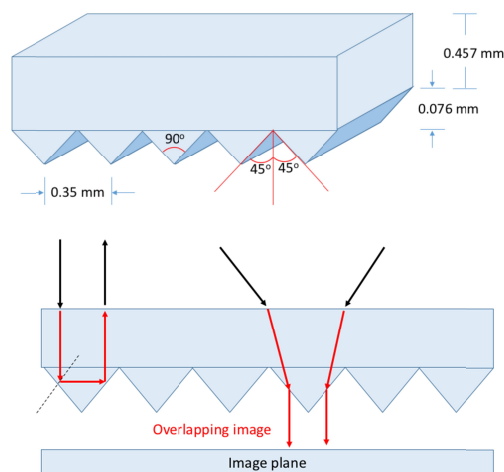


図2 使用したマイクロプリズムアレイの形態とサイズ(上)と入射光に対する光路の例(下)。

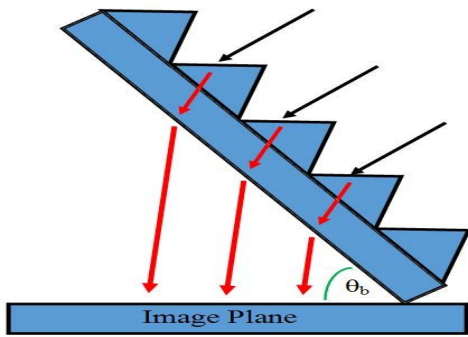


図3 マイクロプリズムに入射した光が撮像素子に到達するまでの光路。

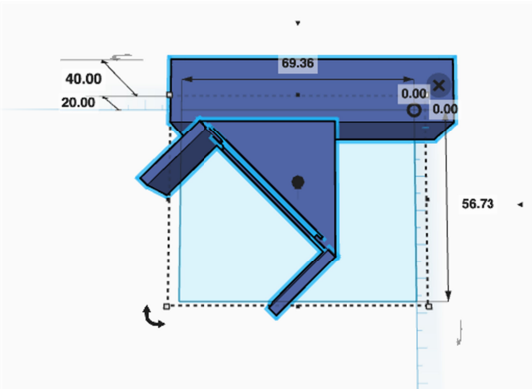


図4 マイクロプリズムアレイを撮像素子に対して斜めに設置するためのマウントの試作。

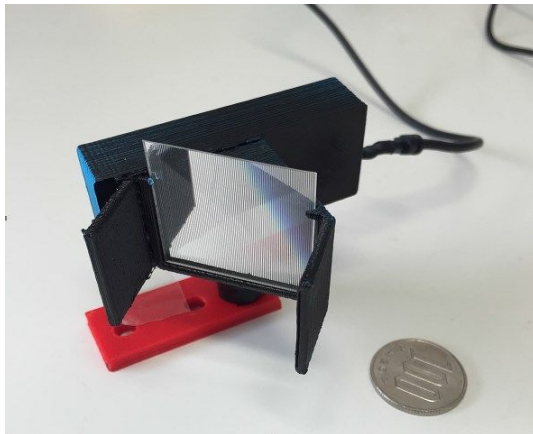


図5 本課題で試作したマルチスペクトル画像センサ

る試作装置の精度には限界があることから、画質については妥協し、コストを下げることを優先して、以下の手順で研究を行ってきた。

(1) 光学系のシミュレーションと、数値シミュレーションに基づき、マイクロプリズムアレイと撮像素子の位置関係を決定した。使用したマイクロプリズムアレイの形態とサイズを図2に示す。このマイクロプリズムに入射した光は図3に示すような光路で屈折、反射する。図2では撮像素子をマイクロプリズムアレイと平行に配置しているが、両者の間に適切な角度を持たせて斜めに配置した方が良いことが明らかになったので、図3に



図6 試作したマルチスペクトル画像センサで撮影した画像例。左画像の赤枠内を拡大した画像を右に示す。虹状のスペクトルが観測された。

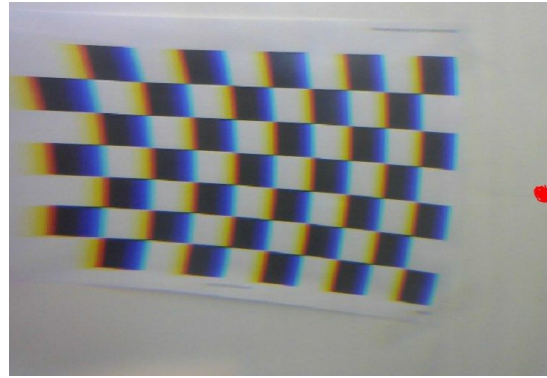


図7 試作したマルチスペクトル画像センサでは正方格子チャートも上図のようにひずんで計測される。

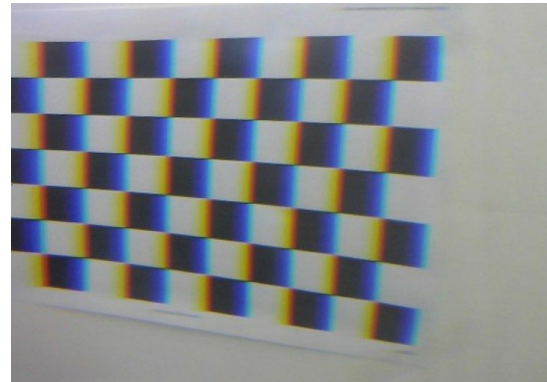


図8 歪んだ図7の画像をキャリブレーション手法で補正した結果。虹状のスペクトル情報が保持されていることが分かる。

示すように撮像面に対してマイクロプリズムアレイを斜めに傾けて設置している。

(2) こうしてシミュレーションによって設計した光学系、及び光学系と画像センサとの位置関係に基づき、図4に示すように撮像素子に対してマイクロプリズムアレイの姿勢を固定するためのマウントを3Dプリンタで製作した。こうして完成したマルチスペクトル画像センサを図5に示す。100円玉のサイズと比較すると十分小型にできていることが分かる。手前に鏡のように見える平板がマイクロプリズムアレイである。

(3) この試作で撮影した画像の例を図6に示す。想定通りに分光されていることが、画像のエッジ部分に虹状の色の分布が観測されることから確認できた。ただしマイクロプリ

ズムでは、光線の入射角度に対して非線形な関係で屈折光の角度が定まるため、撮像素子に投射される画像に歪みが生じていることが分かる。

(4)この歪を補正するキャリブレーション手法を開発した。正方格子のチェック柄のチャートを用いて補正した。本来は正方形の格子が、試作した図5のカメラで撮影すると図7に示すように歪んで観測される。この歪んだ画像と元の正方格子のチャート画像の対応点を使って、補正のための変換式を導出した。得られた変換式で補正した画像を図8に示す。歪んだ格子が正方形に補正されたことが分かる。

(5)補正後の画像に対して、波長バンド間と近傍の画素値間にまたがって生じるクロストークを数式で定式化した。そしてこのクロストークの生成モデルの逆変換を行うことでクロストーク除去を行う信号処理手法を各種開発した。

(6)上記逆変換の計算安定性を向上するため、連続性等を制約条件として逆問題を解くことを試みてきた。

(7)上記逆変換の計算安定性を向上するため、各バンドの混合係数を線形独立とする変則的な変形をプリズムに施した。さらにバンド個別の光量を、近傍で近い値となることを制約条件として、計測した受光量から推定するようにした。これは制約条件付逆問題の一種となり、連続性と誤差を評価するコスト関数の最小化や学習手法を通じて解ける。連続性等を制約条件として逆問題を解くことを試みてきた。

(8)上記の方針の正しさを検証するため、試作した図5の光学系に、仮想的に変則性を導入して数値的にシミュレーションして、計算機上でクロストークを作り出して、赤、緑、青の3つのバンドが分離できるのかを調べる予備実験を行ったところ、良好な分離結果が得られた。

(9)以上の試みを通じて、理想光学系では想定していなかった光の散乱や回折、ボケなどの光学系の誤差が生じる実際の状況で提案原理が想定通りに通用するか検討してきた。しかしながら、試作ハードウェアを用いた検証を通じて、様々な想定外の問題が浮かび上がり、計測のための光学系の構成を根本的に見直すことになった。まず物理的に混入(クロストーク)が生じている計測情報から、クロストークを排除する数値的处理は一種の逆演算となるが、逆演算が優良設定問題となって、混入が数値的な処理で分離しやすくなるように光学系の形態を工夫する必要があった(上記(7))。

(10)本課題を1年延長して、上記に述べた新しい光学系を模索してきたが、残念ながら(7)に述べた変則的な変形の導入が試作会社等の製造装置の能力内では実現できておらず、(8)の数値シミュレーションで確認できた効果を試作として実現できなかった。

4. 研究成果

本課題では、マルチスペクトル画像のバンド間、画素位置間のクロストーク(光の混合)を敢えて許容することによって、極端にまで簡易化した光学系を用いながら、計測される画像に、数値的にクロストーク分離処理を適用して、必要十分な解像度とバンド数のマルチスペクトル画像を計測することを試みてきた。数値シミュレーション上は、方針の正しさを検証できたので、実際に図5に試作を行ってマルチスペクトル画像センサを完成することができた。しかしながら、この試作した装置を用いて検証したところ、理想光学系では想定していなかった光の散乱や回折、ボケなどの光学系の誤差が生じる実際の状況では、クロストークを分離するための逆演算が不良設定問題となって、期待していた解像度やバンド数では、マルチスペクトル画像が得られないことが分かった。この逆演算が優良設定問題となるように、マイクロプリズムアレイに変則性を導入し、その効果を計算機シミュレーション上では確認したが、変則性を持ったマイクロプリズムアレイの試作が困難であったため、実際の効果は検証できなかった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表](計7件)

Hybrid Spatio-Spectral Total Variation 最小化によるハイパースペクトル画像のノイズ除去. 武山彩織, 小野峻佑, 熊澤逸夫. 2016 年度映像メディア処理シンポジウム (IMPS2016), 静岡, Nov 2016. (査読なし)

A hybrid spatio-spectral total variation regularization for hyperspectral image restration.

Saori Takeyama, Shunsuke Ono, Itsuo kumazawa. 第31回信号処理シンポジウム. 第31回信号処理シンポジウム予稿集. 大阪, Nov 2016. (査読なし)

制約付き最適化によるぼけ/ノイズ画像を利用した画像復元. 武山彩織, 小野峻佑, 熊澤逸夫. 電子情報通信学会画像工学研究会. 電子情報通信学会技術研究報告. vol. IEICE-116. no. 119. pp. 25-29. 沖縄, Jul 2016.

(査読なし)

A Novel Land Cover Mapping Algorithm Based On Random Forest And Markov Random Field Models. Teerasit Kasetkasem, Panyanat Aonpong, Preesan Rakwatin, Thitiporn Chanwimaluang, Itsuo Kumazawa.

2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2016).

Proceedings of IGARSS 2016. 中国, Jul 2016.

(査読あり)

Combining a Random Forest Algorithm and a Level Set Method for Land Cover Mapping. Panyanat Aonpong, Teerasit Kasetkasem, Preesan Rakwatin, Itsuo Kumazawa, Thitiporn Chanwimaluang. The thirteenth international conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology. Proceedings of ECTI-CON 2016. タイ, Jun 2016. (査読あり)

Land Cover Mapping Classification Based on Multi Restricted Boltzmann Machines and Support Vector Machines. Apiwat Lekfuangfu, Teerasit Kasetkasem, Preesan Rakwatin, Sararak Tanarat, Itsuo Kumazawa, Thitiporn Chanwimaluang. Proceedings of ECTI-CON 2016. タイ, Jun 2016. (査読あり)

Image restoration using a stochastic variant of the alternating direction method of multipliers. Shunsuke Ono, Masao Yamagishi, Takamichi Miyata, Itsuo Kumazawa. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP) 2016. Proceedings of IEEE ICASSP 2016. オーストラリア, Mar 2016. (査読あり)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

熊澤 逸夫 (KUMAZAWA, Itsuo)

東京工業大学・科学技術創成

研究院・教授

研究者番号：70186469