

令和元年6月25日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K14298

研究課題名（和文）橋梁の点検効率化のための、衛星SARを用いた変位量、変位ベクトル、変動速度計測

研究課題名（英文）Estimation of displacement, the vector and velocity by using satellite SAR for an efficient inspection of bridges

研究代表者

須崎 純一（Susaki, Junichi）

京都大学・工学研究科・准教授

研究者番号：90327221

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、衛星SAR画像を用いて、橋梁の変動量を推定する時系列SAR解析技術の確立に取り組んだ。解析を通じて、橋梁の向きによって変動量の推定精度が変動する課題が確認された。そのため、橋梁に限定せず広く人工構造物を対象とした上で、複数方向の軌道で観測された衛星SARデータから推定された変動ベクトルを統合して、水平、鉛直方向の変動量を算出し、それらの結果に加えてGPSデータを併用して三次元方向の変動量を算出する手法を提唱した。更に、人工構造物と地盤面からの反射信号を分離することで両者の変動速度の推定精度を向上させ、両者の速度差をとることで人工構造物の抜け上がり速度を推定する手法を提唱した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、上昇軌道と下降軌道という異なる軌道の時系列SAR画像を用いた人工構造物、地盤面の三次元変動モニタリング手法を提案、検証した。提案手法では、衛星SAR画像のみを用いる手法に加えて、GPSデータを併用する手法も検討した。実験の結果、全提案手法において局所的な変動を把握可能であること、また南北方向の変動については測量結果の統合により推定可能となることを示した。結論として、時系列SAR解析により人工構造物の三次元変動を定量的かつ定性的に示せたという点において提案手法は維持管理に貢献できる実用的な可能性を秘めていると結論付けられる。

研究成果の概要（英文）：In this research, we developed a technique of time-series synthetic aperture radar (SAR) images for estimating the displacement of bridges. The analysis revealed that the accuracy of the estimates deeply depends on the orientation of the bridges. As a result, we extended the research target of interest from bridges to general man-made structures, and we focused on the estimation of the three-dimensional (3D) displacement by utilizing satellite SAR images observed on multi-orbits. The technique calculates the vectors of the displacement from each orbital images, and estimates the 3D displacement from the vectors and GPS data. In addition, we developed another technique for estimating differential settlement velocity of man-made structures from time-series SAR images by discriminating ground-driven permanent scatterers from man-made structures-driven ones.

研究分野：空間情報学

キーワード：衛星SAR 人工構造物 変位 三次元変動 モニタリング 水蒸気遅延

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

橋梁では通常点検に加えて定期点検が実施され、部位・部材単位から橋梁全体までを含む観点で評価され、詳細点検が必要か判定される。橋梁に直接取り付けたりする各種センサに比べると精度は劣るものの、衛星画像を用いたりリモートセンシングの分野では、設置や管理に要するコストを大幅に抑えて橋梁の「異常なたわみ」「変形・欠損」を評価できる可能性が出てきた。この数年間に、20枚程度の合成開口レーダ(SAR)画像を用いて、地物の高さ及び変動速度(変位量の時間微分)を推定する技術が確立されてきた。

約3cmと短い波長のマイクロ波を用いるXバンドSARは構造物等に対しては安定した成果を見せる半面、植生等の非構造物が混ざった都市域になると安定性に欠けることがある。一方、約23cmと比較的長い波長のマイクロ波を用いるLバンドSARでは、長い波長ゆえに、樹木等の植生の影響を受けにくく頑健に建物高さや変動速度を推定できる可能性がある。以前は困難であった都市域抽出や建物分布推定の手法を確立してきた、Lバンド画像処理の経験が豊富な研究代表者が検討した結果、Xバンド以上に前処理に置いて各種の補正、特に水蒸気によるマイクロ波の遅延に伴う位相のずれの補正が重要であると判明した。そこで、光学センサ画像から大気中の水蒸気量を推定し、変位量等の誤差成分を除去することで、LバンドSAR画像を用いた地物の変動速度の高精度推定を実現する発想に至った。

### 2. 研究の目的

本研究では、詳細点検すべき橋梁の選定に役立つような、衛星SAR画像を用いた橋梁の変位量、変位ベクトル、変動速度の推定手法の開発を目的とする。光学画像やGPSデータを併用して大気の水蒸気量を高精度に推定することで、従来困難とされている長い波長のマイクロ波を用いたSAR画像からでも、上空700kmから高精度で変位量等を推定する。

### 3. 研究の方法

まず、GPSデータと光学画像から可降水量の推定手法を構築する。GPSデータのネットワーク単独から得られる可降水量分布図は空間解像度が数~十数km程度と低いため、既存手法を参考にして、気象衛星ひまわり画像の複数の熱赤外バンドとGPSデータを用いて、水蒸気量を1~2km程度の解像度で面的に推定するモデルを構築する。

次に、水蒸気量によるマイクロ波の遅延の影響を補正して、Lバンド衛星SAR画像のPALSAR(2006年~2011年:12.5m空間分解能)を用いても安定的に高さや変位量等を推定できる手法を開発する。衛星から見た視線方向での変動速度から、特定期間の変位量や変位ベクトルを導ける。対象橋梁として、検証用に変位データを入手できる橋梁を選定し、上部構造(主桁等)の変位量等に注目する。

最終的に、複数の橋梁を対象に、変位量等を推定し、提案手法の有効性の範囲を明示する。

### 4. 研究成果

可降水量の推定においては、気象庁のメソ数値予報 Grid Point Value (GPV)と Digital Elevation Model (DEM)を使用することで、時間解像度が地表面で1時間、気圧面で3時間、空間解像度が90mという高時間・空間解像度を持つ可降水量を推定できた。気象庁のメソ数値予報 Grid Point Value (GPV) データと Digital Elevation Model (DEM) を用いて可降水量を推定する際、標高によるバイアスの補正には標高補正係数が必要となる。本年度は、この補正係数が年や地域によってどの程度異なるかを検討した。2010年から2016年の各月の標高補正係数をそれぞれ求めたところ、年による大きな違いは見られなかったが、地域ごとに異なることが明らかになった。また、標高補正係数の年による違いは可降水量の推定精度に大きな影響は及ぼさないことを明らかにした。

また、この推定水蒸気量によるマイクロ波の遅延の影響を補正する手法を開発した。L・XバンドSAR画像を用いて、気象データから求めた水蒸気遅延誤差とDInSAR画像自体から求めた大気による誤差の比較・検証を行った。差分干渉位相から大気成分の性質を利用しフィルター処理によって抽出した大気誤差と外部データを用いて求めた水蒸気遅延誤差の二つに正の相関があることを確認できた。このことから、気象データを用いることでDInSAR画像に含まれている大気誤差成分を評価できることがわかった。

橋梁を対象にした解析の結果、橋梁の向きに依存せずに安定的に橋梁の変動を推定できる手法の確立は困難と分かり、対象を橋梁から一般的な人工構造物や地盤に切り替えた。平成30年度は、人工構造物の解析で得た知見を活かしつつ、衛星画像および外部データを活用した人工構造物や地盤の三次元変動を推定する手法を構築した。地物の変動を解析する手法として Persistent Scatterers Interferometry SAR (PSInSAR)が広く知られているが、この技術によって推定される変動は衛星視線方向のみの一次元変動に限られる。よって、以下に示す三つの方法で、人工構造物や地盤面の三次元変動を推定した。

- (1) PSInSARを用いた二次元解析：上昇軌道と下降軌道という異なる軌道のSAR画像をPSInSAR解析し、南北方向の変動がないと仮定し、その統合を行うことで、鉛直・東西方向の変動を推定する。
- (2) PSInSARを用いた三次元解析：衛星画像から得られる変動ベクトルを増やすために、

異なる軌道の SAR 画像に対してサブ開口処理を行い、前方視と後方視の SAR 画像を作成する。各軌道の前方視と後方視の SAR 画像から PSInSAR 解析を行い、最小二乗法によって統合し、三次元変動を推定する。

- (3) PSInSAR と測量結果の統合による三次元解析：異なる軌道の SAR 画像を PSInSAR 解析し、測量結果の内挿と最小二乗法によって統合し、三次元変動を推定する。

関西国際空港を対象に実施した実験では、全提案手法に関して東西方向の定性的かつ鉛直方向の定量的な妥当性が示された。しかし南北方向については SAR のみでは推定は難しい一方、測量結果の統合により解析が可能であること、結果的に PSInSAR により人工構造物の三次元変動を推定できる可能性を示せた。

更に、人工構造物と地盤面からの反射信号を分離することで変動推定精度の改善も検討した。Persistent Scatterer Interferometry (PSI) において推定される DSM エラー等を利用して permanent scatterer (PS) 高さという指標を定義した。それを閾値処理して地盤面 PS と構造物 PS に分離し、その速度差をとることによる人工構造物の抜け上がり速度を推定する手法を提唱した。

## 5 . 主な発表論文等

### [ 雑誌論文 ] ( 計 8 件 )

- 1) Hiroki Ito, Junichi Susaki and Takuma Anahara, “Integrating multi-temporal SAR images and GPS data to monitor three-dimensional land subsidence”, ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. IV-3/W1, pp. 9-16, 2019.
- 2) Junichi Susaki, Naoyuki Maruo, Masahiro Tsujino and Tirawat Boonyatee, “Detection of differential settlement of man-made structures coupled with urban development by using persistent scatterer interferometry (PSI)”, Remote Sensing, vol. 10, no. 7, 1048, doi:10.3390/rs10071048, 2018.
- 3) Shin Akatsuka, Junichi Susaki and Masataka Takagi, “Estimation of precipitable water using numerical prediction data”, Engineering Journal, vol. 22, no. 33, pp. 257-268, 2018.
- 4) Junichi Susaki, Masahiro Tsujino and Takuma Anahara, “Fusion of different frequency SAR images for DInSAR-based land subsidence monitoring”, 写真測量とリモートセンシング, vol. 56, no.5, pp. 217-224, 2017.
- 5) Junichi Susaki, Masahiro Tsujino and Takuma Anahara, “Fusion of different frequency SAR images for DInSAR-based land subsidence monitoring”, Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) 2017, pp. 945-948, 2017.
- 6) Junichi Susaki, Naoya Maeda and Shin Akatsuka, “Estimation of phase delay due to precipitable water for DInSAR-based land deformation monitoring”, ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, IV-2/W4, pp. 477-484, DOI: 10.5194/isprs-annals-IV-2- W4-477-2017, 2017.
- 7) Junichi Susaki and Masaaki Kishimoto, “Urban area extraction using X-band fully polarimetric SAR imagery”, IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, vol. 9, no. 6, pp. 2592-2601, 2016.
- 8) Junichi Susaki, “Analysis of scattering components from fully polarimetric SAR images for improving accuracies of urban density estimation”, ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. III-7, pp. 219-226, 2016.

### [ 学会発表 ] ( 計 15 件 )

- 1) Hiroki Ito and Junichi Susaki, “Monitoring of 3-D land subsidence from PSI with GPS/leveling data”, Proceedings of the 39th Asian Conference on Remote Sensing (ACRS), Renaissance Kuala Lumpur Hotel, Kuala Lumpur, Oct. 22-26, 2018.
- 2) 辻野雅博・須崎純一・丸尾尚之・Tirawat Boonyatee, 「衛星 SAR 画像を用いた構造物の抜け上がり検出」, 2018 年度土木情報学シンポジウム講演会論文集, 土木学会, vol. 43, pp.101-104, 2018 年 9 月 27-28 日.
- 3) 伊藤大生・須崎純一, 「PSI と測量結果の統合による地盤沈下監視」, 2018 年度土木情報学シンポジウム講演会論文集, 土木学会, vol. 43, pp.89-92, 2018 年 9 月 27-28 日.
- 4) 伊藤大生・須崎純一, 「地盤沈下監視のための時系列 SAR 画像と GPS データの統合」, 第 26 回生研フォーラム論文集, 東京大学生産技術研究所, pp.15-16, 2018 年 3 月 6-8 日.
- 5) 伊藤大生・須崎純一, 「上昇・下降軌道の SAR 画像を用いた PSI による地盤沈下解析」, 平成 29 年度日本写真測量学会秋季学術講演会論文集, 宇部市文化会館 ( 宇部市 ), pp.71-74, 2017 年 11 月 9-10 日.
- 6) 辻野雅博・須崎純一, 「時系列 TerraSAR-X 画像を用いた建造物の抜け上がりの検知」, 平成 29 年度日本写真測量学会秋季学術講演会論文集, 宇部市文化会館 ( 宇部市 ), pp.67-70, 2017 年 11 月 9-10 日.
- 7) 伊藤大生・須崎純一・穴原琢磨, 「関西国際空港を対象とした PSI を用いた地盤沈下解析」, 2017 年度土木情報学シンポジウム講演会論文集, 土木学会, vol. 42, pp.143-146, 2017 年 9 月

28-29 日.

- 8) 丸尾尚之・須崎純一,「差分干渉 SAR 解析による建造物の抜け上がり検知のための地盤面、建造物に対応した画素の選定」,平成 29 年度日本写真測量学会年次学術講演会論文集,東京大学生産技術研究所(東京都),pp.29-30,2017 年 5 月 25-26 日.
- 9) Hiroki Ito and Junichi Susaki,“Land subsidence monitoring by using PSI with ascending- and descending-orbit satellite images”,Proceedings of the 38th Asian Conference on Remote Sensing (ACRS),Ashok Hotel,New Delhi,India,Oct. 23-27,2017.
- 10) Shin Akatsuka, Junichi Susaki and Masataka Takagi,“Estimation of precipitable water using numerical prediction data”,Proceedings of International Symposium of the 11th SSMS and the 5th RCND 2017, Bangkok, Thailand, 2017.
- 11) 丸尾尚之・須崎純一・岸田潔・Tirawat Boonyatee,「差分干渉 SAR 解析を用いた地盤沈下に伴う建造物の抜け上がり検知手法の開発」,平成 28 年度日本写真測量学会秋季学術講演会論文集,都久志会館(福岡市),pp.173-176,2016 年 11 月 10-11 日.
- 12) 前田直也・須崎純一・赤塚慎,「DInSAR による地盤変動推定精度の向上を目的とした可降水量推定」,平成 28 年度日本写真測量学会秋季学術講演会論文集,都久志会館(福岡市),pp.177-180,2016 年 11 月 10-11 日.
- 13) Naoya Maeda, Junichi Susaki and Shin Akatsuka,“Estimation of precipitable water for improving land subsidence accuracy using DInSAR technique”,Proceedings of the 37th Asian Conference on Remote Sensing (ACRS),Galadari Hotel,Colombo,Sri Lanka,Oct. 17-21,2016.
- 14) Naoyuki Maruo, Junichi Susaki, Tirawat Boonyatee and Kiyoshi Kishida,“Detection of the deformation rate gaps between buildings and land surface by differential synthetic aperture radar interferometry techniques”,Proceedings of the 37th Asian Conference on Remote Sensing (ACRS),Galadari Hotel,Colombo,Sri Lanka,Oct. 17-21,2016.
- 15) Naoyuki Maruo, Junichi Susaki, Tirawat Boonyatee, Kiyoshi Kishida,“Detection of gaps between land and building surface displacement by PSInSAR and SBAS analysis using L-band PALSAR data”,Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) 2016,pp. 5994-5997,China National Convention Center,Beijing,China,July 10-15,2016.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計 0 件)

○取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.gi.ce.t.kyoto-u.ac.jp/user/susaki/>

## 6 . 研究組織

### (1)研究分担者

研究分担者氏名：赤塚 慎

ローマ字氏名：Shin Akatsuka

所属研究機関名：高知工科大学

部局名：システム工学群

職名：准教授

研究者番号(8桁): 80548743

### (2)研究協力者

なし

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。