

令和 4 年 4 月 14 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04640

研究課題名（和文）衛星SAR画像とGPSデータ解析による空港・堤防の3次元変位量と精度の推定

研究課題名（英文）Estimation of 3D displacement and its accuracy in airports and dikes by analyzing satellite SAR images and GPS data

研究代表者

須崎 純一（Susaki, Junichi）

京都大学・工学研究科・教授

研究者番号：90327221

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：日本国内に存在する種々の土木インフラは老朽化が進み、維持管理に要する費用が加速度的に増加すると予想されており、早期の異常検出手法が求められている。本研究では、点検に関わる負担を大幅に軽減することを目的として、上昇軌道（南 北）画像、下降軌道（北 南）上で取得された衛星合成開口レーダ（synthetic aperture radar: SAR）画像に加えて、電子基準点等の外部データを利用し、対象地物の三次元変動速度を推定する技術を確立した。土木インフラの中でも空港、堤防に着目し、それら以外にも高速道路周辺の山地における地盤変動を高精度に推定する方法を検討、確立した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、上昇、下降軌道の衛星SAR画像と電子基準点におけるGPSデータの統合による三次元変動速度の推定手法を確立した。空港と堤防に提案手法を適用した結果、空港においては概ね良好な結果が得られたものの、堤防においては舗装や植生の有無、また衛星から見た時の堤防の向きに推定精度が左右されることが判明した。また、高速道路周辺で発生した土砂災害に関連し、被害状況の迅速な把握及び事前兆候の把握の可能性を検討した。現地では確認が困難な広域に亘る高速道路周辺の山地の変動を長期間に亘りモニタリングするには、提案手法は適切であると明らかになった。

研究成果の概要（英文）：In near future, it is expected that various civil infrastructure in Japan will be degraded with accelerating speed, and accordingly the cost for the inspection and maintenance will be increased. Therefore, in this research, we aimed to save the cost and efforts for the inspection and developed a method for estimating three-dimensional ground deformation rate of area of interest by using satellite-borne synthetic aperture radar (SAR) images and external data, e.g. electronic reference point data. We applied the method to airports, dikes and mountains along expressways, and found that the method can successfully estimate ground deformation.

研究分野：衛星リモートセンシング

キーワード：合成開口レーダ 地盤変動 三次元変動 時系列SAR 空港 高速道路 GNSS GPS

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

衛星リモートセンシングでは、マイクロ波を用いた衛星 SAR 画像を干渉処理することで、地物の座標やその変動速度を推定できる。土木分野では 2000 年代に入り地盤変動の監視に活用されるようになってきた。差分干渉 SAR 解析の中でも、10~30 枚の画像を使用する時系列解析では、誤差数 cm/年レベルの精度で変動速度を推定できると期待されている(変動量は対象とする期間によって変わるため変動速度が推定されることが多い)。しかしながら、SAR 画像の解析では視線方向の変動速度しか分からず、水平変動速度が分からない。上昇軌道(南→北)画像、下降軌道(北→南)画像から得られた変動や変動速度を合成する 2.5 次元解析という手法も存在するが、南北方向の変動を 0 と仮定して解く方法で、本当の三次元変動解析ではない。三次元変動や変動速度を推定するには、衛星画像以外に何らかの外部データが必要になる。また、上昇軌道、下降軌道画像から得られた変動速度が、大気の水蒸気による遅延や地形データに含まれる誤差等のために整合しないこともある。そのような誤差の影響を緩和する方法が確立されていないのが実情である。

2. 研究の目的

本研究では、土木インフラの定期測定の負担を大幅に軽減することを目的として、上昇軌道、下降軌道の衛星 SAR 画像に電子基準点の外部データを利用することで、相対座標系及び絶対座標系での垂直・水平変動速度を推定する方法、及び得られる変動速度の精度を測量学に基づいて推定する方法を確立する。

3. 研究の方法

- (1) 上昇、下降軌道の衛星 SAR 画像と GPS データの統合による垂直・水平変動速度推定、異なる波長(L, Xバンド)の画像の検討
- (2) 精度の異なる観測値を組み込んだ観測方程式からの変動速度の不偏標準偏差の推定
- (3) 空港、堤防、高速道路周辺山地への応用

4. 研究成果

(1) 上昇、下降軌道の衛星 SAR 画像と GPS データの統合による垂直・水平変動速度推定、異なる波長(L, Xバンド)の画像の検討

上昇、下降軌道の衛星 SAR 画像と、国土地理院が運用している電子基準点における GPS データの統合による三次元変動速度の推定手法を確立した。また空港と堤防を対象に提案手法を適用し、その有効性を検討した。関西国際空港で検証用の GPS データから得られる変動量と比較した結果、三次元変動推定で得られた垂直変動量は、一次元変動推定で得られたものよりも高精度であることが明らかになった。

また東京西部において、Lバンド(PALSAR2)、Xバンド(TerraSAR-X)の異なる波長の画像を用いて地盤変動量を推定し、両者の結果を比較した。Xバンド画像を用いた解析結果の RMSE は、水準測量データに対し 1.6 mm/year であった。Xバンド画像は都市部の地盤変動の監視に有効であり、水準測量データがない地点でも十分に空間的補完が可能であることが示された。また図 1 に示すように、地下水位上昇量と地盤隆起量との間には強い相関を持つことが判明した。

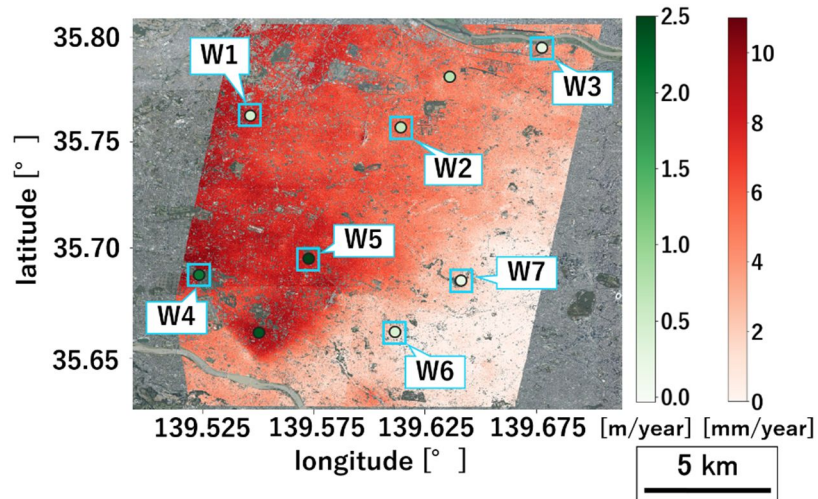


図1 時系列 SAR 解析結果と地下水位変動データ(W1～W7 は地下水観測井の地点，
緑色は地下水位変動速度，赤色は地盤隆起速度を表す)

(2) 精度の異なる観測値を組み込んだ観測方程式からの変動速度の不偏標準偏差の推定

三次元変動速度を推定する際に利用する観測データ自体が持つ誤差の大きさの影響を検討した。衛星 SAR 画像と電子基準点の GPS データに混入している誤差の大きさを観測値から推定し、それを観測方程式における重みとして取り込んで再度観測方程式を解くことで変動速度を推定した。特に衛星 SAR 画像から得られる変動速度と GPS データが示す変動速度の間で整合しない状況が発生する時に、単に三次元変動速度を推定するだけでなく、対処方法を検討した。

応用事例として、空港としては関西国際空港、新潟空港を取り上げた。地上水準測量と傾向に乖離が見られた GPS データの鉛直方向の内挿速度を用いないで推定した結果とその検証を図2，3に示す。また堤防に類似する構造物として、高速道路周辺の法面や周囲の山地も対象に提案手法の有効性を検討した。いずれの地域においても、より安定性の高い三次元変動推定結果が得られた。

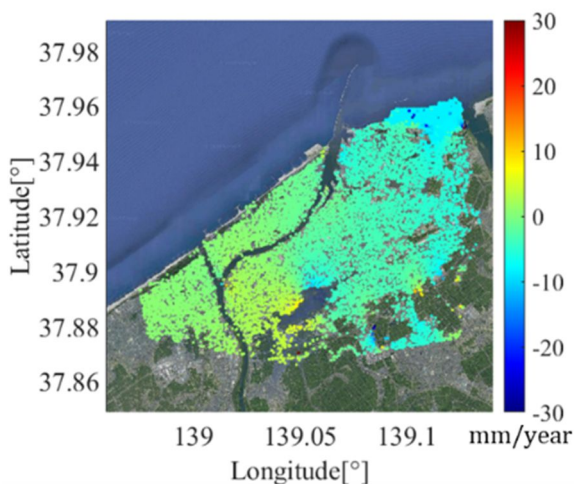


図2 GPSデータの鉛直方向の内挿速度を用いないで推定した変動速度の鉛直成分。正值は隆起方向，負値は沈下方向。

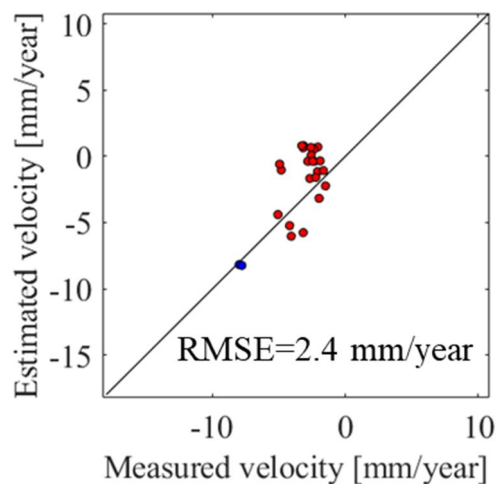


図3 推定変動速度の鉛直成分と水準測量データとの比較

(3) 空港、堤防、高速道路周辺山地への応用

(1)(2)では空港への応用結果を述べたが、ここでは堤防への適用結果を報告する。兵庫県の間山川を対象に、河川堤防の天端、法面の標高値を推定した。データの利用状況を踏まえて、2009年の標高値に変動量を加算して2015年の標高値を推定した。航空機レーザデータと比較した結果、堤防天端では提案手法の有効性を確認できたが、法面ではできなかった。天端は舗装されている一方、法面は植生で覆われていることが多いために、地表面から戻ってくる反射信号が安定しなかったことが一因であると考えられる。また天端、法面に関係なく、衛星から見た視線方向の水平成分と、水平平面での堤防の向きの法線方向が平行に近いほど反射が最も強くなり、解析結果も安定する。しかし、両者の方向ベクトルがなす角度が大きくなるほど、推定精度が悪化することも確認された。

また土木インフラ業者の通常業務での活用を意識して、高速道路周辺で発生した土砂災害に関連し、被害状況の迅速な把握及び事前兆候の把握の可能性を検討した。具体的には、2019年8月に地滑りによる土砂で約1年間運用が停止された長崎自動車道武雄ジャンクション(JCT)周辺を対象地域として取り上げた。高速道路に沿って、高速道路から一定の幅を想定したグリッド内での平均累積変動量を算出した。その結果、土砂災害が発生した武雄JCT周辺の山地において、土砂災害発生前から地盤変動が進行しつつあったことが確認できた。衛星SAR画像自体は入手できる時間間隔が数か月に及ぶこともあり迅速性に欠けるものの、現地では確認が困難な広域に亘る高速道路周辺の山地の変動を長期間に亘りモニタリングするには適切な手法であると判明した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8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 Junichi Susaki, Takaya Kusakabe and Takuma Anahara	4. 巻 V-3-2020
2. 論文標題 Estimating 3-D land subsidence from multi-temporal SAR images and GNSS data by weighted least square method	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences	6. 最初と最後の頁 165, 172
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5194/isprs-annals-V-3-2020-165-2020	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 伊藤大生, 須崎純一, 穴原琢磨	4. 巻 58
2. 論文標題 測量データを用いた時系列SAR解析による三次元地盤沈下監視	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 写真測量とリモートセンシング	6. 最初と最後の頁 174, 183
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 Junichi Susaki, Hiroki Ito and Takuma Anahara	4. 巻 *
2. 論文標題 Detection of 3D land displacement after the Great East Japan Earthquake in 2011 from multi-temporal SAR images and GPS data	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) 2019	6. 最初と最後の頁 2500, 2503
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/IGARSS.2019.8900158	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 Takaya Kusakabe, Junichi Susaki, Takuma Anahara	4. 巻 *
2. 論文標題 Estimating dike elevation from multi-temporal SAR images for efficient dike management	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) 2019	6. 最初と最後の頁 2504, 2507
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/IGARSS.2019.8898110	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 Hiroki Ito, Junichi Susaki and Takuma Anahara	4. 巻 IV-3/W1
2. 論文標題 Integrating multi-temporal SAR images and GPS data to monitor three-dimensional land subsidence	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences	6. 最初と最後の頁 9, 16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5194/isprs-annals-IV-3-W1-9-2019	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 日下部貴也, 須崎純一	4. 巻 77
2. 論文標題 時系列SAR画像と少数のGNSS測量結果による空港周辺の三次元変動解析	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 土木学会論文集F3	6. 最初と最後の頁 49, 58
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 楠瀬智也, 須崎純一	4. 巻 78
2. 論文標題 Xバンド画像を活用した都市部における面的な地盤隆起モニタリングの検証	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 土木学会論文集F3	6. 最初と最後の頁 1, 14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Tomoya Kusunose, Junichi Susaki	4. 巻 -
2. 論文標題 PSInSAR Analysis of X-Band SAR Images for Detecting Urban Ground Deformation in Japan	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the 7th Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/APSAR52370.2021.9688365	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 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 日下部貴也・須崎純一・穴原琢磨
2. 発表標題 重み付き最小二乗法を用いた衛星SARデータとGPSデータによる地表面の三次元変位推定
3. 学会等名 土木学会年次学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takaya Kusakabe, Junichi Susaki, Takuma Anahara
2. 発表標題 Monitoring of 3-D land subsidence combining PSI and GPS data by WLS
3. 学会等名 The 40th Asian Conference on Remote Sensing (ACRS) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 日下部貴也, 須崎純一, 穴原琢磨
2. 発表標題 衛星SARを用いた河川堤防の標高値推定
3. 学会等名 2019年度土木学会関西支部年次学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 日下部貴也, 須崎純一, 穴原琢磨
2. 発表標題 時系列SAR解析による河川堤防の標高値推定
3. 学会等名 土木学会全国大会第74回年次学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tomoya Kusunose and Junichi Susaki
2. 発表標題 Development of a method for extracting disaster areas around infrastructures using multi-temporal SAR images
3. 学会等名 The 42nd Asian Conference on Remote Sensing (ACRS) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 日下部貴也, 須崎純一, 穴原琢磨
2. 発表標題 重み付き最小二乗法を用いた衛星SARデータとGPSデータによる地表面の三次元変位推定
3. 学会等名 土木学会全国大会第75回年次学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 楠瀬智也, 須崎純一
2. 発表標題 TerraSAR-X画像を活用した都市部における面的な地盤変動モニタリングの検証
3. 学会等名 令和3年度日本写真測量学会年次学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 楠瀬智也, 須崎純一
2. 発表標題 TerraSAR X画像を活用した都市部の平常時地盤変動モニタリングの検証
3. 学会等名 2021年度土木学会関西支部年次学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 楠瀬智也, 須崎純一
2. 発表標題 多時期SAR画像を活用した土木インフラの災害発生箇所抽出の検討
3. 学会等名 第46回土木情報学シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 須崎純一, 日下部貴也
2. 発表標題 時系列SAR画像を用いた三次元地盤変動解析におけるGNSSデータの活用方法の検討
3. 学会等名 令和3年度日本写真測量学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021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