

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 7 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24360347

研究課題名(和文) 情報融合による遠隔探査データの多次元超解像

研究課題名(英文) Superresolution of Remote Sensing Data using Data Fusion Technique

研究代表者

岩崎 晃 (Iwasaki, Akira)

東京大学・先端科学技術研究センター・教授

研究者番号：40356530

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,300,000円

研究成果の概要(和文)：ハイパースペクトルデータは100以上の波長で観測することができるが、空間分解能が低いという欠点がある。観測する波長が少ないが、空間分解能の高いマルチスペクトルデータと融合することで、高スペクトル分解能かつ高空間分解能のデータを生成することが期待される。航空機に2つのセンサを搭載して同時に撮像した実データを対象に高解像度化のアルゴリズムの妥当性を調べ、スペクトル画像がより精細に表現されていることを確認した。異種衛星センサデータへの応用、非線形反射率への拡張も示した。

研究成果の概要(英文)：Hyperspectral data has more than one hundred spectral bands and can discriminate ground targets precisely; however, the spatial resolution is limited due to low signal power. This work is intended to fuse hyperspectral data with multispectral data that has higher spatial resolution. To demonstrate the validity of the proposed methodology, the real data is obtained by both hyperspectral and multispectral sensors that are on board an airplane. The validity of the algorithm that fuses two sensor data is examined to express the spectral characteristics of ground targets with higher spatial resolution. The application to different satellite sensors is also indicated. The methodology is extended to ground targets with nonlinear reflectance properties.

研究分野：リモートセンシング

キーワード：ハイパースペクトル マルチスペクトル 情報融合 航空機実験

1. 研究開始当初の背景

「宇宙基本計画」において宇宙開発利用の重要性が強調されている中、データ利用者は観測波長や空間分解能の点からより詳細な観測を求めている。ハイパースペクトルセンサは150以上の観測波長で地表面を観測する遠隔探査センサであり、日本・ドイツ・イタリア・米国・中国などで衛星搭載用に開発が進められている。これらのセンサが打ち上げられる2015年以降には超多波長観測の時代を迎えることになるが、センサに入射する光量が少ないために空間分解能が30m程度に制限されており、ユーザの要求を満たしきれない。例えば、区画ごとに品種分類まで行うことができる農業分野、「生物多様性条約」のために詳細な生物圏の把握が期待される環境分野、「コペンハーゲン合意(COP15)」による森林の減少及び劣化に由来する排出削減(REDO+)のために樹種識別を行う森林分野においては、さらに詳細な空間情報が要求されている。

空間分解能の低いハイパースペクトル画像を、観測波長が4つ程度で空間分解能の高いマルチスペクトルセンサと融合することができれば、最も確からしいという規範に基づき、空間分解能の高いスペクトルデータを生み出すことができる。これによって、衛星においては空間分解能を30mから5mに改善し、航空機においては空間分解能を1mから12cm程度にまで向上させることができるため、日本のような狭大な土地利用がなされている国土の管理にスペクトル情報を用いることが可能となる。

類似の視点として白黒画像とマルチスペクトル画像を組み合わせるパンシャープン技術があるが、スペクトルの再現性が悪く、目視判読に使われるのみである。これはマルチスペクトル画像のスペクトル情報が少ないために、解を求めるための拘束が足りないことによる。特に、2つの装置の応答関数に関して既知として扱ってしまうと、軌道上で装置が経年変化した場合には誤差が拡大し、解が収束しないという問題がある。さらに、地形や大気の影響がデータの分散を大きくするために、最尤推定に影響を与えてしまう。

提案者らはこれまでに機械学習に基づいてハイパースペクトルとマルチスペクトルのセンサデータを融合する手法を開発し、数値シミュレーションによって、高空間分解能と高スペクトル分解能を満たすデータを得ることを確認した。これらの経験に基づき、データ融合で既知としている装置関数について、システム同定手法を推定過程に組み込むことで、未知のセンサ同士でも最適な解を得られると考えられる。また、地形情報を既知の拘束条件として入れることで、種々の環境要因を低減できる可能性が高い。最適化問題としてこれらの事象を定式化し、さまざまな問題が発生しうる実証実験を通じてこれらの課題を解決することで、信頼できるスペ

クトル情報として用いられる融合データを生み出すことが可能となると期待された。

この問題については、2005年に米国の研究グループが最大事後確率に基づく融合方法を発表しているが、さまざまな制限があるものであった[*1]。2011年に提案者らが非負値行列因子分解に基づく手法を用いて、より高精度に融合データを生み出せることを示した[*2]。しかしながら、いずれも合成データに基づくものであり、実用にはさらなる頑強性の獲得が必要である。そのためには、まず、ハイパースペクトル画像とマルチスペクトル画像を同時に取得し、実データでの検証を行う必要がある。この際に問題となるのは、センサ間の観測波長の関係や画像の応答関数が設計値からずれており、その推定がデータの品質に影響してしまうことである。装置関数を凸最適化問題として定式化することで、非負値行列因子分解に組み込むことができれば、自己完結性を獲得できる。実データを用いたセンサ技術と高度な数学モデルの構築は他の研究グループにない特筆すべき点である。

以上の見地から、実データを用いて融合研究を行うことが本課題をさらに進めるために必要と考えた。

[*1] M. T. Eismann and R. C. Hardie, "Hyperspectral resolution enhancement using high-resolution multispectral imagery with arbitrary response functions," IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., vol.43, pp.455-465, 2005.

[*2] N. Yokoya, T. Yairi and A. Iwasaki, Coupled nonnegative matrix factorization unmixing for hyperspectral and multispectral data fusion, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol.50, pp.528-537, 2012.

2. 研究の目的

ハイパースペクトルセンサは将来の地球惑星遠隔探査において、多くの知見をもたらすものとして期待されているが、センサに入射する光量が少ないため、空間分解能を高くすることに困難を伴う。本研究では、波長分解能の高いスペクトル画像と空間分解能の高いカラー画像を融合することで、両者の長所を兼ね合わせた融合データを作成する手法を研究する。両者の装置関数のシステム同定および地形効果などの拘束条件を定式化することで、スペクトル精度や空間分解能の点で融合データの品質を向上させるアルゴリズムを開発する。このために、航空機に実験装置を搭載し、地上の様々な場所を撮像する。実際に観測を行うことで、誤差の要因を抽出し、その補正方法を検討する。作成した融合データを用いて、機械学習に基づく土地被覆分類による評価を実施し、将来の遠隔探査ミッションへの適用性を示す。

3. 研究の方法

ハイパースペクトルセンサとマルチスペクトルセンサが取得したデータを融合する。ソフトウェア面では、物質・含有率分離手法および装置関数推定法のアルゴリズムを構築し、両者を結び付ける定式化を行う。具体的には、非負値行列因子分解と凸最適化を組み合わせることで解を得る。

ハードウェア面では校正実験系および観測系装置を作成し、2つの光学観測センサの装置関数（空間応答関数、スペクトル応答関数）を測定する。最後に、地上実験および航空機実験で得られた画像を融合して、高空間分解能かつ高スペクトル分解能の画像を得る。地上ターゲットに対して、物質・含有率分類を行い、精度のよい融合データが得られていることを確認する。同時に、装置関数の推定を行い、校正実験で得られた結果と比較する。標高や大気の影響を軽減する方法を検討することで、より頑強な手法を完成させる。

以上の研究の妥当性を調べるために、航空機実験を行う。これまで、ハイパースペクトルセンサとマルチスペクトルセンサを同時搭載した例がないため、搭載可能性を調査するとともに、航空測量会社とデータ取得の検討を行う。

4. 研究成果

4.1 航空機実験

セスナ機に搭載するハイパースペクトルセンサ（HeadWall）およびマルチスペクトルカメラ（Cannon, EOS）を搭載するための装置開発および電気系開発を行った。前者はプッシュブルーム撮像を、後者は二次元画像撮像を行うため、撮像時間を記録し、航空機の位置姿勢情報と照合させ、二種類の画像データを位置合わせる必要がある。このため、GPS/IMU位置姿勢計測装置としてAPPLANIX社製 POS-AV および空中写真撮影システムとしてVEGAを搭載した。

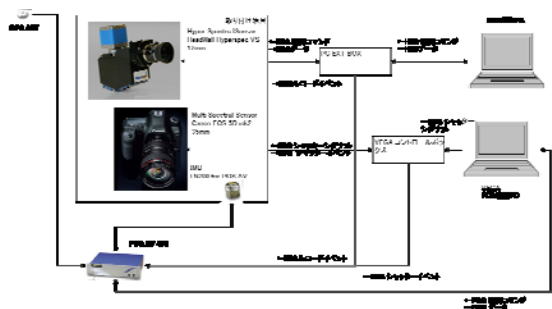


図1 航空機実験装置

図1に航空機実験装置のフロー図を示す。信号の同期に必要な情報は、GPS/IMU位置姿勢計測装置およびその制御計算機によってGPS時刻に基づき行われる。撮像は搭載計算機から制御した。

搭載航空機については、機種はセスナ

社のC208型とし、観測装置一式を架台に固定した後、法律に基づく搭載審査を行った。すなわち、修理改造検査合格証の発行までの作業に関しては、航空法の搭載のための承認、および国土交通省航空局技術部航空機安全課の航空機及び装備品等の検査に関する一般方針に従った。撮像飛行業務に関しては国土交通省の測量業務に関わる法規に基づく。審査にあたっては、搭載する計測器および計算機について、電子干渉を中心としたデータ収集を行った。当初は2012年に航空機実験を行う予定であったが、審査に時間がかかること、太陽高度が高く植物が繁茂する夏季の実験が望ましいことから、2013年に繰り延べた。

2013年および2014年に航空機による撮像実験を行った。2013年度は、東京大学駒場キャンパスおよび多摩森林公園を撮像した。図2に2013年に撮像した画像を示す。実験時のレンズの絞りの調整に課題を残し、得られたデータの輝度が低いという問題が発生した。

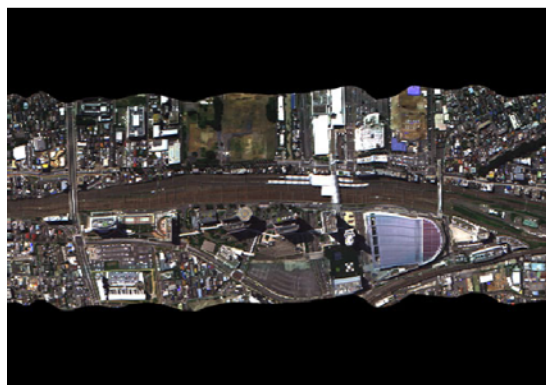


図2 2013年撮像（7月8日）

2014年は、上記の問題を解決し、東京大学駒場キャンパスおよび茨城県筑西市を撮像した。同時に観測地の地物のスペクトルデータを地上で取得し、参照データとした。また、ハイパースペクトルセンサに対して、標準光源たる高輝度タングステンランプを用いて校正を行った。さらに、大気補正ソフトウェアを用いて、輝度情報から反射率情報への変換を行った。図3に2014年に取得した画像を示す。

2つの観測データの連立関係式を解くためには、それぞれのセンサ間の関係式が必要である。それぞれのセンサのスペクトル応答関数について、実測データに基づいて推定する手法を開発した。とりわけ、マルチスペクトルセンサとして、市販のRGBカメラを用いていることから、応答関数の決定は重要である。



図3 2014年撮像（7月29日）

4.2 データ融合手法の検討

非負値行列因子分解を核として、ハイパースペクトルセンサデータを地表面物質とその含有率に分離する。これは、地表面が比較的少ない物質から成り立っているという事前知識に基づくものであり、空間分解能が低いために観測対象が混合する遠隔探査ではよく用いられる方法である。

線形モデルに従えば、物質と含有率の積を足し合わせたものが、観測されるスペクトルである。観測されるスペクトルから物質と含有率を逆推定する混合分離をそれぞれのセンサに行うことができれば、データ融合の過程が行いやすくなる。非負値行列因子分解は効率的に混合分離を行うアルゴリズムであり、それぞれの観測データについての連立方程式が得られる。解の収束性や精度に影響する拘束条件についての検討を行い、精度の向上を目指した。とりわけ、初期条件としてVCAアルゴリズム[*]を用いることが有効である。

同時に、観測方程式を準備し、ハイパースペクトルセンサについては、真の画像に対して解像度をダウンサンプルしたものとなる。マルチスペクトルセンサについては、真の画像に対してスペクトル方向にダウンサンプリングしたものになる。どちらの応答関数も正值である。マルチスペクトルセンサの応答関数については、凸最適化理論を用いることで、ハイパースペクトルデータをスペクトル方向にダウンサンプリングしたものとの推定値誤差を最小とする解を得ることで、装置関数の推定ができる。

[*] J. M. P. Nascimento and J. M. B. Dias, "Vertex component analysis: A fast algorithm to unmix hyperspectral data," IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., vol. 43, pp. 898-910, 2005.

図4にハイパースペクトル画像および、マルチスペクトルデータとの融合によって高解像度化した結果を示す。明らかに、地物の境界が明瞭となっていることが判る。また、スペクトル解析の結果から、融合画像は植生のスペクトルを示すことを確認した。

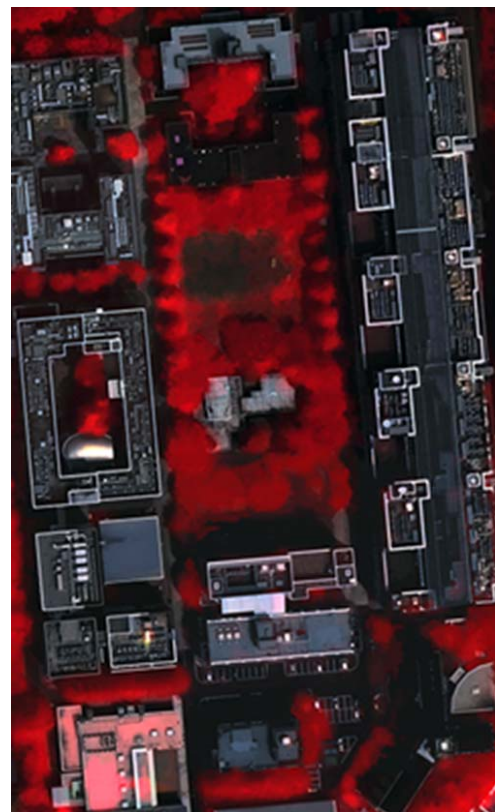


図4 観測画像（上）と融合画像（下）

4.3 非線形散乱への拡張

鉱物や植生では多重散乱によって、物質間のスペクトルが非線形に混合するという現象が報告されている。このような現象がある場合について、物質・含有率分離手法を導入する定式化を行った。非線形性としてバイラテラルモデルを選択し、適用方法を見出し、拡張した非負値行列因子分解問題としての形式に変換した。多重散乱が起こりやすい場所で、非線形性が発生していることが確認できた。

4.4 衛星データへの展開

これまでのデータ解析は同時に撮像した航空機データを用いてきた。しかしながら、地球規模での解析を考えた場合には、衛星データでの適用性を調べる必要がある。

2つのセンサデータを融合する際に必要となる、装置関数推定の可能性を調べるために、既存の衛星データを用いた。この場合は、同じプラットフォームに搭載されているセンサはないため、撮像時間は異なるものとなる。軌道上で運用中の Hyperion センサと ASTER センサはほぼ同じ軌道を飛行し、ほぼ30分の時間差の撮像時間で済む。従って、大気や影の変化は少ないと期待される。

サンフランシスコの撮像シーンに対して相互の衛星データの幾何学的レジストレーションを行い、位置合わせを行った。線形の非負値行列因子分解問題を適用し、解像度の向上に成功した。光学収差に起因する点像分布関数およびスペクトル応答関数について、実測データに基づいて推定する手法を開発した。これは、2つの装置間の関係を最適化問題として定式化するものであり、ハイパースペクトルセンサを用いて、マルチスペクトルセンサの特性を校正することにつながる。

4.5 公開データの準備

現在、本課題で取得したデータのうち、教師データの精度の高いものを公開する準備を進めている。

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)

[雑誌論文] (計 3件)

1. N. Yokoya, N. Mayumi, and A. Iwasaki, "Cross-calibration for data fusion of EO-1/Hyperion and Terra/ASTER," IEEE J. Sel. Topics Appl. Earth Observ. Remote Sens., Vol. 6, pp. 419-426, 2013.
2. N. Yokoya, J. Chanussot, and A. Iwasaki, "Nonlinear unmixing of hyperspectral data using semi-nonnegative matrix factorization," IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., Vol. 52, pp. 1430-1437, 2014.

3. N. Yokoya, A. Iwasaki, "Object detection based on sparse representation and Hough voting for optimal remote sensing imagery," IEEE J. Sel. Topics Appl. Earth Observ. Remote Sens., Vol. 8, pp. 2053-2062, 2015.

[学会発表] (計 3件)

1. 横矢直人, 岩崎晃, "航空撮像によるハイパー・マルチスペクトルデータ融合," 日本リモートセンシング学会学術講演会, 日本大学 (郡山), 11/18-19, 2013.
2. N. Yokoya, A. Iwasaki, "Effect of unmixing-based hyperspectral super-resolution on target detection," IEEE WHISPERS, Lausanne, Switzerland, 6/24-27, 2014.
3. N. Yokoya, A. Iwasaki, "Airborne unmixing-based hyperspectral super-resolution using RGB imagery," IEEE IGARSS, Quebec, Canada, 7/13-18, 2014.

[図書] (計 0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0件)

○取得状況 (計 0件)

[その他]

ホームページ等

<http://park.itc.u-tokyo.ac.jp/sal/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岩崎 晃 (IWASAKI AKIRA)

東京大学・先端科学技術研究センター・教授
研究者番号: 40356530