

A5

TerraSAR-X 画像を用いた 2015 年ネパール地震におけるカトマンズ市街地の被害評価

Damage assessment of buildings in Kathmandu due to the 2015 Nepal earthquake using TerraSAR-X imagery

○レンディ バハリ<sup>1</sup>・リュウ ウェン<sup>2</sup>・山崎文雄<sup>2</sup>・笹川正<sup>3</sup>  
Rendy Bahri, Wen Liu, Fumio Yamazaki and Tadashi Sasagawa

**Abstract :** The 2015 Nepal earthquake occurred on April 25, 2015 with Mw 7.8. It caused the collapse of many buildings including those in Kathmandu Durbar Square. In this study, we used multi-temporal high-resolution TerraSAR-X images to detect the changes of urban areas in Kathmandu, the capital city of Nepal. TerraSAR-X images obtained before and after the earthquake were utilized for calculating the difference and correlation coefficient of the SAR backscatter, within the layover area of a large building in order to extract severely damaged buildings in the central Kathmandu. As the result, the correlation coefficient was found to be the most suitable index to identify severely affected buildings.

**Keywords :** The 2015 Nepal Earthquake, TerraSAR-X, damage assessment, SAR backscatter, layover

1. はじめに

2015年4月25日11:56(現地時間)にネパール中部 Gorkha 郡を震源とする Mw7.8 の地震が発生し、その後余震も相次いだ。このため、市街地や農村部では耐震性の低い建物が倒壊し、8千人を超える死者が発生した。また、首都カトマンズや古都パタンやバグダブルに点在する歴史的建造物の多くが修復不可能な損傷を受けた。このような大規模災害の状況を迅速に把握するには、衛星リモートセンシングの利用が有効である。とくに、合成開口レーダ(SAR)は全天候性かつ昼夜に依らない観測が可能である。Xバンドの TerraSAR-X や COSMO-SkyMed, Cバンドの Sentinel-1, Lバンドの PALSAR-2 などの新型衛星が近年、次々稼働するようになった。

本研究では、災害前後に撮影された TerraSAR-X 画像を用いて、カトマンズ市の被害建物を抽出し、その精度を評価することを目的とする。

2. 対象地域と使用データ

対象地域は Fig. 1 に示す首都カトマンズ市である。なかでも、世界遺産に指定されているダルバール広場を含む市中心部を対象とした。地震によって、広場に位置するカシュタマンダップ寺院やマジユデガ寺院などの組積造建物や仏塔が全壊した。

本研究では、ドイツ航空宇宙センター(DLR)により2007年に打上げられた TerraSAR-X 衛星が撮影した地震前後の画像を用いた。地震前画像は2013年10月13日(地震1年半前)、地震後画像は2015年4月27日(地震2日後)のものである。いずれの画像も SpotLight (高分解能)モードの VV 偏波で観測された。ともに上昇軌道からの右側観測で、入射角は 39.5°である。前処理としてまず放射輝度補正を行い、後方散乱係数に変換した。また

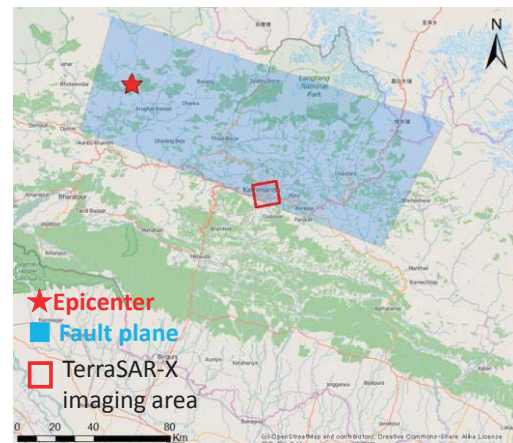


Fig.1 The fault plane and TerraSAR-X's imaging area

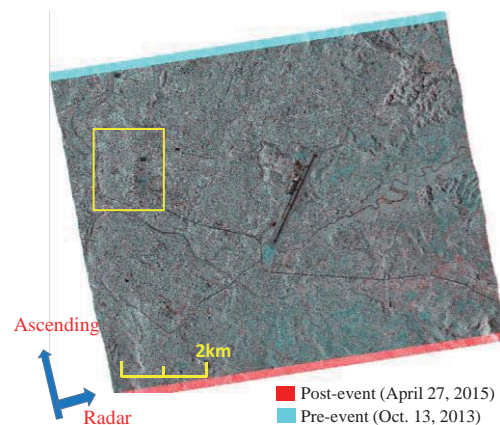


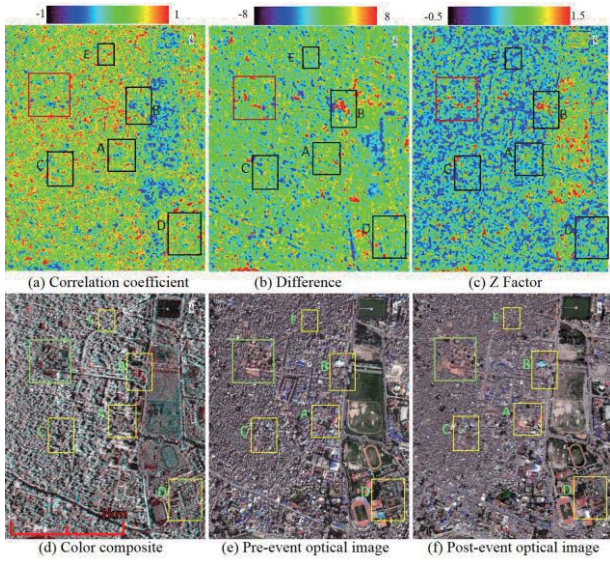
Fig. 2 Color composite of TerraSAR-X images

スペckルノイズを除去するため、3×3ピクセルのウィンドウによる Enhanced Lee フィルタ<sup>1)</sup>を適用した。地震前画像にシアン(B+G)色を、地震後に赤色(R)を与えたカラー合成を Fig. 2 に示す。図中の黄色四角の範囲を対象地域とする。また検証用の光学センサ画像として、地震前の WorldView-3 (2014年10月14日撮影、分解能31cm)と、地震後の GeoEye-1 (2015年5月15日撮影、分解能41cm)も導入した。

<sup>1</sup>学生会員 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 千葉県千葉市稲毛区弥生町1-33  
(連絡先 Tel:043-290-3528, E-mail: rendy.bahri@gmail.com)

<sup>2</sup>正会員 千葉大学大学院 工学研究科 建築・都市科学専攻

<sup>3</sup>正会員 株式会社パスコ



**Fig. 3** Close-up of the central Kathmandu: (a) correlation coefficient, (b) difference, (c) z-factor; (d) color composite of the TerraSAR-X images, (e) the pre-event WV-3 image; (f) the post-event GeoEye-1 image.

### 3. 被害検出の手法

被害の検出は、2 時期の SAR 強度画像を用いた変化抽出により行う。後方散乱係数の差分( $d$ )、相関係数( $r$ )、 $z$  ファクターを  $11 \times 11$  ピクセルのウインドウを用いて式 (1)-(3) により計算した。これらによる結果と 2 時期 SAR 画像のカラー合成、および光学センサ画像を **Fig. 3** に示す。

$$d = \bar{I}a_i - \bar{I}b_i \quad (1)$$

$$r = \frac{N \sum_{i=1}^N I a_i I b_i - \sum_{i=1}^N I a_i \sum_{i=1}^N I b_i}{\sqrt{(N \sum_{i=1}^N I a_i^2 - (\sum_{i=1}^N I a_i)^2) \cdot (N \sum_{i=1}^N I b_i^2 - (\sum_{i=1}^N I b_i)^2)}} \quad (2)$$

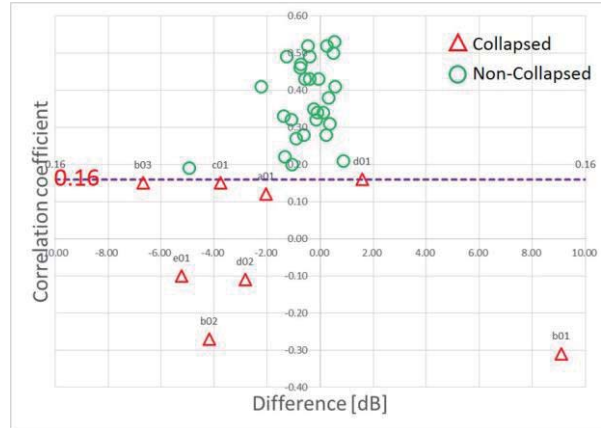
$$Z = \frac{|d|}{\max(|d|)} - w \times r \quad (3)$$

$$L = \frac{H}{\tan \theta} \quad (4)$$

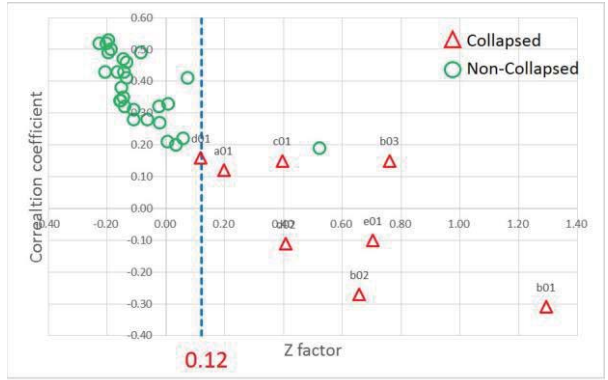
被害と無被害の領域を分離するために、指標ごとに適切な閾値を設定することにする。**Fig. 3** に四角で示す市中心部の 5 カ箇所から、8 棟の倒壊建物と 28 棟の非倒壊建物を教師データとして設定した。倒壊建物に対して求めた相関係数、差分、 $Z$  ファクターの値を **Table 1** に示す。計算した相関係数と差分の関係を **Fig. 4** に示し、相関係数と  $Z$  ファクターの関係を **Fig. 5** に示す。これらの値は

**Table 1** Collapsed buildings and their estimated layover lengths

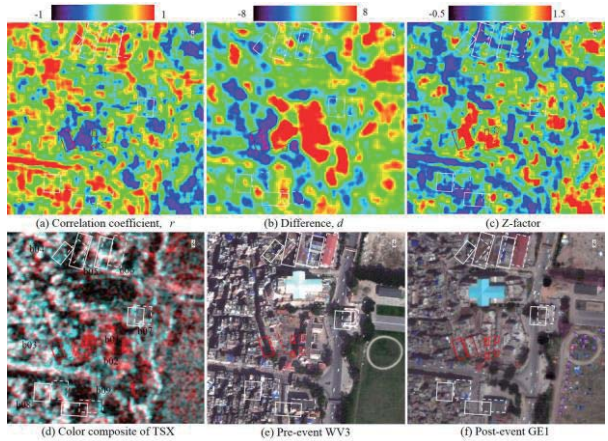
	Block	Correlation coefficient	Difference	Z factor	Estimated height(m)	Movement distance(m)
Collapsed	a01	0.12	-2.05	0.20	40.0	48.5
	b01	-0.31	9.10	1.29	12.0	14.5
	b02	-0.27	-4.18	0.66	12.0	14.5
	b03	0.15	-6.68	0.76	10.0	12.1
	c01	0.15	-3.76	0.40	8.0	9.7
	d01	0.16	1.58	0.12	8.0	9.7
	d02	-0.11	-2.82	0.41	8.0	9.7
	e01	-0.10	-5.23	0.70	10.0	12.1



**Fig. 4** Scatter plot of correlation coefficient and difference form 36 building's footprint



**Fig. 5** Scatter plot of correlation coefficient and difference form 36 building's footprint



**Fig. 6** Close-up of the area B: (a) correlation coefficient, (b) difference, (c) z-factor, (d) color composite of the TerraSAR-X images, (e) the pre-event WV-3 image, (f) the post-event GeoEye-1 image.

倒れ込み範囲で計算したものであり、地表面からの反射に加えて、建物側面からの反射を含んだものとなっている<sup>2)</sup>。このような 2 回反射が建物倒壊により減少することを把握するために、建物頂部の輪郭をレーダ照射方向に、式(4)に示すように入射角( $\theta$ )と推定建物高さ( $H$ )を考慮して移動し、倒れ込みの長さ( $L$ )を算出し、この範囲の平均値を使用した。倒壊建物の推定高さと同倒れ込みの移動距離も **Table 1** に示す。

Fig. 4 に示すように、非倒壊建物において相関係数は大きく、差分は 0 付近に分布する傾向が見られる。しかし倒壊建物では、相関係数は小さく、差分値はばらつく傾向が見られ、負値になったものが多い。しかし、倒壊建物 b01 では、大きな正値になった。この建物は倒壊していたが、差分が正値になった理由を探るために、その建物を含む領域 B を Fig. 6 に示す。図では 3 棟の倒壊建物を赤色四角で示し、6 棟の非倒壊建物を白色四角で示している。この図に示すように、非倒壊建物では相関係数が高く、z ファクターが低く、差分値がほぼ 0 になるという結果が得られた。つまり、撮影された 2 時期間に対象建物に変化がないということである。一方、倒壊建物では相関係数が低く、z ファクターが大きくなり、変化があるとことが考えられる。しかし、倒壊建物 b01 のように差分値がとても大きくなったものもある。光学画像を確認してみると、その崩壊建物の隣に建築途中の建物が、崩壊建物よりマイクロ波を強く反射したため、差分が正値になったと考えられた。

Fig. 4 と Fig. 5 に示す結果を踏まえて、本研究では、相関係数 0.16 と Z ファクター 0.12 を閾値として設定し、輪郭内の平均値が  $r < 0.12$  と  $Z > 0.16$  の建物を倒壊と分類した。



Fig. 7 Reference images for producing verification data: (a) Field survey photo taken by F. Yamazaki, (b) Snapshot of drone aerial video, (c) Damage map made by the local government, (d) pre-event WorldView-3 image.

#### 4. 検証用データに対する抽出精度の検討

カトマンズ中心部にあるダルバール広場周辺に関しては、第 3 著者が 2015 年 9 月に現地調査を行っている。また、ドローンによる空撮映像<sup>3)</sup>、市による被災度判定地図、それに地震前後の光学衛星画像などのデータが Fig. 7 に示すように存在する。これらを参考にして、作成した検証用の建物被害データを Fig. 8 に示す。図中の点線は、地震前の 5 棟の倒壊 (赤)、11 棟の、22 棟の小被害 (緑) の建物輪郭を示し、実線は建物の倒れ込みを考慮した建物頂部の投影範囲を示す。ここで市の被災度判定 (赤：倒壊) のうち、衛星画像などで被害検出が困難に見えた建物については、大被害 (黄) という分類に変更した。

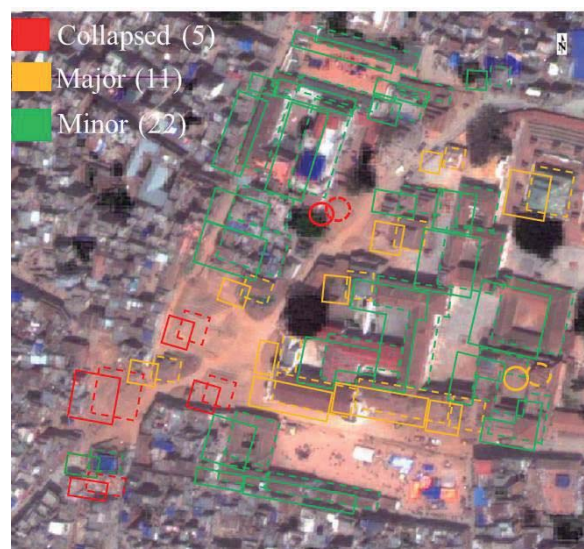


Fig. 8 Verification data of Kathmandu Durbar Square

Fig. 9 に示すように、各建物の投影範囲内の後方散乱係数の相関係数、差分、z ファクターの各平均値を算出した結果を Table 2 に示す。また Fig. 10 に相関係数と差分の関係を示し、Fig. 11 に相関係数と z ファクターの関係を示す。この図に示すように、Fig. 4 と Fig. 5 で決めた閾値に入るものを「倒壊」、それ以外のものを「非倒壊」と区分とした。結果として、検証データの倒壊建物は、すべて閾値内に入ることがわかった。また、大被害建物は、相関にばらつきが出ており、5 棟は倒壊領域に入り、6 棟は非倒壊領域に入った。また、小被害建物では、相関係数による閾値を用いて、全て適切に分類されたが、Z ファクターによる閾値を用いた場合、2 つ誤分類されたことが分かった。

検証用データに対する相関係数に基づく建物被害の抽出結果の精度を Table 3 に示す。この表では検証用データ

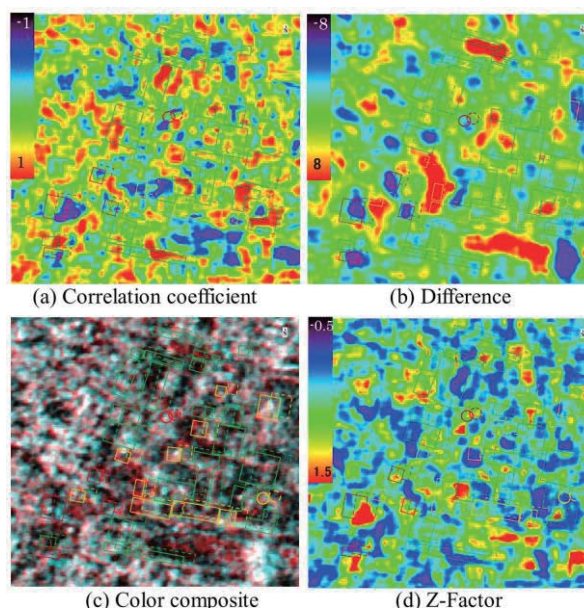


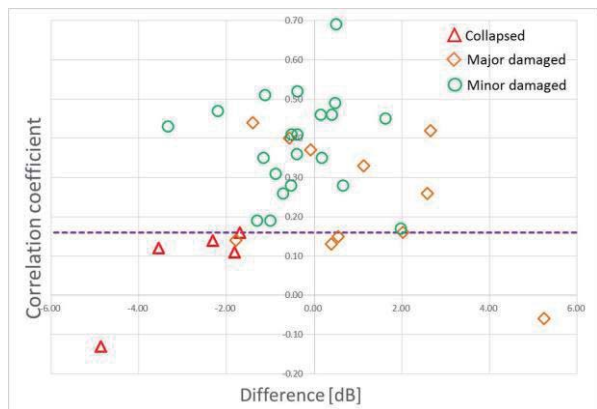
Fig. 9 (a) correlation coefficient, (b) difference, (c) color composite of the TerraSAR-X images, and (d) z-factor of the verification data in Kathmandu Durbar Square

**Table 2** Truth data in Kathmandu Durbar Square and their estimated layover length

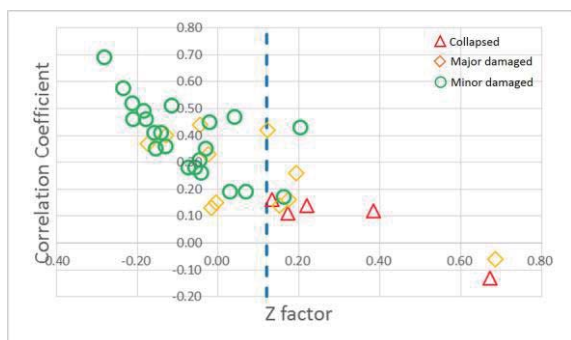
	correlation coefficient	difference (dB)	z	Estimated height (m)	Movement distance (m)		correlation coefficient	difference (dB)	z	Estimated height (m)	Movement distance (m)
Collapsed	0.16	-1.70	0.13	4.0	4.8	Minor damaged	0.52	-0.38	-0.21	10.0	12.1
	0.14	-2.31	0.22	8.0	9.7		0.26	-0.71	-0.04	10.0	12.1
	0.11	-1.82	0.17	8.0	9.7		0.35	0.17	-0.15	10.0	12.1
	0.12	-3.55	0.38	10.0	12.1		0.28	-0.53	-0.07	10.0	12.1
	-0.13	-4.86	0.67	8.0	9.7		0.69	0.50	-0.28	10.0	12.1
Major damaged	0.33	1.13	-0.02	8.0	9.7	0.41	-0.38	-0.16	8.0	9.7	
	0.42	2.66	0.12	10.0	12.1	0.41	-0.51	-0.14	8.0	9.7	
	-0.06	5.25	0.69	10.0	12.1	0.19	-1.00	0.03	8.0	9.7	
	0.15	0.55	-0.01	10.0	12.1	0.46	0.15	-0.21	8.0	9.7	
	0.37	-0.08	-0.18	10.0	12.1	0.45	1.63	-0.02	8.0	9.7	
	0.14	-1.78	0.15	10.0	12.1	0.17	1.98	0.16	10.0	12.1	
	0.16	2.03	0.17	12.0	14.5	0.36	-0.40	-0.13	8.0	9.7	
	0.26	2.58	0.19	10.0	12.1	0.28	0.66	-0.06	8.0	9.7	
	0.13	0.39	-0.02	10.0	12.1	0.31	-0.88	-0.05	10.0	12.1	
	0.44	-1.40	-0.05	8.0	9.7	0.43	-3.34	0.20	12.0	14.5	
Minor damaged	0.40	-0.56	-0.13	10.0	12.1	0.19	-1.30	0.07	12.0	14.5	
	0.58	0.42	-0.24	8.0	9.7	0.49	0.48	-0.19	10.0	12.1	
	0.35	-1.16	-0.03	10.0	12.1	0.46	0.41	-0.18	12.0	14.5	
	0.51	-1.12	-0.12	10.0	12.1	0.47	-2.20	0.04	12.0	14.5	

の「倒壊」と「大被害」を合わせたものが「倒壊」と区分されれば正答とした。その結果、相関係数による閾値を用いた総合精度 (84.2%) の方が高いという結果が得られた。SAR 画像から倒壊と判定された建物では、正答率 (User accuracy) は 100% の値を示しているが、非倒壊と判定された建物では、78.6% とやや低い値となった。また、抽出率 (Producer accuracy) では、倒壊と小被害において 100% の高い値が得られるが、大被害区分では 45.5% という低い値となった。これは、SAR 画像からでは大被害区分の被害が必ずしも充分は把握できない場合があることを示している。

なお、ここで大被害区分とした建物は、現地調査やドローンにより大きな被害が確認されているが、光学画像からは被害があるかどうか確認できないものである。SAR は斜めにマイクロ波を放射するが、それでも建物側



**Fig.10** Extraction result for the truth data for relation r and d



**Fig. 11** Extraction result for the truth data for relation r and z

**Table 3** Confusion matrix for the reference data in Durbar Square

			Truth Data				
			Collapsed	Major Damage	Minor Damage	Total	User Accuracy(%)
Extraction by TerraSAR-X	Correlation coefficient	Collapsed	5	5	0	10	100
		Non-Collapsed	0	6	22	28	78.6
		Total	5	11	22	38	
	Producer Accuracy(%)	100	45.5	100		Overall Accuracy(%) 84.2	
Z factor	Collapsed	5	5	2	12	83.3	
	Non-Collapsed	0	6	20	26	76.9	
	Total	5	11	22	38		
	Producer Accuracy(%)	100	45.5	90.9		Overall Accuracy(%) 78.9	

面や屋根部の小さな被害を検出することは容易ではないと考えられる。ここで用いた教師データおよび検証データはともに、ある程度独立した大きな建物を選択しており、建物密集地域や小さな建物についての被害抽出はさらに容易ではない。また今回は、光学画像から目視で建物輪郭や高さデータの作成を行ったが、これらの効率化を含め、今後の課題といえよう。

## 5. まとめ

本研究では、2015年ネパール地震前後にカトマンズ市街地を撮影した TerraSAR-X 強度画像を用いて、倒壊と非倒壊建物を検出し、その精度評価を行った。被害抽出は、倒れ込みを考慮した建物頂部の投影範囲内の後方散乱係数を計算し、それらの地震前後の相関、差分、zファクターによって定量的に評価した。非倒壊建物では、相関係数が高く、差分値が0付近に集中し、zファクターが高くなる様子が観察された。一方倒壊建物では、この範囲で低い相関を示すことがわかった。これにより設定した相関係数の閾値を用いて、ダルバール広場の建物を検証データとして、建物単位の被害抽出の精度評価を行った。この結果、総合精度 84.2% と高い値が得られた。

しかし、大被害区分でも被害抽出ができなかった建物もあり、市街地状況やマイクロ波照射方向、それに被災部位などによって、把握が困難な場合も想定される。SAR の斜め観測の特徴を考慮すると、直下視の光学画像では確認することができない建物側面の被害も把握できる場合もある。今後とも解析事例を増やすとともに、より密度の高い市街地への適用についても検討する必要がある。

## 参考文献

- Lee, J.S., 1980. Digital image enhancement and noise filtering by use of local statistics. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2(2), 165-168.
- 岩崎洋志, 山崎文雄, リュウ・ウェン, 野中崇志, 笹川正: 高解像度衛星 SAR 画像を用いた建築側面の被害把握, 日本地震工学会論文集, 第 13 巻, 第 5 号, 2013.
- YouTube: Drone Footage Captures Aftermath of Nepal Earthquake. <https://www.youtube.com/watch?v=N52LX1GZYWs>