

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 11 日現在

機関番号：82401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K20955

研究課題名(和文)スペクトル画像データ融合に基づく多次元高分解能リモートセンシング

研究課題名(英文)Multidimensional high-resolution remote sensing based on spectral data fusion

研究代表者

横矢 直人(Yokoya, Naoto)

国立研究開発法人理化学研究所・革新知能統合研究センター・ユニットリーダー

研究者番号：40710728

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、複数の地球観測衛星から得られる光学画像を統合的に解析し、空間・時間・波長の次元において高い分解能で地表面の状態・変化を認識するデータ融合基盤技術を開発した。センサ特性や観測条件の差異に関わらず、複数の光学画像から、地表面の物質と含有率分布を認識する理論を構築した。土地利用・土地被覆図や鉱物分布図の作成、及び、土地被覆変化検出に適用し、地表面物質の詳細な識別を、高解像度かつ高頻度で実現した。

研究成果の概要(英文)：We developed a data fusion technology to analyze multisensor optical images obtained from different Earth observation satellites to recognize the state and change of the ground surface with high resolution in spatial, temporal, and spectral domains. We developed a methodology that determines the materials and their fractional abundances at each pixel from multiple optical images obtained by different sensors. The proposed methodology is robust against the difference of sensor characteristics and observation conditions. We applied the technique to land-use and land-cover mapping, mineral mapping, and land-cover change detection, and demonstrated detailed identification of ground surface materials with high spatial and temporal resolution.

研究分野：空間情報学

キーワード：リモートセンシング スペクトル画像 データ融合 物質・含有率分解 土地被覆変化認識 高解像度
化

1. 研究開始当初の背景

地球観測光学センサは、空間・波長・時間の分解能を上げることで発達してきたが、ハードウェアの制約から全てを同時に高めることは困難であり、各種分解能にはトレードオフが存在する。例えば、欧州宇宙機関が打ち上げた Sentinel-2 (マルチスペクトル衛星) は、可視光・近赤外・短波長赤外域を 13 の波長帯で観測し、地上サンプリング幅 10・20・60 m、観測幅 290 km で、同じ地域を 5 日に 1 度撮影できる。一方、ドイツ航空宇宙センターが打ち上げる EnMAP (ハイパースペクトル衛星) は、242 の波長帯を観測することで詳細な地表面物質の識別を可能とするが、地上サンプリング幅 30 m、観測幅 30 km、撮影頻度は 27 日に 1 度に制限される。

地表面の状態や変化を正確に把握するためには、複数の光学センサで得られるスペクトル画像を統合的に解析し、各センサの強みを全て活かすデータ融合が有効である。空間と波長の分解能にトレードオフがある 2 つのスペクトル画像 (例：マルチスペクトル画像とハイパースペクトル画像) を融合し、高空間・高波長分解能画像を再構成する研究 (スペクトル画像高解像度化) が盛んに進められた。ただし、これらの研究は、2 つの画像を同時期に撮影することと、観測波長帯が共通していることを仮定しており、観測条件やセンサ特性が大きく異なる場合には適用できない。スペクトル画像データ融合を、一般的な多センサ・多時期のスペクトル画像集合の解析に拡張することで、空間と波長に加えて時間の高分解能化することが課題である。

2. 研究の目的

センサ特性が異なる複数の地球観測衛星から得られるスペクトル画像集合を統合的に解析することで、一つのデータでは得られない地表面情報を抽出するデータ融合手法を開発する。より具体的には、センサ特性や観測条件の差異に関わらず、複数のスペクトル画像から、地表面の物質とその含有率分布を認識 (物質・含有率分解) する理論を構築する。地表面物質の詳細な識別を、高解像度かつ高頻度で実現し、土地利用・土地被覆図や鉱物分布図の作成、及び、土地被覆変化検出に応用する。

3. 研究の方法

(1) スペクトル画像データ融合理論の構築

多センサ・多時期データを扱うことができるスペクトル画像データ融合理論を構築する。物質・含有率分解の最適化において、地表面情報、センサ特性、大気条件を分離するための方法論を明らかにする。また、地表面状態の類似度やセンサ特性の優劣を利用することで、複数のスペクトル画像データに共通して潜む物質とその含有率分布を安定的に求める方法を明らかにする。特に、大気の影響が大きいとき、データを個別に解析する場合より

も正確に物質と含有率分布を推定できるかを調査する。

(2) 土地被覆変化自動認識への応用

多センサ・多時期のスペクトル画像セットに物質・含有率分解を連成的に適用し、データ駆動による土地被覆変化の自動認識を実施する。分類に基づく従来手法では識別が困難なサブピクセルレベルの土地被覆変化を把握できるか調べる。将来の地球観測ミッションへの適用性を明らかにする。

(3) スペクトル画像高解像度化への応用

同期観測を前提としないスペクトル画像高解像度化技術を確立する。観測プラットフォームや大気条件の違いが、高空間・高波長分解能画像の再構成に与える影響を明らかにする。特に、波長応答関数などのセンサ特性の組み合わせと融合データの再構成精度の関係性を明らかにする。実衛星画像に適用し、土地被覆・土地利用図や鉱物分布図の作成における有効性を検証する。

4. 研究成果

(1) スペクトル画像データ融合理論の構築

似た反射スペクトルを有する画素は、そこに含まれる物質と含有率も類似することを仮定し、複数の物質・含有率分解問題を安定的に解くスペクトル画像データ融合理論 (連成物質・含有率分解) を開発した。本技術は、時系列画像集合内で、地表面状態が似通ったスペクトル画像のサブセットを探し (図 1)、それらの物質・含有率分解を連成的に解く。センサ特性の優劣を考慮して、波長分解能が高い画像 (ハイパースペクトル画像) の解析で得られる知識を、波長分解能が低い画像 (マルチスペクトル画像) の解析に転移する点において特色がある (図 2)。また、大気条件の標準化と、波長応答関数の推定をデータ駆動で行うことで、観測条件やセンサ特性の差異に関わらず、地表面の物質と含有率分布の推定を実現した。

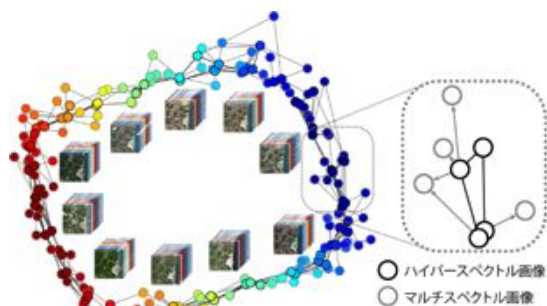


図1. 時系列データ内における地表面状態の類似度に基づく近傍画像探索。

(2) 土地被覆変化自動認識への応用

本研究で開発した連成物質・含有率分解の有効性を定量的に評価するために、アメリカ

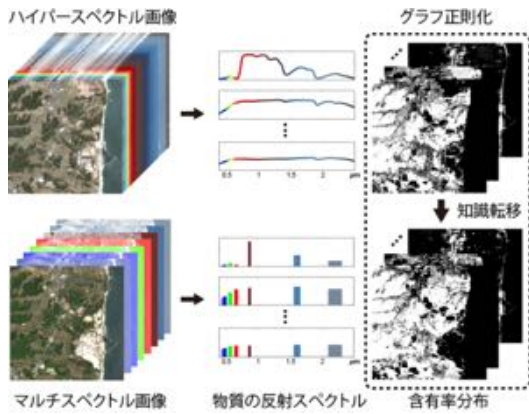


図2. センサ特性を考慮した物質・含有率分解の知識転移。

地質調査所のスペクトルライブラリを用いて、時系列スペクトル画像集合をシミュレートした。マルチスペクトル衛星とハイパースペクトル衛星を想定し、センサ特性には Landsat-8 と EnMAP を用いた。複数の物質に対して異なる季節変化や土地被覆変化を模擬した。提案手法により、含有率の推定誤差が、12%から3%まで低減することを示した。

次に、Hyperion (ハイパースペクトル衛星) と Landsat-8 (マルチスペクトル衛星) から取得された時系列スペクトル画像集合に、連成物質・含有率分解を適用し、土地被覆の変化を自動認識することに成功した (図3)。データ駆動により、植物の季節変化と、土地利用の変化をサブピクセルレベルで認識できることを明らかにした。また、Hyperion 画像の物質・含有率分解で得られた知識の転移により、Landsat-8 の物質・含有率分解の精度が飛躍的に向上することを実証した。

(3) スペクトル画像高解像度化への応用発展

最先端のスペクトル画像高解像度化手法を体系的に比較・評価した。特に、波長応答特性などのセンサ特性の組み合わせと融合データの再構成精度の関係性を明らかにした。2つのセンサ間で、空間・波長特性において差異が大きい場合 (例: 位置ずれ、観測波長帯の不一致)、物質・含有率分解に基づく手法が良い性能を示したが、再構成の絶対精度は大幅に低下することがわかった。この問題に対処するためには、画像の勾配とテクスチャの情報を活用することが有効であることを明らかにした。この知見を基に、当初目的としていた、光学画像同士の融合だけでなく、マルチモーダルな画像の組み合わせに適用できる汎用的な高解像度化技術を開発した (図4)。

また、高解像度化が応用に及ぼすインパクトを定量的・定性的に評価した。高解像度化によって土地利用・土地被覆分類の精度大幅に向上できることを定量的に示した (図5)。さらに、Hyperion (ハイパースペクトル衛星) と WorldView-3 (マルチスペクトル衛星) を用いて高解像度スペクトル画像を再構成し、鉱物分布図作成への適用性を示した (図6)。

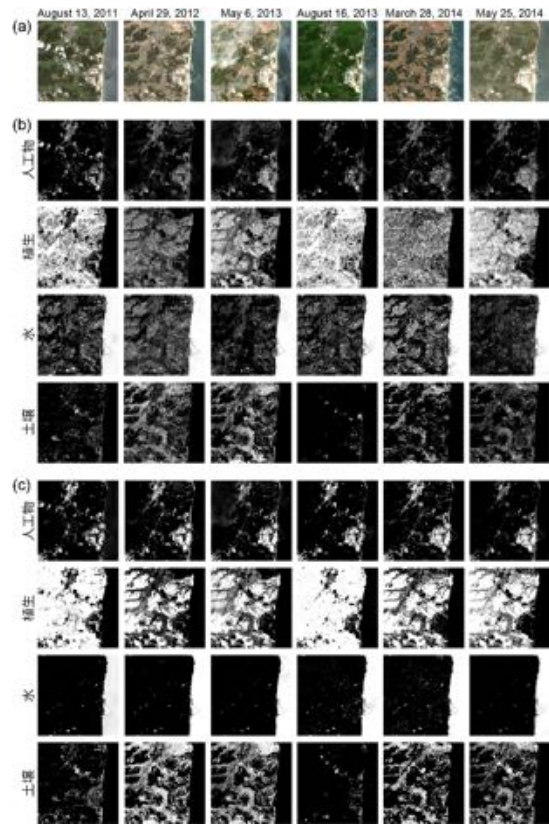


図3. Landsat-Hyperion 時系列データの物質・含有率分解 (人工物, 植生, 水, 土壌). (a) カラー画像, (b)従来手法, (c)提案手法。



図4. マルチモーダル画像融合による高解像度化. 左から右は高解像度画像, 低解像度画像, 高解像度化画像. レーダと光学 (上), 可視光と熱赤外 (中), 光学と標高モデル (下) の融合。

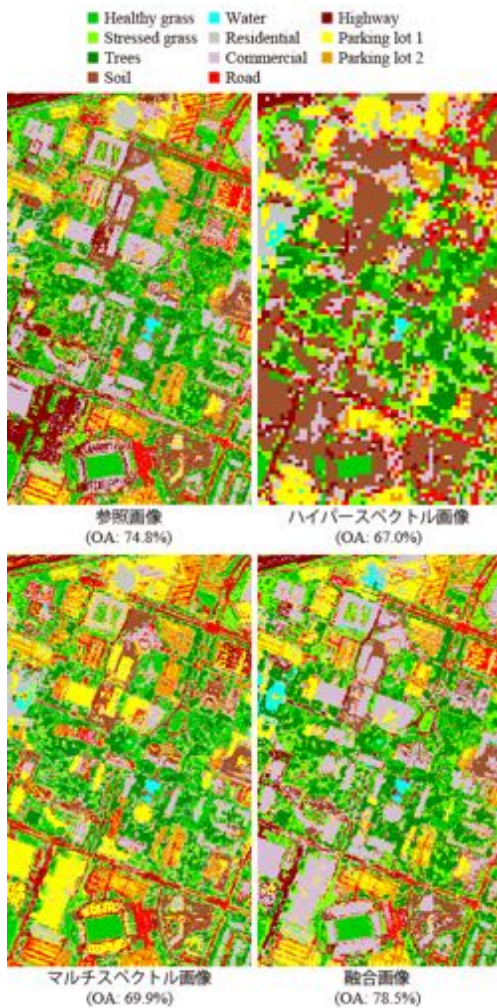


図5. ヒューストン大学キャンパスの土地利用・土地被覆分類図. 参照画像(上段左), 低解像度ハイパースペクトル画像(上段右), 高解像度マルチスペクトル画像(下段左), 融合画像(下段右)を用いた結果.

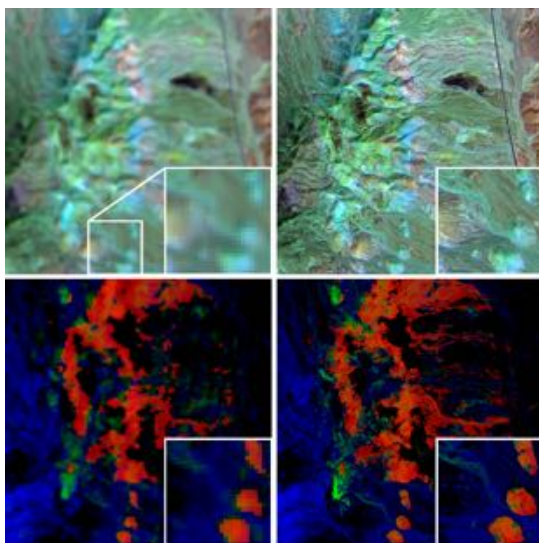


図6. アメリカ, ネバダ州, クプライト鉦区を撮影した Hyperion データ(上段左)と Hyperion-WorldView-3 融合データ(上段右)の合成画像(赤, 緑, 青に 2.2, 1.6,

0.57 μm を使用). アルナイト(赤色), カオリナイト(緑色), 白雲母(青色)の分布図を, Hyperion データ(下段左)と Hyperion-WorldView-3 融合データ(下段右)を用いて物質・含有率分解により推定. (Copyright of WorldView-3 imagery: European Space Imaging / DigitalGlobe)

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 13 件)

- ① N. Yokoya, P. Ghamisi, J. Xia, S. Sukhanov, R. Heremans, I. Tankoyeu, B. Bechtel, B. Le Saux, G. Moser, and D. Tuia, "Open data for global multimodal land use classification: Outcome of the 2017 IEEE GRSS Data Fusion Contest," *IEEE J. Sel. Topics Appl. Earth Observ. Remote Sens.*, vol. 11, no. 5, pp. 1363-1377, 2018. (査読有)
- ② J. Xia, P. Ghamisi, N. Yokoya, and A. Iwasaki, "Random forest ensembles and extended multi-extinction profiles for hyperspectral image classification," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 56, no. 1, pp. 202-216, 2018. (査読有)
- ③ P. Ghamisi, N. Yokoya, J. Li, W. Liao, S. Liu, J. Plaza, B. Rasti, and A. Plaza, "Advances in hyperspectral image and signal processing: a comprehensive overview of the state of the art," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, vol. 5, no. 4, pp. 37-78, 2017. (査読有)
- ④ H. Zheng, P. Du, J. Chen, J. Xia, E. Li, Z. Xu, X. Li, and N. Yokoya, "Performance evaluation of downscaling Sentinel-2 imagery for land use and land cover classification by spectral-spatial features," *Remote Sensing*, vol. 9, no. 12: 1274, 2017. (査読有)
- ⑤ J. Xia, N. Yokoya, and A. Iwasaki, "Classification of large-sized hyperspectral imagery using fast machine learning algorithms," *Journal of Applied Remote Sensing*, vol. 11, no. 3, 035005, 2017. (査読有)
- ⑥ N. Yokoya, C. Grohnfeldt, and J. Chanussot, "Hyperspectral and multispectral data fusion: a comparative review of the recent literature," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, vol. 5, no. 2, pp. 29-56, 2017. (査読有)
- ⑦ N. Yokoya, "Texture-guided multisensor superresolution for remotely sensed images," *Remote Sensing*, vol. 9, no. 4: 316, 2017. (査読有)
- ⑧ D. Hong, N. Yokoya, and X. X. Zhu, "Learning a robust local manifold representation for hyperspectral

- dimensionality reduction,” IEEE J. Sel. Topics Appl. Earth Observ. Remote Sens., vol. 10, no. 6, pp. 2960-2975, 2017. (査読有)
- ⑨ N. Yokoya, X. X. Zhu, and A. Plaza, “Multisensor coupled spectral unmixing for time-series analysis,” IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., vol. 55, no. 5, pp. 2842-2857, 2017. (査読有)
- ⑩ J. Xia, N. Yokoya, and A. Iwasaki, “Hyperspectral image classification with canonical correlation forests,” IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., vol. 55, no. 1, pp. 421-431, 2017. (査読有)
- ⑪ N. Yokoya, J. C. W. Chan, and K. Segl, “Potential of resolution-enhanced hyperspectral data for mineral mapping using simulated EnMAP and Sentinel-2 images,” Remote Sensing, vol. 8, no. 3: 172, 2016. (査読有)
- ⑫ M. A. Veganzones, M. Simoes, G. Licciardi, N. Yokoya, J. M. Bioucas-Dias, and J. Chanussot, “Hyperspectral super-resolution of locally low rank images from complementary multisource data,” IEEE Transactions on Image Processing, vol. 25, no. 1, pp. 274-288, 2016. (査読有)
- ⑬ L. Loncan, L. B. Almeida, J. Bioucas Dias, X. Briottet, J. Chanussot, N. Dobigeon, S. Fabre, W. Liao, G. A. Licciardi, M. Simoes, J. Y. Tourneret, M. A. Veganzones, G. Vivone, Q. Wei, and N. Yokoya, “Hyperspectral pansharpening: a review,” IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, vol. 3, no. 3, pp. 27-46, 2015. (査読有)

[学会発表] (計 14 件)

- ① D. Hong, N. Yokoya, J. Chanussot, and X. X. Zhu, “Learning A low-coherence dictionary to address spectral variability for hyperspectral unmixing,” Proc. ICIP, Beijing, China, September 17-20, 2017.
- ② N. Yokoya, P. Ghamisi, and J. Xia, “Multimodal, multitemporal, and multisource global data fusion for local climate zones classification based on ensemble learning,” Proc. IGARSS, Texas, USA, July 23-28, 2017.
- ③ J. Xia, N. Yokoya, and A. Iwasaki, “Ensemble of transfer component analysis for domain adaptation in hyperspectral remote sensing image classification,” Proc. IGARSS, Texas, USA, July 23-28, 2017.
- ④ J. Xia, N. Yokoya, and A. Iwasaki, “Hyperspectral image classification with partial least square forest,” Proc. IGARSS, Texas, USA, July 23-28, 2017.
- ⑤ J. Xia, N. Yokoya, and A. Iwasaki, “Tree species classification in Japanese mixed forest with hyperspectral and LiDAR data using rotation forest algorithm,” Proc. EARSeL IS, Zurich, Switzerland, April 19-21,

2017.

- ⑥ J. Xia, N. Yokoya, and A. Iwasaki, “A novel ensemble classifier of hyperspectral and LiDAR data using morphological features,” Proc. ICASSP, New Orleans, US, March 5-9, 2017.
- ⑦ N. Yokoya, X. X. Zhu, and A. Plaza, “Graph-regularized coupled spectral unmixing for multisensor time-series analysis,” Proc. WHISPERS, LA, US, August 21-24, 2016.
- ⑧ N. Yokoya and P. Ghamisi, “Land-cover monitoring using time-series hyperspectral data via fractional-order Darwinian particle swarm optimization segmentation,” Proc. WHISPERS, LA, US, August 21-24, 2016.
- ⑨ J. C.-W. Chan and N. Yokoya, “Mapping land covers of Brussels capital region using spatially enhanced hyperspectral images,” Proc. WHISPERS, LA, US, August 21-24, 2016.
- ⑩ D. Hong, N. Yokoya, and X. X. Zhu, “The K-LLE algorithm for nonlinear dimensionality reduction of large-scale hyperspectral data,” Proc. WHISPERS, LA, US, August 21-24, 2016.
- ⑪ D. Hong, N. Yokoya, and X. X. Zhu, “Local manifold learning with robust neighbors selection for hyperspectral dimensionality reduction,” Proc. IGARSS, Beijing, China, July 10-15, 2016.
- ⑫ N. Yokoya and A. Iwasaki, “Generalized-Hough-transform object detection using class-specific sparse representation for local-feature detection,” Proc. IGARSS, Milan, Italy, July 26-31, 2015.
- ⑬ L. Loncan, L. B. Almeida, J. Bioucas Dias, X. Briottet, J. Chanussot, N. Dobigeon, S. Fabre, W. Liao, G. A. Licciardi, M. Simoes, J. Y. Tourneret, M. A. Veganzones, G. Vivone, Q. Wei, and N. Yokoya, “Comparison of nine hyperspectral pansharpening methods,” Proc. IGARSS, Milan, Italy, July 26-31, 2015.
- ⑭ N. Yokoya and X. X. Zhu, “Graph regularized coupled spectral unmixing for change detection,” Proc. WHISPERS, Tokyo, Japan, June 2-5, 2015.

[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://naotoyokoya.com/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

横矢 直人 (YOKOYA, Naoto)

国立研究開発法人理化学研究所・革新知能統合研究センター・ユニットリーダー

研究者番号：40710728