3ZG-08

航空機SAR画像を用いた3次元計測とその性能評価

丸木 大樹 †　酒井 修二 †　伊藤 康一 †　青木 孝文 †　上本 純平 ‡　浦塚 清峰 ‡
† 東北大学 大学院情報科学研究科，‡ 情報通信研究機構

1　はじめに

合成開口レーダ (SAR) は，航空機や人工衛星が移動しながら電磁波を照射・受信することで地表面を画像化するイメージングレーダである [1]．SAR は，地表に観測機器を設置する必要がなく，昼夜・天候に左右されずに，一度に広範囲な観測が可能である．この特長から，SAR は，地球環境観測や標高計測などに利用されている．航空機をプラットフォームとした場合は，自由に観測航路を選択できるため，被災地の状況の迅速な把握等に役立つことが期待されている．本稿では，航空機 SAR を利用した地表の標高計測に着目する．

SAR を利用した標高計測の主な手法として，電磁波の位相差情報を利用する干渉 SAR と，2 枚の SAR 強度画像間の対応関係を利用するレーダグラメトリがある [2, 3]．これらの手法は，不確定性の除去や計測精度の向上のために，現地調査等により取得した地上基準点 (GCP) を利用する必要があり，SAR 観測の持つ利点が損なわれる．また，有理関数モデルで表された投影モデルを利用するために必要となる有理多項式係数 (RPC) が必ずしも提供されるわけではない．これに対し，本稿では，SAR 観測時に取得される情報のみで投影モデルを定義することで，RPC を必要としないレーダグラメトリ手法を提案する．提案手法では，再投影誤差の最小化に基づくバンドル調整により，GCP を利用せずに観測情報を校正できる．また，航空機レーザ測量によって取得した地上表層モデル (DSM) との比較により，提案手法の有効性を示す．

2　SAR の 3 次元幾何モデル

図 1 に示す 2 次元画像座標 (u, v) と 3 次元座標 (X_R, Y_R, Z_R) との間の投影モデルは，プラットフォーム高度 Z_0，分解能 α，スラントレンジ距離 D_{SL} を用いて以下の式で定義される [4].

$$u = \alpha_u Y_R \quad (1)$$

$$v = \alpha_v\left(\sqrt{(X_0 + X_R)^2 + (Z_0 - Z_R)^2} - D_{SL}\right) \quad (2)$$

3D Measurment Using Airborne SAR Images and Its Performance Evaluation
†Daiki MARUKI　†Shuji SAKAI　†Koichi ITO　†Takafumi AOKI
‡Jyunpei UEMOTO　‡Seiho URATSUKA
†Graduate School of Information Sciences, Tohoku University
‡National Institute of Information and Communications Technology

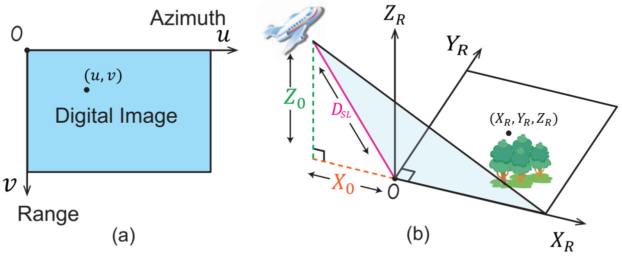

図 1: 座標系の定義：(a) 2 次元画像座標系，(b) 3 次元座標系

ここで，D_{SL} は，2 次元画像座標の原点に対応する 3 次元座標上の物体とプラットフォームとの間の直線距離であり，電磁波を照射してから反射波が到達するまでの時間から計算できる．X_0 は，3 次元座標系の原点とプラットフォームとの間の水平距離であり，Z_0，D_{SL} から求めることができる．投影モデルにおけるパラメータ Z_0, α, D_{SL} を SAR の内部パラメータとする．異なる 2 つの航路で同一の領域を観測すると，それぞれの航路で定義される 3 次元座標系 $\boldsymbol{M}_{R1} = (X_{R1}, Y_{R1}, Z_{R1})$ と $\boldsymbol{M}_{R2} = (X_{R2}, Y_{R2}, Z_{R2})$ との間に次式が成り立つ.

$$\boldsymbol{M}_{R1} = \boldsymbol{R}\boldsymbol{M}_{R2} + \boldsymbol{t} \quad (3)$$

ここで，$\boldsymbol{R}$ は回転角 ϕ の Z_R 軸回りの回転行列，$\boldsymbol{t}$ は X_R-Y_R 平面上の並進ベクトルである．この $\boldsymbol{R}, \boldsymbol{t}$ を SAR の外部パラメータとする．それぞれの航路で取得した SAR 強度画像間の対応点ペア (u, v) と (u', v') が与えられると，式 (1)，(2)，(3) より，3 次元座標 (X, Y, Z) を次式で算出できる.

$$X = \frac{1}{\sin\phi}\left(\frac{u'}{\alpha'_u} - \frac{u}{\alpha_u}\cos\phi - t_Y\right) \quad (4)$$

$$Y = \frac{u}{\alpha_u} \quad (5)$$

$$Z = Z_0 - \sqrt{\left(\frac{v}{\alpha_v} + D_{SL}\right)^2 - (X_0 + X)^2} \quad (6)$$

ただし，(X_{R2}, Y_{R2}, Z_{R2}) は世界座標系 (X, Y, Z) と一致することに注意されたい．以上のように，画像間の対応関係と SAR 観測時に取得されるパラメータ（高度，分解能，スラントレンジ距離）のみから地表面の 3 次元計測が可能である.

Copyright ©2015 Information Processing Society of Japan.
All Rights Reserved.

3　2 枚の SAR 強度画像を用いた 3 次元計測

提案手法は，(i) 地上投影変換，(ii) 外部パラメータ推定と画像対応付け，(iii) パラメータ最適化と 3 次元計測の 3 つの処理で構成される [4]．まず，地上投影変換では，2 節で定義した投影モデルを用い，航路の違いにより生じる画像間の歪みを補正する．高さが一定の平面を仮定し，式 (2) の Z_R を定数とすることで，画像座標 (u, v) を，仮定した平面上の 2 次元座標 (X_R, Y_R) に変換する．次に，外部パラメータ推定と画像対応付けでは，地上投影変換した画像間の回転角度・平行移動量から外部パラメータを推定する．推定した回転角度によって一方の画像を回転補正し，2 枚の画像間で対応付けを行う．回転角度・平行移動量推定，画像対応付けには，位相限定相関法 [5, 6] を用いる．パラメータ最適化と 3 次元計測では，対応点ペアから 3 次元座標を算出し，再度 2 次元画像上に投影した点と対応点ペアとの誤差が最小となるように，バンドル調整を用いて内部・外部パラメータを最適化する [7]．最後に，最適化後のパラメータを用いて 3 次元座標を計算し直す．

SAR 強度画像には，物体の高さに応じて投影位置が変化するジオメトリック画像変調が存在する．地上投影変換において Z_R を定数とした場合，ジオメトリック画像変調を補正することはできないため，外部パラメータ推定や画像対応付けの精度を低下させてしまう．そこで，提案手法では，$Z_R = 0$ として補正した画像を用いて一度 3 次元計測を行い，算出した標高値を新たな Z_R として，再度，計測処理を繰り返すことで，ジオメトリック画像変調の影響を軽減する．

4　性能評価実験

航空機レーザ測量によって取得した DSM を真値とし，提案手法の性能評価を行う．交差角 10 度程度の異なる航路で取得した同一領域の 2 枚の SAR 強度画像を入力とし，提案手法により 3 次元計測を行う．計測した 3 次元点群と DSM を Iterative Closest Point アルゴリズムを用いて位置合わせし，標高の残差で評価する．使用する SAR 強度画像は，情報通信研究機構が開発した航空機 X バンド SAR である Pi-SAR2 により取得した．観測領域は，都市域や山林が多く含まれる仙台市周辺である．また，本実験では，Pi-SAR2 の干渉 SAR 機能によって取得した 3 次元データと提案手法を比較する．使用した SAR 強度画像と 3 次元計測結果を図 2 に示す．図 2 の白色の領域は，計測不能点を表す．また，提案手法と干渉 SAR の計測誤差を表 1 に示す．ただし，表 1 は，計測誤差が 10 m 以下の点を評価対象とした．提案手法により，GCP を利用しなくても，干渉 SAR と同等の精度で計測が可能である．

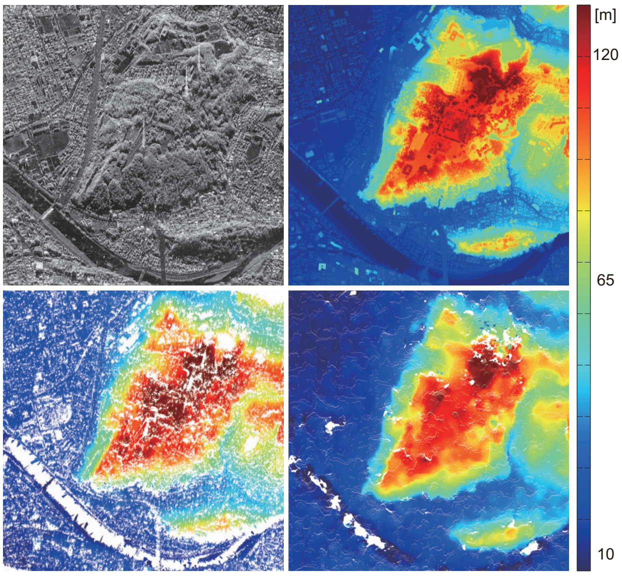

図 2: 入力画像と標高マップ：SAR 強度画像（左上），DSM（右上），干渉 SAR（左下），提案手法（右下）

表 1: 3 次元計測誤差と計測点数

	RMS 誤差	平均残差	計測点数
干渉 SAR	3.77 m	2.96 m	1,536,157
提案手法	3.73 m	2.92 m	2,294,312

5　まとめ

本稿では，SAR 観測時に取得されるパラメータのみを用いた 3 次元計測手法を提案した．精度評価実験を通して，高精度な 3 次元計測が可能であることを示した．

参考文献

[1] 大内和夫, リモートセンシングのための合成開口レーダの基礎, 東京電機大学出版局, 2004.

[2] P. A. Rosen et al., “Synthetic aperture radar interferometry,” Proc. IEEE, vol.88, no.3, pp.333–382, Mar. 2000.

[3] P. Capaldo et al., “High-resolution SAR radargrammetry: A first application with COSMO-SkyMed SpotLight Imagery,” IEEE Geosci. Remote Sens. Lett., vol.8, no.6, pp.1100–1104, Nov. 2011.

[4] 丸木大樹 ほか, “SAR 強度画像間の対応付けに基づく地表面の 3 次元計測手法の検討,” 映像情報メディア学会技術報告, vol.38, no.32, pp.43–46, Aug. 2014.

[5] K. Takita et al., “High-accuracy subpixel image registration based on phase-only correlation,” IEICE Trans. Fundamentals, vol.E86-A, no.8, pp.1925–1934, Aug. 2003.

[6] K. Takita et al., “A sub-pixel correspondence search technique for computer vision applications,” IEICE Trans. Fundamentals, vol.E87-A, no.8, pp.1913–1923, Aug. 2004.

[7] 岡谷貴之, “バンドルアジャストメント,” コンピュータビジョン最先端ガイド 3, pp.1–31, 2010.

Copyright ©2015 Information Processing Society of Japan.
All Rights Reserved.