

令和 6 年 5 月 15 日現在

機関番号：14101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K05669

研究課題名（和文）森林の三次元構造を用いて、衛星で観測された反射率から影を除去する方法の開発

研究課題名（英文）Correction of shadow-affected reflectance from the canopy and topography in mountainous forests using an airborne laser scanning point cloud

研究代表者

松岡 真如（MATSUOKA, Masayuki）

三重大学・工学研究科・准教授

研究者番号：50399325

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,700,000円

研究成果の概要（和文）：人工衛星データを用いて森林の解析を行う際、地形や樹冠によって生じる影が精度を低下させる。本研究では、航空機レーザスキャナで取得した森林の三次元構造を用いて、衛星で観測した反射率から影を除去する手法を開発した。航空機レーザスキャナと地形モデルから算出した、日照率、樹冠の厚さ、地形に関わる変数からなるモデルを構築し、衛星データに適用した。その結果、既存の影補正手法に見られた冬季の反射率の低下が抑えられ、より高精度の補正結果が得られた。また、本研究では静止軌道衛星と極軌道衛星のデータを重ねるためのオルソ補正の手法を構築し、ひまわり8号のデータに適用して位置のずれを定量的に評価した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、ドローンや航空機を用いた写真測量やレーザスキャナなど、森林の三次元構造を取得する方法が普及してきた。本研究は、そのような新しいデータを活用することで、リモートセンシングによる森林の解析精度を向上させる研究であり、地球環境問題の解決や、林業の効率化に貢献するものである。また、静止軌道と極軌道衛星を重ね合わせる手法は、学術的な新規性は低いが見、多くの研究者・技術者への手法の普及を狙って論文にまとめた。現在、第三世代の静止軌道衛星が各国で運用されており、そのデータ処理への貢献を期待している。

研究成果の概要（英文）：Correction of canopy shadows can improve the accuracy of remote sensing of forests. Airborne laser scanning is widely used to measure three-dimensional canopy structure. This study developed a model of shadow-affected reflectance using variables representing the sunlit fraction, canopy depth, and topography. The model was applied to simulate the reflectance data of the Sentinel-2. Scene-based shadow correction generated brighter and geographically smoother reflectance images compared with two existing methods. The seasonal profile of corrected reflectance showed smaller changes than observed reflectance, with increased reflectance in winter. This method will be helpful for accurately estimating forest biogeophysical parameters.

We also addressed the orthorectification algorithm for a geostationary sensor. The orthorectified images of the Himawari satellite showed a clear improvement in geometric accuracy, especially in high-elevation regions located far from the subsatellite point.

研究分野：地理情報科学

キーワード：光学リモートセンシング 影の補正 森林の三次元モデル 航空機レーザスキャナ Sentinel-2 MSI Himawari AHI

### 1. 研究開始当初の背景

人工衛星や航空機によるリモートセンシングが、森林の情報抽出に利用されている。光学センサのデータから、必要な情報を抽出する時、主な情報源は画素が持つ分光反射率である。光学リモートセンシングでは、異なる波長で観測された複数の反射率を組み合わせることで、データから情報を抽出している。

光学センサのデータから森林の材積量や林相などの情報を抽出する際、影が悪影響を及ぼす。例えば同じ森林でも、山の北斜面と南斜面に分布している場合では、観測される反射率は異なる。また、例えば季節変化が全くない森林があったとしても、太陽高度の変化によって反射率は季節変化を示す。同じ森林が場所や時間によって異なった観測値を示す。この事が、光学リモートセンシングのデータ解析を難しくし、情報の抽出精度を低下させている。

これまでも影を補正する研究は行われてきた。しかし、林冠の構造を広域で把握することが難しかったため、デジタル標高モデルを用いて、地形に起因する影のみを補正する研究がほとんどであった。また、地形の補正のみでは十分な精度が得られないため、ほとんどの応用研究では影の補正は行われてこなかった。しかし、より高い精度の情報が求められている今後の森林リモートセンシングにおいて、影の補正は避けて通れない重要な課題である。特に樹冠自身が作り出す影は平地でも山地でも生じるため、その補正が不可欠である。

近年、ドローンを用いた SfM (Structure from Motion: 写真測量で三次元構造を取得する手法) や航空機レーザスキャナ (Airborne Laser Scanning: ALS) など、森林の三次元構造を取得できる技術が普及してきた。これらを利用することで、反射率画像から影の影響を除去できる可能性が大きく広がった。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、航空機レーザスキャナで取得した森林の三次元構造を用いて、衛星で観測した反射率から影を除去する手法を開発することである。

### 3. 研究の方法

#### (1) 研究対象地と使用データ

研究対象地は高知県高知市を中心とする約 914km<sup>2</sup> とした。図 1 の黄色い矩形の中にある不規則な形状の範囲である。本研究で使用した航空機レーザスキャナのデータに合わせて設定した。

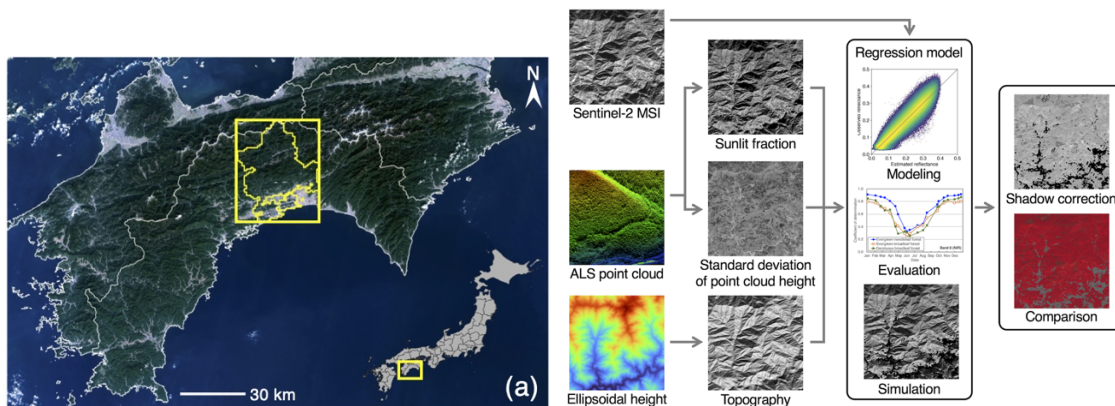


図 1

図 2

使用した衛星データは Sentinel-2 に搭載された Multispectral Instrument (MSI) のレベル 1C プロダクトである。影の解析には、航空機レーザスキャナで取得した点群とデジタル楕円体高モデルを使用した。また、解析対象である森林の位置を知るため、土地被覆図を使用した。以下、それぞれのデータについて説明する。

Sentinel-2 MSI のレベル 1C プロダクトには、大気補正を行っていない、大気上端における反射率が記録されている。空間解像度が 10m であるバンド 4 と 8 を使用した。観測波長帯はそれぞれ赤と近赤外であり、植生の解析に多用されている波長帯である。本研究では、18 時期のデータを使用した。航空機レーザスキャナの観測時期に近い 2017 年から 2019 年に観測されたものから、各月に少なくとも 1 つのデータがあるように選択された。データの地図投影は UTM 投影であるが、航空機レーザスキャナのデータに合わせて、平面直角座標系 (IV 系) へと変換した。

航空機レーザスキャナのデータは林野庁森林整備部から提供を受けた。点群密度を確保するため、グリッドに変換したものでなく、観測されたオリジナルデータを使用した。走査による点群密度の偏りを減らすため、1m<sup>2</sup> の点群密度が最大で 5 点となるように加工した。点群データに付与されている高さ情報は標高であった。衛星や太陽との位置関係を計算する場合には、海面からの高さである標高ではなく、地球楕円体からの高さである楕円体高が必要となる。そのため、

国土地理院が提供する「日本のジオイド 2011」から求めたジオイド高を足すことで、楕円体高に変換した。

デジタル楕円体高データは点群による反射率のシミュレーションを行った際に、残差に地形に起因するバイアスが見られたために導入した。国土地理院が提供する 10m メッシュのデジタル標高モデルに先述のジオイドモデルから求めたジオイド高を足すことで、楕円体高モデルとした。地図投影は、Sentinel-2 MSI に合わせて、空間解像度を 10m、地図投影を平面直角座標系とした。

土地被覆図は宇宙航空研究開発機構が提供する、高解像度土地利用土地被覆図(ver. 22. 11)を使用した。こちらも空間解像度が 10m の平面直角座標系に投影変換した。この土地被覆図において常緑針葉樹、常緑広葉樹、落葉広葉樹となっている画素を解析対象とした。なお、落葉針葉樹はデータ数が極端に少なかったため解析から外した。

## (2) 反射率のシミュレーション

手法の概要を図 2 に示す。影の影響を受けた反射率をシミュレーションするために、点群と楕円体高モデルから三つの変数を算出した。一つは画素内の日照率 (10m×10m の画素の中で直達光があたっている面積の割合) で、点群から作成したデジタル表面モデルから算出した。点群を 1m×1m のサブグリッドに分割し、その中で最も高い点と二番目に高い点を用いて、それぞれデジタル表面モデルを作成した。その後、衛星観測時の太陽位置を用いて、二番目に高い点で作成された各サブグリッドに直達光が当たっているか否かを判定した。ここでは、一番高い点で作成された表面モデルによって直達光が遮られた場合には日陰に、遮られなかった場合には日照と判定した。最後に、1m×1m のサブグリッドの日照/日陰の結果を 10m×10m にまとめ挙げ、衛星画像の画素内の日照率を算出した。

二つ目の変数は点群の高さ方向のばらつきである。樹冠の凹凸が大きい林分や、林冠ギャップの多い林分は、影がでやすい。この状況を点群の高さの標準偏差で表した。10m×10m の画素に含まれる点群を用いて、画素ごとに高さ (Z 座標) の標準偏差を求めた。

三つ目の変数は地形に関する変数である。先述のように、モデルによって再現した反射率に生じた、地形に伴うバイアスを取り除くために採用した。デジタル楕円体高モデルから計算した各画素の傾斜角と方位角、衛星観測時の太陽の方位角から計算した。

反射率のシミュレーションに用いたモデルを式(1)に示す。

$$\rho = c_1 \exp(-c_2 \cdot SDH) \cdot SNF + c_3 \cdot TOP + c_4 + \varepsilon \quad (1)$$

ここで、 $\rho$  は反射率、SDH は点群の高さの標準偏差、SNF は日照率、TOP は地形に関する変数であり、 $c_1$  から  $c_4$  はモデルの係数、 $\varepsilon$  は残差である。地形に関する変数 TOP は式(2)で算出した。

$$TOP = \sin \theta_t \cdot \cos(\phi_t - \phi_s) \quad (2)$$

ここで、 $\theta_t$  は斜面の傾斜角、 $\phi_t$  と  $\phi_s$  はそれぞれ斜面と太陽の方位角である。モデルの 4 つの係数は森林タイプごとに回帰を行って求めた。この時、非線形回帰による不安定さを軽減するため、二段階の回帰を行った。まず、日照率が 0.85 以上の画素を用いて、 $\rho = c_1 \exp(-c_2 \cdot SDH)$  の非線形回帰を行い、係数  $c_1$  と  $c_2$  を算出した。次に、 $c_2$  のみを求められた値に固定した上で、全てのデータを用いて線形重回帰を行い、係数  $c_1$ 、 $c_3$ 、 $c_4$  を求めた。

## (3) 影の補正

観測日、バンド、森林タイプごとに求められた回帰係数を用いて、影の除去を行った。影を除去した反射率は、衛星と太陽が共に天頂にある場合に観測される反射率と見なせる。そこで、日照率(SNF)を 1 に設定した。また、地形によるバイアスを除去するため  $\theta_t$  を 0 に設定した。これらの値を用いて反射率  $\rho$  を算出することで影を補正した反射率を求めた。この時、森林の反射率の場所による違いを反映させるため、回帰で得られた画素ごとの残差  $\varepsilon$  を、補正後の反射率に加えた。これにより、影の影響を補正した場合でも、場所による反射率の違いを画素ごとに表すことができる。

## (4) 結果の評価

実際に影を除去した反射率を得ることはできないため、補正された反射率の精度評価は難しい。本研究では、既存の二つの影補正手法と比較することで、手法の精度を定性的に評価した。一つは Sentinel-2 MSI のレベル 2A プロダクトである。これは、経験則を導入した Minnaert 法によって補正されている (文献①)。もう一つは C correction であり (文献②)、影補正の手法を比較した複数の研究において良い結果が示されている。本手法で得られた補正後の反射率の画像および反射率の季節変化を、これらの補正手法と比較して評価した。

## (5) 静止軌道衛星のオルソ補正

ここまで説明してきた極軌道衛星 Sentinel-2 を用いた解析とは別に、本研究では、静止軌道衛星に対する影補正手法を検討した。極軌道衛星と静止軌道衛星では観測の幾何条件が大きく異なる。そのため、両データの位置を正確に合わせるためのオルソ補正の手法を、静止軌道衛星 Himawari に搭載された AHI のデータを用いて構築した。また、この方法を用いて幾何補正した AHI データを Sentinel-2 と比較し、効果を検証した。なお、研究の進捗から、影補正の結果を得るまでには至らなかった。

#### 4. 研究成果

##### (1) 反射率のシミュレーション

点群から算出した日照率の例を図3に示す。(a)は1m×1mのサブグリッドで計算した日照/日陰の判定結果であり、(b)は10m×10mにまとめ挙げた日照率である。また(c)はSentinel-2 MSIの反射率である。(b)と(c)の明るさは類似しており、日照率の計算の精度が高いことが分かる。ここから、航空機レーザスキャナで得られた森林の三次元構造に基づいた影のシミュレーションの手法が妥当であったと言える。航空写真の高解像度画像(d)と(a)の比較から、林相の違いや作業道の様子が日照率に反映されていることが分かる。

図4はSentinel-2の観測画像と、三つの変数を用いてシミュレーションした反射率画像との比較である。赤と近赤外のバンドについて、太陽高度が特徴的な夏至と冬至に近い観測日の例を示した。(a)と(b)はそれぞれ2018年6月13日と2018年12月25日の赤(バンド4)の反射率である。6月は常緑針葉樹、常緑広葉樹と落葉広葉樹のいずれも葉があるため全体的に暗いが、12月は葉のない落葉広葉樹で反射率が高い。(c)と(d)はそれぞれ2018年6月13日と2018年12月25日の近赤外(バンド8)の反射率である。こちらは、6月には常緑針葉樹の反射率が低く、常緑広葉樹と落葉広葉樹で反射率が高い。また、12月は赤の反射率と同様、落葉によって常緑林と落葉林との差が大きい。夏と冬の違いに注目すると、夏である(a)と(c)では、太陽高度が高いため、地形の影響が小さく、全体的に反射率のばらつきが小さい。一方、冬の(b)と(d)では、地形によって生じる影により、南向きと北向き斜面による反射率の差が大きい。観測された反射率とモデルにより推定された反射率の違いに注目すると、観測値(上段)と推定値(下段)は類似しており、季節によらずシミュレーションモデルの精度が高い。なお、画像中の黒い部分は解析対象外の土地被覆である。

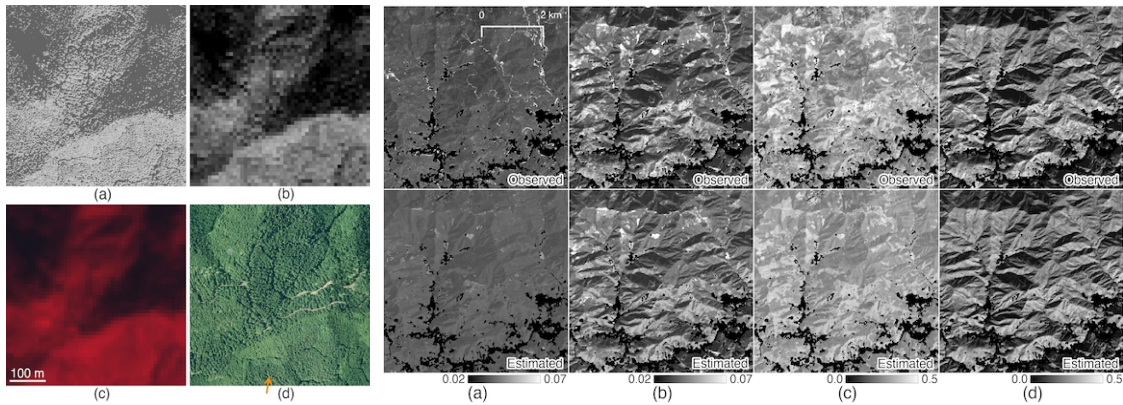


図3

図4

##### (2) 影の補正と評価

影の補正結果の比較を図5に示す。上段が夏、下段が冬のデータである。(a)はSentinel-2 MSI レベル1Cの反射率である。観測されたオリジナルデータであり影の影響が含まれている。(b)はモデルによってシミュレーションされた反射率であり、(a)と類似していることが分かる。(c)は本研究の補正結果、(d)はSentinel-2 MSIのレベル2A、(e)はC correctionによる補正結果である。既存の補正手法(d)と(e)では地形による反射率の違いは軽減されているものの、夏と冬の反射率の差が大きい。一方、本研究の補正結果(c)では、夏と冬で植生による明るさの違いが小さく、同じような反射率を示している。また、落葉広葉樹における反射率の違いは維持されており、良好な補正結果であるといえる。この理由は、既存の補正手法が樹冠の構造を考慮できていないことにある。既存の手法は地形データのみに基づき、日照と日陰との反射率の差を除去するように補正する。しかし、太陽高度が低くなる冬には日照側の斜面においても樹冠による影の影響を受けて反射率が低下する。既存の手法はこれを考慮できないため、冬の反射率が全体的に低くなる。一方、本研究の手法では航空機レーザスキャナにより樹冠の形状を考慮しているため、太陽高度の低下による冬の反射率の低下を補正できている。

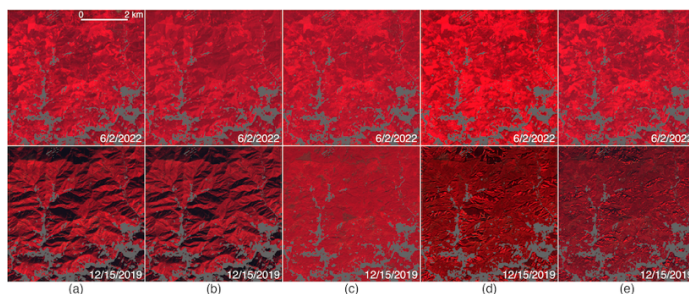


図5

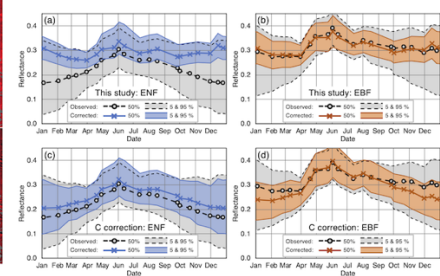


図6

図6は本研究の手法(上段)とC correction(下段)により補正された反射率の季節変化である。左が常緑針葉樹、右が常緑広葉樹であり、それぞれ画像に含まれる反射率の10パーセント点と90パーセント点の範囲に色をつけている。灰色は補正前の反射率の範囲であり、青と橙が補正後の範囲である。本研究の手法(上段)は元の反射率の高い値に沿うように補正している。一方、C correctionは先述のように冬に反射率の低下が見られ、常緑針葉樹(左)では冬に反射率の範囲が広がっている。常緑針葉樹や常緑広葉樹では、このような反射率の大きな季節変化は生じず、特に常緑針葉樹では、ほとんどがスギとヒノキであるため、場所による反射率の違いは小さい。したがって、年間を通じて反射率の分布範囲が一定であることは、本研究の補正手法の有効性を示している。

### (3) 静止軌道衛星のオルソ補正

図7は静止軌道衛星のオルソ補正手法の概要である。静止軌道衛星は地表面と衛星との相対的な位置関係が固定されているため、オルソ補正処理によって位置の対応がとれれば、全てのデータについて画素の単純な再配列によってオルソ画像を作成できることが利点である。図8はオルソ補正の有無による画素位置の違いを示している。オルソ補正なし(上段)の場合、極軌道衛星と静止軌道衛星の画像は重ならず、湖などが二重に写っている。オルソ補正あり(下段)では二つの衛星画像は位置があっており、オルソ補正の効果が出ている。図9はAHIの観測範囲において生じる位置ずれの大きさを示しており(1km解像度換算)、衛星直下点から離れるにつれて、また標高が高くなるにつれて位置ずれが大きくなっている。静止軌道衛星と極軌道衛星のデータの重ね合わせは、正確な植生情報の取得に不可欠であり、本研究の成果が役に立つと期待される。

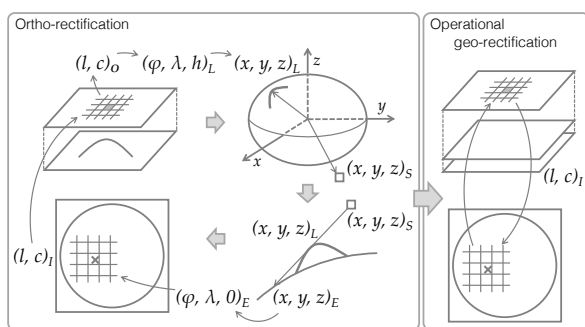


図7

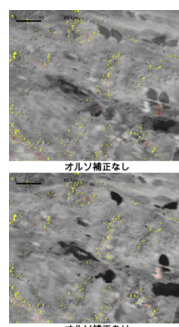


図8

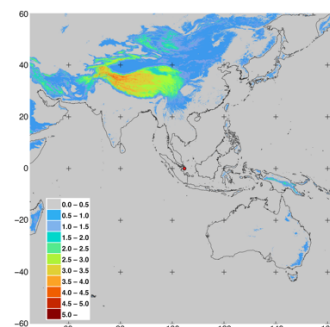


図9

### (4) 本研究の課題と展望

Sentinel-2 MSIの影の補正では、使用したモデルの物理的な解釈が不足している。特に、地形に関わる変数は大気の影響を受けた散乱日射と、樹冠による多重反射の影響を示していると思われるが、根拠を示せていない。この点は今後も検討が必要である。したがって、今後の解析によっては、モデルの式が変更される可能性もある。

研究の進捗から、静止軌道衛星の反射率の影補正には至らなかった。Himawari AHIは最短で2.5分間隔で日本全域を観測しているため、日内の反射率変動を日照率や地形の変数でモデル化できるかが研究の主眼となる。本課題で構築した静止軌道のオルソ補正や、幾何補正の方法を活用し、解析を続けたい。

謝辞：航空機レーザスキャナのデータを提供いただいた林野庁森林整備部に深謝いたします。

### <参考文献>

- ① Richter, R., & Schlaepfer, D., 2012. Atmospheric / Topographic Correction for Satellite Imagery (ATCOR-2/3 User Guide, Version 8.2 BETA, February 2012). [https://www.dlr.de/eoc/en/Portaldata/60/Resources/dokumente/5\\_tech\\_mod/atcor3\\_manual\\_2012.pdf](https://www.dlr.de/eoc/en/Portaldata/60/Resources/dokumente/5_tech_mod/atcor3_manual_2012.pdf).
- ② Teillet, P.M., Guindon, B., & Goodenough, D.G., 1982. On the slope-aspect correction of multispectral scanner data. Canadian Journal of Remote Sensing, 8, 84-106. <https://doi.org/10.1080/07038992.1982.10855028>.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Matsuoka Masayuki, Yoshioka Hiroki	4. 巻 15
2. 論文標題 Orthorectification of Data from the AHI Aboard the Himawari-8 Geostationary Satellite	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Remote Sensing	6. 最初と最後の頁 2403 ~ 2403
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/rs15092403	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 Sato Yuki, Tsuji Takeshi, Matsuoka Masayuki	4. 巻 16
2. 論文標題 Estimation of Rice Plant Coverage Using Sentinel-2 Based on UAV-Observed Data	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Remote Sensing	6. 最初と最後の頁 1628 ~ 1628
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/rs16091628	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 3件）

1. 発表者名 松岡真如, 吉岡博貴, 市井和仁
2. 発表標題 静止軌道衛星 Himawari と極軌道衛星 Sentinel-2 の位置合わせ: どちらに合わせるか?
3. 学会等名 日本写真測量学会 令和5年度秋季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Masayuki Matsuoka, Hiroki Yoshioka, Kazuhito Ichii
2. 発表標題 Ortho-image or normalized geostationary projection: which projection is better for comparing the reflectance of GEO and LEO sensors?
3. 学会等名 Asian Conference on Remote Sensing 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Masayuki Matsuoka, Horoki Yoshioka, Kazuhito Ichii
2. 発表標題 Geometric registration of Himawari/AHI and Fengyun-4/AGRI
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023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 Asia Oceania Geosciences Society 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松岡真如, 吉岡博貴, 市井和仁
2. 発表標題 Himawari-8/AHIのオルソ補正
3. 学会等名 日本写真測量学会令和4年度秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松岡真如, 吉岡博貴, 市井和仁
2. 発表標題 静止軌道衛星データのオルソ補正: Himawari-8/AHIの例
3. 学会等名 日本リモートセンシング学会 第73回 (令和4年度秋季) 学術講演会
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
--	---------------------------	-----------------------	----

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