

# 1. ALOS-3

# ALOS-3 観測データの農林水産業への利用可能性の評価

PI No.: ER2A3N001

米澤千夏<sup>1</sup>, 斎藤元也<sup>2</sup>, 石塚直樹<sup>3</sup>, 村田裕樹<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup> 東北大学大学院農学研究科

<sup>2</sup> 東京大学

<sup>3</sup> 農研機構

<sup>4</sup> 横浜市役所

## 1. はじめに

先進光学衛星 (ALOS-3) によって実際に観測されたデータの国内における農林水産業への利用を念頭において、観測波長帯および解像度が類似した衛星画像の解析をおこなった。

日本国内では農林水産業への従事者の減少および高齢化が年々進んでおり、人手不足への対応や生産性の向上のために ICT 技術の活用が進められようとしている。人工衛星からの地球観測は、対象を継続的にモニタリングできる技術であり、その活用が今まで以上に期待されている。ALOS-3 に搭載されるセンサ WISH では、マルチスペクトルで 3.2m、パンクロマチックで 0.8 m の分解能をもっている。

ここでは、農林水産業への農業への利用可能性の検討のために空間分解能が類似する光学センサの解析を行った結果をまとめて報告する。農業への検討事例としては、Sentinel-2 衛星画像による農地の排水性評価への利用可能性を報告する[1]。さらに、planet 社 SCOPE 衛星による撮像画像を用いて、近年利用が盛んになっているドローンと併用した圃場の生育むらの把握への活用について検討した。森林モニタリングへの利用を念頭において、SPOT6 号のデータによる屋敷林抽出について検討した[2]。漁業への利用についての検討事例として Pleiades1A による養殖漁具の抽出をおこなった[3]。また、ドローン搭載ハイパースペクトルイメージャデータからのシミュレーションデータを作成した[4]。

Sentinel-2 衛星は ESA が運用する光学センサ搭載衛星であり、10m の解像度で地表面を観測することができる。観測データが無償提供されていることから、日本国内の農業関係の研究者からもその利用が期待されている。Planet SCOPE 衛星は、赤、緑、青、近赤外のマルチスペクトル観測が可能であり、直下視の空間解像度は 3.7m である。SPOT6 号は SPOT6 は RGB バンドと近赤外 (Near Infrared: NIR) バンドからなる解像度 6 m のマルチスペクトル (Multi Spectrum: MS) バンドと解像度 1.5 m のパンクロマチック (panchromatic: PAN) バンドが搭載されている。マルチスペクトルバンドの解像度は ALOS-3 よ

りやや大きくなるが、利用方法や解析方法は類似すると考えられる。また Pleiades1A 衛星は、マルチスペクトルで空間分解能 2.0 m、パンクロマチックで空間分解能 0.5 m である。

## 2. 農地の排水性評価への利用可能性の検討[1]

### 2.1 光学センサ画像による土壌水分推定

わが国のダイズ作においては湿害がダイズの収量を最も制限する要因となっている。ダイズ作付前の圃場を対象として、Sentinel-2 の近赤外波長領域のデータを用いて空間的な土壌水分量を推定することによって、排水性を評価した。さらに、作付後の生育状況を NDVI を用いて評価し、推定される土壌の排水性との対応を調べた。

土壌水分推定には、これまでに多くの報告がある。国内では例えば、土壌の含水比の増加に伴い簡易分光反射率計で測定した 450nm と 980nm の反射率が減少していることが報告されている。衛星画像を用いた研究としては Landsat/TM のバンド 2 と畑土壌の水分率の負の相関がみられた。また、無人ヘリコプタに搭載したサーモトレーによる地表面の水分状態の推定では、熱画像との相関には劣るものの近赤外画像と地表面含水率との負の相関が指摘されている。また航空機レーザスキャナによるレーザー反射値による地表面の水分状態の推定についての報告では、室内実験において近赤外波長域で土壌の含水率が大きくなると反射率が減少することが示されている。

### 2.2 対象地域と使用データ

福島県新地町にある 3 つのダイズ圃場を対象とした。それぞれ前年に、トウモロコシ、水稻 (乾田直播)、水稻 (移植) が栽培されていた。排水性は一般的にトウモロコシ後の圃場が最も良く、移植水稻栽培後の圃場は劣り、乾田直播水稻栽培後の圃場に関しては明らかにされていない。面積は前年水稻 (移植) 圃場が 0.15 ha、他の 2 つの圃場が 0.9 ha である。ダイズの播種は 2019 年 6 月 6 日に行われた。なお、各圃場で使用した作業機、深さ等の耕起条件は同一である。ただし、前年トウモロコシ圃場の東

側半分では、前年 11 月から 5 月上旬まで緑肥としてヘアリーベッチが栽培されていたため対象から除外した。

Sentinel-2 搭載の MSI センサで取得された処理レベル 2A のデータを解析した。レベル 2A データは Bottom-Of-Atmosphere (BOA)を補正した反射率に変換されている。ダイズ播種前で前日もしくは前々日に 10 mm 以上のまとまった降雨が確認された、4 月 13 日、4 月 28 日、5 月 8 日、5 月 30 日の観測データについて、近赤外波長領域に相当するバンド 8 を使用した。また、ダイズ播種後においては、対象圃場が雲に覆われずに観測された 6 月 14 日、7 月 29 日、8 月 1 日、8 月 3 日、8 月 6 日、8 月 26 日、9 月 15 日のデータを使用した。

### 2.3 結果と考察

#### 2.2.1 ダイズ播種前の圃場の排水性

ダイズの播種前に取得された 4 データのバンド 8 について、対象とする圃場毎に平均値を調べた (Table 1)。4 つの画像を通して、前年水稲栽培の 2 圃場よりも前年トウモロコシの圃場の値が大きくなった。これは、土壌の含水率と反射率の関係と矛盾しない。前年が水稲 (乾田直播)であった圃場の反射率は、圃場内の北側で小さく南側で大きくなった。この傾向は 4 つのデータを通してみられ、圃場内での排水性の偏りと関係していると考えられる。

#### 2.2.2 ダイズの生育と排水性

ダイズ播種後の画像より、正規化植生指標 (Normalized Difference Vegetation Index: NDVI) を計算した。近赤外バンドから推定される排水性と NDVI から推定されるダイズの生育の関係について、2 つの画像間での画素対画素の相関関係をもとに考察した。前年が乾田直播水稲であった圃場では、4 月 13 日と 5 月 30 日の近赤外バンド値と 7 月 29 日から 8 月 6 日の間に得られた画像から得られる NDVI の間に明瞭な正の相関 (相関係数 0.85 以上) がみられた (Fig.1)。これは、圃場内で排水性が良好であると推定される場所ほどダイズの生育が良好であったと解釈できる。ただし、播種前の近赤外バンド値とダイズが十分に生育した 8 月 26 日、9 月 15 日の NDVI との相関係数は 0.3 以下となった。前年がトウモロコシおよび移植水稲であった圃場では、明瞭な相関はみられなかった。

Table 1. Average for B8 (NIR) of Sentinel-2 L2A data in the target soybean fields [1].

|    | 13-Apr | 28-Apr | 8-May | 30-May |
|----|--------|--------|-------|--------|
| A* | 0.18   | 0.19   | 0.23  | 0.21   |
| B* | 0.21   | 0.24   | 0.29  | 0.24   |
| C* | 0.16   | 0.19   | 0.22  | 0.22   |

\*Cultivated crops on 2018 are as follows;

A: transplanted rice, B:corn, C:direct seeded rice

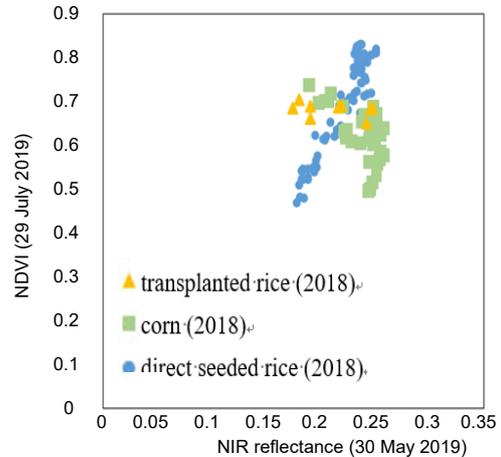


Fig.1. Correlation between reflectance of NIR on 30 May 2019 and NDVI on 29 July 2019 obtained by Sentinel-2 MSI. [1]

### 3. ドローンと併用した農地観測への利用の検討

#### 3.1 圃場内の生育ムラ

土地利用型農業においては、土壌肥沃度のバラツキなどの影響により、圃場内での作付作物の生育ムラが問題となることがある。作物の生育ムラを抑制して均一にするための方法として、作付時や生育途中での適正な施肥が挙げられる。施肥を調整するためには、圃場内の生育状況を面的に把握する必要があり、リモートセンシングによる観測データの利用が期待されている。

#### 3.2 使用データと解析方法

2018年7月14日に撮影された PlanetSCOPE 画像を対象とする衛星画像とした。

重ね合わせの評価のために農林水産省から提供されている筆ポリゴンデータを用いた (Fig.2)。筆ポリゴンデータは平成 31 年 7 月から農林水産省統計部においてオープンデータとして公表・配布されている、衛星画像等をもとに筆ごとの形状に沿って作成したほぼ全国の圃場ポリゴンデータである。フォーマットはシェープファイルとなっており、属性としては地目としての田と畑が入っており、現在は、全圃場にユニーク ID が付与されている。

圃場ポリゴンデータを Planet SCOPE 画像に重ね合わせ、近赤外バンドを対象としたポリゴン内の統計値として最大値、最小値、標準偏差、分散を算出した。解析には、QGIS およびエクセルを利用した。

また、2018年7月20日に一部の圃場を対象に、ドローンで空撮を行った。DJI 社の Phantom4Pro に Parrot 社の sequoia を搭載して撮影した。



Fig.2. Agricultural parcel data.



Fig.3. Overlay image of agricultural parcel data with Planet SCOPE data..

### 3.3 結果結果と考察

#### 3.3.1 画像解像度

Fig.3はPlanet SCOPE画像に、筆ポリゴンデータを重ね合わせたものである。Planet衛星画像は直下視の時の空間解像度が約3.7mとなっており、ドローンより空間解像度は劣っている。しかし、Fig.3に示した範囲だけでも約1.2km×2kmあり、回転翼ドローンで全ての圃場を撮影するにはかなりの労力と時間、つまりコストを必要とする。さらに、ドローンでこの範囲を観測することは不可能ではないものの、同時に観測することは不可能であり、観測する間に太陽高度・角度、雲、雲影等が変化するため、パラメータの異なるデータが混在することとなる。つまり、この範囲の多数の圃場をドローンで同じ条件で計測し、比較することは出来ない。

一方、可変施肥を行うための情報として圃場内のムラをはっきりと知るためには、PlanetSCOPE衛星の空間解像度では解像度が不足している。もう少し

高い解像度の画像としてドローン観測による観測画像が必要となる。衛星画像から圃場内のムラの大きな圃場を探し出し、そのような圃場のみドローンで詳細観測をして可変施肥の設計図にするというシナリオが考えられる。ALOS-3の解像度もPlanetSCOPE衛星と同程度であり、同様な利用方法が考えられる。

Table 2. Statistics of Near Infrared band of Planet SCOPE data

| ID                | Min. | Max  | Variance  | Standard Deviation |
|-------------------|------|------|-----------|--------------------|
| 80900022150059700 | 2393 | 5190 | 980264.82 | 990.08             |
| 80900039070058800 | 2239 | 5194 | 930477.36 | 964.61             |
| 80900012610060500 | 2588 | 5557 | 837772.70 | 915.30             |
| 80900022930059700 | 2044 | 5296 | 830417.71 | 911.27             |
| 80900033850060100 | 2142 | 5266 | 755168.59 | 869.00             |
| 80900035020061200 | 2412 | 5249 | 743086.93 | 862.02             |
| 80900033460060500 | 2492 | 5197 | 730099.82 | 854.46             |
| 80900034870058300 | 2719 | 5551 | 717860.13 | 847.27             |
| 80900028280059500 | 2291 | 5302 | 707729.94 | 841.27             |
| 80900034370060400 | 2256 | 5380 | 699993.75 | 836.66             |
| 80900031660059500 | 2067 | 4636 | 685094.37 | 827.70             |
| 80900028670060100 | 2316 | 5097 | 671698.42 | 819.57             |
| 80900031260059500 | 2371 | 5002 | 663030.10 | 814.27             |
| 80900022020059600 | 2262 | 4880 | 641505.04 | 800.94             |
| 80900010560060700 | 2848 | 5242 | 626654.19 | 791.61             |
| 80900039270058400 | 2273 | 5196 | 626274.94 | 791.38             |
| 80900014510060800 | 2772 | 5433 | 619950.91 | 787.37             |
| 80900030590059800 | 2376 | 4886 | 613549.72 | 783.29             |
| 80900029680059300 | 2583 | 5274 | 612112.33 | 782.38             |

#### 3.3.2 圃場毎の統計値と生育ムラ

Table 2に圃場毎の近赤外バンドの統計値を示す。標準偏差や分散の値が高い圃場は、圃場内の近赤外線バンドの値のバラツキが大きいということであり、圃場内の生育ムラが大きい可能性が高い圃場ということになる。ただし、畑作地においては出荷時期をずらす等のため一つの圃場内の生育ステージが異なる場合もあり、そのような場合も値が大きくなるため対象作物の作付体系には注意をする必要がある。この情報をもとに、確認すべき圃場の優先順位をつけ、上位から調査をしていくことで効率的に調査を行っていくことが可能になる。一方、標準偏差や分散の小さい圃場は、圃場内での差が小さい、つまりムラが小さい圃場と考えられ、可変施肥は必要ない

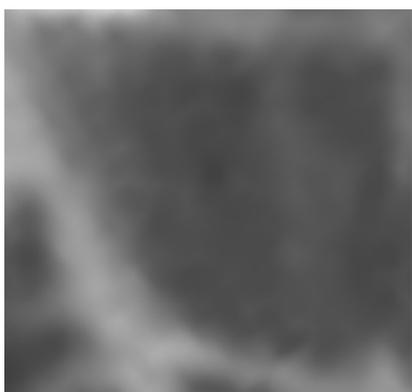


Fig. 4. A Planet Scope image for an agricultural parcel.

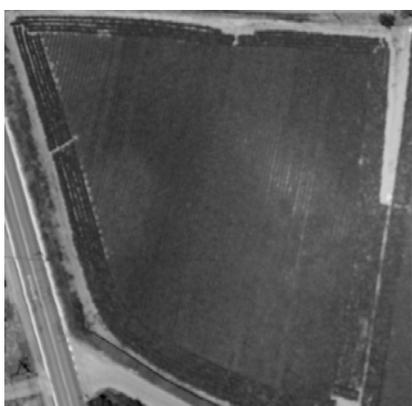


Fig. 5. Image obtained by drone for an agricultural parcel.

という判断にも繋がる。したがって、この情報をもとに、可変施肥の必要な圃場と必要ない圃場の目安をつけることも可能となる。

Fig.4は Table 2 の上位にある圃場の一つであり、衛星画像においても不明瞭ながらも圃場内が一様でないことが確認できる。この圃場のドローンによる撮像画像が Fig.5である。ドローンの空間解像度は数 cm であるため圃場内の生育ムラを明瞭に確認することができる。また、Fig.4および Fig.5 のパターンは概ね一致していることも確認できる。情報をもとに、可変施肥の必要な圃場と必要ない圃場の目安をつけることも可能となる。

### 3.4 まとめ

ALOS-3 による観測画像とドローンによる観測画像を組み合わせた活用方法として、圃場内のムラの大きい圃場を探し出し、圃場内のムラに合わせた可変施肥を行うための情報を得ることが可能か検討した。その結果、空間解像度は低いものの、観測幅は広く、観測の同時性が高いという特徴を有する衛星観測を用いることで、多数の対象圃場からムラの大きいと考えられる圃場をスクリーニングできた。そして、広域の同時観測できないものの、高い空間解像度で観測可能という特徴を有するドローンで詳細な計測を行った結果、圃場内にムラがあることが確認され、さらにそのパターンも似ているということが確認できた。

## 4. 屋敷林抽出への利用[2]

### 4.1 屋敷林について

屋敷林は、平野部において生活する人々にとって



Fig.6 SPOT6 Image (right) and windbreak forest area extracted from Pan-sharpened MS band and texture image (left)[2].

最も重要な林の一つであり、防風・防雪、日陰供給機能、湿地生態系保全機能など多様な役割を有する。

海外では屋敷林のことを hedge や hedgerow と呼び、広域を観測可能な衛星リモートセンシングを活用した屋敷林のモニタリング研究が盛んに行われている。

衛星画像を用いた対象物の検出において、画素サイズは対象物よりも小さいことが望ましい。屋敷林および屋敷林をもった家屋の規模としては、樹林幅 40~50 m、敷地面積 270~1,400m<sup>2</sup>などが報告されており、解像度が 10 m 以下であることが望ましいと考えられる。

#### 4.2 対象地域と使用データ

宮城県大崎市古川地域および岩出山地域の一部を研究対象地とした。大崎市は宮城県の北西部に位置し、市の中央~南部に位置する平野部は「大崎耕土」と称される県内有数の穀倉地帯である。大崎耕土は 2017 年 12 月に世界農業遺産に認定され、その中でも周囲の水田・水路とともに豊かな湿地生態系を育む「イグネ」と呼ばれる屋敷林が織りなす独特な農村景観が高く評価された。

2015 年 5 月 11 日に観測された処理レベル Projected の画像（入射角 13.9°）を使用し、RPC ファイルを用いてオルソ補正をおこなった。Projected では、大気補正および幾何補正が適用されている。

#### 4.3 解析方法

本研究では MS 画像から、NDVI に加えて拡張植生指数（Enhanced Vegetation Index: EVI）、近赤外バンドと青バンドの比植生指数（Ratio Vegetation Index: RVI）を求めた。

MS バンドの解析では、NDVI、EVI、RVI をそれぞれスペクトル特徴量として k-平均法によるクラスタリングを行い、クラスタリング結果の目視判読により、最適な植生指数について検討した。パンシャープンバンドの解析では、Tukey-Kramer 法を用いて有意水準 5%による多重比較を行い、分類できる植生の組み合わせが最も多い RVI をスペクトル特徴量として用いた。

4 つの MS バンドについて同時生起行列（Gray Level Co-occurrence Matrix: GLCM）（Haralick and Shanmugam 1973）を 5 × 5 の正方領域で計算し、9 つの特徴量（角二次モーメント、類似度、異質性、コントラスト、エントロピー、平均、分散、最大相関係数、相関）を求めた。4 バンドそれぞれについて 9 つの特徴量を求めた合計 36 つの特徴量に対して、主成分分析を適用し、第一主成分から第五主成分をテクスチャ特徴量として選択した。また、Band Dependent Spatial Detail (BDSD)（Garzelli, et al. 2008）によりパンシャープン処理を行ったパンシャ

ープン RGB バンドについても同様な処理をおこなった。

k-平均法によるクラスタリングによって屋敷林の抽出をおこなった。MS バンドに対して、クラスタの数を 7 とした場合を採用した。①MS バンド+各植生指数、②MS バンド+テクスチャ特徴量、③パンシャープン RGB バンド+テクスチャ特徴量のデータセットについて k-平均法を適用した。生成されたクラスタから、Google Earth との目視比較により、屋敷林が最も多く含まれるクラスタを抽出し、ベクタデータに変換した。抽出されたクラスタのうち、面積が 100 m<sup>2</sup> 未満もしくは 10,000 m<sup>2</sup> 以上のポリゴンを除去した。

①および②のデータセットについて、残ったポリゴンのうち住宅データから 30 m 圏内に含まれるポリゴンを抽出した。以上の処理によって抽出されたデータを屋敷林ポリゴンとした。③のデータセットについて、残ったポリゴンのうち RVI の値が 3.0 から 6.5 未満となるポリゴンをさらに抽出した。RVI の閾値は、屋敷林参照データを用いてゾーン統計を行い、下限値を第一四分点、上限値を第三四分点として決定した。抽出されたポリゴンのうち、住宅データから 30 m 圏内にあるポリゴンを屋敷林ポリゴンとした。

#### 4.4 結果と考察

Fig.6 に屋敷林の抽出結果の例を示す。屋敷林の面積が 500 m<sup>2</sup> 以上、すなわち解像度 6 m の MS 画像では屋敷林が 14 画素以上のまとまりを持つ場合、80 %以上の精度で屋敷林が抽出できる可能性が示唆された。これは、イグネ型屋敷林が塊状であるため、画像上では屋敷林の特徴を有する画素が隣接する。そのことによって類似する特徴を持つ画素が一つの屋敷林オブジェクトとしてクラスタリングされた結果、高い精度で抽出されたと考えられる。一方、屋敷林の面積が 500 m<sup>2</sup> 未満、すなわち MS 画像では屋敷林の構成画素が 13 画素以下の場合、屋敷林の植栽形態が大きく影響することが考えられる。例えば、屋敷林が複数列の形態で植栽されている場合、イグネ型屋敷林と同様に屋敷林の特徴を持つ画素が隣接するため、抽出できると考えられる。しかし、屋敷林の植栽形態が単列型の場合、屋敷林の特徴を持つ画素が周囲の土地利用とのミクセルになっていることが考えられる。

高解像度画像の場合、屋敷林の面積が 300 m<sup>2</sup> 程度であっても、80 %の精度で屋敷林を抽出できた。本研究では MS 画像とパンシャープン画像の空間解像度の比が 4 であるため、MS 画像の 1 画素はパンシャープン画像の 16 画素に相当する。このため、単列型の屋敷林であっても屋敷林の特徴を持つ画素が隣接するため、高解像度画像解析では屋敷林の植栽形態は抽出精度に影響しないと考えられる。したが

って、高解像度画像を用いた手法はより汎用的な手法である可能性が示唆された。

ALOS-3ではパンクロマチックで0.8 mの解像度を有しており、本手法によって、より小さな面積の屋敷林抽出に活用できることが期待できる。

## 5. 養殖漁具の抽出[3]

### 5.1 リモートセンシングデータによる沿岸域管理

日本の沿岸域では海面養殖が行われており、世界の人口増加に対応するための水産物供給源として重要な役割を担っている。養殖は自然の恵みの上に成り立っており、過度な養殖は生態系に悪影響を及ぼす恐れがある。そのため、持続可能な海洋利用のためには、海面養殖の適切な管理が必要である。海面養殖は漁業権に基づいて行われているが、実際に設置された養殖施設の台数や空間配置などは、各地域の漁業協同組合が自主的に管理している程度であり、一般には知られていない。また、沿岸域に数多く設置された養殖施設を現地調査により把握することは非効率的であり、現実的でない。今年度新たに策定された第3期海洋基本計画においても、海洋状況把握（Maritime Domain Awareness : MDA）が基本施策の1つとして位置付けられるなど、海洋における情報の収集、集約、共有が求められている。

### 5.2 対象地域と使用データ

岩手県と宮城県の間境に位置する広田湾を対象とした。広田湾の湾開口部の長さは約4.8 kmで、奥行き約9 km、面積は約37.1 km<sup>2</sup>、湾内および湾口最大水深56 mのリアス式海岸である。湾内ではカキ、ワカメ、ホタテなどの海面養殖が行われている。本研究では、カキ養殖に用いられる長さ約10 m、幅約4 mの養殖筏を対象とした。

2015年4月30日に人工衛星Pleiades1Aにより観測された空間分解能2.0 mのマルチスペクトルバンド画像から作成したRGB画像（R：バンド3，G：バンド2，B：バンド1）と近赤外バンド画像（バンド4）の2種類の画像について解析を行った。また、空間分解能0.5 mのパンクロマチックバンド画像についても解析を行った。画像の解析にはソフトウェアENVI 5.5（Harris Geospatial社）を用い、ルールベースのオブジェクトベース解析を行った。条件として、海面のスペクトル領域を除外したスペクトルを養殖筏として設定した。

### 5.3 結果と考察

RGB画像からは897台の養殖筏が検出され、目視判読結果と比較して約85%の検出率であった。また、養殖筏1台当たりの平均面積は約48 m<sup>2</sup>であった。実際の養殖筏の面積は約40 m<sup>2</sup>であることから、実際の面積よりも大きく検出された。この面積の大

きさの違いは、使用した人工衛星Pleiades1Aの近赤外バンド画像の空間分解能の2ピクセル分（約8.0 m<sup>2</sup>）の面積に相当するものである。

近赤外バンド画像からは1030台の養殖筏が検出された。これは目視判読結果と比較して約98%の検出率であった。1台当たりの平均面積は約49 m<sup>2</sup>であり、RGB画像と同様に実際よりも2ピクセル程度大きく面積が検出された。また、養殖筏の距離が近いものや、漁船が係留されていた養殖筏などは、それぞれが区別されずに1つのオブジェクトとして検出されていた。このことから、実際よりも台数が少なく、かつ面積が大きく検出されたものであると考えられる。

パンクロマチックバンド画像からは1319台が養殖筏として検出された。これは目視判読結果と比べ約25%の増加であった。養殖筏1台当たりの平均面積は約30 m<sup>2</sup>であり、実際よりも小さかった。養殖筏の台数が実際よりも多く検出された理由として、用いたパンクロマチックバンド画像の空間分解能0.5 mでは、1台の養殖筏が2-4台程度の細かいオブジェクトとして解析されたことが理由として考えられる。これによって1台当たりの平均面積も実際より小さくなったものと考えられる。

## 6. ハイパースペクトルイメージャデータからのシミュレーションデータ作成[4]

静岡大学農学部地域フィールド科学教育研究センター藤枝フィールドにおいて、ディーブ・センセンシング・イニシアティブ（DSI）社製のハイパースペクトルイメージ（HSI）センサーで観測したデータを使用し、ALOS-3のシミュレーション画像を作成し、このセンサーデータの特性を調べた。とくに、新たに加わったRed Edge(RE)バンドについて注目した。ALOS-3センサーの応答曲線は公開されていないため、各種文献を基に推定し、応答曲線を作成した（Fig.7）。

HSIデータ処理においては、中心波長345 nmから845 nmまでを5 nm刻みの101ファイルにしたデータを使用した。Fig.7に示したグラフを読み取り、エクセル上で数値感応曲線を作成し、各バンドにおいて感度があるHSIファイルについて加重平均することにより、ALOS-3シミュレーションバンドを作成した。作成したALOS3/AVNIR3シミュレーションバンドを画像化してFig.8に示した。

2018年11月21日に観測した野菜畑のシミュレーションデータのバンド間相関表をTable 3に示した。このバンド間相関表を見ると、バンド1と2の相関は0.93001であり、追加したバンド1（沿岸域観測用）はバンド2（青）と類似情報であり、このバンド追加での陸域農業での意義は低い。一方、バンド5（レッドエッジ）は、最も相関の高いバンド3（緑）との相関

係数は 0.49112 であり、新たに加わる情報量は非常に多く、農業分野での利用価値は高い。

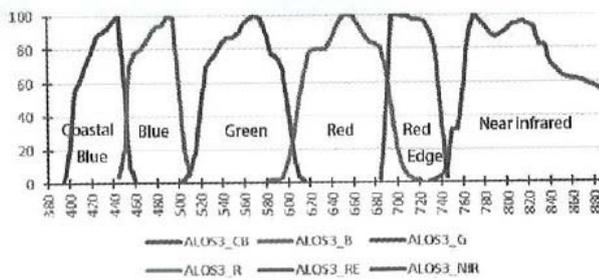


Fig. 7. Estimated response curve for ALOS-3 AVNIR3.

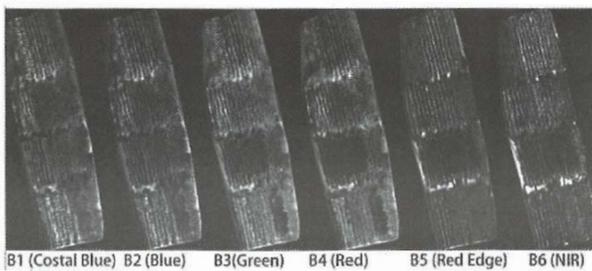


Fig. 8. Simulated ALOS-3 AVNIR-3 image.

Table 3. Inter-band correlations. .

| Layer | 1        | 2        | 3       | 4        | 5        | 6        |
|-------|----------|----------|---------|----------|----------|----------|
| 1     | 1.00000  | 0.93001  | 0.95234 | 0.69257  | -0.12857 | -0.19538 |
| 2     | 0.93001  | 1.00000  | 0.72282 | 0.82282  | 0.05168  | -0.15473 |
| 3     | 0.95234  | 0.72282  | 1.00000 | 0.75401  | 0.49113  | 0.29543  |
| 4     | 0.69257  | 0.82282  | 0.75401 | 1.00000  | 0.10144  | -0.28230 |
| 5     | -0.12857 | 0.05168  | 0.49113 | 0.10144  | 1.00000  | 0.43442  |
| 6     | -0.19538 | -0.15473 | 0.29543 | -0.28230 | 0.43442  | 1.00000  |

## 7. おわりに

ALOS-3 の観測データは、農林水産業の様々な場面での利用が期待される。ここでは ALOS-3 搭載センサーと解像度が類似した衛星データとして Sentinel-2、SPOT6、Pleades1A の観測画像の利用について検討した結果をまとめた。このうち Sentinel-2 は無償で誰でもインターネットからデータのダウンロードが可能であることから、リモートセンシングを専門としない農業関係の研究者からも注目されている。ALOS-3 による観測データが広く利用されるためには、データがユーザーが利用しやすい方法で提供されることも重要である。

## 8. 参考文献

[1] 米澤千夏, 松波寿典, Sentinel-2 によるダイズ圃場の排水性の評価と生育状況の観測, (社) 日本リモートセンシング学会第 67 回 (令和元年度秋季) 学術講演会講演論文集 255 – 256, 2019.

[2] 三浦祐未, 米澤千夏, SPOT6 衛星画像を用いた宮

城県大崎市古川地域における屋敷林自動抽出手法の提案, システム農学, 37、4、77 – 85, 2022.

[3] 村田裕樹, 小松輝久, 米澤千夏, 岩手県広田湾の養殖筏のオブジェクトベース画像解析による自動抽出, (一社) 日本リモートセンシング学会第 65 回 (平成 30 年度秋季) 学術講演会講演論文集, pp.125-126, 2018.

[4] 齋藤元也, 吉野邦彦, 菌部礼, 関晴之, 島村秀樹, 望月貫一郎, ドローン搭載ハイパースペクトルイメージャデータからの先進光学衛星(ALOS-3)シミュレーションデータ作成, システム農学会 2020 年度大会講演要旨集, pp.15-16, 2020.

## APPENDIX

その他の関連する発表

[1] 成澤朋紀, 米澤千夏, 東日本大震災前後の福島県葛尾村野行地区の採草地の変化, システム農学 36(3) : 39 – 48, 2020.

[2] 米澤千夏, 合成開口レーダ画像処理, 物理探査ハンドブック (出版予定)

# ALOS-3 を防災・災害対策に活用するための、位置決定精度の評価と パンシャープン手法の開発

PI No.: ER2A3N002

松岡真如<sup>1</sup>, 本田理恵<sup>2</sup>, 高木方隆<sup>3</sup>, 赤塚 慎<sup>3</sup>,  
野々村敦子<sup>4</sup>, 岩崎洋平<sup>5</sup>

<sup>1</sup>三重大学, <sup>2</sup>愛媛大学, <sup>3</sup>高知工科大学, <sup>4</sup>香川大学, <sup>5</sup>高知工業高等専門学校

## 1. はじめに

先進光学衛星(ALOS-3)はミッションとして「防災・災害対策を含む広義の安全保障」と「地理空間情報の整備・更新」を掲げている。これらのミッションを達成するために搭載された広域・高分解能光学センサは、サブメータ級の高分解能でありながら、観測幅 70km という広域観測が可能で、これまでに類を見ないセンサである。加えて、観測頻度の向上やステレオ観測のために、60 度までのポインティング機能を有している。

防災・災害対策や地理空間情報の整備では、プロダクトに高い位置精度が要求される。特に、観測幅が広く、多様な角度で観測を行う ALOS-3 では、センサの初期校正期間に多くの地上基準点を用いて幾何精度を評価し、センサモデルや幾何パラメータを校正することが重要である。また、高い空間解像度を有する ALOS-3 のデータは、パンクロマチックバンドとマルチスペクトルバンドを合成して空間解像度を向上させた、パンシャープン画像の利用が期待できる。加えて、光学センサは曇天や夜間の観測が難しいことから、ドローンを含む航空機や、合成開口レーダとの併用による相補的な観測・解析が求められる。

本研究の目的は、ALOS-3 の幾何学的性能と画質が、防災・災害対策への利用実証に有効であるかを評価することである。そのために以下の課題を実施した。ただし、※印の課題は ALOS-3 の打ち上げ後の課題であり、本報告書からは除いた。以下、各課題の実施内容を報告する。

### 課題 1：位置決定精度の評価

#### 1-A：地上基準点データベースの整備

#### 1-B：四国における晴天率の解析

#### 1-C：打ち上げ後の位置決定精度の評価 ※

### 課題 2：パンシャープン手法の開発

#### 2-A：シミュレーション画像を用いた既存のパンシャープン手法の評価

#### 2-B：ALOS-3 に適したパンシャープン手法とパラメータの決定 ※

#### 2-C：空間解像度の異なるパンシャープン画像の画質評価 ※

### 課題 3：防災・災害対策への利用実証

#### 3-A：RPC を用いて作成したオルソ画像の

### 位置精度の評価

#### 3-B：解像度の異なるオルソ画像からの地物判別精度の評価

#### 3-C：合成開口レーダとの併用による防災・災害対策への利用実証

## 2. 位置決定精度の評価（課題 1）

### 課題 1-A：地上基準点データベースの整備

観測幅が広く、多様な角度で観測を行う ALOS-3 では、長いセンサアレイの両端にわたり、また多様なポインティング観測において、高い位置決定精度を保持する必要がある。そのためには、センサの初期校正期間に多くの地上基準点を用いて幾何精度を評価し、センサモデルや幾何パラメータを校正することが重要である。高木らは 2009 年に ALOS/PRISM 向けの地上基準点データベースを構築して以降、管理・運用を継続してきた[1]。ここでは、空間解像度が 0.8m に向上した ALOS-3 に対応するため、データの選定、刺針、チップ画像作成を行った。地上基準点データベースを図 1 に示す。ここに示される基準点を対象とし、国土地理院の空中写真で計測位置を確認できる基準点を選定した。続いて、現地計測を実施した基準点の位置が空中写真と合致しているかを確認し、ずれている場合には地理情報システムソフトウェア上で刺針作業を実施した。その後、空中写真と基準点座標の座標をデータベースに再登録した。

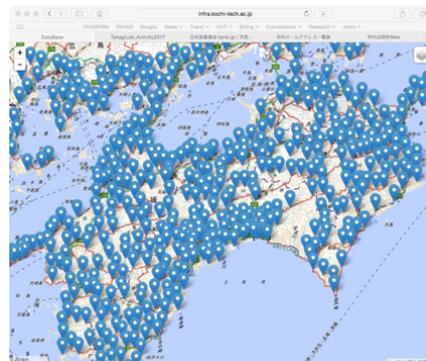


Fig. 1 Ground control point database

これらの作業の結果、514 点の地上基準点のうち、467 点が使用可能と判断された(47 点を削除)。また、このうち刺針作業が行われたのは 92 点であ

った。この基準点データベースは、ALOS-3の初期校正に用いるために JAXA と共有されている。なお、この作業はリモートセンシング技術センターと共同で実施された。

### 課題 1-B : 四国における晴天率の解析

光学センサは雲の影響を受けるため、初期校正を含む観測計画の立案時には晴天率を考慮する必要がある。また、本課題では位置精度の評価のため、ALOS-3の打ち上げ後にも地上基準点を計測する計画である。ここでは、調査位置の計画立案を支援するため、四国における晴天率を取得した。赤塚の方法[2]に基づき、気象庁のメソ数値予報 GPV データを用いて午前 10 時の晴天率を月ごとに推定した。結果の一部を図 2 に示す。12 月から 1 月にかけては室戸岬の東西の海岸線沿いで晴天率が 40%を超えていた。一方、6 月から 9 月にかけては四国全域で晴天率がほぼ 10%程度と低くなっており、特に中央の山地で低かった。これらの結果から、四国南東部の海岸線において地上基準点の追加を行うことが有効と判断された。四国南東部は海岸線沿いに道路や市町村が連なっており、ALOS-3 の観測幅(直下で 70km)を超える範囲で地上基準点を取得できる。また、内陸は剣山(標高 1,955m)に向かって標高が高くなっていることから、高さによる位置精度の評価やオルソ画像の精度評価などにも使用できる。一方で、基準点として使える構造物などが少ないことから、道路や治山ダムなど、候補となる構造物を事前に選定しておく必要があると思われる。

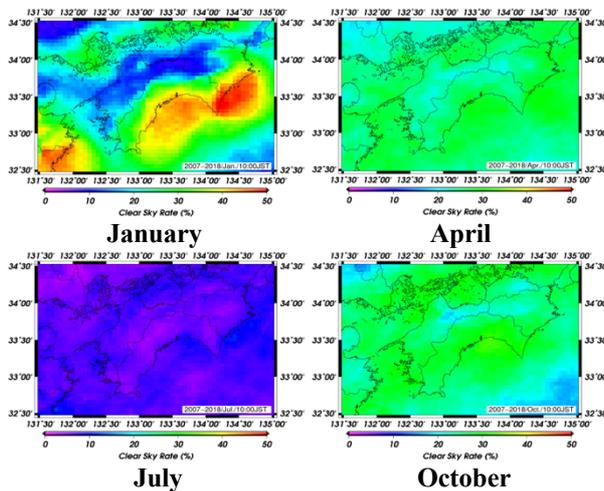


Fig. 2 Clear sky rate

### 3. パンシャープン手法の開発 (課題 2)

#### 課題 2-A : シミュレーション画像を用いた既存のパンシャープン手法の評価

観測幅が広い ALOS-3 では、高解像度かつ広範囲のデータ取得が可能である。特に、小規模で複雑な土地利用を有する日本では、パンシャープン画像の活用が有効である。パンシャープン画像の画質は手法とパラメータの影響を大きく受ける。

そのため、ALOS-3の分光応答や空間解像度に応じて手法とパラメータを設定することが、プロダクトの品質を向上させる鍵となる。また、ポインティングによって空間解像度が変化した際にもパンシャープン画質が保持されることは、ALOS-3の利用可能性を向上させると考えられる。ここでは、松岡らの研究[3]をベースとし、ALOS-3 と類似の観測波長帯と空間解像度を有する WorldView-3 に既存のパンシャープン手法を適用して、波長特性と画質を評価した。パンシャープンの手法として Block-SVR、GLP-SDM、Gram-Schmidt を用いた。また、結果の評価は ERGAS、WSNR, UIAI, QILV、 $Q_{ab}^f$ を用いた。

パンシャープン画像の一部を、比較用画像とともに図 3 に示す。Block-SVRは画素を矩形領域に分割して領域単位でパラメータを求める手法であり、道路と森林の境界線において矩形領域が残っている。特に植生の反射率が高い近赤外バンドにおいて影響が顕著である。GLP-SDM と Gram-Schmidt は画面上部の農地付近の近赤外バンドにおいて、植生と非植生の境界でにじみが見られるものの参照画像と近い画像となっている。GLP-SDMはパンクロマチックから抽出した空間的な詳細情報を重みをつけてマルチスペクトルバンドに加算させる方法である。また Gram-Schmidt はマルチスペクトルバンドの多次元空間を直交変換して第一成分をパンクロマチックと入れ替える(主成分分析によるパンシャープンと類似した)方法である。どちらも分光情報を保存したまま高解像度化ができていると思われる。

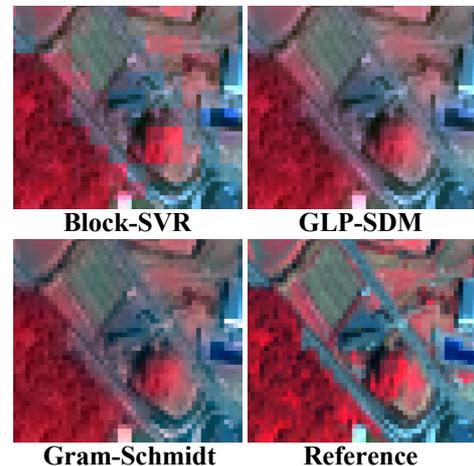


Fig. 3 Pansharpened image

各観測バンドにおける画質の評価指標を図 4 に示す。H の方向が画質の良い方向である。波長の長い、赤、レッドエッジ、近赤外のバンドでは、いずれの手法も同程度の数値を示している。一方、波長の短いバンドでは、 $Q_{ab}^f$ を除いて Gram-Schmidt が高品質となっていた。 $Q_{ab}^f$ はエッジの保存状況に注目した指数であり、Gram-Schmidt は過剰に滑らかな画像を作成する可能性が考えられる。 $Q_{ab}^f$ の数値は悪いものの、Gram-Schmidt によるパ

ンシャープンは調整するパラメータがなく実装が容易でもあることから、現時点では有効な方法と考えられる。

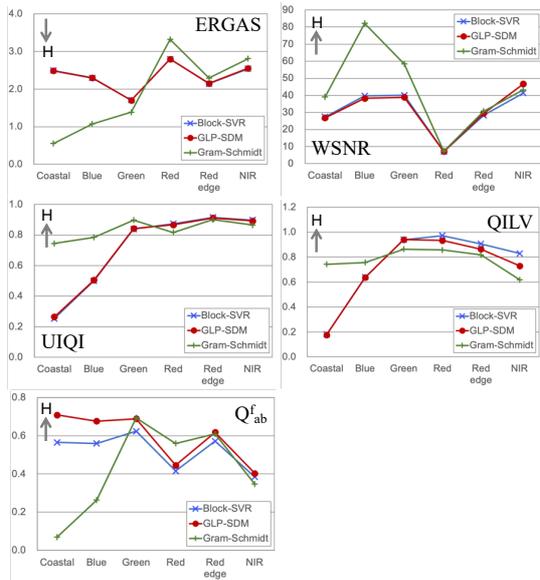
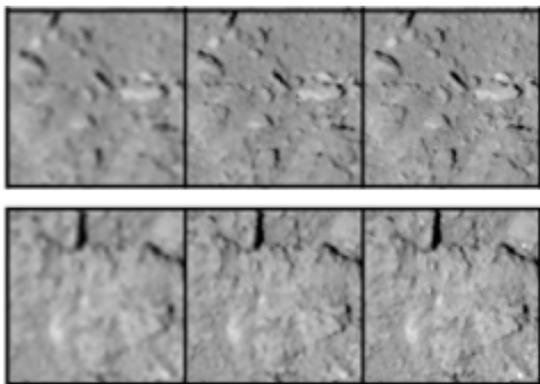


Fig. 4 Image quality indices

近年、機械学習の一手法である敵対的生成ネットワーク (Generative Adversarial Network: GAN) による超解像技術が研究されている。これにより、パンクロマチックバンドの空間解像度を向上させられる可能性がある。特に、森林モニタリングにおける樹種や葉量の推定などへの利用が期待される。ここでは、超解像に用いられる GAN の一つである SRGAN を用いて、小惑星探査機はやぶさ 2 による小惑星リュウグウの観測画像の超解像を試みた[4]。1074 枚の画像を用いて学習を行った結果を図 5 に示す。撮影された画像(左側)に対し、GAN によって生成された超解像画像(中央)は、参照画像(右側)と比較して遜色のない画像となっている。また、一般的な GPU を用い、学習済みのモデルを用いて画像を生成した際の処理時間は 1024×1024 画素の画像一枚あたり 1.12 秒であり、短時間で超解像画像を生成した。この手法は災害時など、特に即時性が求められる問題に対する有用性が高いことが期待される。



Original image SR image Reference  
Fig.5 Super-resolution using GAN

#### 4. 防災・災害対策への利用実証 (課題 3)

##### 課題 3-A : RPC を用いて作成したオルソ画像の位置精度の評価

衛星データから地理空間情報の整備・更新を行う場合には、画像のオルソ補正が必要である。ALOS-3 では、ALOS/PRISM、AVNIR-2 と同様に、RPC (Rational Polynomial Coefficients) の提供が行われると想像する。この課題では、課題 1-A で整備した地上基準点データベースを用い、四国の山地において ALOS-3 のオルソ画像を作成して、その精度を評価する。現在までに軌道情報から RPC を生成する手法[5]を実装した。特に、災害時観測では大きなポイントング角での観測が想定されるため、斜め観測による影響などを評価する予定である。

##### 課題 3-B : 解像度の異なるオルソ画像からの地物判別精度の評価

豪雨などで斜面崩壊などが発生した場合には ALOS-3 に加えて航空機やドローンなど複数のセンサで観測されることが想定される。また、植生の季節変化のモニタリングには、衛星データと地上観測を統合させることで観測頻度を向上させることが有効である。ここでは、ALOS-3 と比較して空間解像度の高いドローンを用いてオルソ画像を作成し、植生の季節変化の判別を試みた[6]。

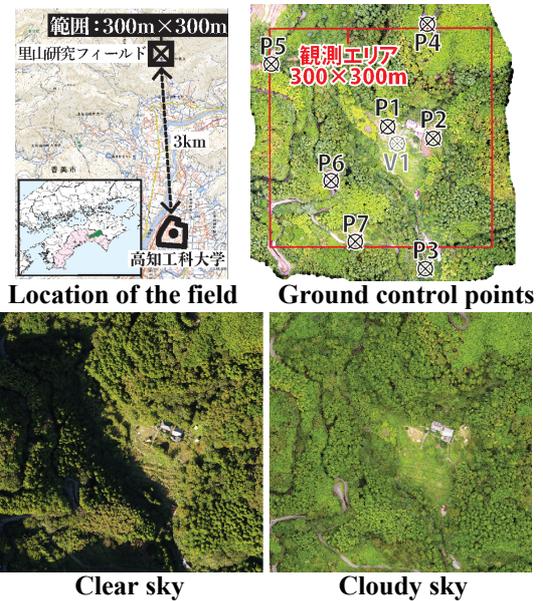


Fig. 6 Ortho-image for vegetation monitoring

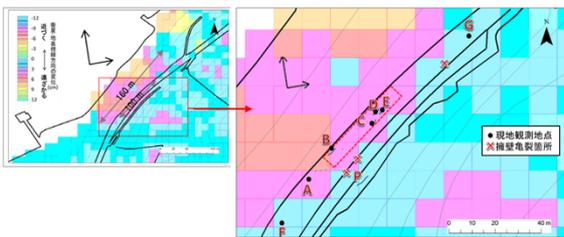
調査地の概要を図 6 の左上図に示す。高知工科大学が管理する里山研究フィールドであり、谷地形で起伏に富んだ地域に針葉樹、広葉樹、竹林などが存在している。計測に使用したドローンは DJI 社の Inspire シリーズであり、オーバーラップ率 90%、再度ラップ率 75%以上となるコースを設定して撮影した。この観測データに Structure from Motion 処理を施し、空間分解能が 20cm のオルソ画

像を作成した。ここでは植生の季節変化の抽出を目的としており、2019年4月から2021年5月までに118回の観測とデータ処理を行った(データはホームページで公開している)。

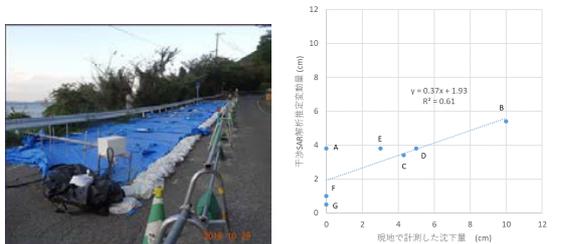
オルソ補正には図6の右上図に示されるP1~P8の地上基準点を用い、精度検証にはV1を用いている。全シーンの幾何精度の平均値は基準点において $2.9 \pm 2.5\text{cm}$ (標準偏差 $1\sigma$ )、検証点において $3.3 \pm 1.3\text{cm}$ である。図5の下段は作成されたオルソ画像の例である。ドローンは曇天でも観測を行うことができ、影の影響の少ない画像を作成することができる(右図)。一方でALOS-3の観測は晴天時であり、影の影響を受けるため、左図のような状態を観測している。日本は山地が多く、観測される反射率は地形や樹冠による影の影響を強く受けている。植生の季節変化を観測する際にはドローンや航空機LiDARから取得した地表面の三次元モデルなどを用いて影や方向性反射の影響を定量化することが必要と考えられる。

### 課題 3-C : 合成開口レーダとの併用による防災・災害対策への利用実証

災害観測では、ALOS-3などの高解像度光学センサと合成開口レーダとの併用が特に有効である。ここでは、ALOS-2/PALSAR-2を用いた干渉SAR解析によって地すべり性の変状箇所の検出を試みた[7]。対象地域は香川県坂出市の県道であり、平成30年7月豪雨によって生じた幅50m、最大深度10cmの沈下を対象とした。



Ground movement detected by PALSAR-2



Research site Comparison with survey  
Fig. 7 Slope deformation by heavy rain

図7の上段はPALSAR-2で検出した衛星-地表面方向の変動量である。図中央に存在する道路の亀裂箇所で、衛星から遠ざかる向きの変動が検出された。検出された範囲は道路沿いに100m程度、道路下の斜面で160m程度であった。解析結果を検証するために現地調査を実施した。図7右上図に示される7地点で変動の鉛直成分を測量し、PALSAR-2で推定した変動量との関係を調べた(図

7右下図)。変動量には正の相関が見られたが、SARの変動量は現地調査の結果と比較して小さかった。この理由として、フィルタ処理とピクセルスペーシングの影響が考えられた。また、対象の斜面が衛星視線方向に正対しているため、斜面下方への変状が水平方向で見ると近づく方向の変位としてとらえられたことも過小評価の原因と思われる。

特に防災・災害対策においては、ALOS-3に代表される高解像度光学センサを用いて、大規模な地表面の変動をとらえると同時に、合成開口レーダによってセンチメートルオーダーの変動を計測することより、崩壊地などを含む広域の変状をとらえることが有効と考えられる。センチメートルオーダーの変動が、大規模地すべりの予兆である可能性もある。事前にその可能性を捉えることができれば、事前防災対策の一助になると考えられる。

### 5. まとめと今後の課題

本報告では、ALOS-3を防災・災害対策に活用するための、位置決定精度の評価とパンシャープン手法の開発について、これまでに実施した内容を記載した。本研究はEO-RA3として継続される予定となっており、初期校正を含めてALOS-3のデータを用いた解析を行えるよう研究を進めたい。

### 参考文献

- [1] M. Kojima, and M. Takagi, "Establishment of ground control points database for satellite remote sensing and the evaluation," *Proceedings of the 30th Asian Conference on Remote Sensing*, Beijing China, ST12-5, 2009.
- [2] S. Akatsuka, "Improved Method for Estimating Precipitable Water Distribution using Numerical Prediction data," *Internet Journal of Society for Social Management Systems*, vol. 12, id. sms19-5790, 2020.
- [3] M. Matsuoka, T. Tadono, and H. Yoshioka, "Effects of the spectral properties of a panchromatic image on pan-sharpening simulated using hyperspectral data," *International Journal of Image and Data Fusion*, vol. 7, pp. 339-359, 2016.
- [4] 岸倫太郎, 橋本廉, 棚瀬旺和, 本田理恵, はやぶさ2 ONC チーム, GANを用いた小惑星画像の超解像, 令和3年度電気・電子・情報関係学会 四国支部連合大会 講演論文集, pp.160, 2021.
- [5] 松岡真如, リモートセンシング質問箱 第19回 Regional Polynomial Coefficients (RPC)の利用, *日本リモートセンシング学会誌*, vol. 34, pp. 347-349, 2014.
- [6] 村井亮介, 高木方隆, 里山研究フィールドにおけるUAVによる植生観測状況と公開データについて, *高知工科大学紀要*, vol. 18, pp. 1-5, 2021.
- [7] 榎本みな, 野々村敦子, 長谷川修一, 藤原一仁, 山之内勤, 田殿武雄, 干渉SAR解析を用いた平成30年7月豪雨による香川県の斜面変状箇所推定, *日本リモートセンシング学会誌*, vol. 40, pp. 97-102, 2020.

# CALIBRATION AND VALIDATION OF ALOS-3 IMAGERY OVER BERGAMA AND ANKARA TESTFIELDS, TURKEY

PI No.: ER2A3N003

*Sultan Kocaman<sup>1</sup>, Ali Ozgun Ok<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Hacettepe University, Department of Geomatics Engineering, 06800 Beytepe Ankara Türkiye

## 1. INTRODUCTION

The proposed project aimed at calibration and validation of ALOS-3 imagery over Bergama and Ankara Testfields, Türkiye. The project goals remain the same over the second period. Due to the rescheduling of the satellite launch, the images could not be assessed. However, the Ankara Testfield is continuously updated in other projects, such as the EDAP supported by ESA; and the characteristics of the site have been analyzed further as explained in the next section.

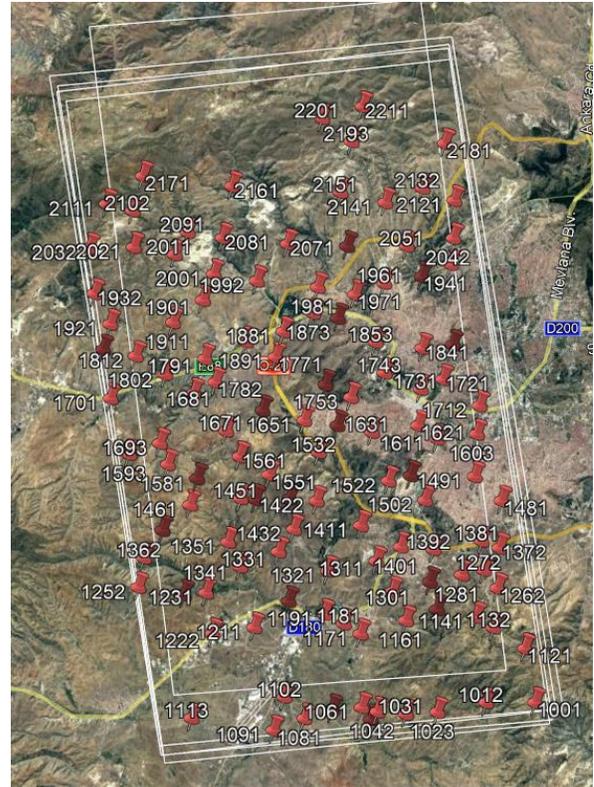
## 2. ANKARA TESTFIELD

Ankara is located in Central Anatolia and is the capital city of Türkiye. The Ankara Testfield features a number of GCPs (Fig. 1) and unmanned aerial vehicle (UAV) data utilized for the Calibration and Validation (Cal/Val) purposes for several satellites, such as Göktürk-2, Skysat [1], and the MAXAR constellation [2], [3]. The site also has several land use land cover (LULC) types (Fig. 2), which are beneficial for assessing the different types of user needs.

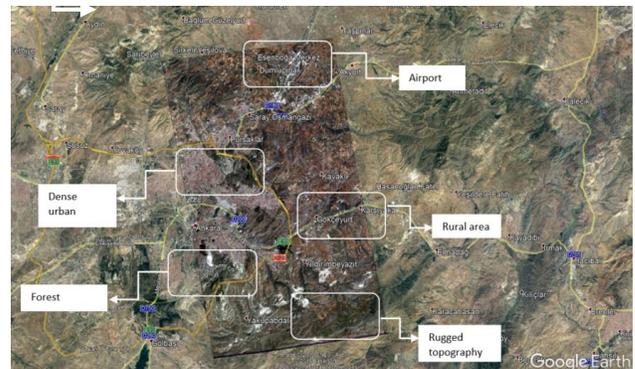
The SkySat data quality assessment study can be briefly summarized as radiometric, geometric and image quality assessments [1]. Within the geometric quality assessments, the Rational Polynomial Coefficients (RPCs) quality of the SkySat Basic Scenes, which are geometrically raw products, were assessed using a number of GCPs. The multi-temporal and band-to-band registration accuracies of the products were also assessed. In addition, the stereoscopic capability of the Basic Scenes was also assessed by comparing the SkySat digital surface model (DSM) with respect to the UAV DSM with a point cloud comparison approach.

## 3. BERGAMA TESTFIELD

Bergama town is located within the Izmir Province, in the western part of Türkiye. The Bergama testfield was implemented and utilized for several projects, such as the geometric and radiometric assessments of the high-resolution Turkish optical satellite, Göktürk-2, and airborne LiDAR data evaluations. The testfield involves approximately 100 GCPs and LiDAR data, which are from the year 2014 [4], [5]. The site needs updating for being used in further Cal/Val activities.



**Fig. 1 Overview of Ankara Testfield GCPs.**



**Fig. 2 The land use land cover types in Ankara Testfield.**

#### 4. FUTURE WORK

The sensor model accuracy of ALOS-3 will be evaluated by using a number of external GCPs surveyed with GNSS devices with high positioning accuracy. The particular focus will be on assessing the calibration of the sensor and validating the 3D point positioning capability. For this purpose, the RPCs provided by JAXA will be evaluated by using mono and stereo images. The RPC refinement requirement will be evaluated. DSMs will be produced from the stereo images and analyzed by comparing with the reference DSMs obtained from unmanned aerial vehicles (UAVs). The results will be published in scientific journals and meetings, and recommendations for potential improvements to the data will be given. In addition, the image radiometric quality will be assessed by using the general image quality equation (GIQE) methods.

#### 5. REFERENCES

- [1] Saunier, S., Karakas, G., Yalcin, I., Done, F., Mannan, R., Albinet, C., ... & Kocaman, S. (2022). "SkySat Data Quality Assessment within the EDAP Framework". *Remote Sensing*, 14(7), 1646.
- [2] Yalcin, I., Kocaman, S., Saunier, S., and Albinet, C.: "Radiometric Quality Assessment for MAXAR HD Imagery", *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLIII-B3-2021, 797–804, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B3-2021-797-2021>, 2021.
- [3] Saunier, S. (2021, April). "Reference Data and Methods for Validation of Very High Resolution Optical Data Within ESA/EDAP Project". In EGU General Assembly Conference Abstracts (pp. EGU21-15501).
- [4] Kalpakoglu, E., Kilic, L., Ural, S., Anbaroglu, B., Kocaman, S., 2018. Hava Lidar Nokta Bulutu Verilerinin Analizi ve Web Ortamında Sunumu. UZALCBS 2018, 18-21 Eylül 2018, Eskişehir, Turkey. <http://dx.doi.org/10.15659/uzalcbs2018.6183>
- [5] Kocaman, S., Karakas, G., & Tavus, B, 2018. Investigations on the radiometric, geometric, and DSM generation qualities of Gokturk-2 stereo images. *Arabian Journal of Geosciences*, 11(22), 1-15. <https://doi.org/10.1007/s12517-018-4049-6>

# DEVELOPMENT OF AN ALGORITHM FOR GENERATION OF DSM AND DETECTION OF ITS CHANGE BY USING ALOS-3 DATA

PI No.: ER2A3N201

Indra Bahadur Chhetri <sup>1</sup>, Junichi Susaki <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Civil and Earth Resources Engineering, Graduate School of Engineering, Kyoto University, Japan

Email: indra.chhetri.63z@st.kyoto-u.ac.jp

<sup>2</sup> Department of Urban Management, Graduate School of Engineering, Kyoto University, Japan

Email: Susaki.junichi.3r@kyoto-u.ac.jp

## 1. INTRODUCTION

Digital elevation models (DEMs) and digital surface models (DSMs) are the generally adopted data structures for storing geospatial datasets used for geographical information analysis. The distinction between them may apply as: a DSM is an elevation model that includes the top of everything, including buildings, treetops, and ground where there is nothing else on top of it, whereas a DEM is a bare land surface model, in which trees, buildings or other non-ground objects are virtually removed. Digital Terrain Model (DTM) by then is a more generic term referring to a DEM with one or more types of terrain information. When dealing with only one terrain information type (i.e., height), this is a DEM i.e. DEM is a subset of DTM [1]. DSMs or DEMs are widely used in surveying and mapping, land use and planning, environmental assessment, disaster relief, civil engineering, mining, agriculture, and updating existing maps. To cater to these applications, they should be up to date. A fast and economic production mechanism is demanded. Moreover, the last but the most important quality in their production is the demand for greater 3D accuracy to guarantee data sets are free of errors and outliers.



**Fig. 1 Schematic diagram showing the difference between DSM, and DEM.**

There are various sensors/techniques available for the generation of elevation data: airborne light detection and ranging (LiDAR), aerial photogrammetry, and optical and spaceborne sensors [2]. The first global dataset by Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) has (90 m) pixel spacing with absolute and relative height accuracies of 9 m and 10 m respectively was based on a spaceborne radar instrument [3]. Elevation data, Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflectance Radiometer Global

Digital Elevation Model (ASTER/GDEM) from ASTER instrument onboard NASA's Terra satellite was obtained using the optical technique, has the height accuracy of 13 m in (30 m) pixel spacing [3], [4]. However, the spatial characteristics of these data show a relatively higher absolute height error with a low spatial resolution [5]. Comparatively, airborne light detection and ranging (LiDAR) data gives more accurate DSMs within  $\pm 15$  cm, however, it is not economical and has limited area coverage than satellite-based imagery [6].

Presently, very-high-resolution (less than 1 m) satellite sensors allow the acquisition of spatial data directly which are equivalent to DSM. For example, the triplet imagery from Advanced Land Observing Satellite-Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping (ALOS-PRISM) was used to generate elevation data satisfying height accuracy within 5 m RMSEs [3]. Additionally, Susaki & Kishimoto [6] examined the accuracies of DSM generated by using multi-temporal triplet images from ALOS-PRISM. Their experimental results showed that the average planimetric and height RMSEs were 3.26 m and 2.71 m respectively. In this respect, the availability of new high-resolution optical spaceborne sensors offers new potential for DSMs generation. Among all these advantages, low cost (in comparison to aerial imagery of small areas included in one scene is concerned), speed of data acquisition and processing, and relaxed logistics arrangements are quite important factors to be considered for areas where the organization of aerial flights can be difficult. Therefore, taking advantage of the capability of optical imagery in generating greater accurate DSMs, this study aims to evaluate the accuracy of the three-dimensional (3D) coordinates estimated using WorldView-3 (WV-3) data for DSM generation. The remainder of this paper is organized as follows: Section 2 briefly introduces the data used followed by an explanation of the proposed methodology in section 3; Section 4 and 5 focuses on presenting experimental results and demonstrates the performance of our method; Section 6 finally provides the concluding remarks together with suggestions for future work.

## 2. DATASET DESCRIPTION

The bias-compensated RPC model of an Ortho-Ready Standard WV-3 image with supplied RPCs provided by DigitalGlobe acquired over Thimphu, Bhutan on 27th August 2020 was used in our experiment. Table 1 shows the detailed technical characteristics of the WV-3 images used in the study.

**Table 1 The technical characteristics of the WV-3 images used.**

| Parameters                  | WV-3 First Scene | WV-3 Second Scene |
|-----------------------------|------------------|-------------------|
| Product Level               | LV2A             | LV2A              |
| Scan Direction              | Forward          | Forward           |
| First Line Time             | 04:46:19.849859  | 04:47:10.700114   |
| Mean Sun Az                 | 130.3 (degree)   | 130.7 (degree)    |
| Mean Sun El                 | 64.9             | 65.1              |
| Mean Sat Az                 | 29.0             | 101.4             |
| Mean Sat El                 | 55.6             | 78.6              |
| Mean in Track View Angle    | 28.8             | -0.4              |
| Mean Cross Track View Angle | 12.0             | 10.3              |
| Mean Off Nadir View Angle   | 31.0             | 10.3              |
| Cloud Cover                 | 0.013            | 0.006             |
| Product GSD                 | 0.40 m           | 0.40 m            |

### 3. METHODOLOGY

#### 3.1 DSM Generation

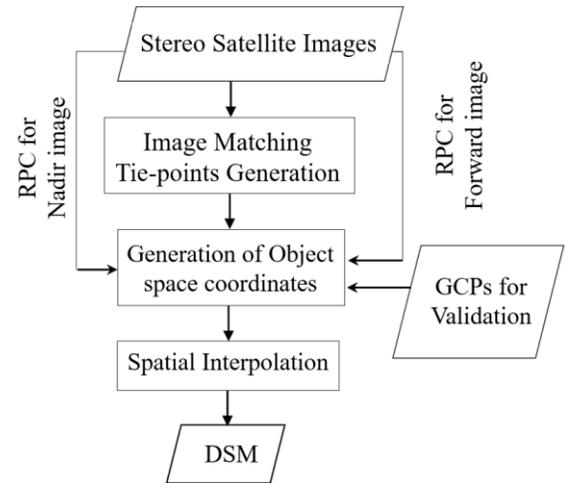
In our study the DSM generation process consists of four main steps: image matching, 3D ground coordinates estimation from the RPC model, spatial interpolation, and accuracy assessment. Figure 2 depicts the overall flow chart of the main steps for DSM generation. Image matching is one of the most important parts of procedures in DSM generation. It is the process of measuring conjugate points in two or more images [7]. Here, in the nadir image, we search the corresponding image points in the forward image. Figure 3 illustrates the flowchart of the proposed dense point correspondence generation algorithm. The two input images such that the nadir image is used as a reference image while the forward image acts as the search image.

At first, we rely on the Speeded-Up Robust Features (SURF) [8] algorithm to obtain the initial corresponding points after removing the incorrect matches by applying the widely used random sample consensus (RANSAC) algorithm available in the MATLAB. Next, the input images are partitioned into smaller localized regions. It is based on the hypothesis that the scene within those localized regions is planar and the images of 3D points lying on this plane are related to each other in different

views by a planar homography [9]. That is, for points sharing a plane in a 3D scene, image projections from one view to another can be constructed by a homography as shown in Equation (1).

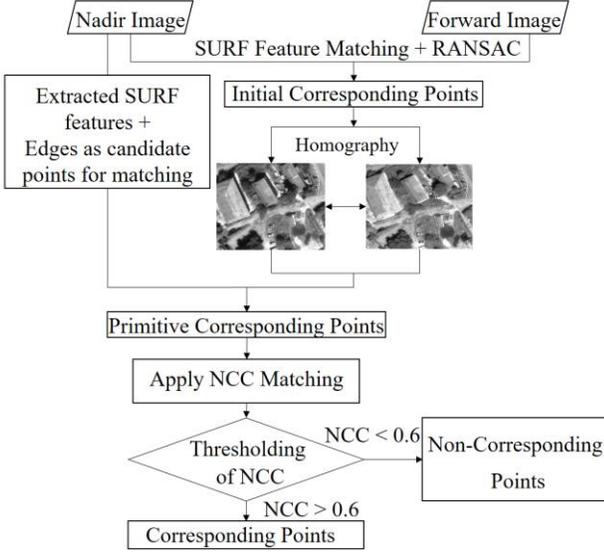
$$x' = Hx \quad (1)$$

where  $x$  and  $x'$  are element by element homogeneous coordinates in two views of the same scene, while  $H$  is a 3 by 3 homography matrix. Given at least four reliable sets of point correspondence present within the regions, the singular value decomposition (SVD) technique can be applied for computing the 3 by 3 homography matrix for each partitioned image [10]. In the first matching stage, all matching primitives lying within these localized regions in image one (Nadir) are then transferred by using homography to image two (Forward) as their corresponding matching hypothesis. In our study, two types of matching primitives are applied. One includes all SURF points detected excluding initial corresponding points used for computing homography, and the other is the edges detected of objects in an image using canny edge detection [11].



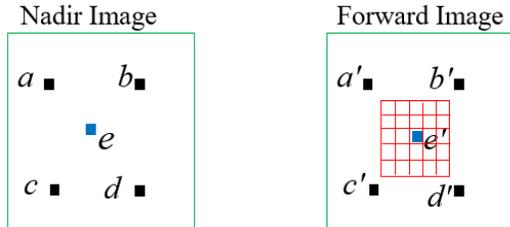
**Fig. 2 Flowchart of the main steps for DSM Generation.**

In the second matching stage, for any correspondence matching hypothesis obtained through planar homography, they are further matched using normalized cross-correlation coefficient similarity constraint. Firstly, for reference point  $e$  (see Figure 4) with its corresponding matching candidate denoted as  $e'$  in the search image, we define the searching window ( $15 \times 15 \text{ pixel}^2$ ) as a square with a center at point  $e'$ . All pixels in this searching window are regarded as possible matching candidates. Secondly, a template window ( $12 \times 12 \text{ pixel}^2$ ) moves pixel by pixel over the search window and a correlation coefficient is calculated in each position. The position where the correlation coefficient reaches its highest value is selected as a position of the best match.



**Fig. 3** Flowchart of the proposed method used for finding the matching point.

In the process, a method of thresholding is applied for eliminating the outliers. For example, a threshold value of 0.6 was used in our study. However, in a general setting, a threshold for a correlation coefficient may not always eliminate all the mismatches. For example, when working with natural targets some good matches may be excluded while some mismatches remain. Therefore, in our experiment, the sequenced wrong correspondence is removed further based on location property (pixel distance) of the feature points such that they fulfill two conditions: Firstly, the same numbers of points must lie within a buffer of a certain radius (30 pixels in our case) in both the images. Secondly, the pixel distance between the center points to all other matched points in both images must not deviate more than 5 pixels. Finally, this procedure is applied for all the matching primitives in the region to obtain final matching points. Now all these dense point correspondences generated through image matching were used to determine the three-dimensional coordinates by employing the RPC model.



**Fig. 4** Four sets of initial point correspondences ( $a, a'$ ), ( $b, b'$ ), ( $c, c'$ ), and ( $d, d'$ ) are used for computing homography matrix, and ( $e, e'$ ) is the matching primitives and its corresponding matching hypothesis.

### 3.2 Least-Square Solutions to the RPC Model

At this stage, the rational polynomials are fitted to the image coordinates and their corresponding object coordinates of the dense image points are estimated. The RPC model is a generalized high approximation accuracy sensor orientation model. The RPC model relates the ground coordinates to its corresponding image pixel coordinates using a ratio polynomial. It describes the relationship between 2D image coordinate and 3D object coordinate by rational polynomial using 80 coefficients (RPCs). It is characterized by a line  $l$  and sample  $s$  of the image pixel coordinates corresponding to the approximate ground coordinates (latitude  $\phi$ , longitude  $\lambda$ , and ellipsoidal height  $h$ ) [12]. The RPC model provides the relationships between image and object coordinates as follows:

$$l = l_s l_n + l^o \quad (2)$$

$$s = s_s s_n + s^o \quad (3)$$

$$l_n = \frac{Num_l(\phi_n, \lambda_n, h_n)}{Den_l(\phi_n, \lambda_n, h_n)} \quad (4)$$

$$s_n = \frac{Num_s(\phi_n, \lambda_n, h_n)}{Den_s(\phi_n, \lambda_n, h_n)} \quad (5)$$

$$Num_l(\phi_n, \lambda_n, h_n) = a_1 + a_2 \lambda_n + a_3 \phi_n + a_4 h_n + a_5 \lambda_n \phi_n + a_6 \lambda_n h_n + a_7 \phi_n h_n + a_8 \lambda_n^2 + a_9 \phi_n^2 + a_{10} h_n^2 + a_{11} \lambda_n \phi_n h_n + a_{12} \lambda_n^2 \phi_n + a_{13} \lambda_n^2 h_n + a_{14} \lambda_n \phi_n^2 + a_{15} \phi_n^2 h_n + a_{16} \lambda_n h_n^2 + a_{17} \phi_n h_n^2 + a_{18} \lambda_n^3 + a_{19} \phi_n^3 + a_{20} h_n^3 \quad (6)$$

$$Den_l(\phi_n, \lambda_n, h_n) = b_1 + b_2 \lambda_n + b_3 \phi_n + b_4 h_n + \dots + b_{20} h_n^3 \quad (7)$$

$$Num_s(\phi_n, \lambda_n, h_n) = c_1 + c_2 \lambda_n + c_3 \phi_n + c_4 h_n + \dots + c_{20} h_n^3 \quad (8)$$

$$Den_s(\phi_n, \lambda_n, h_n) = d_1 + d_2 \lambda_n + d_3 \phi_n + d_4 h_n + \dots + d_{20} h_n^3 \quad (9)$$

Here,  $(l_n, s_n)$  is the normalized (offset and scaled) image coordinates estimated from the measured line and sample coordinates; whereas  $(\phi_n, \lambda_n, h_n)$  are the corresponding object point coordinates in terms of normalized latitude  $\phi$ , longitude  $\lambda$  and ellipsoidal height  $h$  given by:

$$\phi_n = \frac{\phi - \phi_o}{\phi_s}; \lambda_n = \frac{\lambda - \lambda_o}{\lambda_s}; h_n = \frac{h - h_o}{h_o} \quad (10)$$

To remove the unacceptable residual biases in the image coordinates, we introduce bias parameters by incorporating translation parameters ( $A_0$  and  $B_0$ ) and modify Equations (2) and (3) as:

$$l + A_0 = l_s \frac{Num_l(\phi_n, \lambda_n, h_n)}{Den_l(\phi_n, \lambda_n, h_n)} + l^o \quad (11)$$

$$s + B_0 = s_s \frac{Num_s(\phi_n, \lambda_n, h_n)}{Den_s(\phi_n, \lambda_n, h_n)} + s^o \quad (12)$$

RPC model is a non-linear polynomial function, Equations (11) and (12) can be written using first-order Taylor's series approximation as:

$$\begin{pmatrix} l \\ s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} l_o \\ s_o \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} l_s \frac{\partial l}{\partial \phi} & l_s \frac{\partial l}{\partial \lambda} & l_s \frac{\partial l}{\partial h} \\ s_s \frac{\partial s}{\partial \phi} & s_s \frac{\partial s}{\partial \lambda} & s_s \frac{\partial s}{\partial h} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta\phi \\ \delta\lambda \\ \delta h \end{pmatrix} \quad (13)$$

Here,  $l_o$  and  $s_o$  denote, the line and sample respectively of image coordinates, corresponding to the initial approximate ground coordinates.

Now, the 4 residual equations for Nadir ( $N$ ) and Forward ( $F$ ) images will be expressed as Equation (14) and solved for unknowns iteratively via the least square method.

$$\begin{pmatrix} V_{N,l} \\ V_{N,s} \\ V_{F,l} \\ V_{F,s} \\ V_{all} \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} l_s \frac{\partial l_N}{\partial \phi} & l_s \frac{\partial l_N}{\partial \lambda} & l_s \frac{\partial l_N}{\partial h} \\ s_s \frac{\partial s_N}{\partial \phi} & s_s \frac{\partial s_N}{\partial \lambda} & s_s \frac{\partial s_N}{\partial h} \\ l_s \frac{\partial l_F}{\partial \phi} & l_s \frac{\partial l_F}{\partial \lambda} & l_s \frac{\partial l_F}{\partial h} \\ s_s \frac{\partial s_F}{\partial \phi} & s_s \frac{\partial s_F}{\partial \lambda} & s_s \frac{\partial s_F}{\partial h} \end{pmatrix}}_{A_{all}} \begin{pmatrix} \delta\phi \\ \delta\lambda \\ \delta h \end{pmatrix} + \underbrace{\begin{pmatrix} l_{o,N} \\ s_{o,N} \\ l_{o,F} \\ s_{o,F} \end{pmatrix}}_{B_{all}} - \underbrace{\begin{pmatrix} l_N \\ s_N \\ l_F \\ s_F \end{pmatrix}}_{A_{o,N}} - \underbrace{\begin{pmatrix} A_{o,N} \\ B_{o,N} \\ A_{o,F} \\ B_{o,F} \end{pmatrix}}_{B_{o,N}}; \quad (14)$$

$$V_{all} = A_{all}\Delta + B_{all}; \Delta = -(A_{all}^T A_{all})^{-1} (A_{all}^T B_{all}); \begin{cases} \phi = \phi_o + \delta\phi \\ \lambda = \lambda_o + \delta\lambda \\ h = h_o + \delta h \end{cases}$$

### 3.3 Spatial Interpolation Methods

The result of image matching followed by iterative least-squares adjustment using 4 residual equations to derive object space coordinates in Geographic coordinates in WGS84 datum is a set of 3D points representing the earth surface (top of everything). Finally, all sets of irregular 3D tie-points generated thereafter were then utilized as an input to each of the interpolation methods for establishing the three-dimensional coordinates for the entire terrain on a regularly spaced grid of the resulting DSM. The raster data model is built from the spot elevations to estimate the elevation at each grid cell. Inverse Distance Weighted (IDW) and kriging interpolation techniques have been used in this study. The IDW gives a weighted average interpolated value using the nearest reference points within a defined neighborhood around each grid cell [13]–[15]. In ordinary kriging, the prediction at an un-sampled point is a weighted linear combination of all already observed points modelled under the assumption that the process is second-order stationary [16], [17].

## 4. RESULTS

### 4.1 Image Matching

The matching procedure described earlier yields a reasonable number of good matching points. To access the matching performance of our method, we use the same set of feature correspondences detected by SURF earlier as reference points in our matching procedure. Figure 5 shows that RMSEs in line and sample of the matching results obtained by correlation coefficient in conjunction with homography for the same initial correspondence points. Figure 6 shows increased matching tie-points after final matching propagation for the specific region of the tested stereo images.

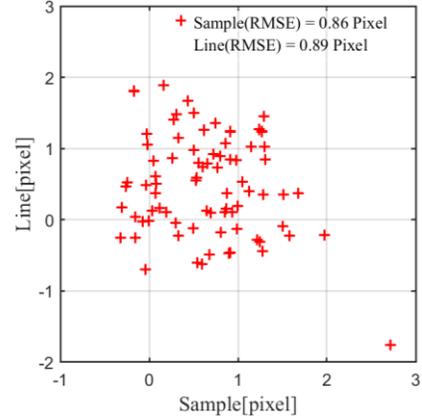
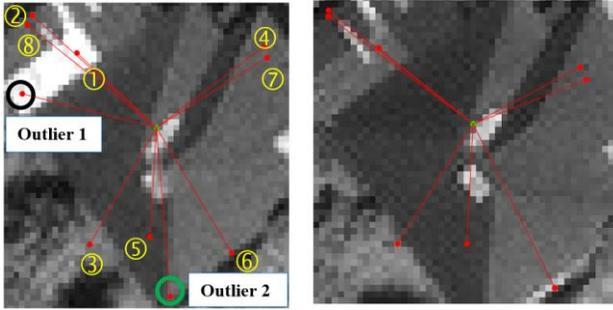


Fig. 5 Scattergram of errors of matching image coordinates and its RMSEs.



Fig. 6 Final tie points generated for the specific region of the tested image.



**Fig. 7** Figure showing the distribution of matching points within a buffer for outlier detection and removal.

#### 4.2 Result of coordinates estimation using RPC model

The locations of GCPs are shown in Figure 8. Estimates of the ground coordinates (elevation) for the 49 checkpoints are shown in Table 2. The fourth column represents the absolute deviation of the elevation (in meters) from their observed values. Table 2 shows that the maximum absolute deviation of the height from the check set is equal to 4.71 m. The absolute values of the relative error are presented in the last column. Additionally, the RMSEs of easting, northing, and height for the coordinates estimated from stereo images were 2.90 m, 2.92 m, and 1.64 m respectively.

$$\Delta H_i = |H'_i - H_i| ; \varepsilon_H(i) = \left| \frac{H'_i - H_i}{H_i} \right| ; RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (\Delta H_i)^2} \quad (15)$$



**Fig. 8** Distribution of the known GCPs over the stereo satellite image: Red squares show the check GCPs and green square show the GCP used for bias-correction.

**Table 2** Deviation of the ground height from check GCP set

| Check GCP | Ellipsoidal heights in meter |                  |            |                 |
|-----------|------------------------------|------------------|------------|-----------------|
|           | Estimated ( $H'$ )           | Observed ( $H$ ) | $\Delta H$ | $\varepsilon_H$ |
| 1         | 2322.12                      | 2322.52          | 0.40       | 0.02            |
| 2         | 2309.32                      | 2306.19          | 3.13       | 0.14            |

|    |         |         |      |      |
|----|---------|---------|------|------|
| 3  | 2289.99 | 2290.32 | 0.33 | 0.01 |
| 4  | 2280.45 | 2279.39 | 1.06 | 0.05 |
| 5  | 2281.95 | 2281.37 | 0.58 | 0.03 |
| 6  | 2281.44 | 2280.48 | 0.96 | 0.04 |
| 7  | 2271.09 | 2271.65 | 0.56 | 0.02 |
| 8  | 2268.00 | 2268.33 | 0.33 | 0.01 |
| 9  | 2266.39 | 2265.81 | 0.58 | 0.03 |
| 10 | 2266.48 | 2265.52 | 0.96 | 0.04 |
| 11 | 2277.26 | 2275.43 | 1.83 | 0.08 |
| 12 | 2325.93 | 2325.90 | 0.03 | 0.00 |
| 13 | 2302.19 | 2303.30 | 1.11 | 0.05 |
| 14 | 2325.11 | 2324.11 | 1.00 | 0.04 |
| 15 | 2328.92 | 2326.93 | 1.99 | 0.09 |
| 16 | 2312.09 | 2313.31 | 1.22 | 0.05 |
| 17 | 2319.00 | 2317.59 | 1.41 | 0.06 |
| 18 | 2324.64 | 2323.86 | 0.78 | 0.03 |
| 19 | 2278.79 | 2278.00 | 0.79 | 0.03 |
| 20 | 2321.69 | 2321.70 | 0.01 | 0.00 |
| 21 | 2327.47 | 2329.61 | 2.14 | 0.09 |
| 22 | 2344.34 | 2343.90 | 0.44 | 0.02 |
| 23 | 2343.23 | 2341.58 | 1.65 | 0.07 |
| 24 | 2329.67 | 2330.22 | 0.55 | 0.02 |
| 25 | 2346.71 | 2347.45 | 0.74 | 0.03 |
| 26 | 2333.50 | 2332.04 | 1.46 | 0.06 |
| 27 | 2346.07 | 2344.93 | 1.14 | 0.05 |
| 28 | 2372.34 | 2369.72 | 2.62 | 0.11 |
| 29 | 2380.17 | 2377.19 | 2.98 | 0.13 |
| 30 | 2392.91 | 2389.08 | 3.83 | 0.16 |
| 31 | 2397.86 | 2398.60 | 0.74 | 0.03 |
| 32 | 2431.48 | 2430.98 | 0.50 | 0.02 |
| 33 | 2461.14 | 2456.43 | 4.71 | 0.19 |
| 34 | 2419.49 | 2420.14 | 0.65 | 0.03 |
| 35 | 2414.28 | 2411.06 | 3.22 | 0.13 |
| 36 | 2387.65 | 2388.70 | 1.05 | 0.04 |
| 37 | 2380.88 | 2381.71 | 0.83 | 0.03 |
| 38 | 2379.43 | 2379.58 | 0.15 | 0.01 |
| 39 | 2369.96 | 2370.79 | 0.83 | 0.04 |
| 40 | 2357.73 | 2356.15 | 1.58 | 0.07 |
| 41 | 2371.74 | 2368.99 | 2.75 | 0.12 |
| 42 | 2358.21 | 2356.96 | 1.25 | 0.05 |
| 43 | 2356.64 | 2356.64 | 0.00 | 0.00 |
| 44 | 2335.90 | 2337.32 | 1.42 | 0.06 |
| 45 | 2359.78 | 2357.74 | 2.04 | 0.09 |
| 46 | 2354.47 | 2352.66 | 1.81 | 0.08 |
| 47 | 2279.06 | 2277.70 | 1.36 | 0.06 |
| 48 | 2486.83 | 2488.59 | 1.76 | 0.07 |
| 49 | 2479.69 | 2479.27 | 0.42 | 0.01 |

#### 4.3 Spatial interpolation

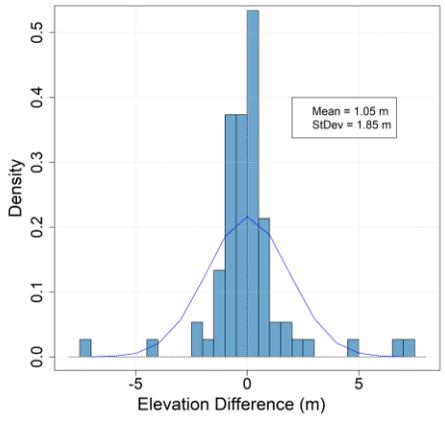
To implement the interpolation as a prediction criterion, a curtailment procedure is applied to curtail some values from the original block of values for the purpose of predicting them later. In our experiment, 10% of the original values are curtailed and used as checkpoints (CPs). The validation of the interpolated results was carried out based on relevant descriptive statistics such as the minimum and maximum error, mean absolute error

(MAE), root-mean-square error (RMSE), and sample standard deviation (StDev) as indicated in Equations (15), (16) and (17).

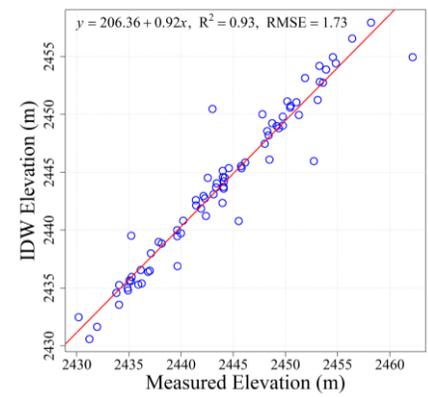
$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n |\Delta H_{(i)}| \quad (16)$$

$$StDev = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^n (H_{(i)} - H_{mean})^2} \quad (17)$$

where  $N$  is the number of the checkpoint and  $H_{mean}$  is the mean value of the measured elevations.  $MAE$  is a measure of how far ‘off’ a measurement is from extracted value,  $RMSE$  is a measure of goodness of fit and  $StDev$  is a measure of the amount of variation. Figures 9 and 10 show the histograms of the elevation errors and the regression model fit derived from the IDW, and kriging predictors. Figure 11 shows the DSM surfaces built by IDW and kriging interpolation methods with a cell size of 2 m.

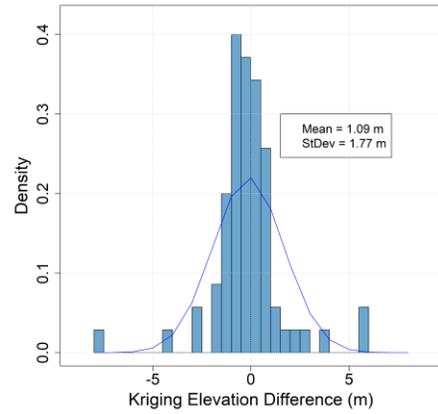


(a)

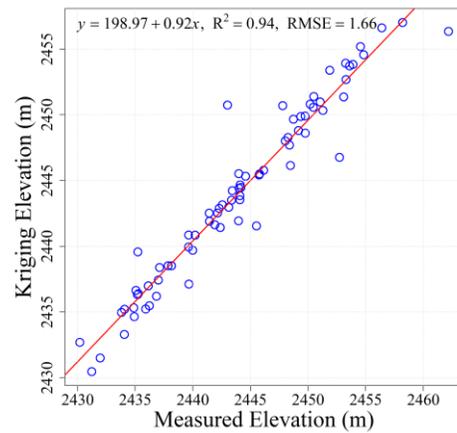


(b)

**Fig. 9 (a) Histogram of elevation differences, relevant descriptive statistics, and (b) regression model of measured elevations versus interpolated values by IDW interpolation.**

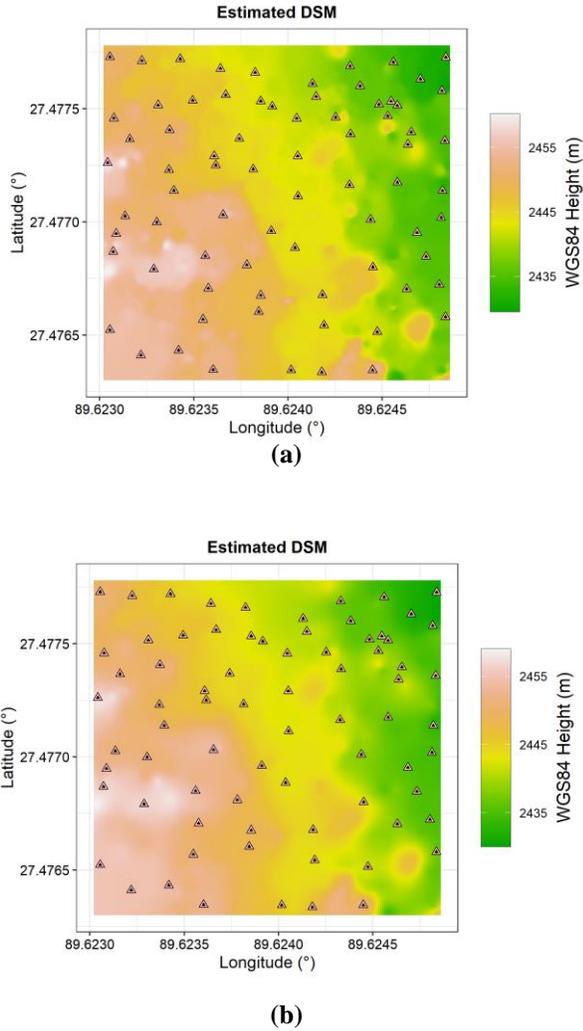


(a)



(b)

**Fig. 10 (a) Histogram of elevation differences, relevant descriptive statistics, and (b) regression model of measured elevations versus interpolated values by kriging interpolation.**



**Fig. 11 (a) DSM surface generated by the IDW interpolator method and (b) DSM surface generated by the kriging interpolator method with locations of CPs.**

## 5. DISCUSSION

The result of the ground coordinates estimated using bias-compensated RPCs from WV-3 data evaluated over the 49 GCPs as shown in Table 2 highlight that the proposed method is simple and effective in estimating 3D coordinates at points of interest that have the potential to generate such explicit image-based 3D information. We also examined the effectiveness of different GCPs during the bias-compensation process. The only one reliable GCP is used for bias-compensation as shown in Figure 8. In our experiment, we found that GCPs located relatively on flat ground with sharply-definable ground points increased the expected accuracy of estimated ground coordinates.

In DSM generation it is well known that image matching is the critical issue within the considered images. The RMSEs in line and sample of the matching results shown

in Figure 5 obtained by correlation coefficient in conjunction with homography used in our study is a simple method to stabilize stereo correspondence computation. Moreover, in our method the use of the image distance property of a feature point to effectively identify isolated points as outliers demonstrated its ability to remove a significant number of wrong correspondences in generating reliable sets of tie points.

The visualization of geospatial entities generally entails DSMs/DEMs that are interpolated to establish 3D coordinates for the entire terrain within the study area. The study evaluated the performance of IDW and kriging interpolated surfaces using the spatial data estimated via the RPC model. The results presented in Figure 9 indicate the consistency between the statistical parameters of IDW and kriging algorithms such as MAE, StDev, and RMSE. Furthermore, concerning the DSMs generation, the main and still open problem is the dense matching strategy, to reach a better reconstruction of the texture of buildings in the scene, presently not sufficiently delineated as shown in Figure 11. The further optimization of the matching algorithm parameters would likely improve the result.

## 6. CONCLUSION AND FUTURE RESEARCH

The topographical information is some essential geospatial datasets for various surveying and engineering applications. An elevation model is the continuous 3D depiction of the Earth's surface that is produced through many techniques such as remote sensing, photogrammetry, and land surveying. In fact, very-high-resolution satellite sensors allow the acquisition of spatial data directly which are equivalent to DSM. This study evaluated the accuracy of a DSM generated by processing Ortho-Ready Standard imagery from WV-3 using supplied RPCs. The use of a bias-compensated RPC model with two shift parameters showed that the easting, northing, and height errors of the coordinates estimated were 2.90 m, 2.92 m, and 1.64 m respectively. The results were well consistent with the expected accuracy of Ortho-Ready Standard imagery satisfying the target accuracy of approximately 4 m as specified under DigitalGlobe Core Imagery Product Guide of WV-3.

Concerning DSMs generation, generating dense tie points is a critical step that enables its quality. We rely on homography transformation stereo matching in conjunction with normalized cross-correlation coefficient matching constraints. Additionally, we presented the property of image pixel distance to effectively identify and remove isolated outliers as non-matching tie points from the images.

Furthermore, visual comparisons of interpolated surfaces between IDW and kriging interpolators have also been presented in this paper. Investigations revealed that both kriging and IDW methods have been found to perform better in geo-morphologically smooth areas than in urban areas which might be attributed to not having sufficient matching tie points. In the future, we aim to optimize the matching algorithm parameters which are likely to

improve the results, as well as the possible integration of the concept of semi-global matching.

In future research, this technique can be explored in time-series satellite images to analyze the suitability and its performance in giving a synthesis of detecting, analyzing, and updating the dynamics of various points of interest in 3-Dimension. Moreover, with this three-dimensional information, the scope can be extended to applications requiring vertical information such as monitoring the growth of urban areas, detecting collapsed buildings, and tree growth which 2D analysis mainly ignores. This might be achieved by simple subtraction of multi-temporal DSMs, resulting in a reasonable approximation of height residual to indicate potential changes.

## 7. REFERENCES

- [1] B. Štular, E. Lozić, and S. Eichert, "Airborne LiDAR-derived digital elevation model for archaeology," *Remote Sens.*, vol. 13, no. 9, 2021.
- [2] F. Fratarcangeli, G. Murchio, M. Di Rita, A. Nascetti, and P. Capaldo, "Digital surface models from ZiYuan-3 triplet: performance evaluation and accuracy assessment," *Int. J. Remote Sens.*, vol. 37, no. 15, pp. 3505–3531, 2016.
- [3] J. Takaku, T. Tadono, and K. Tsutsui, "Generation of high resolution global DSM from ALOS PRISM," *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. - ISPRS Arch.*, vol. 40, no. 4, pp. 243–248, 2014.
- [4] T. Hengl and H. Reuter, "How accurate and usable is GDEM? A statistical assessment of GDEM using LiDAR data," *Handb. Quant. Theor. Geogr. or Adv. Quant. Theor. Geogr.*, no. July, pp. 000–046, 2011.
- [5] E. Rodríguez, C. S. Morris, and J. E. Belz, "A global assessment of the SRTM performance," *Photogramm. Eng. Remote Sensing*, vol. 72, no. 3, pp. 249–260, 2006.
- [6] J. Susaki and H. Kishimoto, "Improving the accuracy of estimated 3D positions using multi-temporal ALOS/prism triplet images," *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, vol. 2, no. 3W4, pp. 223–230, 2015.
- [7] J. Wang, N. Zhang, X. Wu, and W. Wang, "Hierarchical point matching method based on triangulation constraint and propagation," *ISPRS Int. J. Geo-Information*, vol. 9, no. 6, 2020.
- [8] A. Banerjee and D. Mistry, "Comparison of Feature Detection and Matching Approaches: SIFT and SURF," *GRD Journals-Global Res. Dev. J. Eng.*, vol. 2, no. March, pp. 7–13, 2017.
- [9] C. I. Chen, D. Sargent, C. M. Tsai, Y. F. Wang, and D. Koppel, "Stabilizing stereo correspondence computation using Delaunay triangulation and planar homography," *Lect. Notes Comput. Sci. (including Subser. Lect. Notes Artif. Intell. Lect. Notes Bioinformatics)*, vol. 5358 LNCS, no. PART 1, pp. 836–845, 2008.
- [10] V. C. Klema and A. J. Laub, "The Singular Value Decomposition: Its Computation and Some Applications," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 25, no. 2, pp. 164–176, 1980.
- [11] Z. Xu, X. Baojie, and W. Guoxin, "Canny edge

detection based on Open CV," *ICEMI 2017 - Proc. IEEE 13th Int. Conf. Electron. Meas. Instruments*, vol. 2018-Janua, no. 1, pp. 53–56, 2017.

- [12] J. Grodecki and G. Dial, "Block adjustment of high-resolution satellite images described by Rational Polynomials," *Photogramm. Eng. Remote Sensing*, vol. 69, no. 1, pp. 59–68, 2003.
- [13] P. V. Arun, "A comparative analysis of different DEM interpolation methods," *Egypt. J. Remote Sens. Sp. Sci.*, vol. 16, no. 2, pp. 133–139, 2013.
- [14] C. Caruso and F. Quarta, "Interpolation methods comparison," *Comput. Math. with Appl.*, vol. 35, no. 12, pp. 109–126, 1998.
- [15] M. Habib, Y. Alzubi, A. Malkawi, and M. Awwad, "Impact of interpolation techniques on the accuracy of large-scale digital elevation model," *Open Geosci.*, vol. 12, no. 1, pp. 190–202, 2020.
- [16] J. S. Ryu, M. S. Kim, K. J. Cha, T. H. Lee, and D. H. Choi, "Kriging interpolation methods in geostatistics and DACE model," *KSME Int. J.*, vol. 16, no. 5, pp. 619–632, 2002.
- [17] W. C. M. Van Beers and J. P. C. Kleijnen, "Kriging interpolation in simulation: A survey," *Proc. - Winter Simul. Conf.*, vol. 1, pp. 113–120, 2004.

## APPENDIX

- [1] Indra Bahadur Chhetri and Junichi Susaki, "Estimation and updating of digital surface model (DSM) using WorldView-3 dataset", Proceedings of the 42nd Asian Conference on Remote Sensing (ACRS), online and Can Tho city, Vietnam, Nov. 22-24, 2021.