

高解像度 SAR 画像の強度と位相情報を用いた 高層建物の高さ推定

リュウ・ウエン*¹・山崎文雄*¹

Height Estimation for High-rise Buildings from Intensity and Phase Information of
High-resolution SAR Imagery

Wen LIU*¹ and Fumio YAMAZAKI*¹

Abstract

Owing to the remarkable improvements in radar sensors, it is now possible to obtain information regarding a single structure from high-resolution SAR images. In our previous research, we proposed a method for detecting the heights of low-rise buildings automatically using 2D GIS data and a single high-resolution TerraSAR-X intensity image. However, it was difficult to apply this method to high-rise buildings due to their backscattering characteristics. In this study, a new method was developed for estimating the heights of high-rise buildings based on the results from an Interferometric SAR (InSAR) analysis. The potential layover areas were extracted using both amplitude and phase characteristics. First, the proposed method for low-rise buildings was used to extract the layovers from one intensity image. The phase characteristics in the InSAR result were then investigated and used to extract potential layover areas. Finally, heights were estimated based on the layover lengths obtained from both the intensity and phase images. The developed method was tested on two TerraSAR-X image sets of central Tokyo, Japan, in the HighSpot mode. The results were verified by comparison with a digital surface model obtained by stereoscopic photogrammetry. The detected heights were found to be reasonable.

Keywords : TerraSAR-X, interferometric analysis, building footprints, backscattering model

1. はじめに

近年センサ技術の発展により、高解像度の衛星・空撮画像が得られるようになり、これらを用いた1棟単位での建物観測が可能になった。建物高さは重要なインベントリ情報として、都市計画、環境整備や自然災害による被害予測などに用いられている¹⁾²⁾。そのため、リモートセンシング画像からの建物高さの推定は、注目される課題の1つでといえる。建物高さの推定に用いるリモートセンシングデータは、大きく3つに分かれる。1つ目は、光学センサ画像を用いた推定である。複数の光学センサ画像を用いたステレオ測量は、デジタル表面モデル (DSM) を作成することで建物高さが推定できる^{3)~5)}。また、1シーンの高解像度の光学センサ画像から、日影の長さを用いた建物高さの推定に関する研究もある^{6)~8)}。しかし、光学センサは天候に影響されるため、必要な期間内で適切な雲の無い画像が得られないこともある。

2つ目は、合成開口レーダ (SAR) 画像を用いた推定であ

る。SAR センサは昼夜と天候に依存せずに撮影できるため、光学センサより汎用性が高い。SAR センサの後方散乱モデルより、1シーンの画像から建物の高さの推定が可能である。Franceschetti ら⁹⁾ は建物のコーナー反射における反射強度から建物高さを推定するモデルを構築した。Guida ら¹⁰⁾ は反射強度とジオメトリック特徴を含めたモデルを作成し、シミュレーション画像における建物の情報を推定した。しかしこれらの手法は、建物の材質などの事前情報が必要である。また、複数の SAR 画像から建物高さを推定する手法も研究されている。SAR 画像を用いたステレオ測量のほか、干渉処理でも DSM を作成でき、建物高さの推定に用いられる^{11)~13)}。しかし、建物が密集する都市部では、倒れ込みとレーダ影の影響で、アンラップ処理がうまく行かないことが多い。また、光学センサ画像と SAR 画像を併用して高さを推定する研究も幾つかある⁵⁾¹⁰⁾¹⁴⁾¹⁵⁾。

3つ目は、Lidar データを用いた推定である。Lidar が観測した点群データからは、建物の高さ以外に、形状などの情報を高精度で得ることができる¹⁶⁾¹⁷⁾。しかし、Lidar 観

(2017. 8. 28 受付, 2017. 12. 22 改訂受理)

*¹ 千葉大学大学院工学研究院

〒263-8533 千葉市稲毛区弥生町 1-33

*¹ Graduate School of Engineering, Chiba University, 1-33 Yayoi-cho Inage-ku, Chiba 263-8522, Japan

測は高価であり、限られた国でしか行われていない。

著者らは、1 シーンの高解像度 SAR 強度画像から後方散乱係数が高い倒れ込み範囲を抽出し、低層建物の高さ推定方法を提案した。提案手法はサンフランシスコやバレーの沿岸部を撮影した TerraSAR-X (TSX) 画像に適用し、建物高さを高精度に推定することができた¹⁸⁾¹⁹⁾。しかし、高層建物の場合、壁からの反射が低層建物より低く、さらに倒れ込み長さが建物高さに比例するため、別の建物と重なることが多い。そのため SAR の後方散乱強度のみからの倒れ込み範囲の抽出は難しい。そこで本研究では、倒れ込み範囲における安定した干渉位相に注目した²⁰⁾。干渉位相の勾配と干渉縞の長さを用いて、倒れ込み範囲の抽出を試みた。抽出された倒れ込み範囲の長さから、高層建物の高さを推定する。本研究では、2008 年 2 月と 2010 年 2 月に撮影された 4 枚の高解像度 TSX 画像に提案手法を適用し、東京臨海部にある高層建物の高さ推定を行った。強度画像のみ、干渉位相のみ、およびそれらの組み合わせによる 3 つの手法により、それぞれ建物の高さ推定を行う。航空写真測量から得られた標高モデルを対象建物高さの正解として、推定手法の有効性と精度を検証する。

2. 対象地域と使用データ

本研究では、東京の臨海地域を対象地域とした。臨海部の埋立地では、高層建物が密集せずに独立して建っているため、周辺環境による SAR 画像への影響が少ない。本研究では、2008 年と 2010 年に撮影した 2 ペア計 4 枚の TSX 画像を用いた。すべての画像は、下降軌道から High-resolution SpotLight (HS) モードにより HH 偏波で観測されたものである。2008 年 2 月 14 日と 3 月 17 日に撮影された画像の入射角は 42.2°、2010 年 2 月 3 日と 14 日に撮影された画像の入射角は 25.7° である。各画像の撮影条件を Table 1 に、また撮影範囲を Fig. 1 に示す。画像の共通部分のうち、中央区月島から江東区東雲にかけた約 4.7km² の範囲を対象地域とし、Fig. 1 に白枠で示す。これらの SAR 画像は Single Look Slant Range Complex (SSC) データとして提供されている。

SSC データから後方散乱係数画像と位相画像を得るために、ENVI_SARscape 5.4 を用いて干渉処理を行った。解像度を優先し、進行方向と観測方向ともに 1 ルックでレンジ圧縮した。観測角の違いより、2008 年の画像における観測方向 (スラントレンジ) の解像度は 1.75 m、2010 年の画像は 2.71 m であった。シングルルック処理後、4 枚の画像はいずれも観測方向に対して 0.91 m/pixel にリサンプリングされた。2008 年 2 月 14 日と 2010 年 2 月 3 日に撮影された画像をマスターとし、干渉処理を行った。2008 年のペアにおける垂直軌道間距離は 151.1 m、2010 年のペアは 86.0 m である。2 つのペアは、ともに撮影時期が近くかつ軌道間距離が短いので、干渉性の高い画像が得られた。地形縞を除去するために、国土地理院の基盤地図情報サービ

Table 1 Acquisition conditions of four TerraSAR-X images taken from two different paths

Date	2008		2010	
	02/14	03/07	02/03	02/14
Incident angle [°]	42.2		25.7	
Heading angle [°]	189.6		190.6	
Slant range resolution (R×A) [m]	1.75 × 1.10		2.71 × 1.10	
Slant range spacing (R×A) [m]	0.91 × 0.87		0.91 × 0.86	
Baseline distance [m]	151.1		86.0	
2π ambiguity height [m]	46.3		44.0	
Slope of phase angle: Δφ [rad/pixel]	0.17		0.14	
Length of fringes: T [pixel]	38		44	

ス²¹⁾ よりダウンロードしたデジタル標高モデル (DEM) を用いた。この DEM は、2009 年の航空レーザー測量をもとに作成された 5 m メッシュのデータである。また、位相誤差を低減するために Goldstein フィルタを使用した²²⁾。

推定手法の精度を検証するために、株式会社パスコから提供されたデジタル表面モデル (DSM) を用いた。この DSM データは、2010 年に撮影された航空画像の立体視より得られたもので、0.5 m/pixel にリサンプリングされており、垂直方向の誤差は 1 m 以内である。干渉処理に用いた DEM データを 0.5 m にリサンプリングし、DSM データとの差分を算出したものを Fig. 2 に示す。これより、対象地域内に複数の高層建物が独立して立っていることが確認できた。本研究は月島と豊洲に位置する計 42 棟の高さ 50 m 以上の建物を対象とする。基盤地図情報サービスからダウンロードした建物輪郭を用いて、DSM から建物高さの正解データを作成した。建物輪郭内に、最も多くのピクセルが占める高度をその建物の高さとし、対象となる建物の詳細情報を Table 2 に示す。

3. 推定手法

本研究では、高解像度 SAR データの強度画像と位相画像の両方を用いた高層建物の高さ推定法を提案する。提案手法のフローチャートを Fig. 3 に示す。1 つの干渉ペア画像を用いて、マスター画像に輝度補正を行い、後方散乱係数 (σ^0) に変換する²³⁾。後方散乱係数の閾値より、倒れ込み範囲の候補域を抽出する。一方、干渉解析で得られた位相画像に対して、位相勾配 ($\Delta\phi$) と干渉縞長さ (T) の閾値を適用して、倒れ込み範囲の候補域を抽出する。強度画像と位相画像から抽出された倒れ込みの候補域を建物輪郭データと重ね合わせることで、倒れ込みの長さを推定し建



Fig. 1 Coverage of four TerraSAR-X data used in this study and the study area (white square) in the central part of Tokyo, Japan.

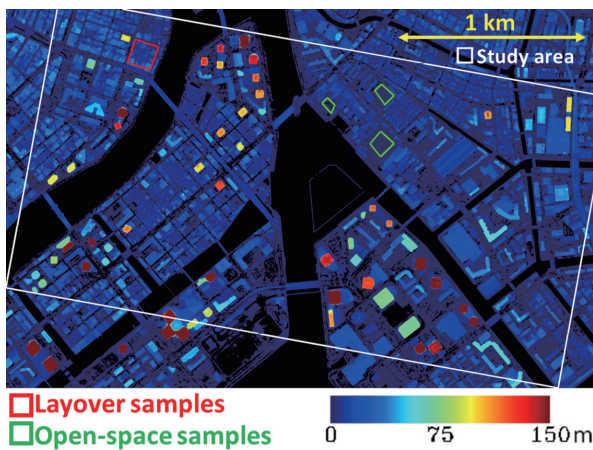


Fig. 2 Building heights calculated from the digital surface model (DSM) provided by PASCO Crop. and the digital elevation model (DEM) downloaded from Base Map Information web-site of GSI²¹⁾.

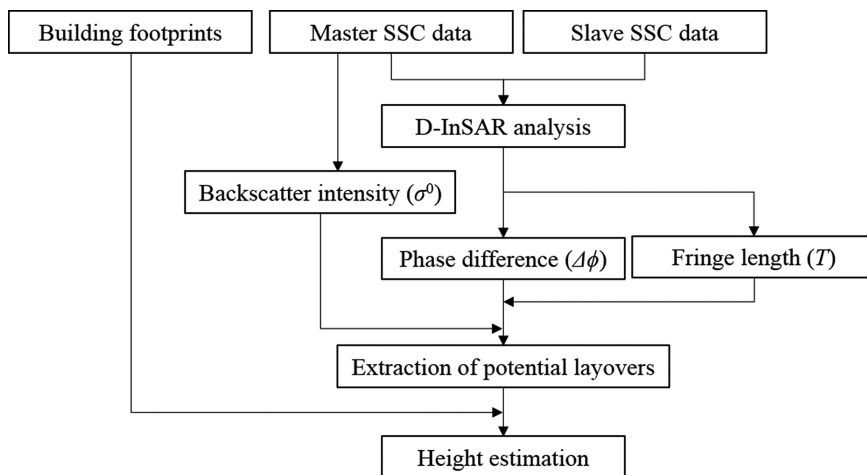


Fig. 3 Flowchart of the proposed method to estimate building heights for high-rise buildings

Table 2 Detailed information of the 42 target buildings and their estimated heights from the TSX images

Building No.	Height from DSM h_D [m]	Area [m ²]	Length in Azimuth [m]	Height from TSX h_T [m]			
				2008 pair	$h_T - h_D$	2010 pair	$h_T - h_D$
1	163.6	2181.0	57.4	23.4	-140.2	13.1	-150.5
2	59.8	2561.8	104.4	57.8	-2.0	58.6	-1.3
3	60.1	2092.3	65.3	3.7	-56.4	9.1	-51.0
4	146.8	3021.8	77.4	159.9	13.1	15.2	-131.6
5	163.6	1636.3	42.6	116.9	-46.7	10.1	-153.5
6	86.9	1485.8	50.5	91.0	4.1	27.3	-59.6
7	54.8	479.3	31.3	6.2	-48.6	3.0	-51.8
8	55.0	886.3	46.1	55.4	0.4	12.1	-42.8
9	164.9	1618.3	41.8	28.3	-136.6	6.1	-158.8
10	51.2	1067.0	52.2	44.3	-6.9	8.1	-43.1
11	176.4	4002.3	77.4	177.1	0.8	40.4	-136.0
12	76.4	1259.8	46.1	19.7	-56.7	10.1	-66.3
13	77.5	1085.8	50.5	76.3	-1.2	3.0	-74.5
14	56.8	1246.5	46.1	4.9	-51.9	57.6	0.8
15	164.6	1966.0	54.8	175.9	11.3	162.6	-2.0
16	118.6	3389.3	60.9	120.5	1.9	130.3	11.7
17	80.8	1184.0	40.0	137.8	57.0	287.9	207.1
18	58.7	1217.3	44.4	59.0	0.3	16.2	-42.5
19	61.0	2141.8	63.5	57.8	-3.1	68.7	7.7
20	139.9	2962.3	76.6	25.8	-114.1	20.2	-119.7
21	152.8	1727.0	62.6	178.4	25.6	58.6	-94.2
22	60.9	1872.8	60.9	68.9	8.0	62.6	1.7
23	74.4	1519.0	60.9	72.6	-1.9	73.7	-0.7
24	62.8	3660.0	90.5	70.1	7.3	68.7	5.9
25	110.8	1217.3	47.9	111.9	1.1	55.6	-55.2
26	119.7	1523.3	44.4	108.2	-11.4	34.3	-85.3
27	74.9	627.0	35.7	82.4	7.5	21.2	-53.7
28	115.2	1523.0	43.5	110.7	-4.5	11.1	-104.1
29	122.7	1702.3	57.4	139.0	16.3	14.1	-108.6
30	99.1	1583.5	62.6	99.6	0.5	8.1	-91.0
31	90.4	1100.3	44.4	111.9	21.6	9.1	-81.3
32	113.9	1316.5	46.1	55.4	-58.5	14.1	-99.8
33	56.1	862.8	33.9	123.0	66.9	24.2	-31.9
34	105.4	1320.5	52.2	98.4	-7.0	9.1	-96.3
35	109.6	1574.3	45.2	108.2	-1.4	113.1	3.5
36	117.9	1330.3	45.2	119.3	1.4	124.2	6.3
37	130.9	1276.0	43.5	3.7	-127.2	15.2	-115.7
38	135.0	1942.5	53.9	139.0	4.0	142.4	7.4
39	109.4	1233.0	42.6	116.9	7.4	106.1	-3.4
40	177.2	2770.8	72.2	125.5	-51.7	180.8	3.6
41	138.5	1218.8	43.5	132.8	-5.6	20.2	-118.3
42	107.3	1608.3	76.6	109.5	2.2	26.3	-81.0

物高さに変換する。

高層建物の SAR 強度画像と位相画像における後方モデルを Fig. 4 に示す。低層建物の場合、地面 (I)、壁 (III) と屋根 (IV) からの反射が重なることが多く、倒れ込み範囲内に強い後方散乱係数を示す。そのため、著者ら¹⁸⁾ は強度画像の閾値で倒れ込み範囲を抽出して、高さを推定する

手法を提案した。しかし、Fig. 4 (a) に示すように、高層建物の場合は地面 (I) と壁 (III) のみからの反射範囲が多い。また、低層建物はコンクリートや外装材などの外壁を有するのに対し、高層オフィスビルの外壁はカーテンウォールとガラスを使用することが多い。ガラスは外装材やコンクリート壁よりマイクロ波を透過しやすいため、高層建物の

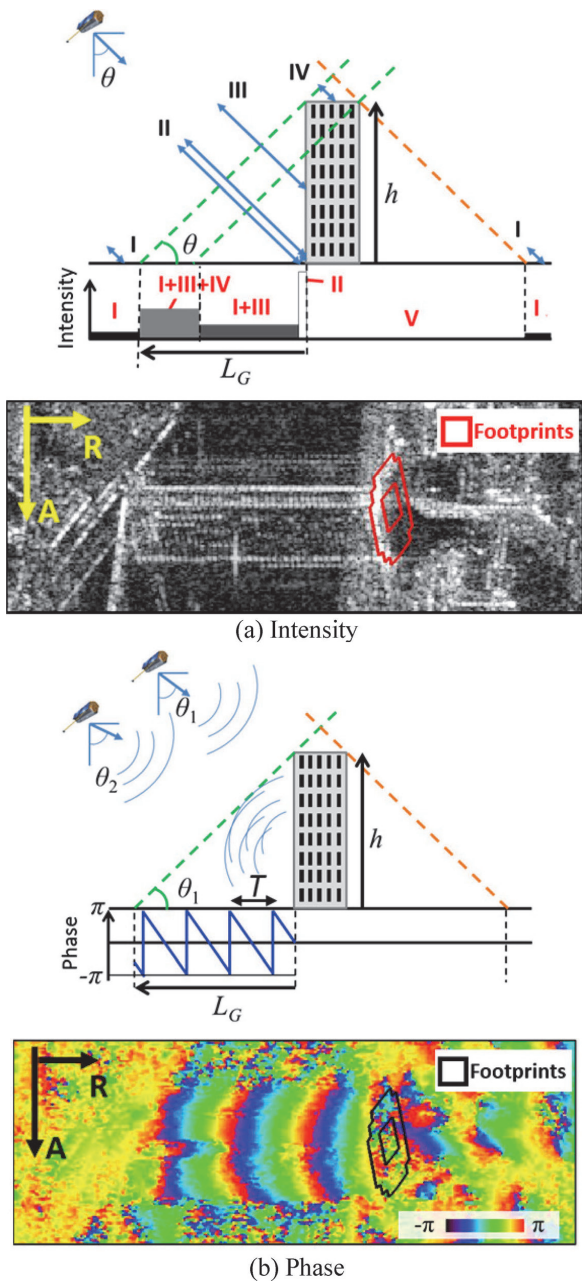
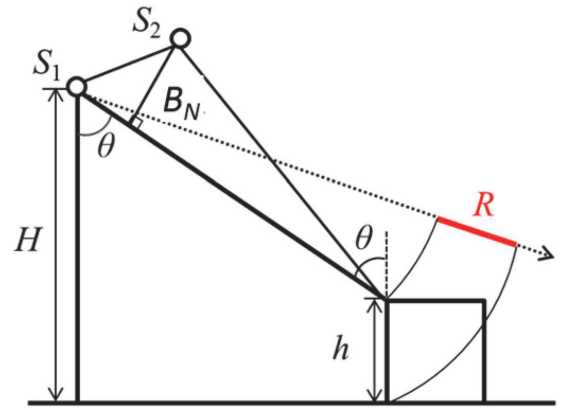


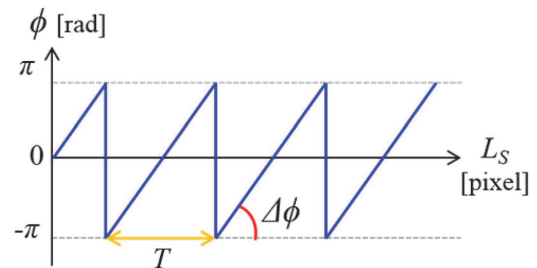
Fig. 4 Backscattering model for a high-rise building in the intensity (a) and the phase (b) images.

壁からの反射は、低層建物の壁からのものより弱い。その一例を Fig. 4 (a) に示す。建物からの反射が水面に倒れ込み、地面よりも低い後方散乱係数を示している。そのため、従来提案した後方散乱係数の閾値による抽出手法は適用しにくい結果となる。

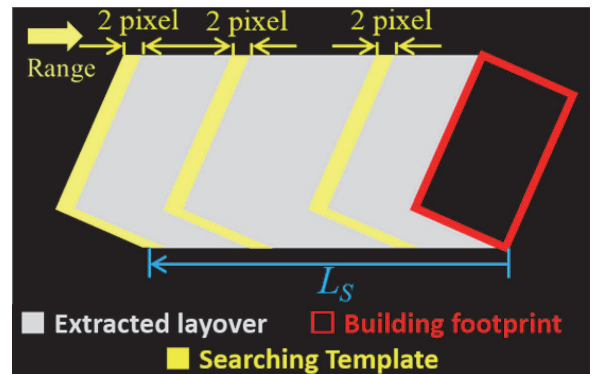
一方、Fig. 4 (b) に示した位相画像では、壁からの反射は弱いものの、位相が周辺に比べて非常に安定している。そこで、位相特徴量を用いて、高層建物の倒れ込み範囲を抽出する手法を提案する。まず、フラットアース補正と地形補正を行った干渉画像において、建物高さ h と干渉位相 ϕ



(a) Geometrical characteristics



(b) Phase characteristics



(c) Searching scheme of the layover length

Fig. 5 Schematic images of (a) geometrical characteristics for a building in a slant range SAR image, (b) phase characteristics in a continuous theoretical phase, and (c) the template searching method in a layover area.

は以下の式で関係づけられる²⁰⁾。

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

ここで、 B_{\perp} は垂直軌道間距離、 λ はマイクロ波の波長、 H はマスター画像の衛星高度、 θ は入射角である。

Fig. 5 (a) に示すように、高さ h の建物のスラントレンジ画像における倒れ込み長さ L_S は式 (2) で表される。式 (1) と (2) より、Fig. 5 (b) に示すスラントレンジ画像における連続位相の勾配 $\Delta\phi$ の理論値は式 (3) で表される。また、位相は π を超えると $-\pi$ に反転する。2 つ反転点の間隔、

すなわち干渉縞の長さ T は式 (4) で表される。式 (3) と式 (4) より、連続位相の特徴量である $\Delta\phi$ と T は撮影条件で定まる定数である。本研究では、この 2 つの特徴量を用いて、位相画像から倒れ込み範囲の抽出を行う。

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

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

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

スラントレンジ画像から抽出された倒れ込み範囲と建物輪郭データを用いて、倒れ込み長さ L_s を求める。倒れ込み長さの推定は、Fig. 5 (c) に示すテンプレート検索法により行う。建物輪郭に基づき、レンジ方向に 2 ピクセル幅のテンプレートを作成する。作成されたテンプレートをセンサ方向に向かって 1 ピクセルずつ移動しながら、テンプレート内における倒れ込みの割合 (p) を求める。 p が閾値より小さくなると、検索を終了する。そのときの移動距離が倒れ込み長さ L_s である。得られた L_s を用いて、式 (1) より建物高さ h を求める。

4. 建物高さの推定と閾値の検討

2008 年と 2010 年の SAR データペアを用いて、それぞれ建物高さの推定を行った。マスターとした 2008 年 2 月 14 日と 2010 年 2 月 3 日の後方散乱係数画像を Fig. 6 (a-b) に示す。入射角の違いによってレンジ方向の分解能が異なり、同じ対象地域では、2008 年の画像のスラントレンジ方向で 2002 m あるに対し、2010 年の画像では 1274 m と短い。撮影軌道の違いより、同じ解像度の観測 (アジマス) 方向においても、ピクセル数で差がある。対象となる 42 棟の高層建物の輪郭をスラントレンジ画像に投影して、後方散乱係数画像上に黄色の輪郭で示す。倒れ込み範囲を抽出するために、後方散乱係数の閾値を検討した。Fig. 2 の赤枠で囲む低層建物が密集するエリアを倒れ込み範囲の教師データとし、緑枠で囲む公園と空き地を地面の教師データと選定した。どちらの教師データも、総面積は約 17000 m² である。教師データの範囲を各ペアの撮影条件に基づき、スラントレンジ画像に投影したのも Fig. 6 (a-b) の中に示す。2008 年の後方散乱係数における倒れ込み範囲は、平均値が -2.74 dB、標準偏差が 8.19 dB である。一方、空き地の平均は -8.42 dB、標準偏差は 5.40 dB である。2 つの教師データにおける累積値の差が最も大きくなる閾値 (-3.5 dB) を用いて、強度画像より倒れ込み範囲の抽出を行った。2010 年の画像においても、同様に教師データの累積値の差が最も大きくなる閾値を求めた。この場合、倒れ込み範囲の教師データについて平均値は -1.56 dB、標準偏

差は 8.23 dB であり、空き地では平均値は -7.37 dB、標準偏差は 4.98 dB であった。入射角が小さいため、2008 年の画像に比べ後方散乱係数の値が大きい。同様のやり方で、倒れ込み範囲の閾値を -1.2 dB と定めた。2 枚のマスター強度画像から求められた閾値以上の部分を倒れ込みの候補域として抽出した。また、候補域の中で 64 ピクセル (約 50 m²) 以下の大きさの範囲をノイズとして除去した。

フラットアース補正と地形補正を行った干渉位相画像を Fig. 6 (c-d) に示す。高層建物の倒れ込み範囲内において、安定した連続位相を確認することができる。2008 年の干渉ペアの撮影条件より、連続している位相の勾配 ($\Delta\phi$) は 0.17 、干渉縞の長さ (T) は 38 ピクセルである。一方、2010 年の干渉ペアにおいては、連続位相の勾配は 0.14 、干渉縞の長さは 44 ピクセルである。まず、位相画像を用いて、レンジ方向における位相差を求めた。位相反転点の理論値は -2π であり、位相差が -5.0 rad 以下のピクセルを、位相反転点として抽出する。また、抽出された反転点のうち、スペクトルノイズや水域におけるランダムなものがある。これらの誤抽出を減少するため、隣接する反転点が 3 つ以下であればノイズとして除去する。得られた反転点のレンジ方向における距離が、理論値の $\pm 25\%$ 以内であれば、有効な干渉縞として補間する。2008 年の干渉ペアでは、有効な干渉縞長さが 28 から 48 ピクセル、2010 年のペアでは 33 から 55 ピクセルである。また、抽出された反転点に位相勾配の理論値を与えて、位相勾配による倒れ込み範囲の抽出を行う。位相勾配の閾値は理論値の ± 0.1 と設定した。2008 年の干渉ペアの場合、位相勾配が 0.07 rad/pixel と 0.27 rad/pixel の間であれば、連続位相として抽出する。2010 年のペアの場合、位相勾配の閾値は 0.04 rad/pixel から 0.24 rad/pixel までである。干渉縞と位相勾配の閾値は Fig. 6 (a-b) 上の点線で囲む 4 棟の建物を参照に決定したものであるが、サンフランシスコにおける建物高さの推定¹⁹⁾ に使用した閾値と近似したため、ほかの TSX 干渉画像にも適用できると考えられる。位相勾配の閾値で抽出されたエリアのうち、64 ピクセル (50 m²) 以下の大きさの候補域をノイズとして除去した。干渉縞長さと位相勾配の閾値より抽出された範囲とを合わせて、位相画像における建物の倒れ込みの候補域とする。

Fig. 6 (a) 上の点線で囲む 4 棟の建物を例とし、後方散乱係数より抽出された倒れ込みの候補域を Fig. 7 (a) に示す。建物 c と d の倒れ込み範囲がほぼ抽出されたに対し、建物 a と b の一部が抽出されなかった。位相画像から抽出された位相反転点と補間された干渉縞を Fig. 7 (b) に示す。建物の倒れ込み範囲以外にも、位相が反転する箇所が多数抽出された。しかし、そのうち距離が干渉縞長さの閾値を満たすものの多くは倒れ込み範囲内にある。位相勾配の閾値より抽出されたエリアを Fig. 7 (c) に示すが、位相反転点に勾配の理論値を与えたため、連続した範囲を抽出することができた。Fig. 7 (a) に示す建物 a と b の抽出範囲と比べて、後方散乱係数が低い領域を位相情報より抽出することがで

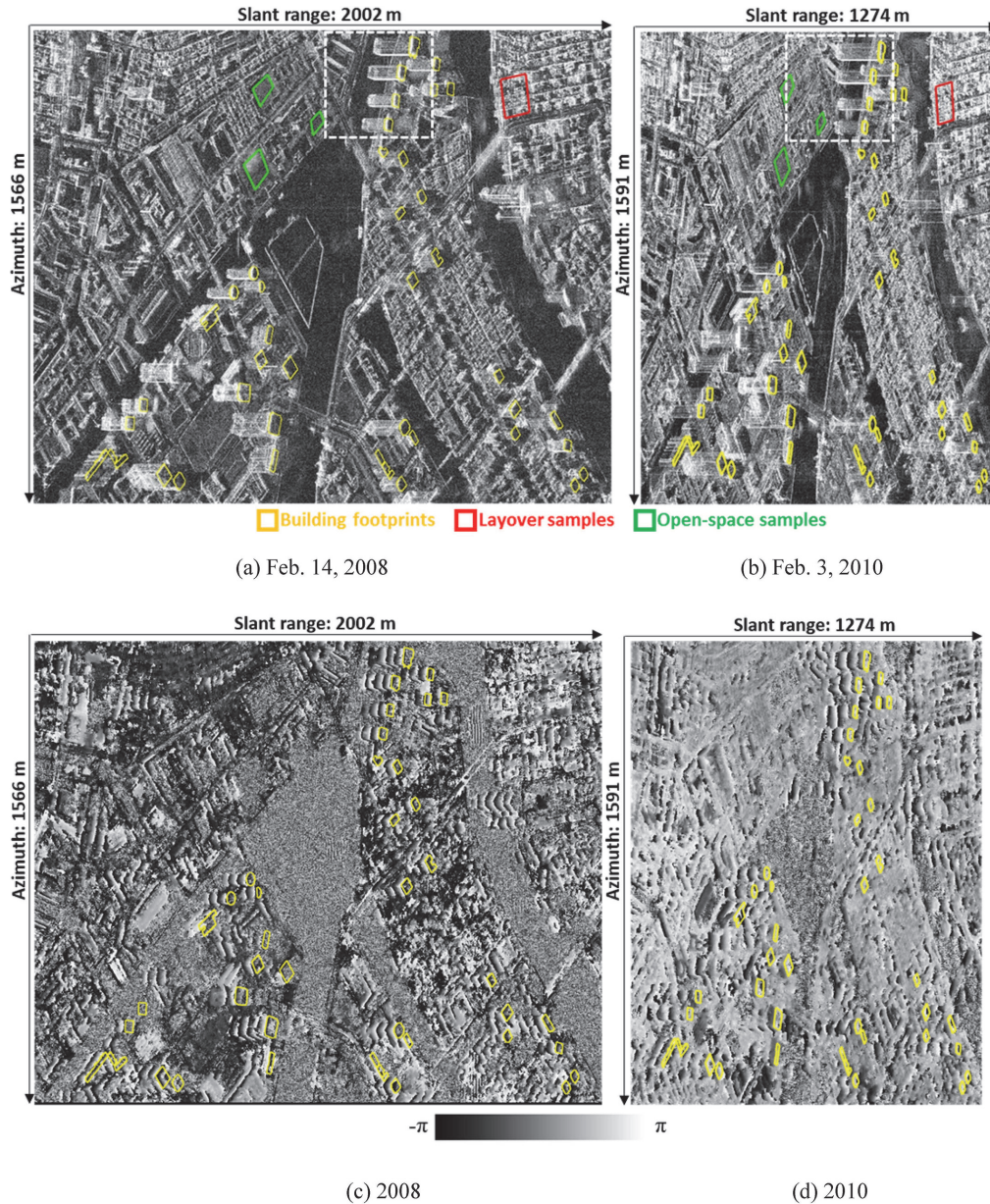


Fig. 6 Backscattering intensity images (a-b) and the phase images obtained by D-InSAR analysis (c-d) in the study area. All images are shown in the slant range.

きた。Fig. 7 (b) と (c) に示す抽出結果を合わせて、位相画像による倒れ込みの候補域とする。

倒れ込みの候補域を抽出したあと、建物輪郭を用いて倒れ込み長さ L_S の推定を行う。まず、強度画像と位相画像の候補域から、それぞれ長さの推定を行った。作成されたテンプレート内における倒れ込みの割合 (p) の閾値は、Fig. 7 に示す 4 棟の建物を用いて検討した。まず、2008 年と 2010 年の強度画像から、岩崎ら⁸⁾ と同様に目視より倒れ込み長さを測定した。得られた長さを建物高さに変換したものを Table 3 に示す。DSM と DEM から作成された正解データと比較すると、目視では SAR 強度画像から高精度の結果が得られる。次に、テンプレートを建物輪郭からニアレンジ方向に向かって移動しながら、後方散乱係数より

抽出された候補域の p を算出する。移動距離が目視で推定された長さになったときの p を書き出す。4 棟建物に対して、2008 年と 2010 年における 8 つの割合を検討したところ、 p を 30% に設定したときに最も妥当な長さを得ることができた。テンプレート内における倒れ込み候補域の割合が 30% を下回った時点でテンプレートの移動を終了し、そのときの移動距離を倒れ込みの長さとする。

2008 年の強度画像から得られた倒れ込み範囲の推定結果を Fig. 7 (d) に枠で示す。建物 b, c, d の倒れ込み範囲がほぼ抽出することができた。建物 b では、一部壁の反射が弱いところが候補域として抽出できなかったが、割合を 30% に下回らなかったため抽出できた。一方、建物 a は壁の反射が弱いため、水面と重なる倒れ込み範囲がほとんど抽

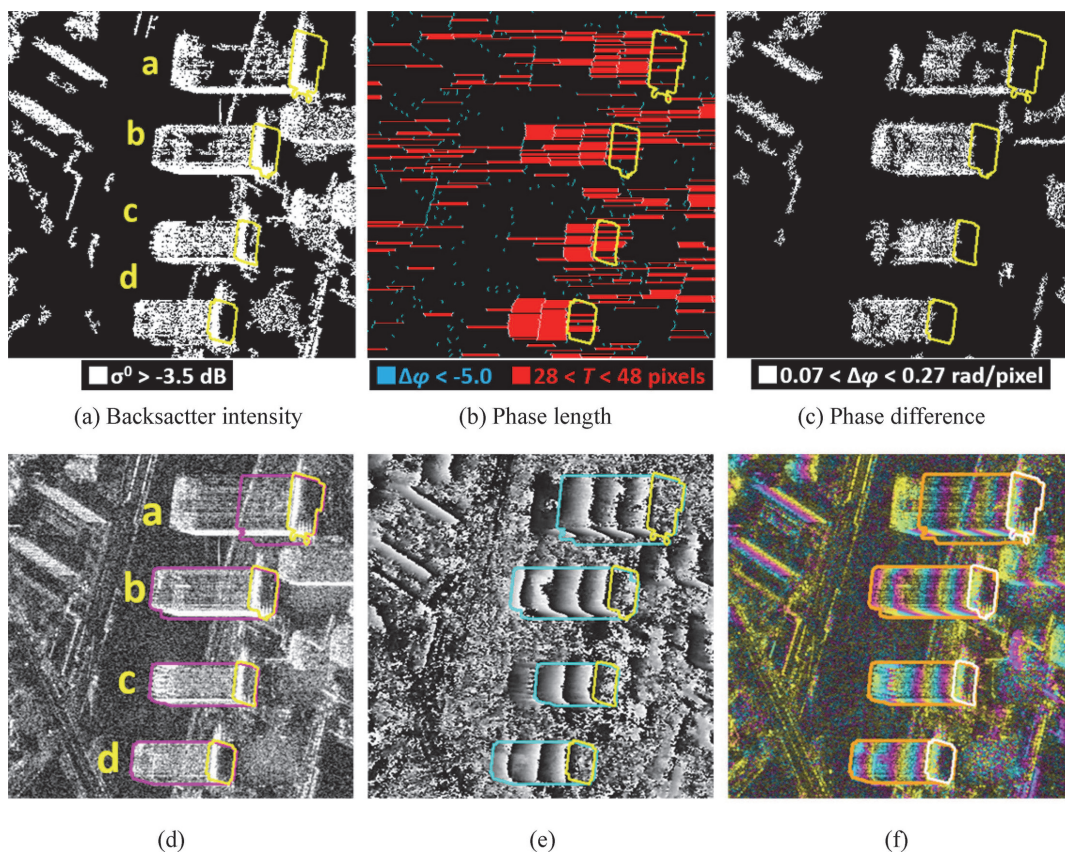


Fig. 7 Extracted potential layover areas using the threshold values of backscattering intensity σ^0 (a), phase length T (b) and phase difference $\Delta\phi$ (c); estimated layover outlines from backscattering intensity (d), phase characteristics (e) and their combination (f) in the data set of 2008.

Table 3 Accuracy assessment for the four sample buildings

Heights [m]		a	b	c	d	RSME
Reference [m]		177.2	135.0	117.9	109.6	[m]
2008	Visual	177.1	132.8	116.2	109.5	1.4
	Intensity	72.6	139.0	119.3	108.2	52.4
	Phase	129.2	139.0	83.6	108.2	29.6
	Combination	125.5	139.0	119.3	108.2	26.0
2010	Visual	175.0	135.7	117.8	110.1	1.18
	Intensity	12.1	44.4	26.3	19.2	114.1
	Phase	16.2	19.2	17.2	111.1	111.2
	Combination	180.8	142.4	124.2	113.1	3.5

出されていなかった。そのため、推定された長さは実際のものより短い。割合 p の閾値の検討は強度画像のみで行ったが、位相画像にも同じ閾値を適用した。2008 年の位相画像から得られた倒れ込み範囲の推定結果を Fig. 7 (e) に枠で示す。建物 b と d の倒れ込み範囲における連続位相が抽

出できたため、強度画像と近い長さが推定された。一方、建物 a と c では、屋根と壁の倒れ込みが重なるところにおいて位相の乱れがあるため、倒れ込みの長さは実際より短く推定された。レーダ方向における建物の幅が大きいほど屋根による位相の乱れ範囲が大きく、高さを過小推定される。建物 a においては、強度画像からのものよりは良い推定結果が得られた。

2010 年の強度画像から得られた倒れ込み範囲の推定結果を Fig. 8(a) に枠で示す。入射角が小さいため、後方散乱係数のバラツキが大きい。4 棟建物の曲がり角、足元と屋根の反射域しか抽出できなかった。そのため、Fig. 8(d) に示す強度から推定された倒れ込み範囲は、実際の範囲より小さく、水面の反射と重なる部分はほとんど抽出できなかった。一方、位相画像では、水面と重なる部分の位相が安定して抽出できたが、地面と重なる部分は地上物の影響で位相が乱れて抽出されなかった。位相画像から推定された倒れ込み範囲を Fig. 8 (e) に示す。抽出範囲が不連続であったため、建物 a, b, c がともに短く推定された。建物 d のみ実際の高さに近い結果が得られた。

以上の検討より、強度と位相の単独情報からでは、高層建物の高さ推定が難しいことがわかった。しかし、Fig. 7-8 に示す例のとおり、強度画像と位相画像からは異なる

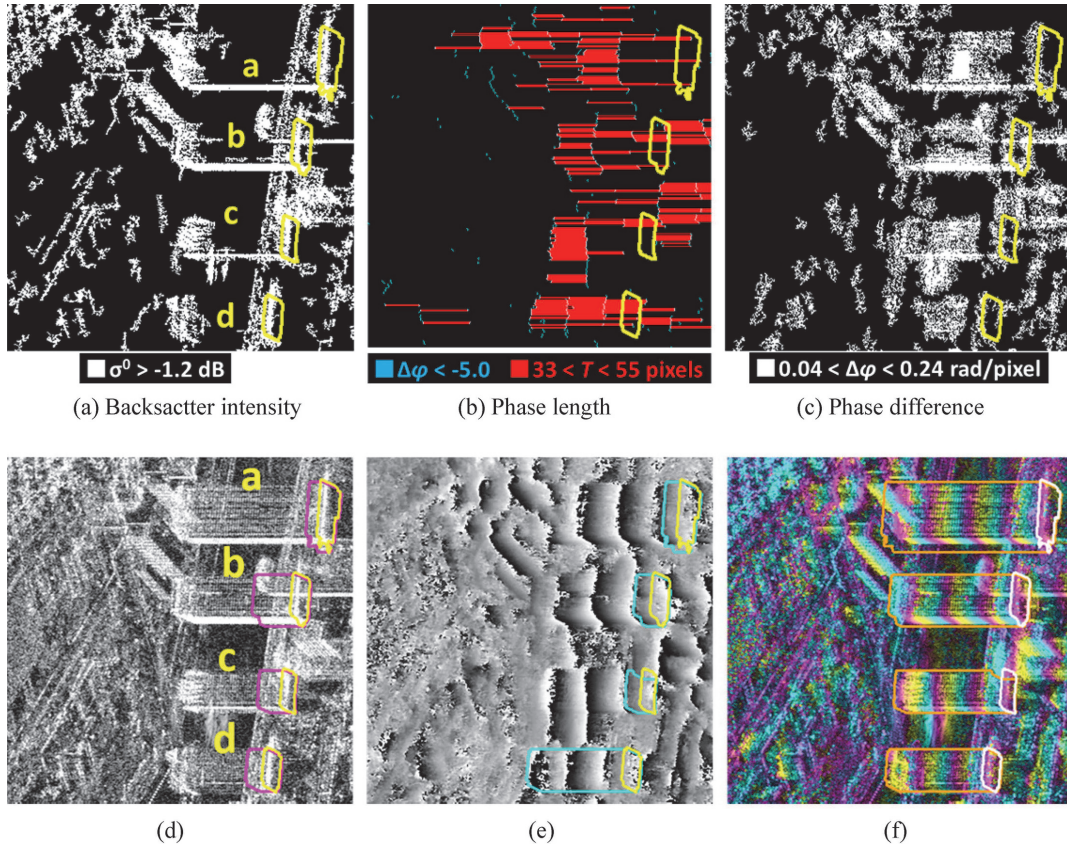


Fig. 8 Extracted potential layover areas using the threshold values of backscattering intensity σ^0 (a), phase length T (b) and phase difference $\Delta\phi$ (c); estimated layover outlines from backscattering intensity (d), phase characteristics (e) and their combination (f) in the data set of 2010.

候補域を抽出されたため、これらを組み合わせることによって、より完全な倒れ込み範囲が得られると考えた。そこで、2つの候補域を合わせて推定を行った。単独での推定では、 p の閾値を30%と設定したが、どちらの例でも過少推定する傾向が見られた。そのため、2つの候補域を足し合わせるときの閾値は30%から60%の間で与えることにした。本研究では、2008年の干渉ペアを使って、40%、45%と50%の3つの閾値を試みた。42棟の対象建物に対して、強度画像と位相画像の両方から得られた候補域を用いて、倒れ込み範囲の推定を行った。3つの閾値で得られた結果を高さに変換したものをFig. 9に示す。縦軸にDSMとDEMから得られた正解高さを示す。3つの結果から0を通す近似直線をそれぞれ求めた。近似直線のうち、傾きが最も1に近いのは閾値が45%のときであった。閾値が40%の場合、過大推定の傾向があり、傾きは0.93であった。一方、閾値が50%の場合、近似直線の傾きは1.02であった。以上の結果より、強度と位相を組み合わせると、 p の閾値を45%と設定することにした。 p の閾値は倒れ込みの候補域の抽出に影響される。複雑な環境や厳しい閾値で候補域を抽出した場合、 p を小さく設定する。一方、単純な環境や緩い閾値で候補域を抽出した場合は大きく設定する。そのため、対象地域や画像の撮影条件によって検討す

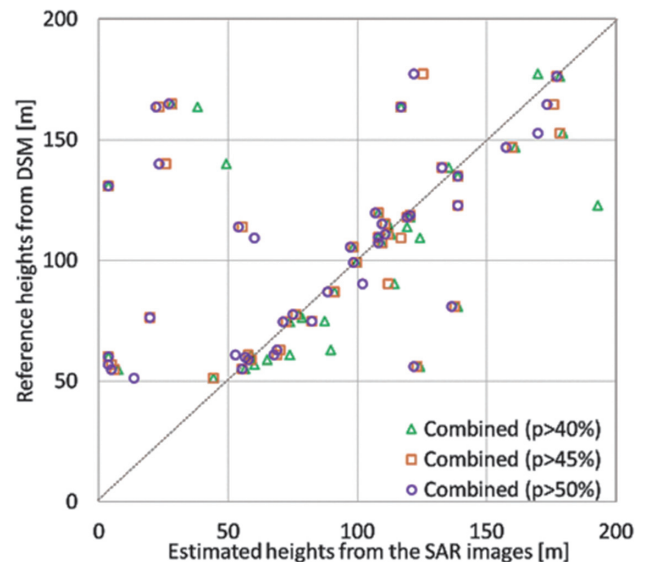


Fig. 9 Comparison of the estimated heights using the different p values for the combined layovers from the data set of 2008 and the reference heights from the DSM and DEM data.

る必要がある。

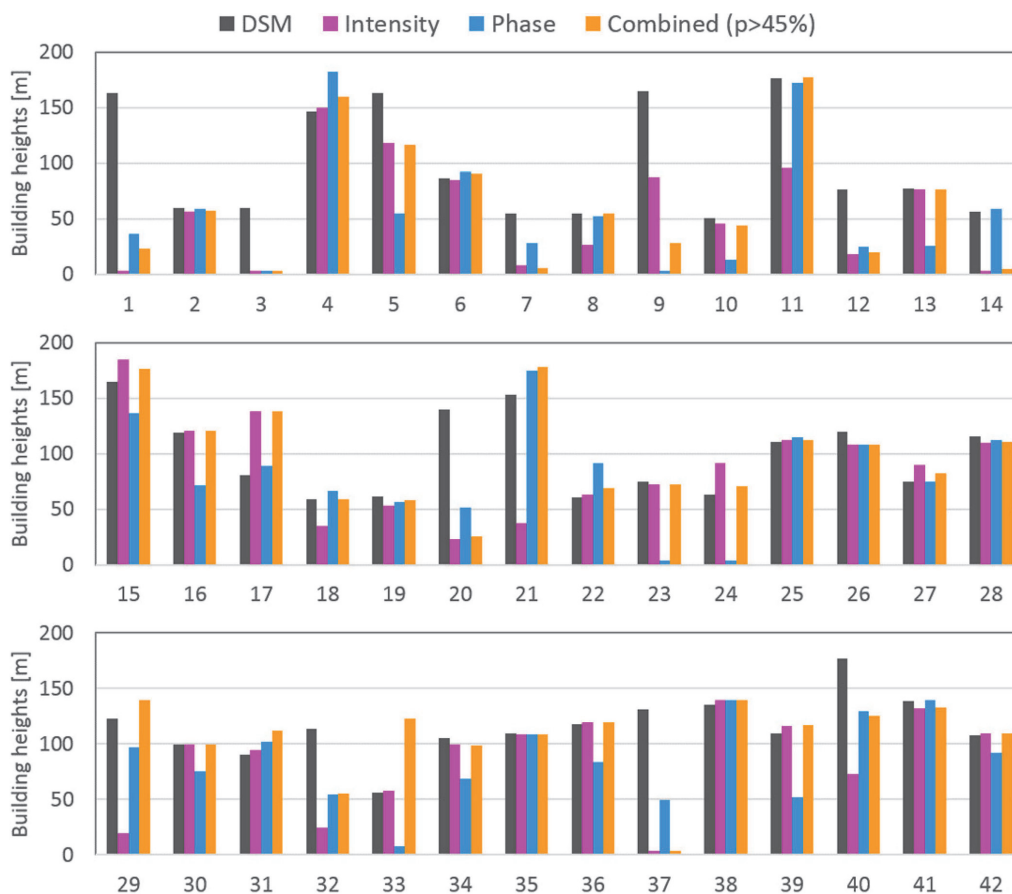


Fig. 10 Comparison of the estimated heights obtained by the three different methods for the SAR data set of 2008 and the reference heights.

例となった4棟建物から推定された倒れ込み範囲を Fig. 7-8 (f) に示す。2008 年の干渉ペアでは、強度のみでも良い推定結果が得られたが、推定できなかった建物 a の倒れ込み範囲が位相の結果により修正された。しかし、まだ実際の範囲よりは短かった。2010 年の干渉ペアでは、建物 d のみが位相画像から高さを推定できたが、強度と組み合わせることで4棟ともに推定することができた。強度、位相、両方の推定結果から得られた高さを Table 3 に示す。4つの手法で得られた高さを比較すると、目視による推定は最も精度が高かった。二乗平均平方根誤差 (RSME) がわずか 1 m であった。2008 年の干渉ペアでは、建物 a の弱い反射強度より位相を用いた推定の方が良い結果が得られた。さらに、強度と位相の組み合わせにより、建物 c が正しく推定できたため、さらなる誤差の減少を図ることができた。2010 年の干渉ペアでは、強度と位相の単独では、どちらも高さの推定ができなかったが、両者の組み合わせにより倒れ込みの候補域が補完し、RSME が 4 m の精度で高さ推定が可能となり、提案手法の有効性を示すことができた。

5. 推定結果とその評価

前章で検討したパラメータを 2008 年と 2010 年の画像に

適用し、対象とした高さ 50 m 以上の 42 棟の建物の高さを推定した。それらの結果を Fig. 10-11 に示す。また、強度と位相を併用した推定結果を Table 2 に示す。2008 年の強度画像からは、誤差 5 m 以内に推定された建物が 15 棟、誤差 10 m 以内が 21 棟、誤差 20 m 以内が 24 棟であった。2008 年の位相画像からは、誤差 5 m 以内に推定された建物が 11 棟、誤差 10 m 以内が 14 棟、誤差 20 m 以内が 17 棟であった。42 棟のうち、強度から誤差 20 m 以内に推定できたが、位相から推定できなかったものが 12 棟であった。一方、位相のみで推定できたものが 5 棟であった。組み合わせより推定された高さでは、5 m 誤差以内が 16 棟、10 m 誤差以内が 23 棟、20 m 誤差以内が 27 棟であった。誤差 10 m 以内に推定された建物高さの RSME は 4.4 m、誤差 20 m 以内のもの RSME は 6.5 m である。強度と位相を組み合わせることで、建物高さの推定精度は、単独のものによる結果より向上した。

2010 年の強度画像からは、誤差 20 m 以内推定できた建物が 3 棟のみであった。位相画像から、誤差 10 m 以内のものが 4 棟、誤差 20 m 以内のものが 5 棟であった。どちらの画像でも推定できた建物は 22 番のみであった。一方、2つの抽出結果を組み合わせることで、誤差 5 m 以内のものが 8 棟、誤差 10 m 以内が 12 棟、誤差 20 m 以内が 13 棟

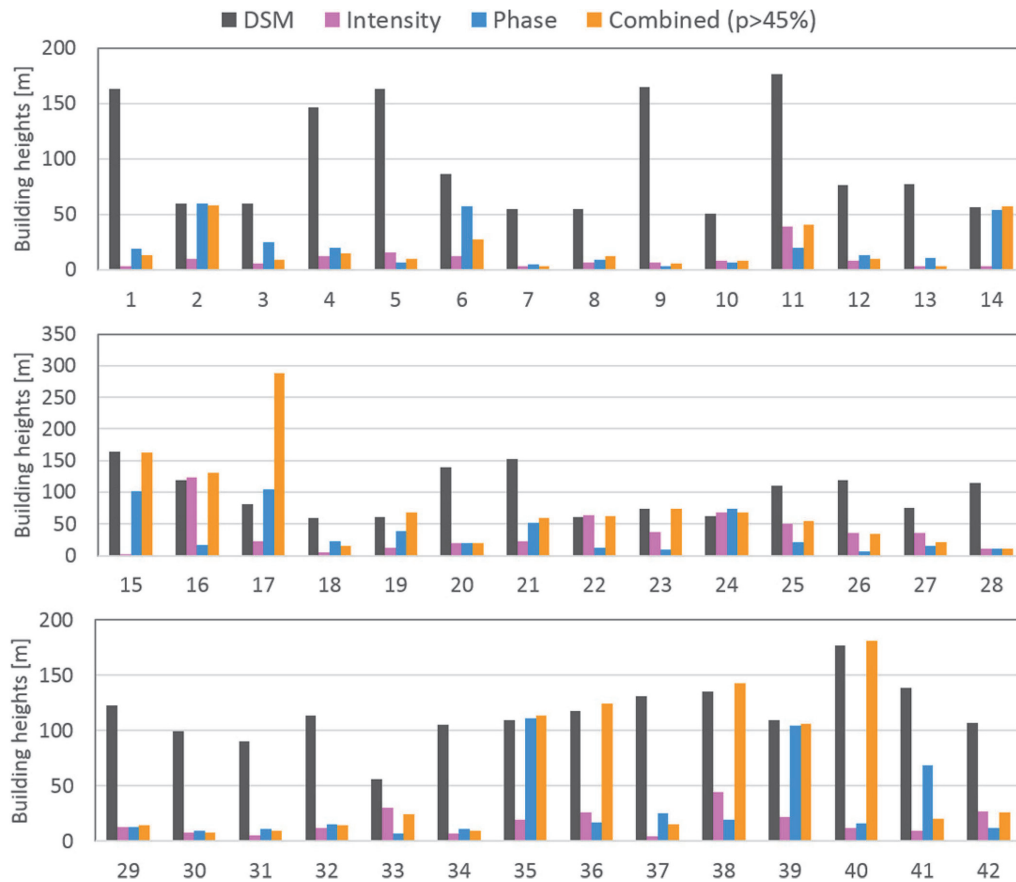


Fig. 11 Comparison of the estimated heights obtained by the three different methods for the SAR data set of 2010 and the reference heights.

であった。誤差 20m 以内のもの RSME は 5.6m である。

2008 年と 2010 年の干渉ペアの結果を比較すると、強度画像では入射角が大きい方が倒れ込み範囲を抽出しやすい。一方、2 つペアの軌道間距離はともに短いため、位相画像からも近い精度の結果を得ることができた。強度と位相の組み合わせでは、強度画像からの結果と比べて、2008 年の方がより良い結果を得られた。誤差 20m 以内に推定された建物高さに対しては、どちらの結果の RSME も 6m 前後であった。

強度画像に、推定された倒れ込み範囲(赤枠)と正解データから作成された倒れ込み範囲(シアン色枠)を重ねて Fig. 12 に示す。提案手法では、強い後方散乱と安定した位相のどちらも満たさない倒れ込みが抽出できないため、多くの建物が正解データより低い結果になった。強度画像においては、建物の足元と屋根の部分が抽出できたものの、それらを繋ぐ壁の反射が抽出されなかったため、テンプレート検索が途中で切れた。位相画像においては、壁の倒れ込み域にある地上物の反射より位相が乱れることが、正しい結果が得られない主な原因である。主に両者を組み合わせた場合でも、抽出された倒れ込み候補域の割合が閾値を下回ることが多かったため、全体的に建物高さは過少推定された。

しかし、2008 年の結果のうち、番号 17 と 33 の建物において、正解より 50m 以上高く推定された。また、2010 年の結果においても、17 番建物が正解より 100m 以上高く推定された。強度と位相からそれぞれ抽出された 17 番と 33 番建物の倒れ込み範囲を Fig. 13 に示す。33 番建物では、手前の相生橋と重なったことが誤差の原因と考えられる。水面から誤抽出された位相候補域(シアン色部分)によって、トラス上部構造が強い反射する相生橋まで 33 番建物の倒れ込みと誤推定された。そのため、推定された建物高さは、67m 以上高く推定された。17 番建物では、2008 年の結果が 57m、2010 年の結果が 104m 高く推定された。その原因は、対象建物のニアレンジ方向にある高層建物「勝どきビュータワー」(Fig. 13 の点線域)であると考えられる。勝どきビュータワーは、2008 年 1 月に建設工事が着工し、2010 年 10 月 27 日に完了した 192m の高層建物である。基盤地図情報サービスからダウンロードした建物輪郭データにこの建物が含まれていなかったため、対象とはしなかった。2008 年 2 月に撮影された画像では、建設工事による強い反射(赤部分)が 17 番建物の倒れ込み範囲として抽出されたため、高く推定された。一方、2010 年の撮影画像上では、すでに 100m 以上の高さがあり、17 番建物の倒れ込み範囲として誤抽出された。Fig. 13 (b) に示す建物 12

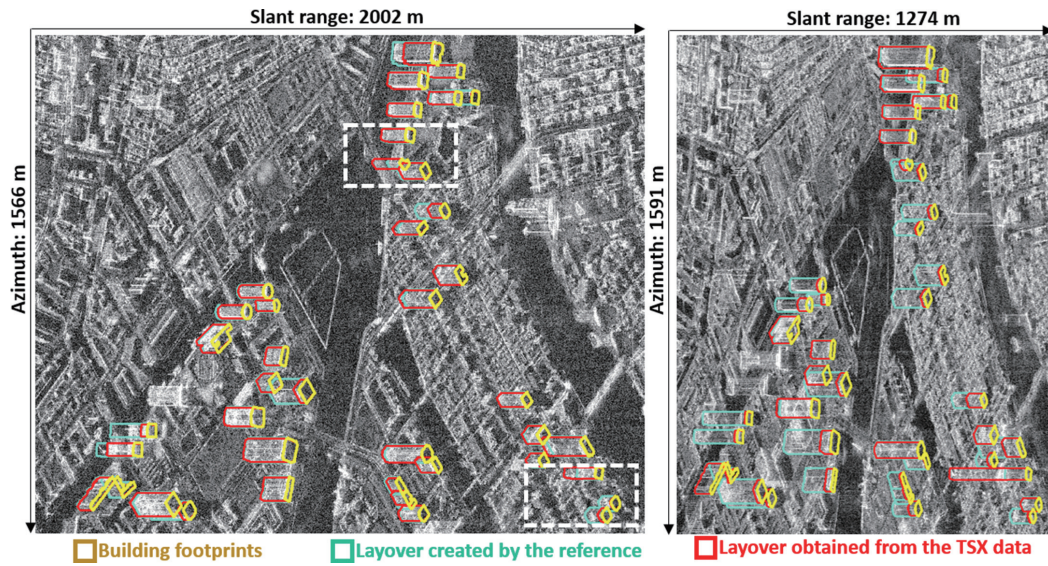


Fig. 12 Comparison of the estimated layover areas from the data sets of 2008 (a) and 2010 (b), and the ones created according to the DSM and DEM data in the whole study area, overlapping on the fringe images.

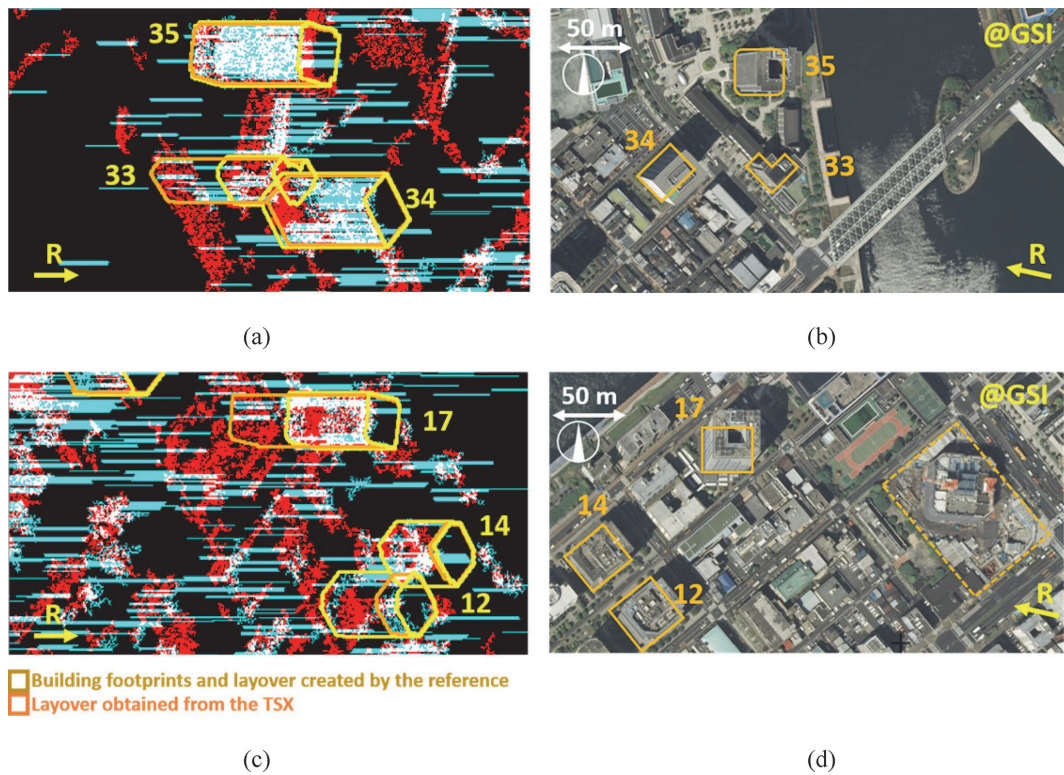


Fig. 13 (a, c) Close-up of the extracted potential layover areas enclosed by the white frames in Fig. 12(a), where the result from the intensity image taken in 2008 is shown in red color and that from the phase image is shown in green and blue colors; (b, d) aerial photos taken by GSI²⁴⁾.

と 14 番は過小推定された例である。対象建物の入射方向に 8 階建のマンションなどの中層建物があるため、建物の一部にレーダが届かず、抽出された倒れ込み範囲が少なかった。

建物高さの推定結果と建物の固有条件（形状、大きさ、

向きなど）の比較も行ったが、関係性は見られなかった。倒れ込み範囲における強度の強さは壁の材質と構造、衛星画像の撮影条件に影響される。また、対象建物の周辺に建物が密集すると、高さの推定誤差が大きくなる。一方、位相画像を用いた推定結果は、屋根の状態と周辺環境に影響

される。対象建物のレンジ方向に、1つ以上の干渉縞が生じる中層建物があると、精度が低下する。観測条件のよい SAR 画像 (2008 年ペア) であれば、強度画像のみでも建物の高さが推定できるが、撮影条件が劣る画像 (2010 年) や周辺環境が複雑の場合、位相の方が有効と考えられる。2008 年の画像において、11 棟の建物の倒れ込み域内に別の対象建物が存在した。そのうち、5 棟の高さが誤差 20 m 以内に推定できた。推定できなかった建物はすべてレーダシャドウによる過小評価であった。位相を用いることは、レーダ方向に重なる建物の高さ推定に有効と分かった。

6. ま と め

本研究では、高解像度 SAR データによる強度画像と位相画像を組み合わせた高層建物の高さ推定手法を提案した。2008 年と 2010 年に撮影された 2 つの干渉ペア画像を用いて、東京臨海部にある 42 棟の 50 m 以上の高層建物の高さを推定した。航空ステレオ測量で得られたデジタル表面モデルと航空レーザー測量で得られたデジタル標高モデルから正解とする建物高さを抽出し、提案手法の有効性と精度の検証を行った。

入射角が大きい 2008 年の画像では、強度画像のみに基づく推定結果は、位相のみを用いた結果に比べ、多くの建物高さを推定することができた。強度と位相を組み合わせた結果では、64% の建物に対して誤差 20 m 以内で推定することができた。一方、入射角が小さい 2010 年の画像では、強度のみを用いた場合、建物高さの推定がほとんどできなかった。位相のみを用いた場合は、38% の建物に対して誤差 20 m 以内で推定することができたが、RSME が 12 m と大きかった。強度と位相を組み合わせた結果では、31% の建物に対し誤差 20 m 以内で推定ができ、RSME は 5 m 程度に収まった。これらの比較より、強度と位相を組み合わせた提案手法は、単独の推定よりも有効で、高い精度の結果が得られるといえよう。また、2 つ干渉ペアを比較すると、入射角が大きい方が建物高さの推定に適していることがわかった。今回の事例解析の推定精度が全体的に低くなった原因は、周辺環境に影響されて、建物の倒れ込み範囲内で高い後方散乱と安定した位相のどちらもが得られなかったケースが挙げられる。また本研究では、倒れ込み長さの推定を 1 ピクセル単位で行ったが、1 ピクセルのズレで高さに約 10 m の誤差が生じる。今後は低層建物の場合と同様に、サブピクセルを用いた倒れ込み範囲の検索を行い、推定精度の上昇を試みたいと考えている。

謝 辞: TerraSAR-X データはドイツ航空宇宙センター (DLR) に所有権があり、株式会社パスコより千葉大学との共同研究の一環として提供された。デジタル表面モデル (DSM) は株式会社パスコに所有権がある。本研究について、科学研究費補助金 (課題番号: 15K16305) の助成を受けた。

引用文献

- 1) 義江龍一郎, 田中英之, 白澤多一, 小林 剛: 高層密集市街地における建物群の形態が歩行者レベルの風速・気温分布に与える影響, 日本建築学会環境系論文集, 73 (627), pp. 661-667, 2008.
- 2) M. Matsuoka, H. Miura, S. Midorikawa and M. Estrada: Extraction of urban information for seismic Hazard and risk assessment in Lima, Peru using satellite imagery, Journal of disaster research, 8 (2), pp.328-345, 2013.
- 3) H. Hirschmuller: Stereo processing by semiglobal matching and mutual information, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 30 (2), pp. 328-341, 2008.
- 4) L. Zhang and A. Gruen: Multi-image matching for DSM generation from IKONOS imagery, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 60 (3), pp. 195-211, 2006.
- 5) G. A. Licciardi, A. Villa, M. D. Mura, L. Bruzzone, J. Chanussot and J. A. Benediktsson: Retrieval of the height of buildings from WorldView-2 multi-angular imagery using attribute filters and geometric invariant moments, IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 5 (1), pp. 71-79, 2012.
- 6) A. Comber, M. Umezaki, R. Zhou, Y. Ding, Y. Li, H. Fu, H. Jiang and A. Tewkesbury: Using shadows in high-resolution imagery to determine building height, Remote Sensing Letters, 3 (7), pp. 551-556, 2012.
- 7) M. Izadi and P. Saeedi: Three-dimensional polygonal building model estimation from single satellite images, IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 50 (6), pp. 2254-2272, 2012.
- 8) 岩崎洋志, リュウ・ウェン, 山崎文雄: 光学センサ画像における日影長さと SAR 強度画像における倒れ込み量に基づく建物高さ地震による倒壊の検出, 日本地震工学会論文集, 12 (6), pp. 33-45, 2012.
- 9) G. Franceschetti, A. Iodice and D. Riccio: A canonical problem in electromagnetic backscattering from buildings, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 40 (8), pp. 1787-1801, 2002.
- 10) R. Guida, A. Iodice and D. Riccio: Height retrieval of isolated buildings from single high-resolution SAR images, IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 48 (7), pp. 2967-2979, 2010.
- 11) E. Simonetto, H. Oriot and R. Garello: Rectangular building extraction from stereoscopic airborne radar images, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 43 (10), pp. 2386-2395, 2005.
- 12) P. Gamba, B. Houshmand and M. Saccani: Detection and extraction of buildings from interferometric SAR data, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 38 (1), pp. 611-618, 2000.
- 13) C. Tison, F. Tupin and H. Maitre: A fusion scheme for joint retrieval of urban height map and classification from high resolution interferometric SAR images, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 45 (2), pp. 496-505, 2007.

- 14) H. Sportouche, F. Tupin and L. Denise: Extraction and three dimensional construction of isolated buildings in urban scenes from high-resolution optical and SAR spaceborne images, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 49 (10), pp. 3932-3946, 2011.
- 15) J.D. Wegner, J.R. Ziehn and U. Soergel: Combining high-resolution optical and InSAR features for height estimation of buildings with flat roofs, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 52 (9), pp. 5840-5854, 2004.
- 16) A. Sampath and J. Shan: Segmentation and reconstruction of polyhedral building roofs from aerial LiDAR point clouds, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 48 (3), pp. 1554-1567, 2010.
- 17) G. Q. Zhou and X. Zhou: Seamless fusion of LiDAR and aerial imagery for building extraction, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 52 (11), pp. 7393-7407, 2014
- 18) W. Liu, F. Yamazaki, B. Adriano, E. Mas and S. Koshimura: Development of building height data in Peru from high-resolution SAR imagery, Journal of Disaster Research, 9 (6), pp. 1042-1049, 2014.
- 19) W. Liu and F. Yamazaki: Height Estimation for High-rise Buildings based on InSAR Analysis, Proceedings of 2015 Joint Urban Remote Sensing Event, 2015.
- 20) 上本純平, 小林達治, 佐竹 誠, 児島正一郎, 梅原 俊, 松岡建志, 浦塚清峰: SAR インターフェログラムから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.
- 21) 基盤地図情報ダウンロードサービス: <http://fgd.gsi.go.jp/download/>(2017.12.13)
- 22) R. M. Goldstein and C.L. Werner: Radar interferogram filtering for geophysical applications, Geophysical Research Letters, 25 (21), pp. 4035-4038, 1998.
- 23) AIRBUS: Radiometric calibration of TerraSAR-X data, <http://www.intelligence-airbusds.com/en/228-terrasar-x-technical-documents> (2017. 12. 13)
- 24) 地理院地図: <https://maps.gsi.go.jp/> (2017. 12. 13)

〔著者紹介〕

●リュウ ウェン



所属：千葉大学大学院工学研究院 助教。
2008 年千葉大学工学部都市環境システム
学科卒。2010 年千葉大学大学院工学研究
科建築・都市科学専攻博士前期課程修了,
2013 年同専攻博士後期課程修了, 博士(工
学)。2011~2013 年千葉大学日本学術振
興会特別研究員 (DC2), 2013~2014 年東

京工業大学日本学術振興会外国人特別研究員 (PD)。2014 年
より千葉大学大学院工学研究院助教。衛星データを用いた都
市情報の収集と災害後の被害把握に関する研究に従事する。
日本リモートセンシング学会, 日本地震工学会, 土木学会,
IEEE に所属。

E-mail : wen.liu@chiba-u.jp

●山崎 文雄 (ヤマザキ フミオ)



所属：千葉大学大学院工学研究院 教授。
1978 年東京大学大学院工学系研究科修士
課程修了。1978 年清水建設株式会社入
社。1987 年東京大学工学博士。1989 年東
京大学生産技術研究所助教授。2001 年ア
ジア工科大学院教授 (JICA 長期専門家)。
2003 年 12 月より現職。専門分野は, 都市

防災工学, 地震工学。最近は, リモートセンシングの防災利用
について研究。IEEE, ASCE, EERI, SSA, 土木学会, 日本地
震工学会, 日本リモートセンシング学会などに所属。中央防
災会議専門委員, 東京都地域危険度測定調査委員会, JAXA 大
規模災害衛星画像解析 WG 委員等を歴任。

E-mail : fumio.yamazaki@faculty.chiba-u.jp