

令和元年6月10日現在

機関番号：12608

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K12457

研究課題名(和文) センサ融合とクロストーク除去によるハイパースペクトル画像計測の高感度化

研究課題名(英文) Highly sensitive hyper spectral imaging by sensor fusion and numerically resolved cross-talks

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) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：従来光学系でスペクトルを帯域別に分離しようとしていたマルチスペクトル画像センサの原理を見直し、光学系を画期的に単純化して、そのため生じる帯域間や画素間のクロストークを後段の信号処理によって取り除くことを試みた。通常のカメラの光学系にプリズムやマイクロプリズムを挿入したモノクロカメラとカラーカメラのセンサ融合を行いマルチスペクトル画像計測するためのカメラシステムを試作し、このセンサ融合カメラシステムを用いて計測した画像データから、上記クロストークを除去する凸最適化を用いる数値計算的手法を開発し、さらにディープニューラルネットワーク(U-net)を用いてクロストークを除去することを試みた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年工場自動化の製品検査工程、植物工場における植物の生育状態診断、医療画像診断、航空機やドローンによる農場や植生の監視等、様々な場面でマルチスペクトルカメラが重要な役割を果たすようになった。しかしながら現状のマルチスペクトルカメラは高度な光学系を使用しているため高価で重く、一度に計測できるのが線上の範囲となるため二次元の画像の計測に時間を要することが、利用上の制約になっていた。本課題では、光学系を画期的に単純化してコストを下げ、軽く、二次元の画像を短時間に計測できるようにし、光学系が単純なために生じる低下する画質を高度な数値処理やディープラーニングで改善する技術を開発する。

研究成果の概要(英文)：Traditional multi-spectrum cameras have been trying to use sophisticated optical systems to resolve spectrum bands. In this study, we used a very simple optical system and tried to resolve the cross-talks among spectrum bands and pixels resulting from such a simple optical system by numerical processing of the images. For this purpose, we developed a sensor fusion system using a mono-chrome camera with a micro-prism-array and a standard color camera. And as the numerical processing to resolve cross-talk, we developed convex-projection-based optimization techniques and deep neural networks (U-net).

研究分野：画像認識、ニューラルネットワーク

キーワード：マルチスペクトルカメラ ハイパースペクトル ディープラーニング 逆問題 マイクロプリズムアレイ センサー融合

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年マルチスペクトルカメラあるいはハイパースペクトルカメラの用途は急速に拡大しており、地球観測衛星や航空機を使った地質や植生、気候、環境、農業のリモートセンシング、工場内の食品、製品の検査、医療診断等に使用されている。その最も代表的な計測原理を以て、計測対象から反射されてきた光をスリットに通すことによって計測範囲を一本の線上に制限した上で「反射型回折格子」を用いて、その線と直交する方向に光を波長毎に異なる方向に投射（分光）している点にある。外光は細い線状の「スリット」を通してカメラに入射するときに、通常のレンズを使うカメラに比べて、光量が数百分の一になる。さらにこれが「反射型回折格子」で数百バンドの波長帯に分割されるため、1画素に辿り着く光量は通常のカメラの「数百分の一×数百分の一」すなわち数万分の一になってしまう。また二次元の画像センサの二つの座標軸の一軸はスペクトルの計測に使用するため、一度に計測できるのは画像の一ライン上の情報のみとなるので、二次元画像として計測するためには、このラインと直交する方向にスキャンする必要がある。

以上の問題に対して学術的背景としては、現在「センサ融合」と呼ばれる手法が活発に研究されており、低感度のハイパースペクトルセンサと高感度のカラーセンサを併用して上記の問題に対応しようとしているが、光学系で生じている光の大きな損失を改善しない限り限界がある。

2. 研究の目的

上述したように、現状のマルチスペクトル(バンド数が多い場合ハイパースペクトルと言う)画像センサの最大の欠点は光エネルギー利用効率が低いことにあり、それは画像計測に致命的な悪影響をもたらす。本課題では、光学部分でクロストークを許容することで光学系を簡易にするとともに光利用効率を数百倍に改善し、後段のコンピュータによる数値的処理部分でクロストークを除去することによって、十分な画質のハイパースペクトル画像を得ることを目的とする。本課題では、特に分光方式を見直すと共に「センサ融合」の概念を導入し、先行課題で試作したハイパースペクトル画像センサに通常のステレオカメラを併用し、両者で同時に計測した画像を融合し補完させ合うことでクロストークの除去性能を大幅に改善する。

3. 研究の方法

本課題では、先行課題を通じて得られた知見に基づき、次の様にハイパースペクトル画像センサの構成を見直して試作することを計画した。(a)分光に使用しているマイクロプリズムアレイのピッチを50ミクロン間隔から数ミクロン間隔に変更する。(b)ピッチを狭くしたことにより回折現象も生じるため、プリズムによる屈折と回折による干渉が混在した場合の分光現象を幾何光学的に解析する。(c)この解析結果に基づき、空間的なクロストークと異なる波長帯間のクロストークの数値モデルを構築する。(d)この数値モデルに基づきクロストークを除外するアルゴリズムを作成する。(e)以上で試作したハイパースペクトル画像センサとステレオカメラを併用して、センサ融合によりクロストーク除去性能を一層向上させる方法について研究する。実際には、以上の研究方法は、当初計画していた研究期間2年では完了しなかったため、研究期間を1年間延長した上で、以下のように修正して実行した。

Micro-Prism Sheet

- Micro-prism can disperse the color spectrum of image at a different position without an image distortion.
- We believe that spectral dispersion over spatial plane contains color information than traditional RGB image.
- We assume that we can use this color feature to improve quality of image reconstruction method.



Micro-prism sheet



Sample images taking from iPhone camera integrated with a Micro-Prism sheet



図1 本課題で使用したマイクロプリズムを通して撮影した画像例

Stereo camera system

Equipment

1. Logitech C270 webcam cameras
2. Logitech C270 Stereo Vision Case from 3D printer
3. Micro-prism array film

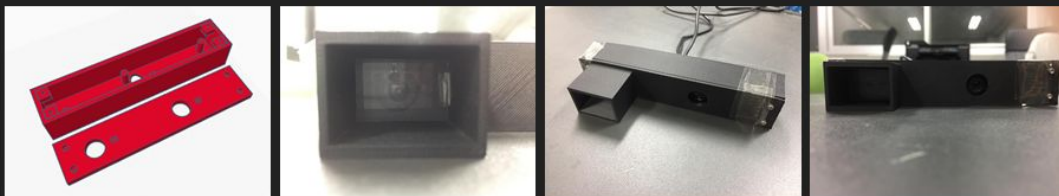


図2 センサ融合のため、マイクロプリズムアレイをレンズ前面に設置したモノクロカメラとカラーカメラを精密に位置を決めて収納する筐体を3Dプリンタで制作した。

H28 年度に考案した構造の独自センサでは、クロストーク除去アルゴリズムとセンサ融合によって期待したスペクトルの分離は達成できなかったが、新たに RGB カラーカメラとマイクロプリズムアレイ(図1)を光路途中に挿入したカメラを2台同時に用いて計測することにし、この2台の計測結果の間で厳密な位置合わせを行えるように、2台のカメラの位置関係を精密に定めるための筐体を3Dプリンタで試作し(図2)、2台のカメラのキャリブレーションを厳密に行うようにしたところ、2台のカメラで計測した画像の画素間に正確な対応付けができるようになり、それによって逆演算の際の不確実性が減り、クロストークを除去しやすくなり、スペクトルの分離が行えるようになった。また、前年度までの研究から当スペクトル分離問題(クロストーク除去問題)が当初想定していたよりも条件の悪いデコンボリューション問題となることが判明していたので、凸射影法に基づく新たなクロストーク除去の方式を開発した。この方式は、まだ実データには適用していないが、数値シミュレーションによって生成したノイズ混入の模擬マルチスペクトル画像に対して、ノイズの除去とクロストークの除去を同時に実現できることが示された。上記キャリブレーションにおいて、幾何光学的校正を行う際には、異なる画像センサの対応画素の近傍の多数の画素の間で、クロストークを生じたスペクトル情報間に多数の連立方程式ができるのでこれを高次元の逆問題として定式化した。そして人工ニューラルネットワークを多数のサンプルで学習することによってこの逆問題を解く方式を考案した。

Collecting New Dataset

- > Giving up on outside spectral dispersion and focused only inside dispersion
- > Setting 2 cameras in front of computer display, rendered 2x2 color square matrix of 10 colors different
- > The distance between camera and display is about 42 cm
- > Capturing image at night, only using light from display
- > Number of total dataset = $P(10, 4) = 5,040$ images

> Micro-prism



> Rgb



図3 クロストークを除去するニューラルネット学習用画像データの制作

Experiment with U-net

Crop images from center

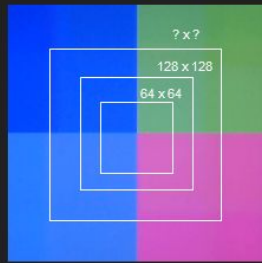
1. 64 x 64 pixels
2. 128 x 128 pixels

Different color space

1. L → ab
2. L → rgb

Camera

1. Prism based camera
2. Conventional camera



Fixed parameters

Dataset: 5,040 images of 2x2 color square matrix (train: 4283, val: 757)

Loss: Mean Absolute Error (MAE)

Optimizer: Adam

Epochs: 3000 with early stopping

Batch size: 32

9

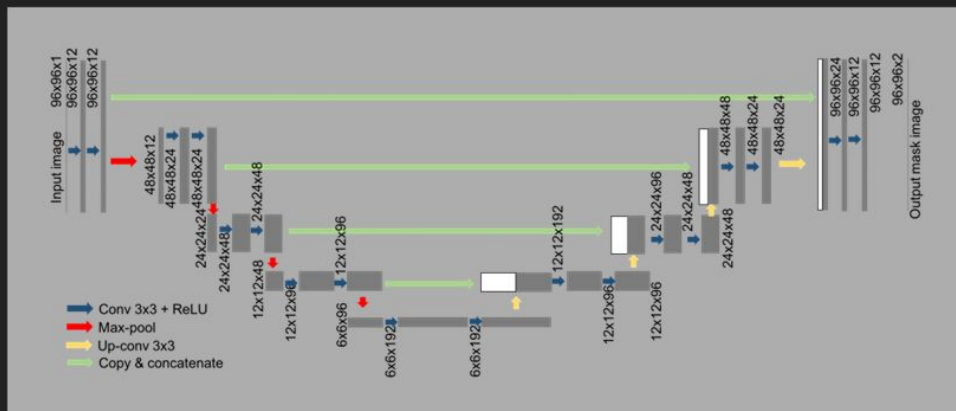
図4 図5のディープニューラルネットワーク(U-net)を使用する際の実験条件

図2のようにマイクロプリズム付きモノクロカメラとカラーカメラのセンサ融合によって、計測した画像からニューラルネットワークでクロストーク除去を行う場合、スペクトルと空間情報が混合した情報から混合前の情報を復元するように逆問題を解く必要がある。当初は下記の発表論文に見られるように最適化問題として定式化して、数値計算によってこの逆問題を解いていたが、近年、ディープニューラルネットワークによって各種逆問題が高精度に解かれていることに触発されて、平成28年以降は図5に示すディープニューラルネットワークを用いて、マルチスペクトル画像を求めることを試みてきた。このディープニューラルネットワークを機械学習させるための学習用データは図3に示す方法で収集した。また図2に示すセンサ融合用カメラから得た画像は図4に示す解像度(入力画像サイズ)、カラー画像表現、ロス関数、学習回数、最適化方法の実験条件でディープニューラルネットワークに与えて機械学習を行った。

4. 研究成果

従来光学系でスペクトルを完璧に帯域別に分離しようとしていたマルチスペクトル画像センサの原理を見直し、光学系を画的に単純化して、そのため生じる帯域間や画素間のクロストークを後段の信号処理によって取り除くことを目指して、図2に示す通常のカメラの光学系にプリズムやマイクロプリズムを挿入したモノクロカメラとカラーカメラのセンサ融合を行いマルチスペクトル画像計測するためのカメラシステムを試作した。

Colorizing with U-net model



8

図5 図2のセンサ融合カメラシステムで撮影した画像に含まれるスペクトルと空間のクロストークを除去するために構成したディープニューラルネットワーク(U-net)

この独自のセンサ融合カメラシステムを用いて計測した画像データから、スペクトルと空間のクロストークを除去するアルゴリズムとして、凸最適化を用いる数値計算的な手法（下記発表論文）を開発し、さらに図4、5に示すディープニューラルネットワーク(U-net)を用いてクロストークを除去することを試みた。ディープニューラルネットワーク(U-net)を用いた場合の実験結果を図6、図7に示すが、まだ十分にクロストークは除去できない状況にある。

今後は、この逆問題を最適化問題として定式化して数値計算で解く場合には、線形で定式化すると逆行列を解く際に悪条件となるため、その条件を改善するための制約項を新たに導入してクロストークを除去できるように改善したい。またディープニューラルネットワークで解く場合には、層数、素子数、フィルター数、ネットワークの形体等を調整してクロストーク除去能力を高めていきたい。

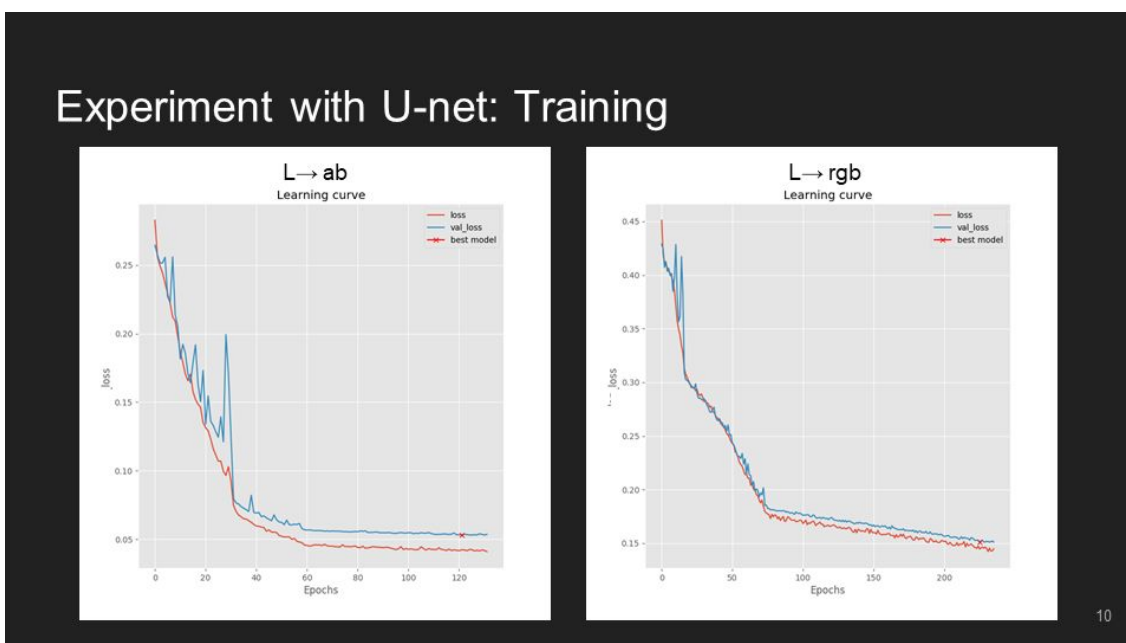


図6 図5のディープニューラルネットワーク(U-net)を図3の学習用画像で学習した際のロス関数の減少の様子。カラー表現として ab と rgb を用いる場合を比較している。

Experiment with U-net: Results

| Prism based camera | | Convention camera | |
|----------------------------|-----------|----------------------------|-----------|
| Input→Output [image sizes] | Loss: MAE | Input→Output [image sizes] | Loss: MAE |
| L→ab [64 x 64] | 0.05108 | L→ab [64 x 64] | 0.00963 |
| L→ab [128 x 128] | 0.05298 | L→ab [128 x 128] | 0.01038 |
| L→rgb [64 x 64] | 0.06587 | L→rgb [64 x 64] | 0.00957 |
| L→rgb [128 x 128] | 0.15086 | L→rgb [128 x 128] | 0.01745 |

図7 図6の学習後、テスト用画像で評価したクロストーク除去性能。マイクロプリズムを搭載されたモノクロカメラを用いてセンサ融合を行ったがクロストーク除去性能は向上しなかった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

(1) 武山 彩織, 小野 峻佑, 熊澤 逸夫: Image restoration with multiple hard constraints on data-fidelity to blurred/noisy image pair, IEICE Transactions on Information and Systems, E100-D, pp. 1953-1961, 2017(査読有)

〔学会発表〕(計 9 件)

(1) 武山彩織, 小野峻佑, 熊澤逸夫: 空間-波長方向の正則化を用いたノイズにロバストな Hyperspectral Pansharpening, 第 32 回信号処理シンポジウム予稿集, 2017(査読無)

(2) 武山彩織, 小野峻佑, 熊澤逸夫: パンクロマティック画像に含まれるガウシアンノイズを考慮した hyperspectral pansharpening に関する手法, 電子情報通信学会技術研究報告, 2017(査読無)

(3) Watsana Bupphawat, Teerasit Kasetkasem, Preesan Rakwatin, Itsuo Kumazawa, Thitiporn Chanwimaluang: On the Multi-resolution Image Land Cover Mapping Using Deep Learning, The 8th International Conference on Information and Communication Technology for Embedded Systems (国際学会), 2017(査読有)

(4) Saori Takeyama, Shunsuke Ono, Itsuo Kumazawa Robust and effective hyperspectral pansharpening using: spatio-spectral total variation IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP), pp.1603-1607, 2018(査読有)

(5) 武山彩織, 小野峻佑, 熊澤逸夫: ハイパースペクトルイメージングのための圧縮 pansharpening の検討, 電子情報通信学会技術研究報告, 2019(査読無)

(6) 武山彩織, 小野峻佑, 熊澤逸夫: ガウシアンノイズを考慮した ハイパースペクトル画像とマルチスペクトル画像の合成法, 第 33 回信号処理シンポジウム予稿集, 2018(査読無)

(7) 武山彩織, 小野峻佑, 熊澤逸夫: ハイパースペクトル画像の混合ノイズ除去におけるパラメータ設定に関する検討, 2018 年電子情報通信学会ソサイエティ大会予稿集, 2018(査読無)

(8) Saori Takeyama, Shunsuke Ono, Itsuo kumazawa: Hyperspectral Pansharpening Using Noisy Panchromatic Image, Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA ASC) 2018, 2018(査読有)

(9) Saori Takeyama, Shunsuke Ono, Itsuo kumazawa, Hyperspectral Image Restoration and Pansharpening, Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA ASC) 2018, 2018(査読有)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

6. 研究組織

(1) 研究分担者

なし

(2) 研究協力者

なし

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。