

3次元画像処理とクラウドソーシングによる被災状況マップ生成法

小林 洋陽[†] 宮戸 英彦[‡] 亀田 能成[‡] 北原 格[‡]

[†]筑波大学 大学院システム情報工学研究科知能機能システム専攻

〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1

[‡]筑波大学 計算科学研究センター

〒305-8577 茨城県つくば市天王台 1-1-1

E-mail: [†]kobayashi.koyo@image.iit.tsukuba.ac.jp,

[‡]{shishido, kameda, kitahara }@ccs.tsukuba.ac.jp

あらまし 災害発生時の各地域の被災度合いを表す被災状況マップは、避難、復興、防災の計画に有用であるため、発災後の迅速な作成が求められる。被災状況マップを作成するためには、各地域の被災状況を正確に把握する必要がある。しかし、広域に渡る被災地の情報を収集し、それら大量の収集情報から被災状況を的確に把握するためには、多くの手間と時間が必要とされる。本稿では、被災地の情報を収集する収集型クラウドソーシングと被災状況を判定する判定型クラウドソーシングを3次元画像処理によってつなぎ合わせることによって、被災状況マップを効率的に作成する手法について述べる。

キーワード クラウドソーシング、3次元画像処理、多視点画像、被災状況判定、ドローン撮影

1. はじめに

災害発生時の各地域の被災度合いを表す被災状況マップは、避難、復興、防災の計画に有用であるため、発災後の迅速な作成が求められる。被災状況マップを作成するためには、各地域の被災状況を正確に把握する必要がある。広いエリアの被災状況を把握するためには多くの人的リソースを導入しての調査が必要となるが、被災地ではそのような作業に割ける人的リソースが乏しいことが、被災状況マップ作成を困難にしている。

近年、人的リソースの確保手段としてクラウドソーシングが注目されている[1][2]。クラウドソーシングは、Web上の不特定多数の群衆（ワーカ）に仕事を委託することで大量の人的リソースを確保する。多数のワーカが効率的に作業できるよう、目的とするタスクを細分化したマイクロタスクを生成し、その成果を集積することによって目的タスクを実現する。計算機とインターネットの発達に伴い、多くの分野でクラウドソーシングの導入が進んでいる[3]。本稿では、被災状況把握に必要な情報収集と被害判定にクラウドソーシングを導入することで、迅速な被災状況把握を実現するフレームワークを提案する。

被災状況把握にクラウドソーシングを導入する際に検討すべき課題が二つある。一つ目の課題は、災害状況の収集と収集情報の取りまとめの方式である。我々が提案する収集型クラウドソーシングでは、被災地の情報として画像情報を収集する。収集した画像群は、クラウドソーシングワーカによる被害判定に使用されるが、画像情報だけでは撮影場所や撮影方向の把握が困難であるため、ワーカからの被害判定を被災状

況マップとして統合することが難しい。3次元画像処理によって画像を撮影したカメラの位置関係を推定することで、3次元モデルを介して画像情報群を統一的に扱うことが可能となる。本研究では、画像処理ミドルウェアによって被災地を撮影した画像情報を3次元マップとして取りまとめ、被災状況マップを生成する。

二つ目の課題は、判定型クラウドソーシングにおけるマイクロタスク生成である。クラウドソーシングの不特定多数のワーカに提供するマイクロタスクは、誰でも簡単かつ短時間で処理できることが好ましい。本研究の判定型クラウドソーシングでは、ワーカに被災地の建物の倒壊判定を依頼するために、画像処理ミドルウェアで生成された3次元マップからマイクロタスクを生成する。3次元マップには被災地に存在する全ての建物が含まれているため、注目すべき建物が明示されていないなど、マイクロタスクへの使用に適していない。本研究では、3次元マップから建物ごとに分割された3次元モデルを生成し、そこから状況把握に適した映像情報を生成し、判定型クラウドソーシングに提供する。

本研究では、迅速な被災状況マップ生成を目的とした収集型・判定型の2種類のクラウドソーシングを提案する。収集型クラウドソーシングで収集した被災地の画像情報を画像処理ミドルウェアを介して判定型クラウドソーシングに提供し、不特定多数のワーカに被害判定を依頼することで、大規模な判定処理を可能とする。

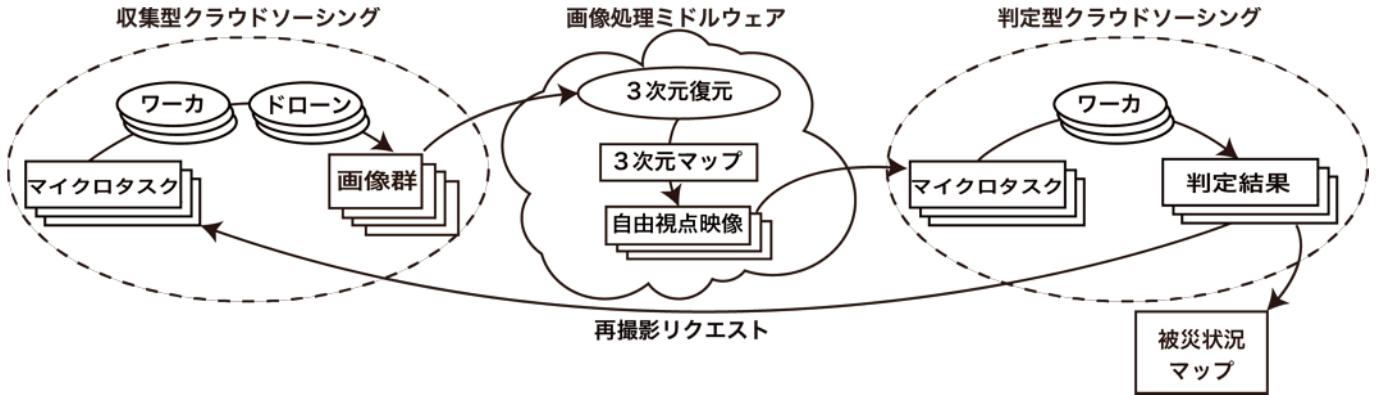


図 1：3 次元画像処理とクラウドソーシングによる被災状況マップ生成法

2. 関連研究

2.1. クラウドソーシングを利用した被災状況把握

森嶋らは、クラウドソーシングを利用して被災状況把握支援について取り組んでいる[4][5]。図 2 に示すような、航空写真の画像データから切り出した小領域画像をワーカに提示し、画像内の建物の有無とその倒壊状態の解答をマイクロタスクとしている。被災状況把握に対するクラウドソーシングの有効性を示してはいるものの、提供する航空写真是 300m 以上の高度から鉛直下向き方向撮影されているため、建物の側面などの細部を確認することは困難である。我々は、建物の倒壊判定のために、建物全体を確認できる情報をワーカに提示する必要があると考えている。



図 2：倒壊判定に使用される航空写真的一例

2.2. 3次元モデルの生成

上述した画像処理ミドルウェアの主要な機能の一つが、被災地を撮影した画像群（多視点画像）を統合し 3 次元モデルを生成する処理である。多視点画像から 3 次元モデルを生成する技術として Structure from Motion (SfM) [6] と Multi-View Stereo (MVS) [7] がある。SfM では、2 枚の画像間の対応点情報からその 3 次元座標とカメラの位置関係（モーション）を推定する。各画像対において推定処理を行った後、最後に全体の誤差を小さくなるよう 3 次元座標とカメラの位置関係を微調整するバンドル調整[8]を行う。SfM で推定され

る 3 次元点群は、画像特徴点のみであるため建物の形状判定を行うには、密度が十分とは言い難い。そこで、SfM の推定結果に MVS を適用し密な点群を生成する。MVS では SfM で推定されたカメラモーションを用いて、注目画像のあるピクセルに対する他の画像上でのエピポーラ線を求める。エピポーラ線に沿ってステレオマッチングを施すことにより深度情報を求める。カメラモーションと深度情報を用いて密な 3 次元点群を生成する。

街全体のような大規模空間を対象とした 3 次元復元として、Agarwal らはインターネット上にアップロードされた画像群を収集し、それを用いて対象空間の 3 次元モデルを生成している[9]。Flickr などの画像投稿ウェブサービスからローマのタグが付いた約 150,000 枚の投稿画像を収集し、並列処理が可能な SfM を 500 コアの計算機上で走らせ、大規模空間の 3 次元モデルを 1 日以内で復元している。

Fonstad らは GPS 情報を活用して、SfM で生成した 3 次元モデルと地図情報を連携させている[10]。画像中の特徴点と対応付けられる GPS センサを地上に設置することにより、SfM で復元した 3 次元点群をユニバーサル横メルカトル図法(UTM)に対応づけることに成功している。

2.3. 3次元モデルを用いたマイクロタスク生成

Cooper らは、タンパク質構造予測をクラウドソーシングにて行うためにタンパク質の 3 次元モデルを操作するゲームをマイクロタスクとして実施している。クラウドソーシングに参加するワーカはタンパク質に基づいた 3 次元のパズルを解くマイクロタスクを行う。タンパク質のモデルを操作することでスコアが与えられ、より妥当な予測を行うことでスコアが高くなる。クラウドソーシングによって、法則が判明していない機械には判断困難な問題に対して人間の判断能力を利用している[11]。

3. 3次元画像処理とクラウドソーシングによる被災状況マップ生成

図1示すように、我々が提案する手法は収集型クラウドソーシングと判定型クラウドソーシングの2種類のクラウドソーシングと画像処理ミドルウェアから構成される。

災害が発生すると、収集型クラウドソーシングでは、被災地の画像情報を収集するマイクロタスクを募集する。このマイクロタスクでは、被災地を一定の範囲で区切った地区をドローンで撮影するタスクが生成される。指定範囲を自動撮影する機能が搭載されているドローンを用いた撮影を想定し、ドローンが一回の充電で飛べる範囲で撮影区画を設定する。ドローンによって撮影した画像には、搭載GPSセンサによって観測された位置情報が画像のexif領域に付加されるため、地図情報との連携が容易である。迅速な情報収集が求められる発災直後の1巡目の撮影では、撮影時間をなるべく短くするために高々度から見下ろし撮影するマイクロタスクが生成され、2巡目以降の撮影では、特定領域をより詳細に撮影するタスクが生成される。

収集型クラウドソーシングで収集した画像群は、画像処理ミドルウェアに提供される。画像処理ミドルウェアでは3次元復元と判定型クラウドソーシングのマイクロタスクの素材生成を行う。収集された画像群からSfMによって被災地の3次元マップを復元する。復元した3次元マップは画像のexifに含まれるGPS情報から地図情報と連携する。判定型クラウドソーシングにおいて建物の倒壊判定のマイクロタスクを提供するために、3次元マップから判定対象となる建物の3次元モデルを分割する。分割した3次元モデルを用いて対象建物の様子を周囲から詳しく観察可能な自由視点映像を生成し、判定型クラウドソーシングに提供する。

判定型クラウドソーシングでは、画像処理ミドルウェアから提供された建物の自由視点映像を用いて倒壊判定マイクロタスクを生成・募集する。クラウドソーシングに参加するワーカは、対象建物の自由視点映像を観察し、選択方式で倒壊状態を回答する。回答された情報と地図情報を用いて被災状況マップを生成する。発災直後の1巡目の判定型クラウドソーシングでワーカに提供される自由視点映像は、撮影時間短縮のため高々度から見下ろし撮影された映像から生成されているため、建物の細部の状態把握に適しているとは言い難い。その結果、ワーカに“判定不能”とラベル付けされた建物は、再撮影リクエストが収集型クラウドソーシングに送られる。再撮影では前回より低い高度から建物を中心に周囲するようにドローンを飛ばしながら多視点画像を撮影し、画像処理ミドルウェアにおいてより詳細な3次元モデル、および、より詳細な観察

が可能な自由視点映像が生成され、判定型クラウドソーシングに提供される。同様の処理を繰り返すことによって、詳細な被災状況マップを効率的に生成する。

4. 収集型クラウドソーシング

災害が発生すると直ちに収集型クラウドソーシングが実施される。クラウドソーシングプラットフォームにおいて、被災地の画像を収集するマイクロタスクが生成され、クラウドワーカが公募される。本研究では、被災地をドローンが一度の充電で飛行できる範囲で区切り、各々を100m程度の高さから撮影する作業をマイクロタスクとして設定する。ドローンの自動撮影機能を使用した撮影を想定しているため、一般的なドローン保有者であればワーカとしてクラウドソーシングに参加できる。飛行経路は、図3に示すように撮影範囲を網羅的に設定し、鉛直下向きを撮影するよう設定する。飛行経路に対する画像の縦方向の重なり(オーバーラップ)、横方向の重なり(サイドラップ)は国土地理院の推奨に従いオーバーラップ70%、サイドラップ60%以上になるよう設定する[12]。ドローンで撮影した画像には画像データのexif領域にGPS情報が付加される。ワーカによって収集された多視点画像データは画像処理ミドルウェアに提供される。図3に撮影実験で設定した撮影範囲と飛行経路の一例を示す。この場合は、400m×200mの範囲を約15分かけて287枚の写真を撮影している。

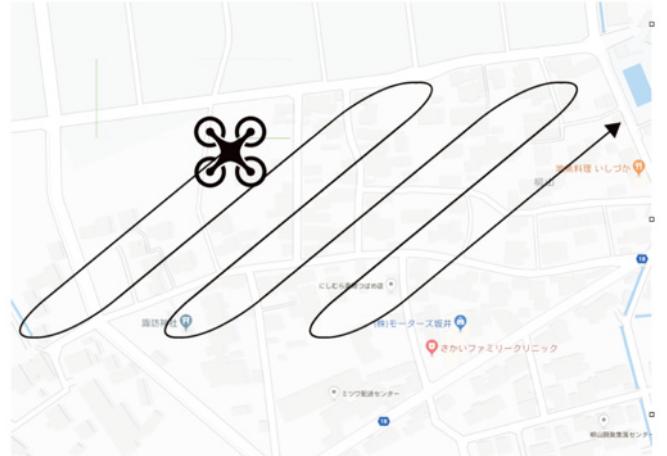


図3：撮影範囲と飛行経路

5. 画像処理ミドルウェア

5.1. 多視点画像による3次元復元

収集型クラウドソーシングから提供された多視点画像から被災地の3次元マップを復元する。多視点画像が300枚程度であれば、コンシュマー向けのデスクトップパソコンでも3時間程度で3次元マップを生成することが可能である。3次元復元では、最初に5点ア

アルゴリズム [13]を用いてカメラの位置姿勢を推定し、その位置姿勢に基づいて、複数画像間の対応点の3次元位置を推定することで、疎の3次元点群を生成する。撮影実験では 353,457 の疎の点群が生成された。推定されたカメラ位置姿勢情報を利用して MVS による密の点群の生成を行う。撮影実験では 9,306,558 の点群が生成された。生成された密の3次元点群を図 4 に示す。この3次元復元は、撮影範囲によってスケーラビリティな処理となるため、スケーラブルな処理体制を構築可能なサーバーサービス上で実施する。



図 4：復元した3次元点群

5.2. GPS を用いた地図情報への重畠

前節で述べた SfM により、撮影対象の3次元点群を生成すると同時に多視点カメラの相対位置を取得することができる。ドローンで撮影した画像に付与されている GPS 情報を用いて、カメラの位置姿勢情報や3次元点群データを世界座標系に変換する。SfM によって求めたローカル座標系から世界座標系への変換は図 5 に示すようにアフィン変換によって行う。3次元のアフィン変換となっておりローカル座標を X 、世界座標を X' 、変換行列を M とすると式 1 のように示される。画像に付与されている GPS 情報をカメラの世界座標系とすることでアフィン変換行列 M を求める。変換行列 M は Kabsch のアルゴリズムを利用し、変換後の座標の平均二乗誤差が最小化するように計算する [14]。求めた変換行列 M を用いて3次元点群を世界座標系に変換し3次元マップを生成する。図 6 に、GPS 情報を用いて3次元点群を地図情報に重畠した3次元マップを示す。

$$X = MX' \quad (1)$$

推定されたカメラの相対位置

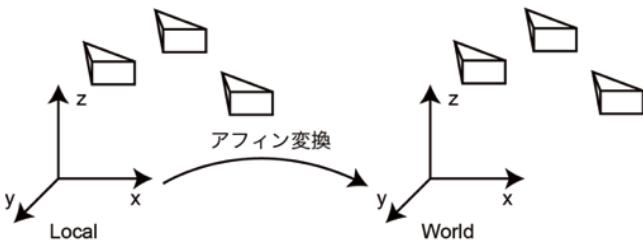


図 5：ローカル座標から世界座標への変換



図 6：3次元点群を重畠した3次元マップ

5.3. 画像認識による建物領域の切り出し

判定型クラウドソーシングにおいて、建物の自由視点映像を用いて倒壊判定マイクロタスクを生成・募集するために、3次元マップ中の建物領域を検出し、建物毎の3次元モデルを生成する。検出処理は画像認識と高度情報に基づいて行う。画像認識処理として、ディープラーニングによる物体認識技術である Mask R-CNN を利用する [15]。衛星写真に写る建物の見え方を学習したモデル [16] を用いて建物領域を検出する。ドローンを用いた空撮撮影と人工衛星からの撮影では撮影高度が異なるため、学習した見え方と検出時の見え方が異なるという問題が生じる。本研究では、前節で生成した3次元マップからオルソ画像（鉛直真下を平行投影で撮影）を生成することで、衛星写真と同様の見え方の画像を疑似的に撮影し、この問題を解消する。

建物領域の検出結果を図 7 に示す。緑の枠で囲まれた範囲が検出された建物領域である。建物の検出漏れがあると判定型クラウドソーシングが機能しなくなるため、この結果には建物ではない領域の誤検出 (False Positive) が含まれている。図 8 に示す3次元マップの高度情報を参照することで明らかな誤検出を除去する。高度が地表に近い領域で建物が検出された場合、誤検出とする。Mask R-CNN では、区画化された田畠など長方形の形状の領域が検出されやすいため、高度情報による誤検出フィルタリングが効果的である。この場合も、建物存在する場所が検出されない検出漏れ (False Negative) を避けるために、高度情報の閾値は高目（建物が検出されやすいよう）に設定する。

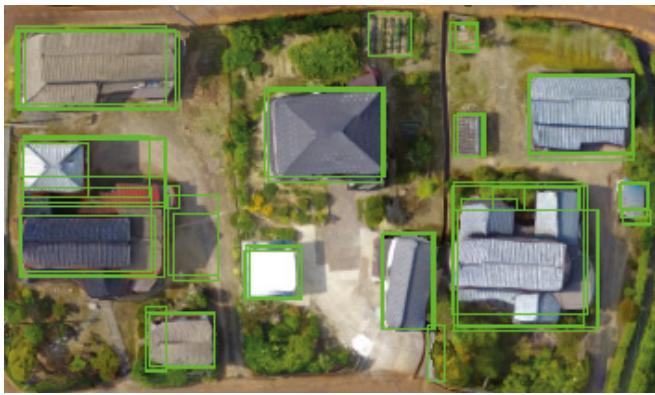


図 7：建物領域の検出結果

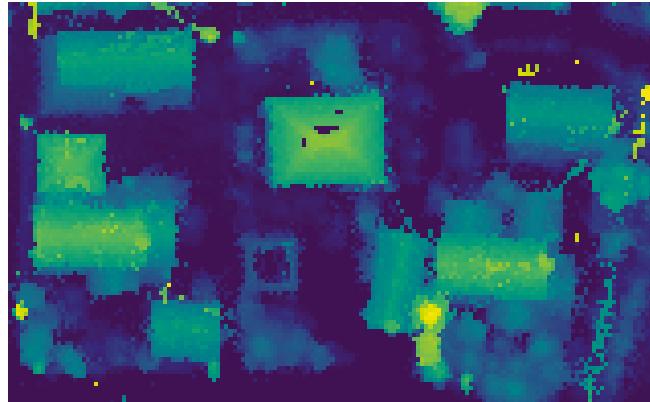


図 8：建物の高度情報の可視化結果

5.4. 自由視点映像の生成

3次元マップから切り出した建物の3次元モデル毎に自由視点映像を生成する。自由視点映像を撮影するバーチャルカメラのカメラワークは、3次元モデルを中心にカメラが円軌道上を移動するように設定する。3次元モデルからカメラまでの距離と角度は、建物の側面と屋根が生成映像上で同時に観察できるように設定する。図11に生成した自由視点映像の一例を示す。3次元モデルではなく映像をワーカに提示することにより、3次元モデルを操作しながらの閲覧が不要となり、インターフェースの簡略化とマイクロタスクの迅速な処理が可能になる。レンダリングされた自由視点映像は、建物の位置情報を付加した状態で判定型クラウドソーシングに提供される。

6. 判定型クラウドソーシング

6.1. 倒壊判定のマイクロタスク

判定型クラウドソーシングでは、画像処理ミドルウェアから提供される自由視点映像を用いて建物の倒壊判定を行うマイクロタスクを生成し、クラウドワーカーを公募する。判定型クラウドソーシングは、インターネットを介して被災地以外からワーカーが参加することを想定している。図9に実施されるマイクロタスクの例を示す。ワーカーは自由視点映像を閲覧し、建物の状

態に関するアンケートに回答する。対象となる建物の位置情報を用いてマイクロタスクの判定結果を3次元マップに付与することにより、被災状況マップを生成する。

What is the condition of this building/house?



図 9：倒壊判定マイクロタスクの一例

6.2. 判定不能な建物の再撮影

被災直後の自由視点映像は撮影時間短縮のため、比較的広い範囲を高々度から撮影した多視点画像から生成されるため、建物の状態を把握するために必要な精度ではない場合が考えられる。本研究では、ワーカが判定不能と回答した建物は、より詳細な観測が必要であると判断し、収集型クラウドソーシングに多視点画像の再撮影をリクエストする。再撮影では、発災直後の網羅的な撮影とは異なり、30m程度の高度から対称とする建物を中心に旋回しながら撮影を行う。再撮影した多視点画像は、5節で述べたのと同様に画像処理ミドルウェアに送られ、3次元マップ、および、自由視点映像の生成が行われた後、再び判定型クラウドソーシングに提供される。

図10に発災直後を想定して撮影した多視点画像から生成された3次元モデルと再撮影した多視点画像から生成された3次元モデルを示す。高々度からの撮影では確認しにくい軒下や壁面について詳細な形状が復元され、クラウドワーカーの理解を助けることが確認できる。

7.まとめ

本稿では収集型、判定型の二つのクラウドソーシングと画像処理ミドルウェアを組み合わせた被災状況マップ生成法について述べた。被災地では人的リソースが不足しがちであるが、クラウドソーシングを活用することでこの問題を解決する。収集と判定を行うクラウドソーシングを3次元画像処理で繋げることで、膨大な画像情報を人間が理解しやすい形式に加工・提示する。今後は、我々が提案した手法が実際の環境で機能するか防災訓練の場などをを利用して実証実験を行う予定である。本研究はJST, CREST JPMJCR16E3の助成を受けたものである。

文 献

- [1] 関治之, "東日本大地震復興支援プラットフォーム sinsai.info の成り立ちと今後の課題", 情報処理学会デジタルプラクティス 2(4), 237-241, 2011-08
- [2] 丹治 寛佳, 森嶋 厚行, 井ノ口 宗成, 北川 博之, "Web 情報を用いた竜巻経路推定支援のためのクラウドソーシング技術開発の試み", 情報処理学会論文誌 データベース (TOD60, vol.6,No.5, pp.95-106, 2013 年 12 月 27 日.
- [3] A. Doan, R. Ramakrishnan, A. Y. Halevy. "Crowdsourcing systems on the world-wide web". Communications of the ACM 54(4): 86-96, 2012.
- [4] Atsuyuki Morishima, Norihide Shinagawa, Tomomi Mitsuishi, Hideto Aoki and Shun Fukusumi, "CyLog/Crowd4U: A Declarative Platform for Complex Data-centric Crowdsourcing", Proceedings of the VLDB Endowment, Volume 5, Issue 12, pp. 1918-1921, August 2012.
- [5] 安部 圭介, 森嶋 厚行, 井ノ口 宗成, 北原 格, "画像処理とクラウドソーシングを組み合わせた災害状況把握支援", 情報処理学会第 77 回全国大会
- [6] N.Snavely, S.M.Seitz, R.Szeliski, "Photo Tourism: Exploring Photo Collections in 3D", ACM Transactions on Graphics, Vol25, pp835-846(2006)
- [7] S. M. Seitz, B. Curless, J. Diebel, D. Scharstein, and R. Szeliski. A Comparison and Evaluation of Multi-View Stereo Reconstruction Algorithms. In Proc. CVPR, 2006.
- [8] Triggs,B.,McLauchlan,P.,R.I.H.,Fitzgibbon,A.:Bundled Adjustment-Amodern synthesis. In: Vision Algorithms'99. (1999) 298–372
- [9] Sameer Agarwal, Noah Snavely, Ian Simon, Steven M. Seitz and Richard Szeliski, "Reconstructing Rome", IEEE Computer, pp. 40-47, June, 2010.
- [10] M.A. Fonstad, J.T. Dietrich, B.C. Courville, J.L. Jensen, P.E. Carbonneau Topographic structure from motion: a new development in photogrammetric measurement Earth Surf. Process. Landf., 38 (2013), pp. 421-430
- [11] S. Cooper, F. Khatib, A. Treuille, J. Barbero, J. Lee, M. Beenan, A. Leaver-Fay, D. Baker, Z. Popovic, and Foldit players, "Predicting protein structures with a multiplayer online game," Nature, vol.466, no.7307, pp. 756–760, Aug.2010.
- [12] 中村 孝之, "国土地理院における基本図測量での UAV の活用", 第 46 会国土地理院報告会, 平成 29 年 6 月 7 日
- [13] B. K. P. Horn, "Closed-form solution of absolute orientation using unit quaternions," J. Opt. Soc. Amer., vol. A-4, pp. 629–642, 1987.
- [14] A discussion of the solution for the best rotation to relate two sets of vectors. W Kabsch. Acta Cryst. 1978. A34, 827-828.
- [15] K. He, G. Gkioxari, P. Dollár, and R. Girshick. Mask R-CNN. In ICCV, 2017. 1, 2, 4
- [16] Sharada Mohanty, "crowdAI Mapping Challenge", <https://www.crowdai.org/challenges/mapping-challenge>



図 10 : (左) 被災直後 (右) 再撮影 を想定して生成した 3 次元モデル



図 11 : 自由視点映像の例