

H-006

高精度画像マッチングを用いた SAR 衛星画像からの地表変位推定 Estimation of Ground Surface Displacement from SAR Satellite Image Using High-Accuracy Image Matching

水野 雄介† Yusuke Mizuno 滝口 哲也‡ Tetsuya Takiguchi 有木 康雄† Yasuo Ariki

1. はじめに

本研究では、地震による地殻変動の地表変位の向きと大きさを、地震の発生前後に合成開口レーダ (SAR) によって撮影された衛星画像から推定する手法を提案する。従来手法[2]である小領域の画像マッチングを行う手法に対し、位相限定相関法によるサブピクセル画像マッチングを適用し、また画像全体の位置あわせに M 推定を利用することで精度の向上を目指す。SAR は電磁波の一種であるマイクロ波を利用した衛星センサであり、L パンドのマイクロ波は樹木を透過し、地表で反射する特性から地表変位の観測に有効である。実験では実際に発生した地震を対象に提案手法を適用し、その有効性を検証した。

2. 提案手法の概要

手法の概略図を図 1 に示す。入力画像は地震発生の前後に合成開口レーダを用いて撮影された画像 2 枚である。このうち地震前に撮影された画像を Master 画像、地震後に撮影された画像を Slave 画像とする。

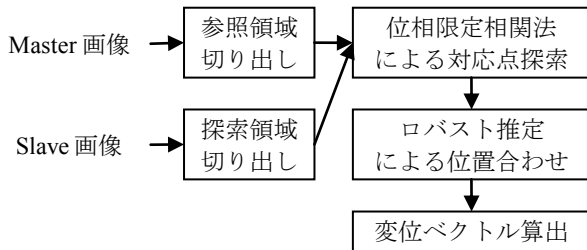


図 1: 提案手法のフローチャート

まず、図 2 のように Master 画像上から任意の点を中心にある一定の大きさの参照領域を切り出す。Slave 画像上からも同じ位置に参照領域より大きめの探索領域を切り出し、同時に参照領域を探索領域の大きさに合わせて 0 パディングする。

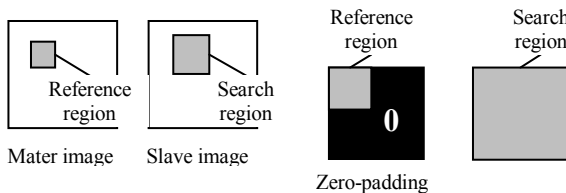


図 2: 参照領域と探索領域の切り出し

この 2 つの小領域画像に対して高精度画像マッチング手法である位相限定相関法を用いることで、Master 画像の任意の点に対して、Slave 画像上での対応点を高速に見つけることができる。

次に、2 つの画像では観測衛星の観測位置・姿勢などの違いによって全体的な位置ずれが生じているため、Slave 画像の座標から Master 画像の座標へのアフィン変換によって 2 つの画像の位置合わせを行う。アフィン変換のパラメータは 2 つの画像上の複数の対応点関係からそれらを一致させるように最小二乗法による線形回帰分析を行うことによって求められる。しかし、対応点の中には誤対応や地表変位の影響を受けた対応点が存在し、推定に悪影響を与える。こうした対応点を効率的に除去し、パラメータ推定に適した対応点のみから推定を行うためにロバスト推定を行う。

こうして得られたパラメータを基に Slave 画像の対応点を Master 画像上に射影することで、観測衛星の観測位置・姿勢などによる全体的な位置ずれの影響を除去し、その残差となって現れる対応点の移動によって地表変位を求めることができる。

3. 位相限定相関法による対応点探索

位相限定相関法[1]は、画像の位相情報に着目することで高精度な画像マッチングを行う手法である。相関ピークのモデル化によって高精度な移動量検出が可能となっている。手法の概略図を図 4 に示す。

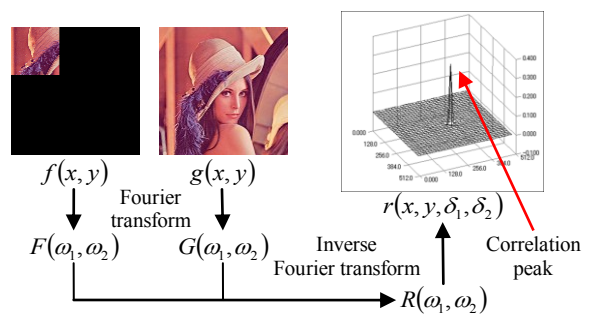


図 3: 位相限定相関法による移動量検出

まず、参照領域を $f(x, y)$ 、探索領域を $g(x, y)$ とする。この 2 つの領域をフーリエ変換したものをそれぞれ $F(\omega_1, \omega_2)$ 、 $G(\omega_1, \omega_2)$ とし、これらから以下に定義される式(1)を計算することで、位相限定合成 $R(\omega_1, \omega_2)$ を得る。 $R(\omega_1, \omega_2)$ を逆フーリエ変換することによって得られた $r(x, y, \delta_1, \delta_2)$ を位相限定相関関数 (POC) と呼ぶ。このとき、 $r(x, y, \delta_1, \delta_2)$ のピークを持つ座標 (ピクセル) を (x, y) 、ピクセル以下の移動量を δ_1, δ_2 とすると、位相限

†神戸大学大学院工学研究科

‡神戸大学自然科学系先端融合研究環

定相関関数のモデルは式(2)のように表わされる。ここで、 $\alpha=1$ である。 $r(x, y)$ の相関ピーク座標を位相限定相関関数のモデルによって評価することで、サブピクセル精度で画像の相対的な移動量を推定することができる。これによって、参照画像に対応する探索画像の位置を得ることができる。

$$R(\omega_1, \omega_2) = \frac{F(\omega_1, \omega_2) \overline{G(\omega_1, \omega_2)}}{|F(\omega_1, \omega_2) G(\omega_1, \omega_2)|} \quad (1)$$

$$r(x, y, \delta_1, \delta_2) = \frac{\alpha}{N_1 N_2} \frac{\sin\{\pi(x + \delta_1)\}}{\sin\left\{\frac{\pi}{N_1}(x + \delta_1)\right\}} \frac{\sin\{\pi(y + \delta_2)\}}{\sin\left\{\frac{\pi}{N_2}(y + \delta_2)\right\}} \quad (2)$$

4. ロバスト推定による位置合わせ

対応点のフィッティングによって2つの画像の位置合わせを行う際、誤対応や地表変位による外れ値が悪影響を及ぼす。ロバスト推定は外れ値に頑健な推定を行うための手法である。

4.1 M 推定

M 推定はデータに対して適切な重みづけをすることでロバストな推定を行う手法である。Tukey の Biweight 推定法は M 推定の一形態であり、外れ値から受ける影響を小さくしながら推定を行う。処理の流れとしては、まず通常の最小二乗法によるパラメータ推定を行った後、フィッティングの誤差に応じてデータに重みを与える。誤差の大きいデータには小さな重みを、誤差の小さなデータには大きな重みを与えることで、大きな誤差を持つデータの影響を軽減することができる。重み係数は式(3)のように表わされる。ここで μ_i は誤差、 w は誤差の中央値である。

$$\begin{cases} w_i = 1 - \left(\frac{\mu_i}{w}\right)^2, & \mu_i < w \\ w_i = 0, & \mu_i \geq w \end{cases} \quad (3)$$

4.2 RANSAC

RANSAC[3]はデータからランダムに幾つかのサンプルを抽出し、推定することを繰り返す。外れ値が含まれないサンプルから推定を行う場合、より正しい推定結果が得られる。このとき、想定される誤差範囲内にデータがより含まれると考えられ、繰り返し推定を行い誤差範囲内にデータがもっとも多く含まれる推定結果を正しい推定とする。

5. 実験

5.1 実験データ

実験用のデータとして、2008年に発生した岩手・宮城内陸地震の前後に撮影されたマイクロ波レーダ衛星画像を用いる。この地震のマグニチュードは7.2で、最大震度

は6強を観測し、地表変位は最大で1メートルから1.5メートルと推測されている。今回実験に使用したデータは地球観測衛星「だいち」(ALOS)に搭載された合成開口レーダセンサ PALSAR によって得られたものである。

5.2 実験内容

提案手法に沿って実験を行った。位相限定相関法による対応点探索の後、2つのロバスト推定手法を用いて画像の大域的な位置ずれの推定と補正パラメータの算出を行う。この補正パラメータによってアフィン変換を行うことで大域的な位置ずれを取り除き、局所的な変位ベクトルを導出する。

5.3 実験結果

Master 画像に変位ベクトルを160倍し重ねて表示したものを図6に示す。ロバスト推定による位置合わせにおいて、M 推定と RANSAC を使った手法ではほぼ同様の効果が得られた。また、このとき M 推定による位置ずれ補正の誤差の中央値は0.16ピクセルであった。これは位置ずれ補正の正確さを表す。今後はこうした位置ずれ補正を多数のデータから正確に行うことが必要になる。

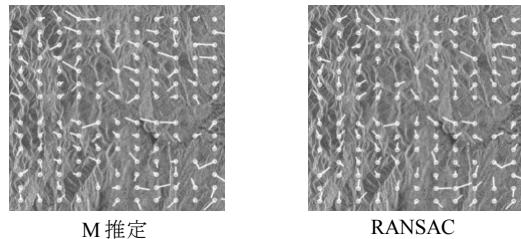


図4: 変位ベクトルの表示

6. おわりに

地震による地殻変動をマイクロ波レーダを用いた衛星画像から求める手法を提案し、実験を行った。位相限定相関法を用いることで、サブピクセル精度で高精度に対応点を取ることが可能であることを確認した。また、ロバスト推定を利用した画像の位置合わせを行い、外れ値による誤差を抑えながら推定ができることが分かった。画像上では、河川など反射が少ない点で対応点が取れず、外れ値の原因となっていることが推測され、対応点を求める地点を選ぶ際には注意が必要である。今後は地表変位の実測値を用いた変位推定の精度検証を行うとともに、全体的な精度向上に取り組む予定である。

参考文献

- [1] 長嶋聖, 青木孝文, “位相限定相関法に基づくサブピクセル画像マッチングの高精度化”, 計測自動制御学会, 2004.
- [2] 飛田幹男, “SAR画像のマッチングによる有珠山周辺の面的な三次元地殻変動, 変動速度, 体積変化”, 国土地理院時報, No.95, 37-48, 2001.
- [3] M. A. Fischler, R. C. Bolles. Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography. Comm. of the ACM, Vol 24, pp 381-395, 1981.