

令和 3 年 5 月 24 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2016～2019

課題番号：16H04587

研究課題名（和文）ハイパースペクトルデータの軌道上高速処理

研究課題名（英文）On board processing of Hyperspectral Data

研究代表者

岩崎 晃（Iwasaki, Akira）

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・教授

研究者番号：40356530

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 9,800,000円

研究成果の概要（和文）：ハイパースペクトルセンサは可視・短波長赤外域で100を超える数の波長で地表を観測する次世代の光学画像センサである。波長という次元のためにデータ量が大きくなり、そのままの形でダウンリンクすると通信系に大きな負担となる。軌道上でデータ解析を行うことを目指し、隣り合った波長の画像が似ているというデータの疎な性質に注目した。地表面のスペクトル情報モデルに基づく手法、およびデータの統計的な性質に注目する手法を開発し、データ量を削減しても地物の高精度分類に利用できることを示した。あわせて、軌道上データ処理用の計算機ならびに雲処理技術についての検討を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ハイパースペクトルデータは農林水産業や資源開発において詳細な地物情報を与える遠隔探査データとして期待されるため、世界各国で宇宙用センサの開発が行われている。波長数が増加することに伴い、従来のマルチスペクトルセンサよりもデータ量が大きくなるために、データ転送が大きな問題となっている。情報の新鮮度やダウンリンク量を考慮すると軌道上でのデータ解析が望まれており、疎なデータを利用したデータ解析手法は非常に有効である。撮像後に地球観測情報を利用可能とすることが求められている中、災害・環境汚染や農林水産業などの即時性を必要とする分野でのデータ利用に貢献可能である。

研究成果の概要（英文）：Hyperspectral sensors are the next generation of optical image sensors that observe the earth's surface at more than 100 spectral bands in the visible and shortwave infrared regions. Due to the dimension of spectral bands, the amount of data is large compared to multispectral sensors, and downlinking the data in its original form would place a heavy burden on the communication system. In order to analyze the acquired data on orbit, we focused on the sparse nature of the data, where images of neighboring spectral bands are similar. We developed two methods; one is based on a spectral information model of the ground surface and the other focuses on the statistical properties of the data. It was found that the method can be used for accurate classification of geological objects even with a reduced amount of data. In addition, a computer for on-orbit data processing and on-board processing technology of cloud detection were discussed.

研究分野：宇宙工学

キーワード：ハイパースペクトル リモートセンシング データ処理

### 1. 研究開始当初の背景

地球観測データ利用者は観測波長や空間分解能だけでなく、データや情報の新鮮度に関心が集まりつつある。とりわけ、災害・環境汚染や農林水産業など、即時性を必要とする利用者にとってはこのようなデータもしくは情報の供給は必須である。

ハイパースペクトルセンサは 200 程度の波長で地表面を観測する光学画像センサであり、植生などの指標作成だけでなく異常検知や物質検知に有効であるため、農林水産業や資源開発において次世代型の遠隔探査データとして大きな期待が集まっている。そのため、日本・ドイツ・イタリア・米国・中国などで衛星搭載用の地球観測センサ開発が進められている。また、惑星探査用としても欧米のセンサが実用になっている。しかしながら、波長という次元のためにデータ量が大きくなり、そのままの形でダウンリンクすると通信系に大きな負担となる。ここで隣り合った波長の画像が似ている、すなわちデータとしては疎であることに注目すると、データ量削減や主題図作成などの軌道上データ処理により通信系に大きな負担をかけずに情報伝達のできる観測システムが構築できると期待される。

このように、ハイパースペクトルの軌道上データ処理の意義は認められており、米国や中国などで概念的な検討が進められた。しかしながら、宇宙機用の計算機に対しては計算負荷の点からハードルが高く、またプログラマブルロジックデバイスに対しては適応情報処理に向いてない点が指摘され、これまでの地球観測センサ同様、採用には至っていない。このような中、日本で開発されているハイパースペクトルセンサが国際宇宙ステーションに搭載されることが決定し、オンボード処理を試す環境が整いつつある。

### 2. 研究の目的

ハイパースペクトル(超多波長)センサで取得された地球観測データは、波長間で相関が高い疎な状態であることに注目し、その処理を軌道上で実施するためのアルゴリズムを開発し、異常検知や地表面把握のための情報抽出を行う。統計的性質に基づくデータ駆動型および物理化学的性質に基づくモデル駆動型の両面からアルゴリズムを発展・融合させ、なるべく超多波長データの情報量を落とすことなく、データ量を削減するソフトウェアの実装を行う。無人飛行機などを用いた地上撮像データを用いて、ソフトウェアとパラメータを実用に耐えるものとする。最終的に、国際宇宙ステーション搭載センサを用いた宇宙実証を行い、軌道上でのデータ処理の妥当性・有効性を示すことを目的とする。

### 3. 研究の方法

本研究では、モデル駆動型アルゴリズムおよびデータ駆動型アルゴリズムについて検討を行い、有効性を確認する。前者においては、植生指標などに繋がる物理化学意味を有するモデル構築を検討する。このため、物理化学的解釈性に有利である反面、ハイパースペクトルデータの疎な性質をデータ量削減に十分に活かすことを考える。波長間の相関性を利用したアルゴリズムにより、特徴的な波長による指標やその重みづけによるモデルを確立する。

後者においては、主成分解析に代表されるデータ駆動型のアルゴリズムを検討する。データの次元削減や異常検出に繋がる手法であるが、統計的なデータ解析を前処理で行う必要があるために、計算負荷が高くなる。

無人飛行機搭載モザイクカメラや回転ステージに搭載したハイパースペクトルカメラを用いて地上データを取得し、パラメータ決定を行う。最終的に、宇宙ステーション搭載センサでの軌道上データ処理を行い、その妥当性を示す。

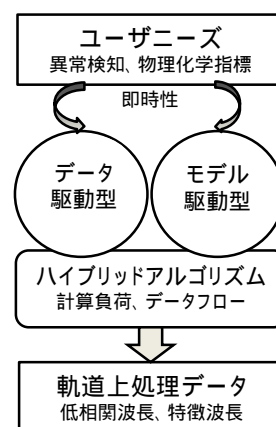


図 1 研究の方法

### 4. 研究成果

#### (1) モデル駆動型アルゴリズム

地表面のスペクトル情報に比べて、ハイパースペクトルセンサの分解能が高すぎる一方、ノイズが多くなっていることに注目して、Fused Lasso 法の適用を行った。これは、スペクトルのように特徴量に順序があり、隣接した係数を同じ値になるように束縛項を設けることでデータを削減する手法であり、ハイパースペクトルデータを活用する上で物理化学的な解釈を導入することができる。バイオマスの推定に適用し、その有効性を示した。

また、ハイパースペクトルデータに対しウェーブレット変換を行うことで、任意の分解能のスペクトルデータを作成した。いくつかのハイパースペクトルデータを用いて分類実験を実施し

た。ウェーブレット変換により生成された波長幅の大きいデータを用いることで性能向上を示し、少ない学習サンプル数で向上率が大きいことが判った。このことは、ウェーブレット変換を行うことで、よりよい複合波長帯を作成できていることを示している。とりわけ、ウェーブレット変換は処理が軽いことから、機上でもちいる上でも有効な手段となりうると考えられる。尚、処理が重くなるが、ウェーブレット変換後のデータに対して、畳み込みニューラルネットワークを用いたところ、さらに分類精度が向上することが認められた。

## (2) データ駆動型アルゴリズム

アンサンブル学習を用いたデータ分類手法の研究を進めた。これは精度が高いにもかかわらず、計算コストが低いという利点を有している。分類結果を空間的に最適化するための前処理手法の検討を行い、総合的な見地からアンサンブル学習法の性能を向上させる試みを行った。特に、正準相関法を取り込むことで、教師データとサンプルの情報関係を強くした。同時に、空間情報を取り込むために、マルコフランダムフィールドや拡張マルチアトリビュートプロファイルと提案手法の相性の良さを示し、統合的な枠組みを構築した。本手法をハイパースペクトルデータに適用した結果、従来手法を上回る結果を得ている。

また、アンサンブル学習を用いたデータ分類手法の研究を進めた。これは精度が高いにもかかわらず、計算コストが低いという利点を有している。ランダムフォレスト (RF)、ローテーションフォレスト (RoF)、エクストリームラーニングマシン (ELM)、および RF と ELM のアンサンブル、について大規模ハイパースペクトルデータを用いた評価を行った。高入力次元と限られたトレーニングデータを用いた結果を比較した。ノイズが多いデータについては、RoF が良好な成績を示した。

さらに、ハイパースペクトル画像の分類性能を改善する手段として、スペクトル情報だけでなく、空間情報を用いる手法が一般的である。ランダムフォレスト (RF) と拡張マルチエクステンションプロファイル (EMEP) を用いて、バギング、ブースティング、ランダムサブスペース、回転ベース、およびブースト回転ベースの 5 つの戦略を使用して、データアンサンブルを構築した。独立成分分析によって抽出された主成分画像に適用し、EMEP を生成した。計算コストが少くない上に、提案された方法がよい分類性能を示した。

## (3) オンボード計算の検討

データ処理を CPU ではなく、FPGA を用いて実現するための検討を行った。高位合成を活用したプロセッシングエレメントの階層化アーキテクチャと特徴として、設置面積が小さく消費電力が小さいことが注目される。動的に再構成可能な技術で小さな設置面積が達成されたことを示した。

機上でのノイズとなる雲を検出するために、畳み込みニューラルネットワークとウェーブレット画像圧縮を組み合わせた手法を提案した。Landsat-8 データセットからの赤、緑、青、近赤外の波長帯の画像を用いて、RISC ベースの組み込みプラットフォームでの実験により、有効性を示した。

宇宙用ハイパースペクトルセンサは 2019 年 12 月に国際宇宙ステーションに到着した。オンボードで輝度係数を適用する機能においては、センサのデータ処理系に設置された FPGA を用いて無事に機能を検証しているところであり、係数がまだ完全でないために、データにストライプノイズが発生している点を除けば問題ない状態である。一方、与圧部計算機に問題が発生したため、種々のアルゴリズムは地上での確認とした。尚、宇宙用ハイパースペクトルセンサデータは、波長毎に空間方向の圧縮が行われているが、軌道上での判別を行うためには波長毎にデータを引き出せるような仕組みが必要と考えられる。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件/うち国際共著 7件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 J. Xia, P. Ghamisi, N. Yokoya, A. Iwasaki	4. 巻 56
2. 論文標題 Random Forest Ensembles and Extended Multiextinction Profiles for Hyperspectral Image Classification	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing	6. 最初と最後の頁 202-216
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TGRS.2017.2744662	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 J. Xia, N. Yokoya, A. Iwasaki	4. 巻 15
2. 論文標題 Fusion of Hyperspectral and LiDAR Data with a Novel Ensemble Classifier	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters	6. 最初と最後の頁 957-961
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/LGRS.2018.2816958	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Z. Zhang, A. Iwasaki, G. Xu, J. Song	4. 巻 13
2. 論文標題 Cloud detection on small satellites based on lightweight U-net and image compression	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 J. Appl. Remote Sens.	6. 最初と最後の頁 26502
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1117/1.JRS.13.026502	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Z. Zhang, A. Iwasaki, G. Xu	4. 巻 16
2. 論文標題 Attitude Jitter Compensation for Remote Sensing Images Using Convolutional Neural Network	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters	6. 最初と最後の頁 1358-1362
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/LGRS.2019.2897710	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 J. Xia, N. Yokoya, A. Iwasaki,	4. 巻 11
2. 論文標題 Classification of large-sized hyperspectral imagery using fast machine learning algorithms	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 J. Appl. Remote Sens.	6. 最初と最後の頁 35005
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/1.JRS.11.035005	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 H. Hihara, A. Iwasaki, M. Hashimoto, H. Ochi, Y. Mitsuyama, H. Onodera, H. Kanbara, K. Wakabayashi, T. Sugibayashi, T. Takenaka, H. Hada, M. Tada, M. Miyamura, and T. Sakamoto	4. 巻 10
2. 論文標題 Sensor signal processing using high-level synthesis with a layered architecture	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEE Embedded Systems Letters	6. 最初と最後の頁 119-122
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LES.2018.2797064	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 T. Takayama, A. Iwasaki	4. 巻 111-8
2. 論文標題 Optimal wavelength selection on hyperspectral data with fused lasso for biomass estimation of tropical rain forest	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 ISPRS Annals of the Photogrammetry	6. 最初と最後の頁 101-108
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5194/isprs-annals-111-8-101-2016	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 J. Xia, N. Yokoya, A. Iwasaki	4. 巻 55
2. 論文標題 Hyperspectral Image Classification With Canonical Correlation Forests	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing	6. 最初と最後の頁 421-431
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TGRS.2016.2607755	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 L. Drumetz, J. Chanussot, C. Jutten; W. Ma, and A. Iwasaki	4. 巻 29
2. 論文標題 Spectral Variability Aware Blind Hyperspectral Image Unmixing Based on Convex Geometry	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Image Processing	6. 最初と最後の頁 4568-4582
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TIP.2020.2974062	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計11件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 9件)

1. 発表者名 J. Xia, N. Yokoya, and A. Iwasaki
2. 発表標題 Tree species classification in Japanese mixed forest with hyperspectral and LiDAR data using rotation forest algorithm
3. 学会等名 Proc. EARSeL IS, Zurich, Switzerland, April 19-21, 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 J. Xia, N. Yokoya, and A. Iwasaki
2. 発表標題 Hyperspectral image classification with partial least square forest
3. 学会等名 Proc. IGARSS, Texas, USA, July 23-28, 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 J. Xia, N. Yokoya, and A. Iwasaki
2. 発表標題 Ensemble of transfer component analysis for domain adaptation in hyperspectral remote sensing image classification
3. 学会等名 Proc. IGARSS, Texas, USA, July 23-28, 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1 . 発表者名 J. Xia, N. Yokoya and A. Iwasaki
2 . 発表標題 A novel ensemble classifier of Hyperspectral and LiDAR Data Using Morphological Features
3 . 学会等名 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP) (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 J. Xia, N. Yokoya and A. Iwasaki
2 . 発表標題 Mapping of large size hyperspectral imagery using fast machine learning algorithms
3 . 学会等名 37th Asian Conference on Remote Sensing (ACRS) (国際学会)
4 . 発表年 2016年

1 . 発表者名 J. Xia and A. Iwasaki
2 . 発表標題 Hyperspectral image classification based on Boosted Rotation Forest
3 . 学会等名 Remote Sensing Society of Japan, Annual meeting
4 . 発表年 2016年

1 . 発表者名 J.Xia, N. Yokoya, A. Iwasaki
2 . 発表標題 Boosting for domain adaptation extreme learning machines for hyperspectral image classification
3 . 学会等名 Proc. IGARSS, Valencia, Spain, July 22-27, 2018 (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Yamada, A. Iwasaki, Y. Inoue
2. 発表標題 Hyperspectral Data Classification and Regression Using Wavelet Transform
3. 学会等名 Proc. IGARSS, Virtual, September 26-October 2, 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山田貴斗, 岩崎 晃
2. 発表標題 ウェーブレット変換と CNN を用いたハイパースペクトルデータの分類
3. 学会等名 第69回日本リモートセンシング学会講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T. Yamada, J. Xia, A. Iwasaki
2. 発表標題 Small Size Class Preserving Classification Based on Segmentation for Hyperspectral Data
3. 学会等名 Proc. IGARSS, Valencia, Spain, July 22-27, 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Z. Zhaoxiang, A. Iwasaki, G. Xu
2. 発表標題 Remote Sensing Satellite Jitter Detection Based on Image Registration and Convolutional Neural Network Fusion
3. 学会等名 Proc. IGARSS, Yokohama, Japan, July 28-August 2, 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年



〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

岩崎研究室Webページ  
<https://www.sal.t.u-tokyo.ac.jp/sal/>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------