

京都大学防災研究所

一般共同研究（課題番号：2021G-10）

建物被害調査画像管理の一元化を 可能とする建物自動分類システム の構築

令和3年4月1日 ～ 令和5年3月31日

研究代表者：中嶋 唯貴（北海道大学）

所内担当者名：西嶋一欽（京都大学防災研究所）

本報告書は、京都大学防災研究所一般共同研究（課題番号：2021G-10）の助成を受け、下記の研究組織により実施された研究成果をまとめたものである。なお、研究成果の取りまとめにあたって、下記の関連する研究成果の一部を加筆修正している。

研究組織

研究代表者

中嶋唯貴 北海道大学・准教授

研究分担者

西嶋一欽 京都大学防災研究所・准教授

友清衣利子 熊本大学大学院先端科学研究部・准教授

研究協力者

富永佳吾 北海道大学修士課程

関連する研究成果の公表

- 1) 中嶋唯貴, 富永佳吾, 友清衣利子, 西嶋一欽: 高精度位置・角度情報を用いた被害写真と被災建物の自動統合, 令和3年度京都大学防災研究所研究発表講演会梗概 2022, C121.
- 2) 富永佳吾, 中嶋唯貴, 西嶋一欽, 友清衣利子: 高精度位置・角度情報を用いた被写建造物の被災部位判定, 地域安全学会梗概集(CD-ROM), 50, A-8, 2022, 05.
- 3) 富永佳吾, 中嶋唯貴: サイバー空間における被災都市データベース構築の試み, 日本地震工学会大会梗概集, C-23-4, 2022.1
- 4) 中嶋唯貴・富永佳吾・西嶋一欽・友清衣利子: 建物被害調査画像管理の一元化を可能とする建物自動分類システムの構築, 令和5年度京都大学防災研究所研究発表講演会梗概 2023, E210

目次

1. 研究の目的	
2.被写建造物判定システム	1
2.1 システムの概要	1
2.2 使用デバイス・ソフトウェア	2
3. システムのアルゴリズム	3
3.1 撮影姿勢の推定	3
3.2 撮影範囲内外判定	3
3.3 建物同士の重なるの考慮	4
3.4 撮影部位の判定	4
3.5 仮想空間における 3次元データベース	5
4. 館山市での実験	エラー! ブックマークが定義されていません。
4.1 館山市での撮影調査	エラー! ブックマークが定義されていません。
4.2 3軸加速度を用いた場合のシステム精度の概要	7
4.3 9軸センサを用いたシステム精度の確認	7
4.4 撮影部位の判定	8
4.5 3次元データベースの利用	8
5. まとめ	9
参考文献	10

1. 研究の目的

災害被害の調査は、防災関連研究を推進するために大変重要であることに異論はないであろう。しかし、災害研究者が被害調査を実施するには準備、調査、調査結果の整理と分析において多くの時間と労力を必要とする。特に、被害調査結果の整理については、多くの時間が必要となる。また、災害調査は多数の研究者により個別に調査が行われるものの、調査時期や調査建物が異なる。調査時期の異なる画像データは、建物に限定した場合、建物ごとに画像データを分類可能であれば被害状況から補修・解体再建情報までを記録した貴重なデータとなりえるものであるが、それらのデータを収集・分類することは実現できておらず、各研究者が時間をかけ収集した被害調査データは個人利用にとどまり、防災関連研究の共通財産として有効に活用できていないといいたい。その背景には、各研究者独自のデータであり、簡単に提供できないという事情はあるものの、研究者の好意により提供されたとしても数千枚に及ぶ被害調査データを建物ごとに自動的に整理する適切な手法が確立されておらず、その一元化作業を担うには、手作業で画像を分類するという途方もない時間が必要となるという問題がある。そこで、調査画像の自動分類とサイバー空間でのデータベース化を目標に、ドローンによる都市の3D情報化、撮影箇所の位置情報の自動取得、撮影建物の特定、3次元仮想空間へ投影などの手法を開発したのち一連のシステムとして統合した自動分類・投影手法を用いた仮想空間における被災都市の建物被害像3Dデータベース構築を目指す。

2. 被写建造物判定システム

2.1 システムの概要

仮想空間での都市を再現した画像情報データベース構築の手順を図1に示す。まず、ドローンにより空撮した画像を用い、竹内ら¹⁾の手法を適用することで都市のモデル化(3Dポリゴンデータ)を行う。次に、被災地調査を実施する。被災地調査は、タブレットと9軸センサを内蔵したRTK測位機器(DG-PRO1RWS)を用いる。これにより、取得した建物の撮影位置・姿勢情報を取得できる。このデータを撮影時間を基準に抽出・整理し、撮影時の姿勢推定、撮影範囲内建物の判定、被写建物の被災部位判定を行う。この撮影位置と姿勢データに加え、3D都市モデルを使用し、仮想空間の3次元ポリゴンに撮影画像を投影することで画像情報データベースを構築する。

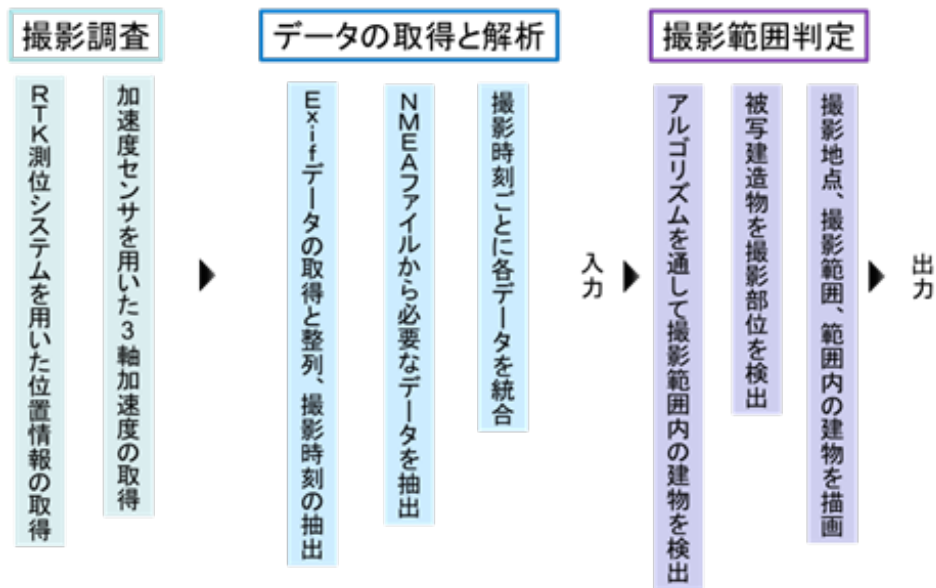


図1 画像情報データベース構築の流れ²⁾

2.2 使用デバイス・ソフトウェア

RTK 測位の移動局となるレシーバ (DG-PRO1RWS) にアクティブアンテナを装着、それをカメラ搭載のタブレット PC (NEC LAVIE11T 112K1) に固定し、加えてモバイルバッテリー、モバイル Wi-fi を使用して撮影調査を行った。撮影調査用のデバイスセットを図2に示す。撮影用のタブレット PC 内には、位置情報の記録を取得するための RTK 測位レシーバに対応した「Drogger GPS」、タブレット PC 内蔵センサを用いて 3 軸加速度を計測する「G-Sensor Pro」というアプリケーションをインストールした。本研究では RTK レシーバから取得した姿勢情報を利用している。



図2 調査デバイス³⁾

3. システムのアルゴリズム

本システムのアルゴリズムは、撮影姿勢の判定、撮影範囲の判定、建物の重なり判定、撮影部位の判定、仮想空間におけるデータベース化の 5 つからなる。なお、本アルゴリズムに関しては文献 2) と文献 3) に報告されている。

3.1 撮影姿勢の推定

撮影姿勢の推定を行う。カメラにローカル座標系を設定する。これは右手座標系であり、奥行き方向を X 軸、左右方向 Y 軸、高さ方向を Z 軸とする。また、X 軸周りの回転を roll、Y 軸周りの回転を pitch、Z 軸周りの回転を yaw とし、各軸に対して右ねじ方向を正とする。ここで、観測によって得られた 3 軸加速度を a_{sensor} 、重力加速度 g が鉛直にのみはたらくとしたもの a_{world} とすると、

$$a_{sensor} = \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix}, \quad a_{world} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \end{bmatrix} \quad (1)$$

また、変換行列 R を Z-Y-X(yaw-pitch-roll)の順にそれぞれの回転行列を掛けたものとする。と、(1)を用いて、

$$a_{world} = R \cdot a_{sensor} \quad (2)$$

pitch 角を θ 、roll 角を φ とおき、(2)を展開すると、

$$\begin{bmatrix} \varphi \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tan^{-1} \frac{a_y}{a_z} \\ -\tan^{-1} \frac{a_x}{\sqrt{a_y^2 + a_z^2}} \end{bmatrix} \quad (3)$$

以上より、3 軸加速度から roll 角と pitch 角の値を算出することができる。本研究においては 3 軸推定結果に加え DG-PRO1RW 内蔵のアルゴリズムにより処理した 9 軸センサーによる姿勢情報も加えて用いる。

3.2 撮影範囲内外判定

カメラの撮影範囲を四角錐として仮定する (図 3)。この四角錐は範囲内の建物を透視投影する面 (以下投影面) を底面に持つ。撮影地点から投影面の各頂点に伸ばしたベクトルについて、隣り合うベクトル同士がなすそれぞれ 4 つの外積 (四角錐の側面に対して鉛直

外向き) と、撮影地点から 1 つの任意の点 A に伸ばしたベクトルの内積がすべて負である場合、点 A は撮影範囲を表す四角錐の内側に存在する。

撮影地点の位置・姿勢情報を入力しカメラのローカル座標系を移動・回転させる。移動・回転させたローカル座標系における撮影範囲について、辺ベクトル及びローカル座標系原点 O から判定対象となる点 P に伸ばしたベクトルを取得し、生成した点群についてそれぞれ撮影範囲内外判定を行う。建物ポリゴン内に均一にランダム配置した点群について、そのうちの一つでも以上の条件を満たせば撮影範囲にその建物が含まれると判定する。点群の密度が小さすぎると判定精度の低下につながり、逆に密度が高すぎると計算時間が増大するため、建物ポリゴンの体積などに応じて適切な密度の点群を設置する必要がある。

3.3 建物同士の重なりの考慮

撮影範囲内の建物について、それぞれの前後大小関係によっては他の建物と重なり映らない建物が存在する場合があるため、これらを取り除く必要がある。撮影範囲内の建物ポリゴンの頂点全てを投影面に透視投影し、投影されたそれぞれのポリゴンの頂点群について凸包を取る。凸包とはある点の集合 A について、 A のすべての要素を含むように A 内の点で形成された最小の凸多角形のことを指す。ある建物ポリゴン P について、 P のすべての頂点がそれより撮影地点に近い建物のいずれかのポリゴンの凸包に内包されていた場合、ポリゴン P が表す建物は前方に建つ他の建物に隠されるため、撮影範囲から取り除く。この処理を画像内の建物すべてに行うことによって画像内の建物重複が判定される。

3.4 撮影部位の判定

被災した建物を撮影する際、多くの場合は被災部位が中心に写るように撮影する。判定簡単のため画像中心部に写る部位を被災部位として撮影部位の判定を行う。建物ポリゴンの頂点ごとに、高さ方向へ一定間隔で点群を生成する。これらの点群に対して撮影位置から伸ばしたベクトル V_p と画角フレームの中心に伸ばしたベクトル V のなす角度を θ とする。 V については調査で得られた姿勢情報を用いて X 軸方向の単位ベクトルを回転させることで得る。 V の延長線上の周囲にある建物ポリゴンの壁面上に生成された点群のうち、どの範囲の点群まで判定に用いるのか制限を設けることで設定する。以下この θ の値を許容範囲と呼称する。

許容範囲を入力した後、 θ が許容範囲内にある点群について、撮影地点からの距離 d の大小について順位をつける。この順位が高いポリゴンの点が撮影部位であると判定するが、この際にどの順位までの点群を判定に用いるかを定める。これを取得範囲と呼称する。取得範囲内の点の中で画像に写る部位と同一なものがあれば正しい判定が行われたことになる。

3.5 仮想空間における3次元データベース

仮想空間において建物のポリゴンに被害建物画像を貼付けた3次元データベース²⁾は、次のように作成した。竹内¹⁾、富永³⁾の手法を用い得られた撮影位置・姿勢データと建物3Dポリゴンを使用し、建物ポリゴンに投影するため、撮影画像内の建物領域のみのトリミングを行う。仮想空間上において撮影範囲を四角錐と仮定すると、四角錐の底面（以下、撮影スクリーンと呼称）が撮影画像と一致する。加えて、撮影対象の建物3Dポリゴンの輪郭を撮影地点・姿勢から算出された撮影スクリーンに透視投影し、撮影画像から撮影スクリーン上に投影された3Dポリゴンの輪郭を切り抜くことで画像内の建物領域を抽出できる。図4に一例を示す。画像から建物部位が抽出されているのがわかる。なお、一連の処理の中で建物3Dポリゴンは計算を簡単にするために建物フットプリントの外接矩形を高さ方向に立ち上げた。トリミングによって得られた画像を撮影画像の建物領域を建物の面によって分割し、それぞれを対応した部位に貼付する。この処理を実行したものが図4である。トリミングされた画像が撮影対象となった建物ポリゴンに表示されているのが分かる。これを被災地内で得られたすべての画像に適用することで仮想空間における建物被害写真の管理が可能になる。

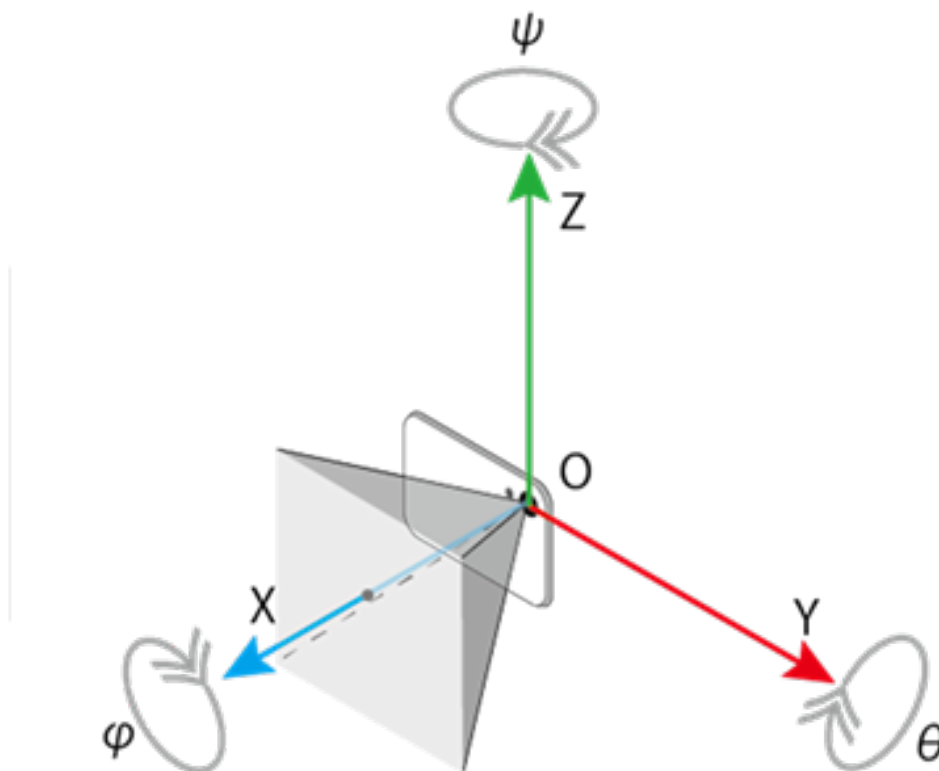


図3 カメラのローカル座標系と撮影範囲³⁾

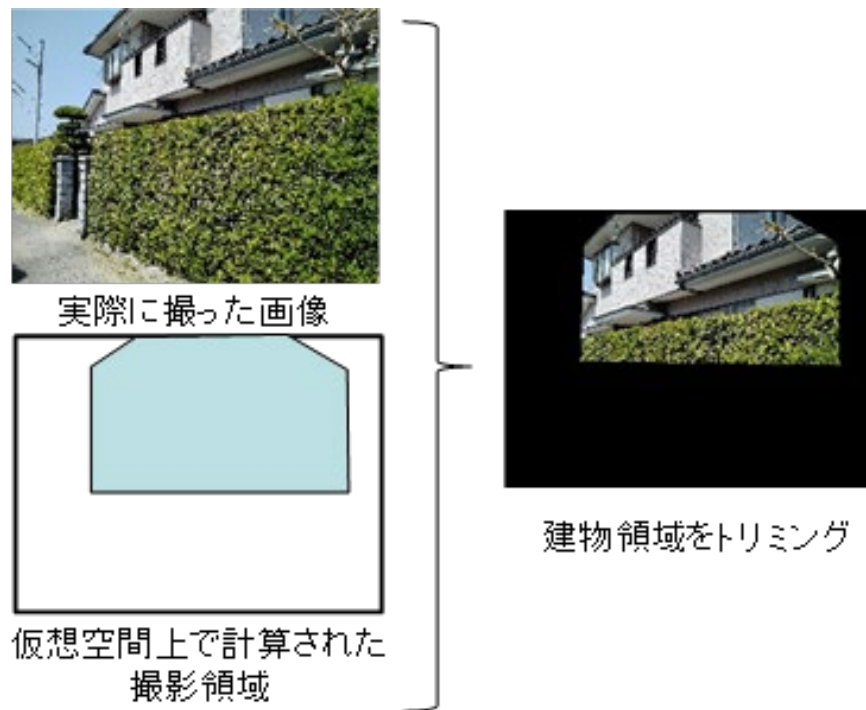


図4 GIS上での実行画面²⁾

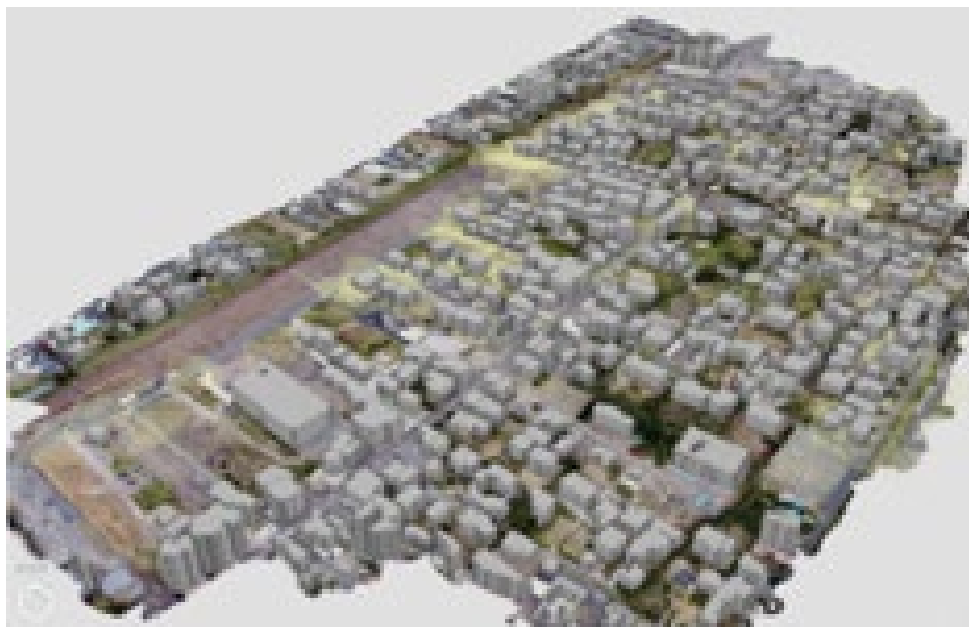


図5 館山市の3Dポリゴン¹⁾

4. 館山市での実験

3章で構築したアルゴリズムを用い、千葉県館山市においてシステムの実装を試みた。なおこの実験の概要については、精度確認が文献^{3) 4)}、3D データベースの構築に関しては文献^{2) 5)}に報告済みである。

4.1 館山市での撮影調査

2019年に大きな台風被害を受けた千葉県館山市で2021年11月23日~11月25日、2022年4月9日から10日にかけて撮影調査を行った。2.2で説明したデバイスおよびアプリケーションを使用し、一度目の調査では位置情報と共にタブレットPCの内蔵センサを用いて3軸加速度を取得しながら撮影を行った。二度目の調査では位置・角度情報、撮影時刻を取得しながら撮影を行った。なお、一度目の調査では公開されている基準局の中で館山市から最も近い千葉県君津市の「人見の基準局」、二度目の調査では前述の基準局が利用できなかったため東京都小金井市の「法政大学小金井キャンパス（理工学創生科学科）」を利用した⁶⁾。

4.2 3軸加速度を用いた場合のシステム精度の概要

一度目の調査³⁾⁴⁾で得られたデータを用いて3軸加速度から姿勢推定を行い、被写建造物の判定を行った。各画像に映る建物のうち、主たる建物を1つ設定する。主たる建物とは画像内の中心、あるいは画像の多くを占めるような建物をその画像の被写体として選択したものを指す。主たる建物の設定に関しては筆者が撮影画像を確認して恣意的に行った。点群データが用意された建物は362棟で、それぞれ個別に0~361の識別番号を与え、撮影時刻とその時刻に撮影した画像内の主たる建物の識別番号を紐づけて抽出したデータと結合した。判定結果と撮影画像を比較し、被写建造物判定の精度がどの程度であるかを写真内の主たる建物が含まれるか否かで確かめた。判定の際、ポリゴン内には100個の点群を生成した。また、建物ポリゴンは全て同じ平面上に屹立していると仮定した。

撮影した写真259枚のうち、撮影地点から30m圏内に建物がない場合を除いた227枚を用いて判定精度の確認を行ったところ71.8%（163枚）は主たる建物が含まれると判断された。また、3軸加速度による姿勢推定を行った場合その割合は59.5%まで低下した。実験結果から本システムに3軸加速度による姿勢推定を適用することは不適切であることが確認できた。

4.3 9軸センサを用いたシステム精度の確認

4.2の結果を踏まえてレシーバ（DG-PRO1RWS）に内蔵されている9軸センサから得られた3軸加速度に加え各軸周りの角加速度により導出される姿勢情報をNMEA形式でファイルに書き出し、その情報を用いて判定を行った。判定の際、ポリゴン内には300個の点群を生成した。また、4.2と同じく建物ポリゴンは全て同じ平面上に屹立していると仮定し、

撮影高さは一律で 1.7m に設定した。

撮影した写真 249 枚のうち、撮影地点から 30m 圏内に建物がない場合を除いた 246 枚を用いて被写建造物の判定精度の確認を行ったところ、姿勢推定をしない場合で 85.4%、姿勢推定した場合でも 76.8%まで向上した。このことから、9 軸センサによる計測値を用いた判定では比較的高精度な結果が得られることが分かった。正しく判定されていない画像について、原因として撮影地点とポリゴンの重複、障害物等により衛星や基準局との通信がうまくいかないことによる位置情報やヘッディングのずれがあることを確認した。

4.4 撮影部位の判定

正しく姿勢推定が行われていた画像に対して撮影部位の判定を行った。撮影中心にある建物について 4.4 で述べたように建物ポリゴン頂点の高さ方向へ 100mm ごとに区分するように点群を生成する。基礎部、壁部、屋根部の高さ範囲を表 2 のように設定する。基礎と屋根に関しては上下 10,000mm 拡張した。これらの点群に加えてポリゴン内にランダムな点群生成し、撮影位置から各点に伸ばしたベクトルと画角フレームの中心に伸ばしたベクトルのなす角度、および撮影地点からの距離の大小を評価することによって、画像中心に写る部位を特定する。表のように許容範囲と取得範囲を変化させ、部位判定システムの精度を確認した。許容範囲を $\theta=5^\circ$ 、取得範囲を 10 とした場合、許容範囲内に点が存在しない場合を含めた正解率は 55.0%、除いた場合の正解率は 66.7%となった。許容範囲が小さいほど、また取得範囲が大きいほど正解率は高くなる傾向にあることが確認できた。また $\theta=30^\circ$ まで許容範囲を広げると、すべての画像において許容範囲の中に点が存在することを確認した。位置・角度情報のずれ、仮想空間上のポリゴンには建物の大まかな形状しか反映されていないこと、建物部位の範囲設定を均一にしていることなどが精度低下の要因として考えられる。

4.5 3次元データベースの利用

3.5 の手法を館山市の調査に適用した結果を図 4 に示す。トリミングされた画像が撮影対象となった建物ポリゴンに表示されているのが分かる。これを被災地内で得られたすべての画像に適用することで仮想空間における建物被害写真の管理が可能になる。3 次元データベース内に投影された画像は被害発生方向や被害発生個所・被害程度などを 3 次元で把握できる。また、撮影日時情報も保有しているため、撮影日時を限定して表示すれば各建物の復興過程の追跡も可能となる。加えて、VR 技術を利用することで、仮想空間に保存された被災地内を再現が可能となり、被災地での調査実施者以外も被害状況の広がりを確認することが可能である。

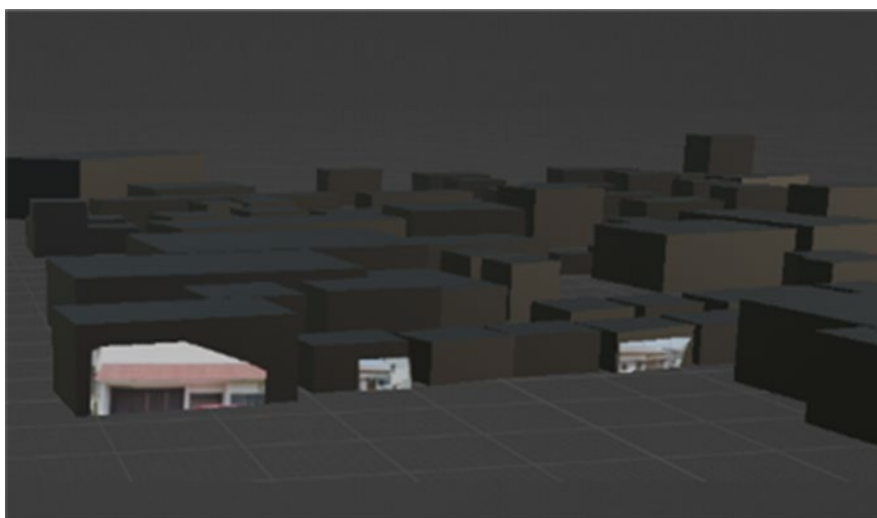


図4 仮想空間でのデータベース⁵⁾

5. まとめ

その前後関係の判定アルゴリズムは仮想空間化では実現している。実際の被災地で使用した結果、一度目の調査では 71.8%にとどまっており、さらに姿勢推定を考慮した判定精度に関しては 59.5%とさらに低下した。原因として、姿勢推定において 3 軸加速度のみを考慮し撮影時に静止していると仮定して姿勢を算出したことが最も問題であったと考えられたため、二度目の調査では RTK 測位用レシーバ内蔵の 6 軸センサを用いて動的状況下での姿勢情報を計測して撮影を行った。これにより被写建造物システムの精度が明らかに上昇し、姿勢推定した場合でも 76.8%の精度を確保できていることが確認できた。

加えて、本論においては姿勢推定結果を使い撮影した建物の部位まで判定するシステムの開発を試みた。結果、その精度は約 6 割強となった。このことから、一度目の調査よりも位置情報・角度情報を高精度に記録できており、6 割強ではあるが部位判定の自動化が可能になったことを確認した。また、建物被害調査画像の自動分類を用いた 3 次元データベースの開発を試みた。画像内の対象建物領域をトリミングし、それらを建物 3D ポリゴンの表面に貼付することによって、サイバー空間上において撮影建物ポリゴンへの画像の投影が可能となった。しかし、現段階では精度の高い位置情報と撮影時のタブレットの姿勢情報が得られる画像にのみ適用可能となっている。今後は機械学習を用いた建物領域の切り抜き画像を用い、撮影位置・姿勢を自動修正することで画像トリミング・貼付の精度を改善するとともに、位置情報・姿勢情報を保有していない画像においても画像の輝度や RGB の情報から相互相関をとることで撮影位置・姿勢情報を推定する所存である。

参考文献

- 1) 竹内崇, 友清衣利子, 高橋徹, 西嶋一欽: 被害調査及び分析のためのドローン空撮写真に基づく建物輪郭抽出 令和3年度京都大学防災研究所研究発表講演会梗概 2022, C123.
- 2) 中嶋唯貴・富永佳吾・西嶋一欽・友清衣利子: 建物被害調査画像管理の一元化を可能とする建物自動分類システムの構築、令和5年度京都大学防災研究所研究発表講演会梗概 2023, E210
- 3) 富永佳吾, 中嶋唯貴, 西嶋一欽, 友清衣利子: 高精度位置・角度情報を用いた被写建造物の被災部位判定, 地域安全学会梗概集(CD-ROM), 50, A-8, 2022, 05.
- 4) 中嶋唯貴, 富永佳吾, 友清衣利子, 西嶋一欽: 高精度位置・角度情報を用いた被害写真と被災建物の自動統合, 令和3年度京都大学防災研究所研究発表講演会梗概 2022, C121.
- 5) 富永佳吾, 中嶋唯貴: サイバー空間における被災都市データベース構築の試み, 日本地震工学会大会梗概集、C-23-4, 2022.1.
- 6) 善意の基準局掲示板 <https://rtk.silentsystem.jp/> 閲覧日: 2023年5月29日