

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

京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻空間情報学講座 学生会員 ○日下部 貴也
京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻空間情報学講座 正会員 須崎 純一
スカパーJSAT 株式会社 非会員 穴原 琢磨

1. はじめに

近年、気候変動や地下水のくみ上げ等が原因で、世界の様々な都市で地盤沈下が起こり、社会問題となっている。そのため、安価、高精度、広範囲に地表面の変動を推定する技術が求められている。そのような技術の一つに、衛星搭載の合成開口レーダ（Synthetic Aperture Radar: SAR）データを用いた変動推定が挙げられる。伊藤ら[1]は、SAR 画像と GPS データから地表面の三次元変位を推定する方法を考案した。この方法では、SAR 画像、GPS データそれぞれから推定された変位量に対して、最小二乗法を適用し、三次元変位の最終推定を行っている。しかし、この手法では各々のデータによる推定変位量の精度の違いが考慮されていない。仮に精度の低い推定変位量が含まれていた場合、最終推定結果はその影響を過度に受けることが考えられる。これを解決する方法として、重み付き最小二乗法の適用が挙げられる。従って本研究では、SAR 画像と GPS データから地表面の三次元変位推定を行う際の、重み付き最小二乗法の有効性について検証を行う。

2. 対象地域及び使用データ

本研究の対象地域は、関西国際空港 2 期島とした。関西国際空港 2 期島は、開港以来地盤沈下が続いており、2015 年の 1 年間で 34 cm 沈下した[2]。

SAR 画像は、ALOS2/PALSAR2 が上昇軌道で 2014 年 9 月から 2018 年 3 月に撮影した画像 13 枚、下降軌道で 2014 年 3 月から 2018 年 5 月に撮影した画像 17 枚を用いた。また、干渉位相への地形の影響を除くため、国土地理院公開の 10 m メッシュ数値標高モデルを用いた。

GPS データとして、関西エアポート株式会社により計測された水準測量点 54 か所、GPS 測量点 26 か所を用いた。内挿用データとして、水準測量点 32 か所と GPS 測量点 18 か所、検証用データとして残りの水準測量点

22 か所と GPS 測量点 8 か所を用いた。

3. 三次元変動速度推定

本節では、三次元変動速度の推定手順について説明する。まず、上昇軌道、下降軌道の SAR 画像から、Persistent Scatterers Interferometry (PSI) [3]を用いて、地表面の各衛星視線方向における変動速度を推定する。次に、内挿用の GPS データから、クリギングを用いて、面的な地表面の三次元変動速度を推定する。以上より、観測方程式は以下のように表される。

$$\begin{bmatrix} V_{PS}^{ASC} \\ V_{PS}^{DES} \\ V_{krig}^E \\ V_{krig}^N \\ V_{krig}^U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_E^{ASC} & u_N^{ASC} & u_U^{ASC} \\ u_E^{DES} & u_N^{DES} & u_U^{DES} \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V^E \\ V^N \\ V^U \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここで、 $V_{PS}^{ASC}, V_{PS}^{DES}$ は上昇軌道、下降軌道の SAR 画像から推定された各衛星視線方向変動速度、 $V_{krig}^E, V_{krig}^N, V_{krig}^U$ は GPS データから推定された東西、南北、鉛直方向変動速度、 $[u_E^{ASC} \ u_N^{ASC} \ u_U^{ASC}]$ 、 $[u_E^{DES} \ u_N^{DES} \ u_U^{DES}]$ は上昇軌道、下降軌道における衛星視線方向速度を東西、南北、鉛直の三次元方向速度に変換する単位ベクトル、 $[V^E \ V^N \ V^U]^T$ は最終的に推定される東西、南北、鉛直方向の変動速度である。この観測方程式を、式(2)をもとに、重み付き最小二乗法によって解くことで、三次元変動の推定を行う。ここで、 V は残差、 P は重み行列を表す。

$$\min L = \min V^t \cdot P \cdot V \quad (2)$$

4. 重みの計算

式(2)の重み P は一般的に、測定誤差の分散の逆数で表される。PSI による変動速度の誤差は以下のようにし

キーワード 合成開口レーダ GPS 三次元変動 重み付き最小二乗法

連絡先 〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 C1 棟 TEL 075-383-3303

て求める. PSI による変動速度から鉛直方向の速度の算出, 当該PS[3]に最も近い内挿用 GPS データから鉛直方向の速度の算出を行う. これら 2 つの鉛直方向の速度の差を誤差とし, 重みを算出する. 一方, GPS データから内挿された変動速度の誤差は, 当該データ以外のデータを用いて内挿して得られた変動速度との差とする. この計算をすべての内挿用 GPS データ点について行い, 誤差分散, 重みの算出を行う. 算出した重み行列を用いて, 式(2)を解く.

5. 結果

本節では, 関西国際空港を対象として提案手法を適用した結果を述べる. まず, 重みの計算結果を示す. 上昇軌道, 下降軌道 SAR 画像から推定した変動速度についての重みの値は $(3.9 \times 10^{-4})^{-1}, (5.6 \times 10^{-4})^{-1}$ であった. GPS データから推定した変動速度についての重みは $(1.3 \times 10^{-3})^{-1}, (1.1 \times 10^{-3})^{-1}, (1.1 \times 10^{-2})^{-1}$ であった.

次に, 重み付き最小二乗法を適用して推定した関西国際空港の東西方向変動速度を図 1(a), 南北方向変動速度を図 1(b), 鉛直方向変動速度を図 1(c)に示す. 重み付き最小二乗法を適用した際の Root Mean Square Error (RMSE)は, 東西, 南北, 鉛直方向の順に, 5, 13, 10 mm/year であった. 重み行列を単位行列とした時の最小二乗法を用いた RMSE は, 6, 13, 16 mm/year であった.

6. 考察

本節では, 重み付き最小二乗法が通常最小二乗法より, SAR データと GPS データから三次元変動を推定することに有効であるか考察を行う. RMSE の値より, 重み付き最小二乗法の適用が水平方向の変動速度の推定精度に対して影響を与えることはなかった. しかし

鉛直方向の変動速度の推定精度については, 16 mm/year から 10 mm/year という改善が確認できた.

この要因として, 重み(誤差分散)の大きさの違いが考えられる. 各データの誤差分散を比較すると, SAR データ, 水平方向の GPS データ, 鉛直方向の GPS データから求めた変動速度の誤差分散は, 概ね1:2:20である. このことから, 極端に精度が悪い GPS データから求めた鉛直方向変動速度の影響が, 重み付き最小二乗法によって抑えられ, 鉛直方向の推定精度向上につながったと考えられる.

7. 結論

本研究では, 重み付き最小二乗法を用いて, SAR 画像と GPS データから地表面の三次元変動を推定することの有効性を検証した. その結果, 通常最小二乗法を適用した場合と比べ, 鉛直方向の変動の推定精度を改善することができた. 今後の課題として, GPS データが比較的少ない地域に対して本手法を適用し, その有効性について検証を行う.

参考文献

[1]伊藤大生, 須崎純一, 穴原琢磨, ”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”, 写真測量とリモートセンシング, 58(4), pp.174-183, 2019.
[2] 関西エアポート. [関西空港]沈下の状況[関西エアポート, <http://www.kansai-airports.co.jp/efforts/our-tech/kix/sink/sink3.html>, (2020.3.25 アクセス).
[3] Ferretti, A., Prati, C., and Rocca, F., 2000. Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry, IEEE Trans, Geosci. Remote Sen. 38(5), pp.2202-2212.

