

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 25 日現在

機関番号：23901

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K12259

研究課題名（和文）地球観測衛星群による植生ビッグデータプロダクト統合手法の開発と評価

研究課題名（英文）Development and evaluation of data fusion method for vegetation big data products observed by earth observation sensors

研究代表者

小畑 建太 (Obata, Kenta)

愛知県立大学・情報科学部・准教授

研究者番号：80758201

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、地球観測衛星による陸域植生の正確な時空間変動量の推定に向け、センサやプロダクト生成処理アルゴリズムの不均一性によって生じる植生データプロダクトの系統的な差の低減手法開発と実証を行った。まず、植生指数のセンサ間変換理論・アルゴリズムを構築して実証を行い、十分な変換精度が達成できることを確認した。しかし、大気補正レベルが異なるデータ間での変換精度については不十分であり、その問題を解決するため、反射率のセンサ間変換理論・アルゴリズムを新たに構築した。その後、実データによる実証を行い、反射率と植生指数から計算される植生指数の十分なセンサ間変換精度を確認し、不確かさ要因を特定した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で構築したアルゴリズムでは、モデル中の変数がすべて物理的な意味を持ち説明可能である。また、モデル中の変数は各センサデータから個別に計算できることから、いわゆる“学習”に必要なセンサデータのペアが不要である。これにより、通常の回帰や機械学習に比べて計算量の削減が期待できることが示唆される。現在、仕様や品質の異なる様々な人工衛星が運用されており、これら衛星データから均一な地表面反射率を導き出す取り組みは数多く報告されている。本研究で提案したアルゴリズムは、アルゴリズムの説明可能性、実用性、および計算量低減可能性という観点で当研究分野に一定の貢献を果たすものと考えている。

研究成果の概要（英文）：This study developed and demonstrated algorithms for reducing systematic differences in vegetation indices (VIs) caused by the differences of sensors and product generation algorithms, aiming at accurate estimations for spatiotemporal variation of terrestrial vegetation using Earth observation satellites.

First, we developed and demonstrated theories and algorithms for cross-sensor VI transformation, confirming that sufficient transformation accuracy was achieved. However, the transformation accuracy decreased when atmospheric correction level between sensors is not identical. To address this issue, we newly developed theories and algorithms for cross-sensor reflectance transformations. Subsequently, we conducted numerical experiments using actual data, confirming sufficient accuracy for the reflectance and VIs transformations between sensors, and identified factors contributing to uncertainties of the algorithm.

研究分野：衛星リモートセンシング

キーワード：地球観測 リモートセンシング 植生 反射率 センサ調和 大気補正 放射量校正 植生指数

1. 研究開始当初の背景

地球温暖化予測精度の向上には二酸化炭素の吸収源である陸域植生の時空間変動量を正確に定量する必要がある。その有効な手段として地球観測衛星や近年台頭する数百機～数千機の小型衛星群(メガコンステレーション)で取得された植生データプロダクトの統合利用がある。しかし、衛星センサ間では設計仕様やプロダクト生成アルゴリズムに差があるためセンサ間の植生プロダクトの値には系統的な差(系統誤差)が生じ、一貫した植生観測が困難となる。

これまでに系統誤差の低減手法は数多く提案されているものの、センサ間プロダクトの土地被覆(植生や土壌)依存性に対して十分説明・対応できる実用的かつ汎用的なアルゴリズムが確立されているとはいえない。そこで本研究では、簡易的な地表面の線形物理モデルを採用し、統合的な系統誤差メカニズムおよびセンサ間変換の理論を構築することを考えた。さらにその理論を応用した植生ビッグデータプロダクトの統融合アルゴリズムを開発・実証することが最終的な目標であった。

2. 研究の目的

本研究では、地球観測衛星群による陸域植生の正確な時空間変動量の推定に向け、センサやプロダクト生成処理アルゴリズムの不均一性によって生じる植生データプロダクトの系統的な差の低減手法開発と実証を行う。まず、植生プロダクトのセンサ間変換手法の開発(理論およびアルゴリズム)、実データによる手法の実証を行う。しかし、研究プロジェクト開始後に大気補正レベルが異なるデータ間での変換精度については不十分であることがわかったことから、その問題を解決するため、次なる段階として反射率のセンサ間変換手法の開発(理論およびアルゴリズム)、実データによる手法の実証(植生指数のセンサ間変換を含む)を行う方針とした。また、アルゴリズムにおける不確かさの要因も特定する。

3. 研究の方法

反射率の線形混合モデルを用いた(1)植生指数センサ変換アルゴリズム、および、(2)反射率変換アルゴリズムを開発した。

(1) 正規化植生指数(NDVI)センサ間変換理論とアルゴリズム

植生指数センサ間変換理論構築

2要素(植生・非植生)線形混合モデルを用いて対象画素の反射率をモデル化し、植生反射率の重み(FVC)がセンサ間で等しくなるという条件を用いてセンサ間のNDVI変換式を導出した(図1, Obata, Remote Sens., 2021)

この変換式中には p_0, p_1, q_0, q_1 が変数として存在し、これらは可視光赤と近赤外バンドにおける植生と非植生反射率の関数である。それら反射率を計算するため次に示すアルゴリズムを開発した。

植生・非植生反射率計算アルゴリズムの開発

シーン内における植生・土壌反射率推定アルゴリズム(Obata, Remote Sens., 2020)を開発した。各反射率は反射率や植生指数の分位点情報および分位点回帰などを利用して計算される。変換時の変数となるこれら植生・土壌反射率自身が実際のデータから計算されるため、変換時には変換元のデータに含まれるバイアス(観測波長のずれ, 放射量校正の違い, および大気補正の違いなどによるもの)が相殺される。これにより、当アルゴリズムは、植生指数および後の反射率変換のセンサ間変換において重要な役割を果たすものとなった。

(2) 反射率センサ間変換理論とアルゴリズムの開発

植生指数変換アルゴリズムの開発によりNDVIのセンサ間変換は現実的に可能となったが、センサ間で大気補正レベルが異なる場合に、一次元のモデル空間内でしか変換が正しくできないことが明らかとなった。そこで、一つの解決策として、反射率の段階でセンサ間変換することを考えた。これにより、モデル中のパラメータを増加させることができ(モデル空間を二次元で考えることが可能となり)、結果的に大気補正レベルが異なっても理論的にはほぼ正しい変換が可能となることがわかった。また、反射率の段階でセンサ間変換ができていれば、NDVI以外のどのような植生指数でもセンサ間変換が可能となる。

反射率センサ間変換理論の構築

3要素(植生・土壌・水域)線形混合モデルを用いて対象画素の反射率をモデルし、3要素の重みがセンサ間で等しくなるという条件を用いてセンサ間の反射率スペクトル(2バンド)変換式を導出した。その際、変換元のセンサは大気上端反射率を仮定しているため、大気補正レベルが異なるセンサ間変換も可能となる。変換式中の変数は3要素の反射率スペクトルの関数であ

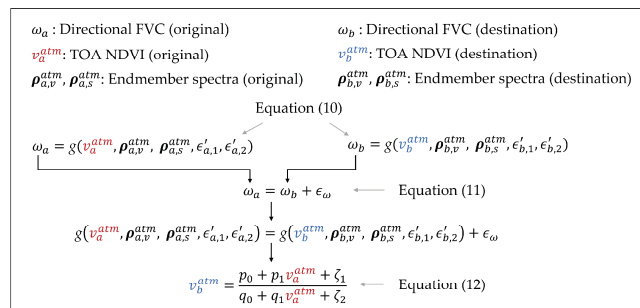


図1 NDVI変換式の導出過程(Obata, Remote Sens., 2021 抜粋)

り、それら反射率スペクトルの計算アルゴリズムを次節に示す通り開発した。

標準反射率計算アルゴリズムの開発

まず、各センサの時系列反射データからシーン毎に植生・土壌・水域の反射率スペクトル(標準反射率スペクトル)を抽出する(図2)。植生・土壌反射率の抽出には(1)- で提案したアルゴリズムを採用し、水域反射率の抽出には各バンドの反射率の1%分位点を用いる。抽出した各センサの標準反射率スペクトルをDOY(Day of Year)順に並べ替え、時間方向の移動平均により観測したスペクトルを平滑化し、DOYを関数とした標準反射率スペクトルデータを作成する。実際の変換時には、DOYを入力することで各センサの標準反射率を計算し、反射率変換式に代入することになる。

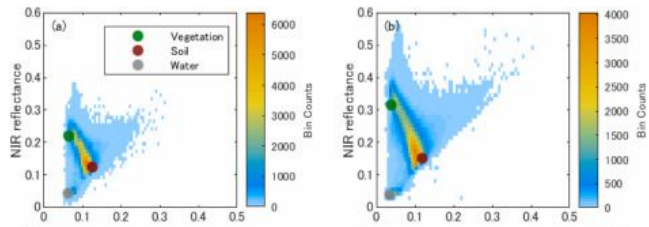


図2 Landat MSS(左)とTM(右)の反射率密度分布および三要素の反射率スペクトル(Obata, ISPRS J. Photogramm. Remote Sens., 2024 から抜粋・改変)

4. 研究成果

(1) NDVI センサ間変換

静止衛星(ひまわり8号AHI)と極軌道衛星(Aqua-MODIS)による同時観測データを用いてアルゴリズムの評価を行った。テストサイトには北海道、東北、東海、四国、および九州の5地方を採用した。本実験では、AHI NDVI からMODIS NDVI への変換を試みた。

図3の左の列は北海道、東北、東海を対象にMODIS NDVI(青)とAHI NDVI(赤)のヒストグラムを表示した例である。右の列はMODIS NDVI(青)と変換後のAHI NDVI(赤)のヒストグラムを表示した例である。結果から変換前に見られたセンサ間の系統的な差が、変換後には低減されていることがわかる。

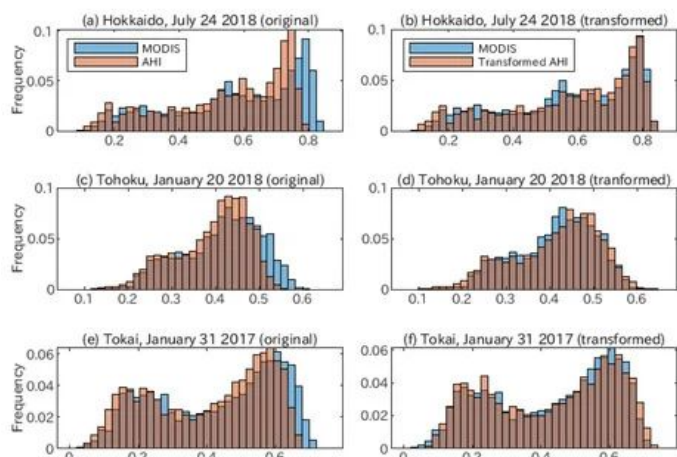


図3 MODIS NDVI(青)と変換前後のAHI NDVI(赤)のヒストグラム。左はAHIが変換前、右はAHIが変換後。上、中、および下段は北海道、東北、および東海地方に対応。(Obata, Remote Sens., 2021 から抜粋・改変)

(2) 反射率センサ間変換

Landat4-5それぞれに搭載されているMSSとTMのデータを用いてアルゴリズムの評価を行った。これらセンサを用いた理由は、同時観測データが手に入ることから評価時に大気や日照条件の影響等を除くことができるためである。また、これらセンサは長期運用され、当研究のテストサイトでも十数年以上の長期データが存在するという利点がある。テストサイトには、愛知県西部および三重県・奈良県境の山間部を採用した。本実験では、MSSの大気上端反射率からTMの地表面反射率への変換を試みた。図4は愛知県西部におけるサイトを対象にTMを正解としたときの、変換前(赤)と変換後(緑)のMSSに含まれる誤差を示したヒストグラムである(左から

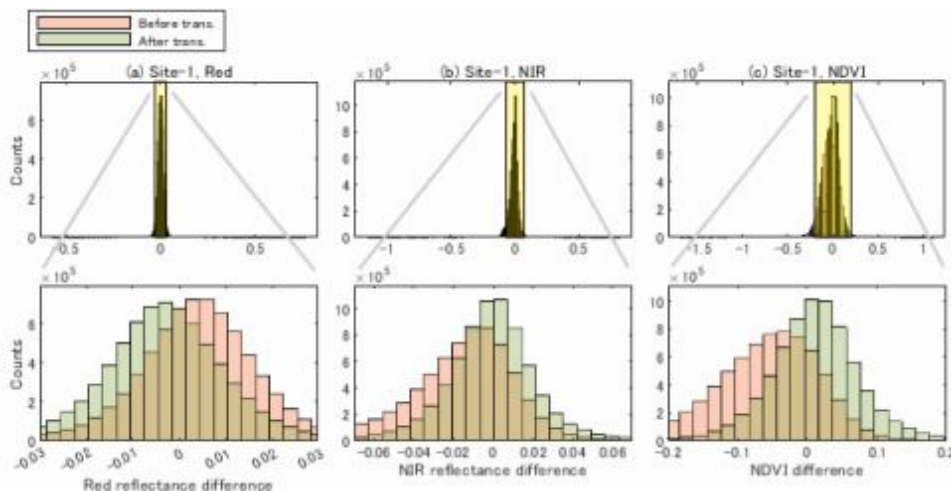


図4 可視光赤(Red)反射率、近赤外(NIR)反射率、および、NDVIのMSS-TM間の差に関するヒストグラム。赤は変換前、緑は変換後に対応。(Obata, ISPRS J. Photogramm. Remote Sens., 2024 から抜粋・改変)

可視光赤バンド反射率, 近赤外バンド反射率, NDVI である)。結果から, 以下の例では, 可視光赤バンド反射率は変換前から誤差が小さいためそれほど変換後の変化は確認できないが, 近赤外バンド反射率や NDVI では変換前に見られた差が大きく減少している(0 を中心に分布している)ことがわかる。図5は近赤外バンド反射率を例に, サイズが60m 四方である4つのROI(Region of Interest: 芝緑地, 道路沿い, 常緑広葉樹林, 落葉広葉樹林)で時系列データをプロットしており, 赤丸は変換前のMSS, 青丸はTM(正解値), 緑丸は変換後のMSSである。この図から, 変換後のMSSの方が変換前のMSSよりTMに近いことがわかる。

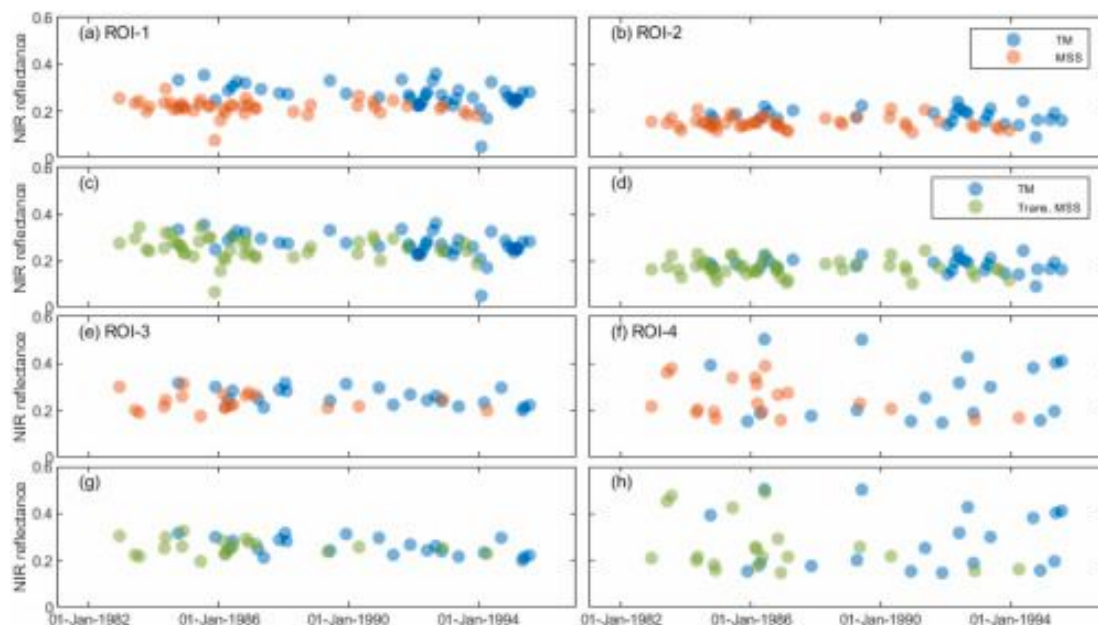


図5 4つのROIにおける返還前後のMSSとTMの時系列NDVIプロット。青はTM, 赤は変換前のMSS, 緑は変換後のMSSに対応。ROI-1, -2, -3, および4はそれぞれ, 芝緑地, 道路沿い, 落葉広葉樹林, 常緑広葉樹林である (Obata, ISPRS J. Photogramm. Remote Sens., 2024 抜粋)。

植生指数や反射率の変換には一定の不確かさが含まれており, それがアルゴリズムの変換精度を低下させる。その主な要因として考えられるのは, アルゴリズム中の変数(植生・土壌・水域の反射率スペクトル)を推定する際の安定性である。それら変数の計算には雲や雪の影響を強く受ける。そのため, データに付随するQuality Flagが正確でないと, 雲や雪を正しく取り除けず, 変換精度が低下することになる。また, モデルの前提と実世界の違いも不確かさに一定の影響を及ぼしているものと考えられる。

以上より, センサ間植生指数変換アルゴリズムと反射率変換アルゴリズムを開発し, 複数のテストサイトを観測した静止軌道衛星および極軌道衛星データによりそれらアルゴリズムの実証を行った。今後は, バンド・センサが拡大できるようにアルゴリズムを発展させ, その評価・実証をさらに進めることが考えられる。

【引用文献】

- Kenta Obata, Hiroki Yoshioka, A Simple Algorithm for Deriving an NDVI-Based Index Compatible between GEO and LEO Sensors: Capabilities and Limitations in Japan, *Remote Sensing*, 12(15), 2417, 2020 (<https://doi.org/10.3390/rs12152417>).
- Kenta Obata, Kenta Taniguchi, Masayuki Matsuoka, Hiroki Yoshioka, Development and Demonstration of a Method for GEO-to-LEO NDVI Transformation, *Remote Sensing*, 13(20), 2021 (<https://doi.org/10.3390/rs13204085>).
- Kenta Obata, Hiroki Yoshioka, Unmixing-based radiometric and spectral harmonization for consistency of multi-sensor reflectance time-series data, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 212, pp.396-411, 2024 (<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2024.05.016>).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Obata Kenta, Taniguchi Kenta, Matsuoka Masayuki, Yoshioka Hiroki	4. 巻 13
2. 論文標題 Development and Demonstration of a Method for GEO-to-LEO NDVI Transformation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Remote Sensing	6. 最初と最後の頁 4085 ~ 4085
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/rs13204085	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 Miura Munenori, Obata Kenta, Yoshioka Hiroki	4. 巻 14
2. 論文標題 Wavelength Extension of the Optimized Asymmetric-Order Vegetation Isoline Equation to Cover the Range from Visible to Near-Infrared	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Remote Sensing	6. 最初と最後の頁 2289 ~ 2289
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/rs14092289	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 Obata Kenta, Yoshioka Hiroki	4. 巻 12
2. 論文標題 A Simple Algorithm for Deriving an NDVI-Based Index Compatible between GEO and LEO Sensors: Capabilities and Limitations in Japan	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Remote Sensing	6. 最初と最後の頁 2417 ~ 2417
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/rs12152417	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 Miura Tomoaki, Smith Charlotte Z., Yoshioka Hiroki	4. 巻 257
2. 論文標題 Validation and analysis of Terra and Aqua MODIS, and SNPP VIIRS vegetation indices under zero vegetation conditions: A case study using Railroad Valley Playa	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Remote Sensing of Environment	6. 最初と最後の頁 112344 ~ 112344
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.rse.2021.112344	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 該当する

1. 著者名 Obata Kenta, Yoshioka Hiroki	4. 巻 212
2. 論文標題 Unmixing-based radiometric and spectral harmonization for consistency of multi-sensor reflectance time-series data	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing	6. 最初と最後の頁 396 ~ 411
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.isprsjprs.2024.05.016	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 -

[学会発表] 計6件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 Kenta Obata, Hiroki Yoshioka
2. 発表標題 Producing MODIS-like NDVI Data with 10-minute Temporal Resolution from Himawari 8 AHI Data: Preliminary Results
3. 学会等名 AOGS 19th Annual Meeting (AOGS2022) Virtual (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kenta Obata, Hiroki Yoshioka
2. 発表標題 Analysis of differences between NDVI-based indices of Himawari 8 AHI and Aqua MODIS using Rayleigh-corrected reflectances
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020, Virtual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kenta Obata, Hiroki Yoshioka
2. 発表標題 Vegetation seasonality observed in Himawari-8 AHI NDVI time-series data over evergreen broad-leaved and coniferous forests in East Asia
3. 学会等名 JpGU 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 市井和仁 , 山本雄平 , YANG Wei , 樋口篤志 , 吉岡博貴 , 松岡真如 , 小畑建太 , 山本浩万
2. 発表標題 静止気象衛星観測網を用いた超高頻度陸面モニタリングに向けて
3. 学会等名 第73回日本リモートセンシング学会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 市井和仁 , 山本雄平 , 林航大 , 吉岡博貴 , 小畑建太 , 松岡真如 , 山本浩万 , 永井信 , MIURA Tomoaki
2. 発表標題 ひまわり8号を用いた陸面モニタリングの試み
3. 学会等名 日本気象学会2020年度秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Masayuki Matsuoka, Hiroki Yoshioka, Kenta Obata, Kazuhito Ichii
2. 発表標題 Analysis of Shadow Effect on Intra-daily Reflectance of Himawari-8/AHI Using LiDAR Point Cloud
3. 学会等名 AOGS 19th Annual Meeting (AOGS2022) Virtual (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
研究分担者	吉岡 博貴 (Yoshioka Hiroki) (40332944)	愛知県立大学・情報科学部・教授 (23901)	

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
---------	---------