

# デジタル空中写真測量に基づく 新潟県中越沖地震における建物倒壊の把握

Detection of Collapsed Buildings after the 2007 Niigata Chuetsu-oki Earthquake  
based on Aerial Photogrammetry

田代 啓<sup>1</sup>, 丸山 喜久<sup>2</sup>, 山崎 文雄<sup>2</sup>

Akira TASHIRO<sup>1</sup>, Yoshihisa MARUYAMA<sup>2</sup> and Fumio YAMAZAKI<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ジェイアール東日本ビルテック株式会社 (元 千葉大学工学部都市環境システム学科)

JR East Facility Management Co., Ltd. (Former Student, Chiba University)

<sup>2</sup> 千葉大学大学院工学研究科建築・都市科学専攻

Department of Urban Environment Systems, Chiba University

The collapsed buildings in Kashiwazaki city due to the 2007 Niigata Chuetsu-oki earthquake are detected based on aerial photogrammetry using digital aerial images. The digital surface models in the area where severe damage incidents were observed after the earthquake are constructed using the digital aerial images. The pre- and post-event aerial images are employed to develop digital surface models in this study. The differences of building heights between the pre- and post-event 3D models are considered to detect collapsed buildings and the accuracy of the method is discussed.

**Keywords:** collapsed building, The 2007 Niigata Chuetsu-oki earthquake, digital aerial image, DSM, aerial photogrammetry

## 1. はじめに

大規模な地震が発生した際、より有効な対策を取るためには迅速な被害状況の把握が重要である。しかし災害発生直後には被災地への立ち入りが困難であったり、被害が広範囲に及んでいたりする場合が多く、直接に被害状況を把握することは難しい。また、例えば2009年4月6日に発生したイタリア・ラクイラ地震のように、二次災害の予防だけでなく、被災者の財産保護などの観点から住民や報道関係者に加えて、民間や他国の調査団も被災地への立ち入りが制限される場合もある<sup>1)</sup>。

そこで衛星画像や空中写真は、被害状況を把握するのに有効な手段の一つと考えられる。実際に我が国では、大規模災害が発生した際にはさまざまな機関が空中写真の撮影を実施し、種々の方法で被害の判読や抽出が試みられてきた。例えば1995年兵庫県南部地震では、発生から5日間のうちに国土地理院と航空測量会社9社によって1万枚以上の垂直写真が撮影された<sup>2)</sup>。2007年新潟県中越沖地震においても、国土地理院と民間航測会社が空中写真の撮影を行っている。

兵庫県南部地震時に撮影された空中写真は、建物被害の目視判読に利用されている<sup>3)</sup>。また、ヘリコプターからの空撮ハイビジョン映像を用いて建物被害の目視判読を行った例もある<sup>4)</sup>。近年では高解像度衛星画像を用いた建物被害の目視判読<sup>5)</sup>も行われている。2004年スマトラ島沖地震の際には、津波被害を受けた建物の被害判読<sup>6)</sup>が行われたり、高解像度衛星画像が津波による建物被害の被害予測式の構築に用いられたりしている<sup>7)</sup>。

リモートセンシングによる被害把握は災害発生直後の

大局的な状況把握に有効で、広域の画像をより短時間で処理するために、目視判読だけではなく自動抽出も研究されている。三富ら<sup>8)</sup>は色彩やエッジ強度をもとに建物被害を表す画素を抽出し、建物被害地域を推定した。画素を単位としない分類の例として、鈴木ら<sup>9)</sup>はセグメンテーションを行い、オブジェクトごとに土地被覆分類を行って瓦礫を抽出することで建物被害を抽出している。

しかし空撮画像では対象物の上面のみしか映っていないため、例えば図1のように建物の1階部分が層崩壊していても、屋根の見た目に変化が少ない場合には、その被害を把握することは困難な場合が多い。そこで、建物の3次元モデルを利用し、高さに注目することでより効果的に被害を把握できると考えられる。このような観点からの研究事例としては、写真測量を用いた鍛田らの研究<sup>10)</sup>、3次元GISを用いたHuangらの研究<sup>11)</sup>が挙げられる。また、航空写真のステレオペア画像を実体視することで得られる高さ情報をもとに建物の自動抽出が試みられたりしている<sup>12), 13)</sup>。

空中写真から地物の座標を計測する手段として、地図作成を目的とした空中写真の図化は古くから行われている。従来の図化は高価な装置や熟練の作業者を要し、時間とコストのかかるものであった<sup>14)</sup>。しかし近年、図化機と航空計測カメラのデジタル化が進んだことで、フィルムの現像だけでなくスキャニングなどの工程も省略され、画像を得るまでの時間が短縮された。災害後の緊急撮影を仮定した場合、一部シーンのみであれば撮影後3時間ほどで数値画像を得られる<sup>15)</sup>。また、デジタル図化機がパーソナルコンピュータやワークステーションなどの一般の機器で扱えるようになったことや、航空機の直接



(a) 空中写真



(b) 現地写真

図1 新潟県中越沖地震により一階部分が崩壊した建物

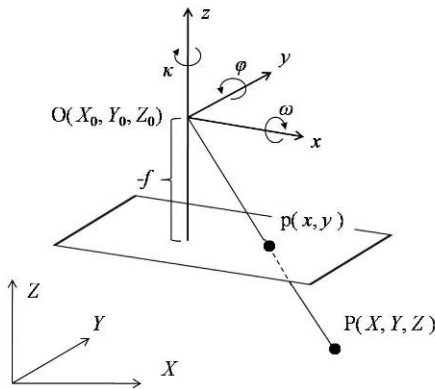


図2 外部標定要素と共線条件

定位技術が民間に転用された<sup>16)</sup>ことなどによって、より短時間で容易に写真測量が行えるようになった。

以上のことから、本研究では2007年7月16日に発生した新潟県中越沖地震において大きな被害を受けた柏崎市街地を対象とし、地震前後に撮影されたデジタル空中写真についてそれぞれ空中写真測量を行う。3次元計測によりDSM (Digital Surface Model)を作成し、地震前後の建物高さの差分から建物倒壊を把握することを目的とする。

## 2. 空中写真測量によるDSM構築

### (1) 空中写真測量の手法について

本研究ではアジア航測株式会社の3次元数値図化システム「図化名人」を用いる。図化名人ではバンドル標定によって空中三角測量を行う。標定とは、空中写真が撮

影された際のカメラの位置と傾きを求め、図化機上で対象点との位置関係を再現することをいう。一般に地上での写真測量と異なり、空中写真測量ではカメラの位置や姿勢は直接定位装置を使っていない限り未知であるため、地上座標が既知の点を拘束条件として標定を行う。このとき基本的に地上の対象点と写真上の像の関係は共線条件により求められる。

これは地上の対象点  $P$  と投影中心  $O$ 、写真上の像  $p$  が一直線上に並ぶという条件で写真測量において基本的な原理である<sup>17)</sup>。図2のように地上座標でのカメラの位置を  $O(X_0, Y_0, Z_0)$ 、対象物を  $P(X, Y, Z)$ 、写真座標で像を  $p(x, y)$  と表す。焦点距離を  $f$ 、カメラの傾きを航空機のロール、ピッチ、ヨー (ヘディング) による角度  $\omega, \varphi, \kappa$  として表すと、写真上の点は次の式で表わされる。

$$x = -f \frac{a_{11}(X - X_0) + a_{12}(Y - Y_0) + a_{13}(Z - Z_0)}{a_{31}(X - X_0) + a_{32}(Y - Y_0) + a_{33}(Z - Z_0)} \quad [1]$$

$$y = -f \frac{a_{21}(X - X_0) + a_{22}(Y - Y_0) + a_{23}(Z - Z_0)}{a_{31}(X - X_0) + a_{32}(Y - Y_0) + a_{33}(Z - Z_0)} \quad [2]$$

ただし、

$$a_{11} = \cos \varphi \cos \kappa \quad [3]$$

$$a_{12} = -\cos \varphi \sin \kappa \quad [4]$$

$$a_{13} = -\sin \varphi \quad [5]$$

$$a_{21} = \cos \omega \sin \kappa + \sin \omega \sin \varphi \cos \kappa \quad [6]$$

$$a_{22} = \cos \omega \cos \kappa - \sin \omega \sin \varphi \sin \kappa \quad [7]$$

$$a_{23} = -\sin \omega \cos \varphi \quad [8]$$

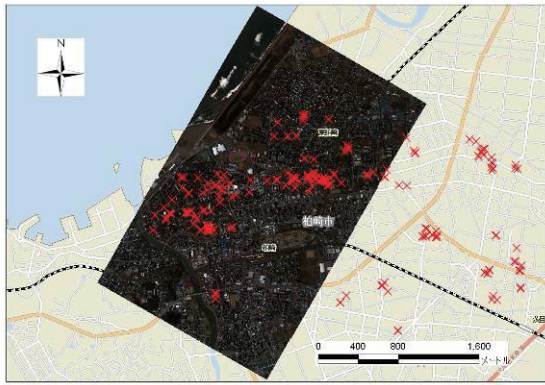
$$a_{31} = \sin \omega \sin \kappa - \cos \omega \sin \varphi \cos \kappa \quad [9]$$

$$a_{32} = \sin \omega \cos \kappa - \cos \omega \sin \varphi \sin \kappa \quad [10]$$

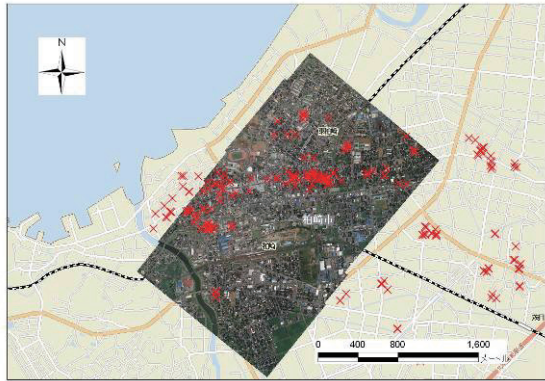
$$a_{33} = -\cos \omega \cos \varphi \quad [11]$$

ここで、カメラの位置  $(X_0, Y_0, Z_0)$  と傾き  $(\omega, \varphi, \kappa)$  を外部標定要素と呼ぶ。

バンドル法は、基準点だけでなく、地上座標が未知である隣接する画像・コースで共通の点 (パスポイント、タイポイント) なども利用し、これらの共線条件からすべての画像の絶対標定を同時に行う方法である。このとき各画像の外部標定要素だけでなく、パスポイントやタイポイントの座標値も最小二乗法により同時に解く。ブロック全体で調整すること、パスポイントやタイポイントを用いることにより、要求される精度を満たすために必要な基準点数を減らすことができる。ブロック全体で基準点が少なく済むことや、全体で均質な精度の成果が得られることから、とくにブロック調整の際には利用されることが多い。さらに、画面距離や、主点位置のずれ、レンズひずみに関する内部標定要素を未知変量として調整計算に加えることもできる。この内部標定と外部標定を同時に行うバンドル法のことを、セルフキャリブレーション付きバンドル法という<sup>18)</sup>。かつてはバンドル法は理論的には独立モデル法よりも優れるが、実際に得られる成果にあまり差はなく、多数の繰り返し計算を必要とするため計算時間がはるかに余分にかかり実用的ではないとされていた<sup>19)</sup>。しかし、情報機器の進歩により計算時間が問題とされなくなると、セルフキャリブレーション付きのバンドル法が概ね最も良い結果を得るとされ<sup>20)</sup>、現在では最も一般的な方法となっている。



(a) 地震前画像



(b) 地震後画像

図3 使用した地震前後の空撮画像の位置  
(×は国土地理院目視判読結果による全壊家屋)

また、撮影時に POS (Position and Orientation Systems) などが運用されていれば、この外部標定要素を直接得ることができる。これは GPS と IMU (慣性計測装置) を組み合わせることにより、撮影時のカメラの位置と姿勢を計測するものである。GPS (干渉測位) は正確な位置と速度を計測できるが、データの取得が 0.5 秒から 1.0 秒間隔と時間がかかるため、航空機の正確な軌跡はわからない。一方、IMU は 0.005 秒間隔で 3 軸方向の加速度と 3 軸回りの角速度を取得できるが、一般に計測中に初期化できないために時間が経過するにつれ誤差が大きくなる。そこで、この 2 つの装置のデータを組み合わせることで、航空機の正確な軌跡を求め、撮影した時刻の位置と姿勢を得る。しかし精度の問題から公共測量<sup>21)</sup>では直接定位のみによる標定は認めておらず、基準点を数点は用いてバンドル調整を併せて行うこととしている (同時調整)。

## (2) 自動標高取得による地震前後の DSM

本研究では、2007 年新潟県中越沖地震で大きな被害を受けた柏崎市市街地の中でも、地震後に空中写真の撮影が行われた図 3 の範囲において地震前後の DSM を作成した。地震前画像については、柏崎市が 2007 年 4 月 27 日にデジタル航空カメラ UltraCamD<sup>22)</sup>を用いて撮影したものを使用した。図 3(a)は、同一コースの 5 枚のパンシャープン画像<sup>23)</sup>を用いている。これらの画像を撮影した際の対地高度は約 1970m で、地上解像度はおよそ 0.17m となっている。撮影時に運用されていた POS による外部標定要素 (同時調整済み) を用いて、標高点の自動取得により作成した DSM を図 4 に示す。

表 1 バンドル標定で確認した精度

	縦視差 最大値	交会残差 最大値	交会残差 標準偏差
地震前	0.0002mm	0.0027mm	0.0015mm
地震後	0.0007mm	0.0055mm	0.0023mm
公共測量	0.02mm	0.03mm	0.015mm

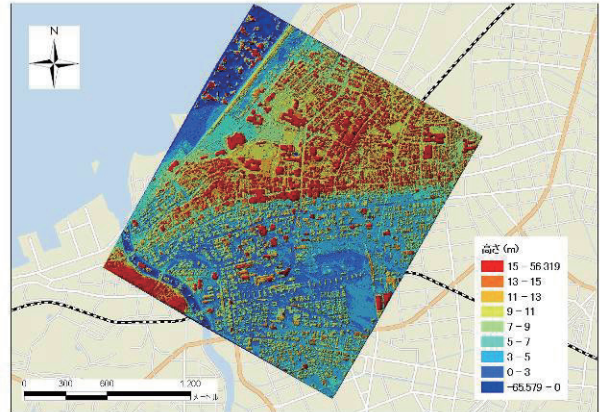


図 4 地震前画像から作成した DSM

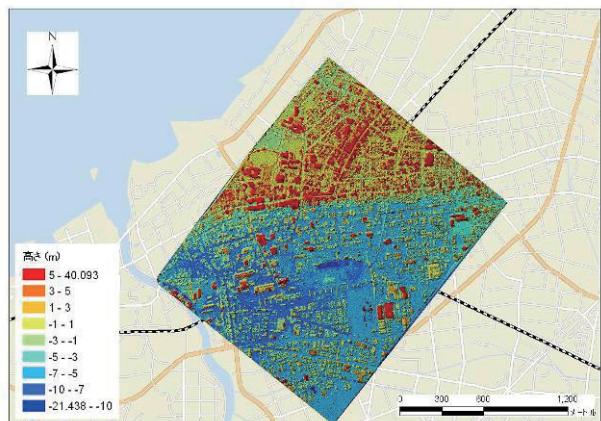


図 5 地震後画像から作成した DSM

地震後画像は、発生から 3 日後の 2007 年 7 月 19 日にアジア航測株式会社 Digital Mapping Camera (DMC)<sup>24)</sup>を用いて撮影したものである。地震前と同様に、単コースの 6 枚のパンシャープン画像を使用した。これらの画像を撮影した際の対地高度は約 1200m で、地上解像度はおよそ 0.12m である。地震後の撮影時に得られた外部標定要素は GPS/IMU による直接定位のみによるものであった。POS による外部標定要素はステレオモデルの縦視差やモデル間の較差が大きい場合があり、パスポイント・タイポイントを計測し撮影ブロック全体の整合性を調整する必要があるとされている<sup>25)</sup>が、パスポイントを測定し確認したところ公共測量で定められている精度内に収まった (表 1)。しかし地震後の自動計測による DSM を建物等の無い場所で国土地理院が発行している 5m メッシュ標高<sup>26)</sup>と比較したところ、モデル全体にわたり約 10m 低い値となっていた (図 5)。このことには後述のように、電子基準点の利用に制限がかけられていたことが影響していると考えられる。また、海や河川な

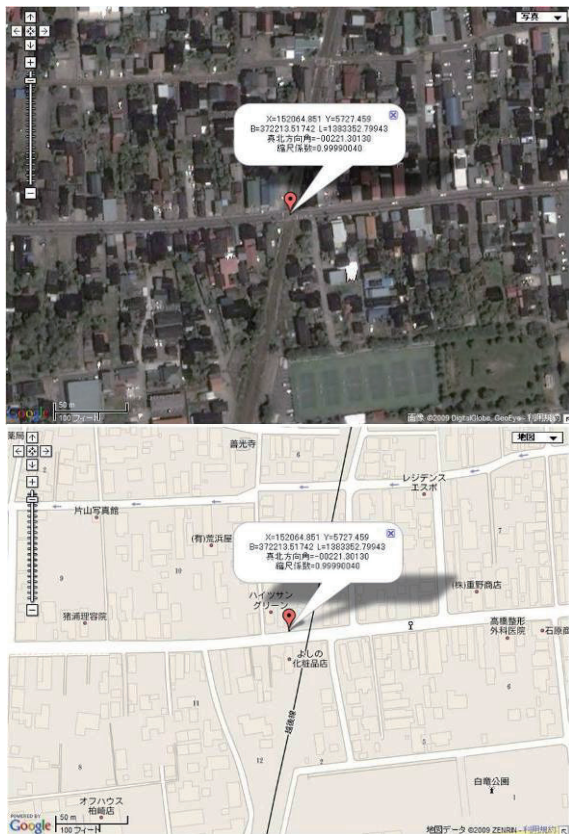


図 6 地図と空中写真が重ならない例

どの水面では画像のマッチングが上手く行えずエラー点が多くなるほか、倒れこみによるオクルージョン、建物による濃い影、ハレーションなどにより本来同一の点がステレオペア間で異なる写り方をしていることによるエラーが見られた。

### 3. 地震後 DSM の修正と建物倒壊の抽出

#### (1) 地震後ステレオモデルの修正

地震災害の直後には地盤変位の影響により電子基準点の利用に制限がかけられ、POS による外部標定要素の同時調整を実施できないことが多い。実際に新潟県中越沖地震では、基準点の測量成果としての利用が停止され、改測された成果が再び公開されたのはおよそ 1 か月後の 8 月 17 日であった<sup>27)</sup>。公共測量では直接定位による外部標定要素を得られた場合でも基準点を配置することとしており、同時調整は必須になっている。未調整の外部標定要素をバンドル標定により調整するためには、地上座標が既知である基準点が必要である。しかし本研究の対象地域内には三角点などの基準点はなく、また当初から測量を目的とした撮影ではなかったために標定に利用した地物も存在しなかった。しかし地震災害が発生した際に基準点測量に準じた測量を行い、対空標識を設置することはほぼ不可能であると考えられる。そこで地震が発生した直後でもなるべく即時性を損なうことなく、基準点座標を得る方法を検討した。

#### a) GIS 基盤地図の利用

空中写真上で確認できる明瞭な地物であれば基準点として利用できるため、まず GIS 上において数値地図や



(a) 現地での測位



(b) 図化名人上での計測

#### 図 7 ハンドヘルド GPS による基準点測位の例

ArcGIS データコレクション<sup>28)</sup>を利用して座標を計測する方法を試みた。しかし空中写真は倒れこみがあるため建物ポリゴンとは重ならず、道路、鉄道、河川など可視のデータもデジタル化する際の取得密度の違いなどにより、正確な位置を計測することができなかった。また、そもそも正射投影の地図と中心投影の空中写真を調整した写真図は正確には重ならないため<sup>29)</sup>、例えば図 6 のように Google マップなどからも地物の正確な座標を得ることはできなかった。空中写真上では道路と線路の交点の中心をプロットしたが、同じ位置で地図表示にすると数 m ずれた位置になっていることがわかる。地図情報レベル 2500 の数値地形図の水平位置精度は標準偏差で 1.75m 以内となっているため、詳細に見た場合にはラインデータも全ての点において正しい位置を表しているとは言えず、標定を行うのに必要な精度を満たす基準点を計測することはできなかった。

#### b) ハンドヘルド GPS の利用

そこで、現地において市販されているハンドヘルド GPS を用いて基準点座標を計測し、外部標定要素の調整を試みた。図化名人では最低 4 点の基準点があればバンドル標定を行うことができるが、単独測位では通常の写真測量に用いられる基準点のような精度を得られないため、点数を多く計測した。これは公共測量作業規程の準則第 168 条の、単コースで基準点のみを用いて調整計算を行う場合に定められた (12) 式よりも多い基準点数である。今回の場合は地震後画像が 6 枚のためステレオモデル数は 5 となり、3 次元の基準点が 5 点必要となる。

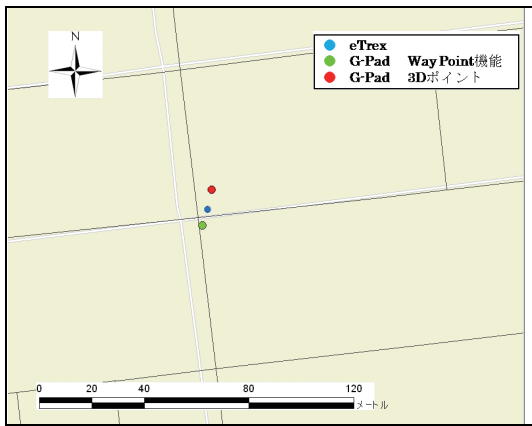


図8 GPS計測点のずれ

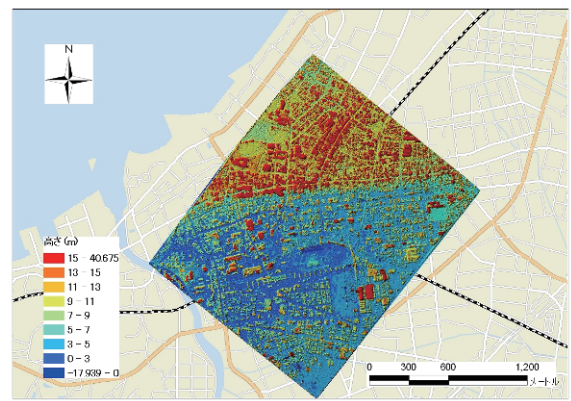


図10 調整した地震後DSM



(a) ステレオモデル上での計測 (地震前)



(b) 図化名人上での計測 (地震後)

図9 地震前ステレオモデルでの基準点計測の例

$$N_H = N_V = \left(\frac{n}{2}\right) + 2$$

[12]

ここで、 $n$  はモデル数、 $N_H$  は水平基準点、 $N_V$  は水準点である。

現地におけるGPSの計測場所の例を図7に示す。計測にはGarmin社製eTrex Vista J、BIZWORKS株式会社のG-Pad (GETAC社製PDA PS535EにモバイルGISソフトSuperPadをインストールしたもの)を使用した。できる限り正確に計測するため、計測を開始したのち、2つの機器に表示される緯度と経度の秒の値が一致するまで時間をおいてから座標を記録した。測定結果は、図8に

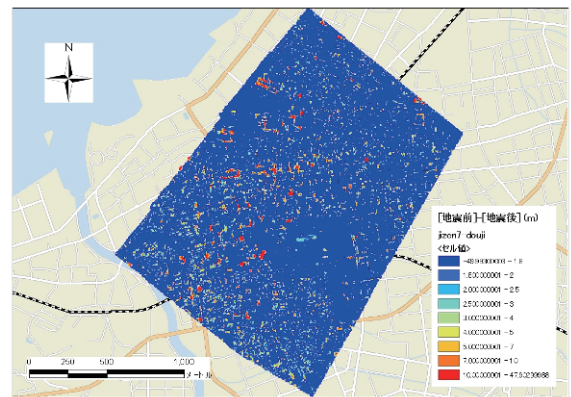


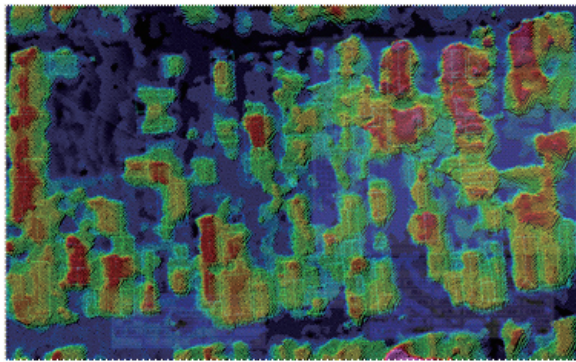
図11 地震前後DSMの差分

示すように数mずれたものとなっている。G-Padでは軌跡を記録するWay Point機能と、現在地のGPS位置から3Dポイントフィーチャを作成する機能の2通りで記録したが、記録する時刻が十数秒程度違ったために同一の機器でも異なる座標が記録された。

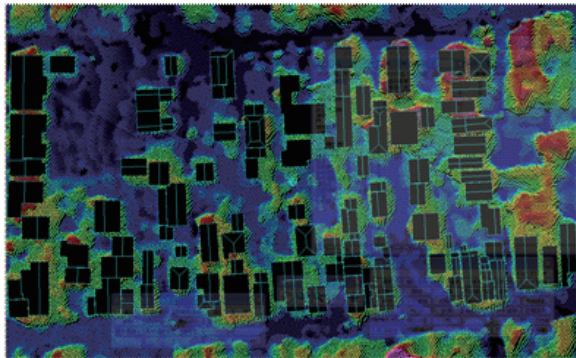
3点のうちGIS上の地図(数値地図2500)と比べて明らかにかけ離れた点は除き、計測された座標の平均値を基準点座標として使用した。通常、単独測位の(測量用ではない)GPSでは位置推定の計算過程で水平方向の精度を向上させるため、高さ方向の精度を犠牲にすると言われている。今回の計測においても高度はばらつきが大きかったため、基準点のZ座標には5mメッシュ標高<sup>26)</sup>の値を利用した。パスポイントは自動で計測したが、樹冠など平坦でない場所や同一点かどうか疑わしい点を計測した場合には再計測を繰り返し、全て正確な点を使用した。しかしながら、誤差が大きくバンドル調整を行うことはできなかった。

### c) 地震前後のDSMのマッチング

一方、地震前画像から自動計測したDSMの地表面と思われる場所の値を数値地図5mメッシュ標高<sup>26)</sup>の値と比較したところ、両者はほぼ一致した。同時調整の行われた外部標定要素を用いたため、精度よくステレオモデルを作成できたものと考えられる。そこで地震前のステレオモデル上において、地震前後で変状をきたしていない明瞭な地物を計測し、その座標値を基準点座標とした(図9)。つまり、地震前DSMをマスター、地震後DSMをスレーブとした画像間マッチングを行った。この方法では、前後の画像上で同一点が確認できる地物があ



(a) 自動計測の標高点群



(b) ブレークラインの抽出

図 12 自動計測の標高点と図化データ

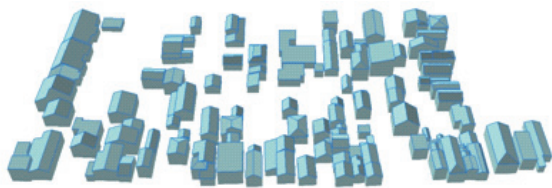


図 13 地震前画像より取得した 3 次元建物モデル

ればどのような場所でも基準点として利用できるため、基準点をステレオモデル全体に配置した。ただし、飛行コースが同一ではなく地震前後画像のラップは完全ではないため、ステレオモデルの端部に近い場所を計測せざるを得ない場合は、基準点の精度をやや大きく設定し、数を増やした。こうして得られた標定要素から偏位修正画像を作成し、自動計測した DSM を図 10 に示す。直接定位による外部標定要素をそのまま使用したモデルに比べ標高の全体的なオフセットはなく、直接定位による外部標定要素を用いたものに比べてより適切なモデルを構築することができた。

## (2) ブレークラインを採用した地震前 DSM の構築

地震前 DSM から地震後 DSM の標高値を差し引くと、図 11 のようになる。地震前後の地物の高さの差は捉えられているものの、ノイズが非常に多く、この画像から倒壊した建物を抽出することは困難である。

図化名人では自動計測による標高点の取得が最も詳細な場合で 4 画素おきになるため、理想的に平坦な場所でも地震前画像では約 0.67m、地震後画像では約 0.48m おきの計測になる。さらに前述したエラーに加え、自動画像マッチングによる 3 次元計測は 5% から 30% 程度の誤

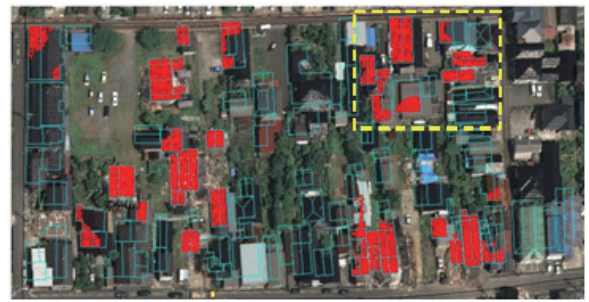


図 14 即時性を重視した方法による倒壊建物抽出結果 (赤色は標高差 2.5m 以上の画素)

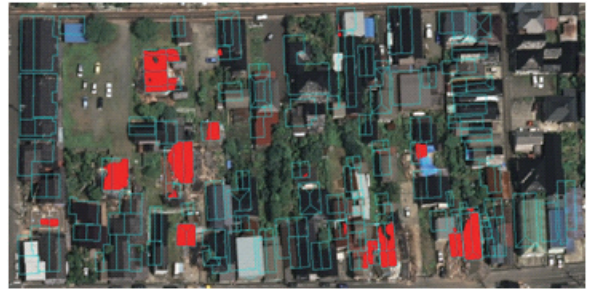


図 15 地震後のステレオ画像からブレークラインを取得した場合の倒壊建物抽出結果 (赤色は標高差 2.5m 以上の画素)



図 16 目視判読結果 (赤色は被害建物)

計測を含むと言われており<sup>29)</sup>、とくに建物などの人工物においてはその形を完全には再現できない。したがって、正しいステレオモデルを作成することができたとしても、自動計測によるモデル同士で計算するには誤差が大きくなると考えられる。

そこで地震前ではデータの準備に時間をかけることができることから、DSM に建物上面の形状を加えることで、より正確な DSM を用意する。具体的には建物の屋根を計測し数値図化したものを、ブレークラインとして立体サーフェスに与える。本研究では、多くの建物が倒壊した東本町 3 丁目の 2 つの街区において、住宅家屋以外の構造物 (物置など) を除いた 109 棟について図化を行った。ここでは、写真図やオルソフォトを作成する過程の通常図化作業とは異なり、建物の屋根の形状のみを取得した。屋根の形状をできる限り正確に再現するため、屋根の輪郭を 3 次元計測し、ポリゴンデータを作成した。計測を行うステレオ画像上で、輝度値を調節しても濃い陰やハレーションによって状況が確認できない箇所は階数から予測される高さで建物の輪郭だけを取得した。なお、今回対象とした地域のブレークライン取得には 1-2

表 2 倒壊建物の抽出結果の精度比較

		目視判読			
		無被害	傾斜	倒壊	合計
即時性を重視 (図 14)	無被害	66	0	2	69
	一部	11	0	1	12
	倒壊	13	1	15	29
	合計	90	1	18	109
ブレイク ラインを 利用 (図 15)	無被害	86	0	0	86
	一部	4	1	1	6
	倒壊	0	0	17	17
	合計	90	1	18	109

時間程度を要した。デジタル図化機の操作に慣れていれば更なる時間の短縮も可能と考えられるが、例えば航空機レーザースキャナの利用やすでに構築されている 3 次元 GIS データを用いる<sup>30)</sup>ことで、事前の 3 次元建物モデルの整備は進むものと考えられる。

自動計測による DSM を構成する点群データと、計測した建物形状の違いを図 12 に示す。このようにして取得した図化データ (図 13) から TIN (Triangulated Irregular Network) を発生させた。

### (3) 建物倒壊の抽出結果

本研究では、即時性を重視するため、地震後画像については自動計測による DSM の計測点データを 0.5m メッシュのラスターデータに変換したものを使用し、地震前の TIN との差分をとった。一般的な建物の階層は 3m 程度であることを鑑みて、標高値が 2.5m 以上減少した箇所を倒壊と判断した (図 14)。

また、即時性に劣るがより正確な抽出手法として、地震前画像から作成した図化データを地震後のステレオモデルに読み込み、地震後におけるブレイクラインも取得した。このようにして得た地震後の図化データを自動計測の DSM に加えて TIN を発生させ、地震前の TIN から差し引いたものが、本研究における理論上の正解結果と考えられる (図 15)。

目視によって判読した結果を図 16 に示す。この目視判読結果と図 14、図 15 における抽出結果の比較を表 2 に示す。目視判読の「傾斜」は、倒壊はしていないものの、ある程度の横方向の変位が認められた建物 (1 棟) である。図 14、図 15 における抽出結果の「一部」は建物面積のおよそ半分未満の領域で高さ変化が抽出されたもの、「倒壊」は半分以上の領域の高さ変化を抽出した建物を示している。即時性を重視した抽出法 (図 14) では、倒壊建物 18 棟のうち 15 棟を倒壊と判断し、1 棟が建物の一部が高さ変化 2.5m 以上を示しており、倒壊建物のほとんどを抽出することができている。一方、目視判読により無被害建物と判断される 90 棟に関しては、13 棟を倒壊とするなどやや精度が悪い。これは、図 14 の北東に位置する一部区域 (黄色線で囲んだ部分) で、地震後の空撮画像から作成した DSM の精度が悪かったことが影響している。DSM の精度が悪かった原因としては、倒れこみによるオクルージョン、建物による濃い影などが考えられる。この区域を除けば、無被害建物のほとんどを無被害と判断できている。本手法の理論上の正解 (図 15) については、無被害建物、倒壊建物の両方の的中率が高く、理想的には空中写真測量に基づく建物倒壊把握

は有効な手法であることが確認できる。

## 4. 結論

本研究では、新潟県中越沖地震の前後に柏崎市を撮影したデジタル空中写真を用いて空中写真測量を行い、得られた DSM の差から地震によって倒壊した建物の把握を試みた。

まず地震前後に撮影されたデジタル空中写真において、POS により直接得られた外部標定要素を用いて空中写真測量を行った。それぞれステレオモデルを作成したのち、自動計測により DSM を構築したところ、地震前画像の標高はおおよそ正しく地物を示していたが、地震後画像を計測したものは全体的に高さ方向に 10m 程度の違いがあり、水平方向にもずれていた。これは地震前の POS データは電子基準点のデータを利用して調整がなされたものであったが、地震後のものは調整を行っておらず、直接定位によるデータであったことが原因であると考えられる。本研究で使用した地震後画像は、測量を目的としておらず被害状況を把握するための撮影であったため、同時調整を行っていなかった。今回に限らず地震直後は電子基準点の位置がずれてしまうなど利用に制限がかかり、同時調整を行えないことも多い。

そこで地震直後にもなるべく即時性を損なわず、基準点座標を得る方法を検討した。公共測量の作業規程で定めるような測量は行うことができないと考えられるため、市販の単独測位のハンドヘルド GPS によって通常より多くの点数を計測した。しかし個々の点の精度の悪さを補うことはできなかった。また、GIS などを利用した通常の間図からの計測を試みたが、画像で明確に確認できる地物と同一の点を計測することは困難であり、これもうまく標定することができなかった。そこで、良好に作成できた地震前のステレオモデルを用いて 12 点の基準点を取得し位置合わせしたところ、精度を満たす調整ができた。

建物が多く倒壊した東本町 3 丁目の一部を対象として、ブレイクライン取得法による DSM の修正を試みた。標高の自動計測では、個々の建物の形状を捉えられるほど密にはデータを得られないことや、誤差を多く含むことから、地震前ステレオモデルを立体視により計測し建物上面の図化データを取得した。これをもとに三次元建物モデルを作成し、DSM にブレイクラインとして加えることで正確なサーフェスを取得した。こうして得られた地震前の DSM と、地震後の DSM については自動計測によって取得されたものとブレイクラインを利用したものの二通りを用意し、両者を比較した。前者は地震後即時に倒壊を把握することを想定したもので、大局的な倒壊箇所はおおむね把握できると思われる結果を得た。後者は本研究手法の理論上の正解であり、空中写真測量に基づく建物倒壊把握は有効な手法であることが確認できた。

本研究の手法では地震後の自動計測による DSM の精度によって抽出結果が大きく変化する。そこで、全画素ステレオマッチングやステレオトリプレットなど、自動で三次元計測を行う他の手法を検討する必要がある。さらに、本研究で行った標高値を用いる手法と、従来より行われているテクスチャから判断して被害箇所を自動判別する手法と組み合わせることにより、より迅速で正確に被害状況を把握することができると考えられる。

## 謝辞

本研究で使用した地震前後の空中写真、POS等のデータは柏崎市とアジア航測株式会社からそれぞれ提供していただきました。ここに記して深く感謝致します。

## 参考文献

- 1) 川島一彦, アイダゴンオメール, 青木孝義, 岸本一蔵, 小長井一男, 迫田丈志, スベン P. テオドリ, 高橋典之, 松井智哉, 八嶋厚: 2009年4月イタリア・ラクイラ地震による被害報告の概要, 土木学会, 地盤工学会, 日本建築学会, 日本地震工学会, 2009.
- 2) 村手直明: 空からの計測技術と周辺技術の進歩, 写真測量とリモートセンシング, Vol.44, No.2, 日本写真測量学会, pp.7-8, 2005.
- 3) 小川直樹, 山崎文雄: 航空写真を用いた兵庫県南部地震における建物被害の目視判読, 地域安全学会論文集, Vol.2, pp.119-128, 2000.
- 4) 長谷川弘忠, 山崎文雄, 松岡昌志: 空撮ハイビジョン映像を用いた兵庫県南部地震による建物被害の目視判読, 土木学会論文集, No.682/I-56, pp.257-265, 2001.
- 5) Yamazaki, F., Yano, Y. and Matsuoka, M.: Visual Damage Interpretation of Buildings in Bam City Using QuickBird Images Following the 2003 Bam, Iran, Earthquake, Earthquake Spectra, Vol.21, No. S1, pp. 329-336, 2005.
- 6) 三浦弘之, Wijeyewickrema, A.C., 井上修作: 高分解能衛星画像を用いた2004年スマトラ沖地震によるスリランカ東部での津波被害判読, 日本地震工学会・大会-2005, pp.260-261, 2005.
- 7) 越村俊一, 行谷佑一, 柳澤英明: 津波被害関数の構築, 土木学会論文集B, Vol. 65, No. 4, pp.320-331, 2009.
- 8) 三富創, 松岡昌志, 山崎文雄: 最近の地震災害の空撮画像を用いた建物被害地域の自動抽出の試み, 土木学会論文集, No.703/I-59, pp267-278, 2002.
- 9) 鈴木大輔, 丸山喜久, 山崎文雄: デジタル航空画像を用いた新潟県中越沖地震の建物被害抽出, 日本地震工学会論文集 2010.
- 10) 鍛田泰子, 高田至郎, 柴田安啓: 写真測量による街区建物群の地震被災度調査・診断方法の開発, 地域安全学会論文集, No. 10, pp. 401-408, 2008.
- 11) Huang, L., Oguni, K. and Hori, M.: Preliminary Study on Digital Images for Automated Identification of Structural Damages by Edge Detection, Journal of Applied Mechanics, JSCE, Vol. 10, 2007.
- 12) 史中超, 柴崎亮介: ウェーブレット変換による画像分割とステレオマッチングを利用した航空写真からの建物の自動抽出の試み, 写真測量とリモートセンシング, Vol. 34, No. 5, pp. 36-44, 1995.
- 13) 史中超, 柴崎亮介: 高さ情報を利用した航空写真からの建物自動抽出手法, 写真測量とリモートセンシング, Vol. 36, No. 2, pp. 36-44, 1997.
- 14) 国土交通省国土地理院: 地図作成と基本情報調査, 国土地理院の測量事業・技術の変遷, 国土地理院時報, 100集, pp35-59, 2003.
- 15) 吉高神充, 田村竜哉: デジタル航空カメラ等による空中写真撮影, 国土地理院時報, 115集, 2008.
- 16) 内田修, 織田和夫, 真屋学, 土居原健: POS撮影精度管理法, 第25回技術発表会論文特集, APA, No.85-3, pp23-45, 日本測量調査技術協会, 2003.
- 17) 近津博文, 熊谷樹一郎, 佐田達典, 鹿田正昭, 淵本正隆: 情報工学概論, 日本測量協会, 2007.
- 18) 中村英夫, 清水英範: 測量学, 技報堂出版, 2000.
- 19) 篠 邦彦: 写真測量 新版, 山海堂, 1980.
- 20) 秋山実: 写真測量, 山海堂, 2001.
- 21) 国土交通省国土地理院: 作業規程の準則(全文), 作業規程の準則の改正について(平成20年国土交通省告示第413号), 2008.
- 22) Leberl, F. and Gruber, M.: ULTRACAM-D: Understanding some Noteworthy Capabilities, Photogrammetric Week 05, Dieter Fritsch, Ed. Wichmann Verlag, Heidelberg, pp.57-68, 2005.
- 23) 加藤正人: 改訂 森林リモートセンシング, 日本林業調査会, 2009.
- 24) Hinz, A.: The Z/I digital aerial camera system, Proceedings of the 47th Photogrammetric Week 1999, Wichmann Verlag, Heidelberg, pp. 109-115, 1999.
- 25) アジア航測株式会社: はじめて使う図化名人チュートリアルマニュアル, VII, 2007.
- 26) 国土地理院: 数値地図5mメッシュ(標高)柏崎, 2009.
- 27) 岩田昭雄, 成田次範, 田上節雄: 平成19年(2007年)新潟県中越沖地震に伴う基準点成果の改定について, 国土地理院時報, 116集, 2008.
- 28) ESRI ジャパン(株): ArcGIS データコレクション スタンダードバック, 2009.
- 29) 津留宏介, 峰島貞治, 内田修, 古本秀明, 馬河紘子, 小田三千夫: 航空・衛星写真画像ハンドブック, 日本測量技術調査協会, 古今書院, 2008.
- 30) 山崎文雄: 防災におけるリモートセンシング技術利用の最新動向, 土木学会第10回地震災害マネジメントセミナー, 地震災害対応におけるリモートセンシング・テクノロジーの活用, pp. 1-12, 2009.

(原稿受付 2010.5.29)  
(登載決定 2010.9.12)