

A7 高解像度干渉 SAR 画像と GIS データを用いた高層建物の高さ抽出

Detection of high-rise building's heights using high-resolution InSAR images and GIS data

○鈴木 賢太郎¹・リュウ ウェン²・山崎 文雄²
Kentaro Suzuki, Wen Liu and Fumio Yamazaki

Abstract : The detection techniques of building heights using remote sensing data have been proposed in previous researches. In this study, a detection method for high-rise building heights using high-resolution InSAR images and GIS data was proposed and a case study was conducted. Specifically, an interferometric image was made from a pair of TerraSAR-X complex images and layover areas were detected by an InSAR analysis. Then, building heights were measured using the detected layover areas and GIS building footprints. Finally, detected heights were compared with the reference heights from Lidar data.

Keywords : high-rise building, height detection, TerraSAR-X, InSAR analysis

1. はじめに

建物のモニタリングやモデリングは、都市計画や災害対策の立案、環境影響評価などを行うために重要である。このとき各々の建物の形状を把握する方法、とくに建物高さの抽出方法が大きな課題となっている。

リモートセンシングによる建物高さの抽出は、光学画像の立体視やレーザ測量もよく用いられるが、天候や昼夜間に関わらず観測できる合成開口レーダ(SAR)が有効な手段である。さらに、近年 TerraSAR-X (TSX)や COSMO-SkyMed などの高解像衛星 SAR 画像が利用できるようになり、広域・定期的に詳細な地表面の観測が可能となった。SAR による建物高さの抽出手法はこれまで多く提案されているが¹⁾、都市の高層建物の高さ抽出においては建物の「倒れ込み」と「干渉位相」を用いた手法が有用であると考えられる。SAR 画像では、幾何学的な歪みによって建物が画像上に倒れ込むため、この倒れ込み範囲を特定し、建物の GIS データと組み合わせることで各々の建物の高さを抽出が可能である²⁾。また、必要な処理を施した干渉画像では建物によって干渉縞が発生し、理論値を用いることで建物の倒れ込み範囲を特定することができる³⁾。このとき、高層建物は位相の変化量が大きいため、倒れ込み範囲に干渉縞が発生しやすく、倒れ込み範囲の特定がしやすい特徴がある。

本研究では、高解像度干渉 SAR 画像と GIS 建物輪郭を用いて高層建物の高さ抽出することを目的とする。まず TSX の干渉画像を作成し、干渉縞の理論式から建物の倒れ込み範囲を抽出する。さらに、抽出した倒れ込み範囲と GIS 建物輪郭データを用いて建物高さを抽出し、Lidar から求めた高さと比較する。

2. 対象地域と使用データ

本研究では、アメリカ合衆国のカリフォルニア州サンフランシスコ市の高層ビル群を対象地域とした(Fig.1)。使用する TSX 画像は 2007/12/05 と同年 12/27 に取得された HS モードの SLC 画像である。この画像はともにアジマス方向の解像度が 1.10 (m/pixel)、スラントレンジ方向の解像度が 0.92 (m/pixel)であり、南向軌道により取得された。また、Lidar の DEM と DSM を干渉画像の地形位相の補正と建物高さの検証用データとして用いた。このデータの水平方向分解能は 2.0m、垂直分解能は 0.06m である。使用する GIS 建物輪郭データは、サンフランシスコ市が HP 上で公開しているものを使用した⁴⁾。Fig.2(a)に対象地域の建物輪郭と Lidar から求めた地表面高さを示す。本研究では、高さ 50m 以上で倒れ込み範囲が他の建物の影に入らないような建物 12 棟を対象に高さの抽出を行う。対象建物を Fig.2(b)に示す。

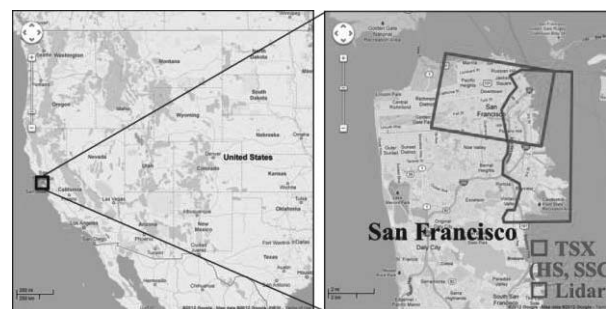


Fig.1. The study area in San Francisco, CA, U.S.A. and shooting areas of TerraSAR-X (TSX) and Lidar data.

3. 干渉縞を用いた建物倒れ込み範囲抽出の抽出

3-1. 干渉画像の作成

建物の倒れ込み範囲を抽出する第一段階として、TSX の干渉画像を作成した。12/05 画像をマスター画像として、ルック数 2:2 の初期干渉画像を作成する。軌道補正と Lidar の DEM を用いた地形位相の除去を行った後、GoldStein フィルターを適用した。

¹学生会員 千葉大学大学院 工学研究科 建築・都市科学専攻

²正会員 千葉大学大学院 工学研究科 建築・都市科学専攻

(所在地 〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町1-33 工学系総合研究棟4F)

(連絡先 Tel: 043-290-3528, E-mail: kentaro_suzuki@chiba-u.jp)

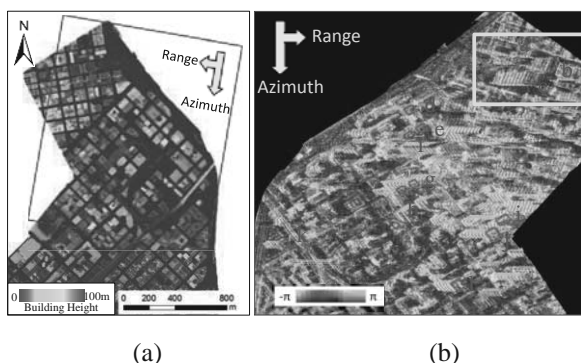


Fig.2. Geocoded image of building heights measured by Lidar data (a); slant-range phase image and target buildings (b).

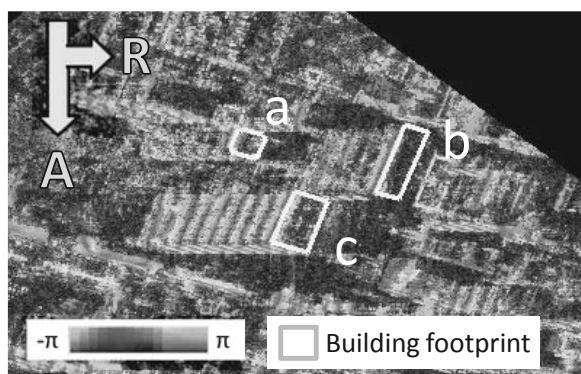


Fig.3. A close up of the phase image within the yellow frame in Fig.2 (b).

Fig.2(b)は強度画像と干渉画像を重ねたスラントレンジ画像であり、一部拡大した図を Fig. 3 に示す。この画像から建物の倒れ込み方向に干渉縞が発生している様子が確認できる。

3-2. 干渉縞の理論式

次に建物高さと同位相の関係式を用いて倒れ込み範囲を抽出する。SAR による建物の観測の様子を Fig. 4 に示す。まず、高さ h (m) の建物による位相の変化量 ϕ (rad) が以下の式で表される。

$$\phi = \frac{4\pi B_{\perp}}{\lambda H \tan \theta} h \quad (1)$$

B_{\perp} : 画像間の垂直軌道間距離 (m)

λ : レーダの波長 (m)

H : マスター画像取得時の衛星高さ (m)

θ : 入射角 (rad)

本画像では、 $B_{\perp} = 561.6$, $\lambda = 3.1 \times 10^{-2}$, $H = 5.01 \times 10^5$, $\theta = 0.70$ であり、 $\phi = 0.54h$ となる。

次に、高さ h の建物がスラントレンジ画像上における倒れ込み量 R (pixel) の関係は以下の式で表せる。

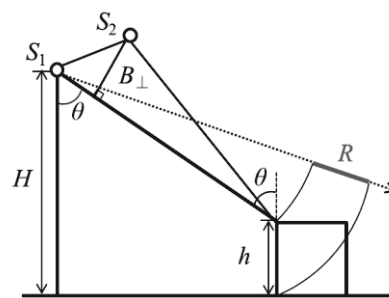


Fig.4. Schematic image of the InSAR observation.

$$h = \frac{a}{\cos \theta} R \quad (2)$$

a : スラントレンジ分解能 (m/pixel)

本画像では $a = 0.92$ なので、 $h = 1.2R$ となる。

式(1)(2)から、スラントレンジ方向の隣接するピクセルの位相差 $\Delta\phi$ (rad/pixel) は以下の式で表される。

$$\Delta\phi = \frac{4\pi a B_{\perp}}{\lambda H \sin \theta} \quad (3)$$

本画像では $\Delta\phi = 0.65$ rad/pixel となる。

また、干渉縞には位相が π から $-\pi$ に変化する位相ラップ(PW)点が存在する。PW 点での $\Delta\phi$ は理論上 -2π であり、PW 点はある一定間隔 T (pixel) で現れる。 T は式(1)と(2)から以下の式で表される。

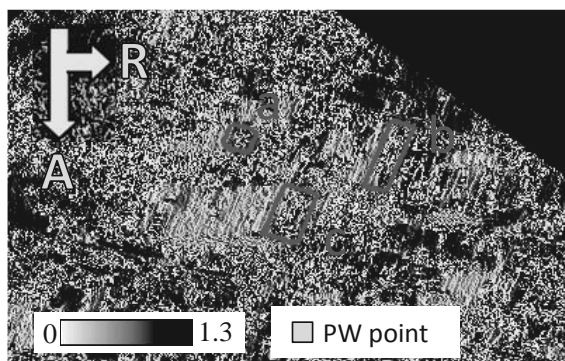
$$T = \frac{\lambda H \sin \theta}{2a B_{\perp}} \quad (4)$$

本画像では $T = 9.66$ pixels となる。

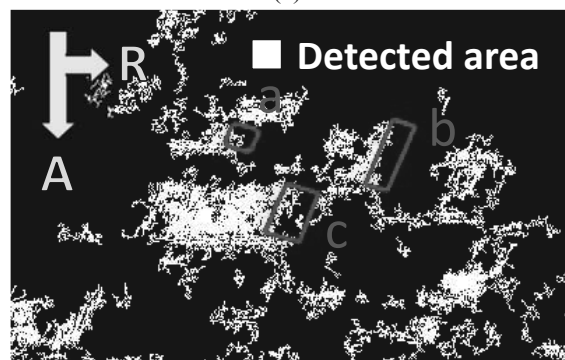
3-3. 倒れ込み範囲抽出方法

干渉画像について、式(3)を利用した位相差による倒れ込み範囲抽出と、式(4)を利用した PW 点間隔による抽出を行う。前処理として、干渉画像からスラントレンジ方向の位相差画像を作成し、 $\Delta\phi < -\pi$ を満たすピクセルを PW 点として抽出した。 Fig.3 の位相画像から抽出された PW 点を Fig.5(a)に示す。

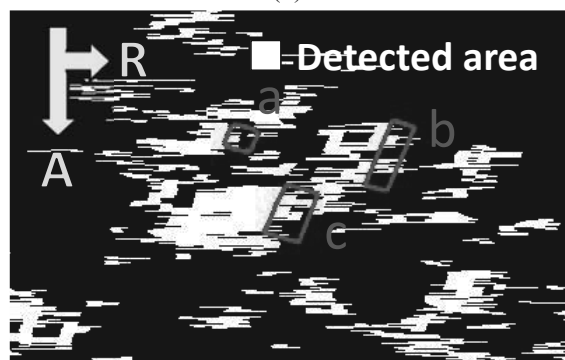
まず、位相差による抽出を行う。位相差画像の PW 点に 2π を加えて位相アンラッピングを行い、その画像の位相差が $0.325 < \Delta\phi < 0.975$ を満たす点を抽出した。そして、抽出したピクセルをセグメンテーションさせ、結合後のピクセル数が 35 以下のセグメントをノイズとして除去した。最終的に抽出した範囲を Fig. 5(b)に示す。位相差による抽出は、1



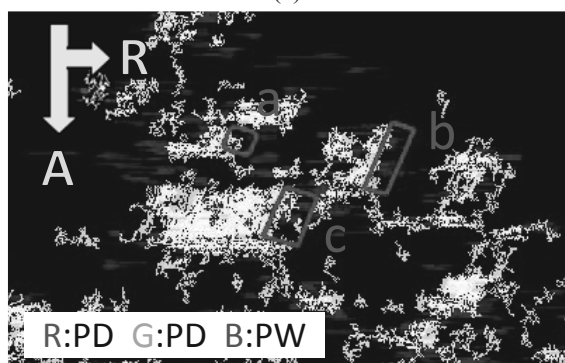
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig.5. Phase difference image with phase wrap points (yellow pixel) (a); Detected layover area from phase difference analysis (b); Detected layover area from PW analysis (c); Color composite of two detected areas by phase difference (PD) and phase wrap (PW) analysis (d).



Fig.6. Illustration of detecting layover length.

ピクセルごとに範囲を抽出するため、細かい範囲まで倒れ込みを推定できる一方、ノイズによって倒れ込み範囲でも抽出できないピクセルも多い。

そこで、位相差が大きく特定しやすいPW点に注目した抽出も試みた。この手法ではPW点間隔によって倒れ込み範囲を抽出する。前処理で抽出したPW点について、レンジ方向の次のPW点までの間隔 T を算出し、 $8 < T < 12$ を満たす場合、自身のPW点から次のPW点までのピクセルを抽出する。そして、同じくセグメンテーションを行って、ピクセル数35以下のセグメントを除去した。この処理による抽出範囲を Fig. 5(c)に示す。この手法では、PW点のみに注目するため、PW点間のノイズの影響を受けずに倒れ込み範囲を抽出することができる。一方、1干渉縞あたりの抽出となるため、実際の倒れ込み範囲を全て抽出できるわけではない。

3-4. 抽出範囲の結合

そこで、位相差とPW点間隔により抽出した範囲を結合することで双方の抽出漏れを補完した。Fig. 5(d)は両手法による抽出範囲のカラー合成図であり、白は両手法で抽出できた範囲、黄色は位相差によって補完された範囲、青はPW間隔によって補完された範囲を示す。この図から、相互に抽出漏れを補完している様子がわかる。本研究では、抽出されたすべての範囲を建物の倒れ込みと見なし、高さの抽出に用いる。

4. 倒れ込みとGISデータを用いた建物高さの抽出

4-1. 建物高さ抽出方法

抽出した倒れ込み範囲とGIS建物輪郭を用いた建物高さの抽出の手順を以下に示す。Fig.6のように建物輪郭を1ピクセル毎に衛星方向に移動し、SARの入射側の輪郭上ピクセルに含まれる倒れ込み範囲の割合を求める。そしてこの割合が25%を下回ったらその移動範囲までを倒れ込み量 R とし、式(2)から建物高さを求めた。

Table 1. Comparison table of the detected heights vs. the Lidar heights.

Building ID	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>
Detected Height (m)	71.8	51.4	113.6	108.8	49.0	89.7
Lidar Height (m)	77.0	67.0	116.0	115.0	55.0	90.0
Error (m)	-5.2	-15.6	-2.4	-6.2	-6.0	-0.3
Building ID	<i>g</i>	<i>h</i>	<i>i</i>	<i>j</i>	<i>k</i>	<i>l</i>
Detected Height (m)	102.9	88.5	143.5	102.9	65.8	74.2
Lidar Height (m)	106.0	90.0	125.0	99.0	67.0	84.0
Error (m)	-3.1	-1.5	18.5	3.9	-1.2	-9.8

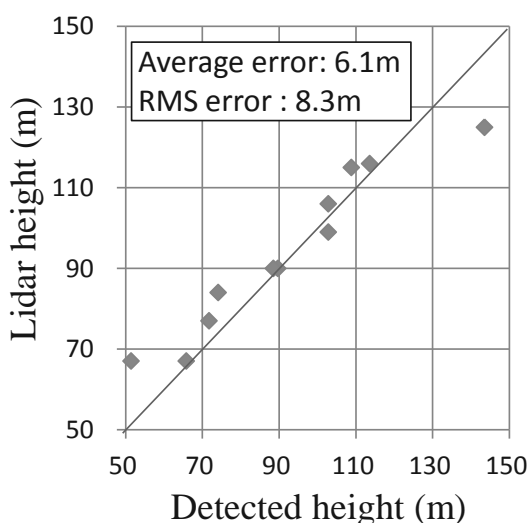


Fig.7. Comparison of the detected heights vs. the Lidar heights.

4-2. 抽出結果と検証データとの比較

抽出した建物高さを Lidar から求めた高さを正解として比較した結果を Table1 と Fig. 7 に示す. 本手法による平均誤差は 6.1m, RMS は 8.3m となり, 50% の建物を 5m 以内の誤差で高さの推定ができた. 高さ 50m 以上の建物が対象であることを考慮すると, 精度よく建物高さが抽出できたと考えられる.

一方抽出誤差の大きい建物に注目してみると, 建物 *i* は 18.5m 過大に高さを抽出し, 建物 *b* は 15.6m 過小に高さを抽出している. 建物 *i* の誤差について検討した結果, この建物の倒れ込み方向にある他の建物の倒れ込み範囲が混合して高さを抽出していたことが分かった. 建物 *b* については, 周辺の地上構造物や空調機などの屋根上構造物による影響により, 安定した干渉が得られなかったことが原因と考えられる.

4. まとめ

本研究では, 都市域の高層建物の高さを高解像度干渉 SAR 画像と GIS 建物輪郭データを用いて抽出する手法を提案した. 具体的には, TerraSAR-X の

干渉画像を作成して, 干渉縞の理論式から位相差と位相ラップ点の間隔に注目した建物の倒れ込み範囲の抽出を行った. さらに, GIS 建物輪郭を用いて建物の倒れ込み量を決定し, 建物高さを求めた. 最後に本手法の建物高さと Lidar より求めた建物高さを比較検討した.

抽出結果は平均誤差 6.1m であり, 高層建物の高さ推定としては高い精度であった. 一方, 周辺の構造物や建物の形状によって抽出誤差が大きくなることも確認された.

今後は, 周辺の建物立地状況を考慮した手法や, 建物の形状にも留意した手法を考える必要がある. また, 撮影条件が異なる画像を使用することで, 干渉縞の理論値が変動した場合でも本手法の抽出フローが有用であるかを検証する予定である.

謝辞

本研究で用いた TSX 画像と Lidar データは 2012 IEEE Geoscience and Remote Sensing Society Data Fusion Contest より提供させていただいた. ここに謝意を表す.

【参考文献】

- 1) T. Toutin and L. Gray, : State-of-the-art of elevation extraction from satellite SAR data, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume 55, Issue 1, pp. 13–33, 2000.
- 2) W. Liu, F. Yamazaki, : Building height detection from high-resolution TerraSAR-X imagery and GIS data, Proceedings of 2013 Joint Urban Remote Sensing Event, IEEE, Sao Paulo, Brazil, CD-ROM, 33-36, 2013.
- 3) 上本純平・小林達治・佐竹誠・児島正一郎・梅原俊彦・松岡建志・浦塚清峰 : SAR インターフェログラムからの垂直構造物の自動抽出方法, 日本リモートセンシング学会第 56 回学術講演会論文集, pp.139-140, 2014.
- 4) City and County of San Francisco WEB ページ: <https://data.sfgov.org/Facilities-and-Structures/Building-Footprints-Zipped-Shapefile-Format-/jezr-5bxm>