

航空機オブリークカメラ撮影データからの 3D-TIN 高速作成

四俣徹*・藤原紘子**・杉浦健人***・石川佳治****・
神林飛志*****・埋金進一*****・川口章*****・佐藤俊明**

Fast 3D-TIN Creation from Airborne Oblique Camera Images

Toru YOTSUMATA*, Hiroko FUJIWARA**, Kento SUGIURA***, Yoshiharu ISHIKAWA****,
Takashi KAMBAYASHI*****, Shin-ichi UMEGANE*****, Akira KAWAGUCHI*****, Toshiaki SATOH**

Abstract: We are developing a system that can quickly generate 3D-TIN from the optical images captured by an airborne oblique camera for the usages after a large-scale disaster. The oblique camera is capable of acquiring images by viewing nadir, forward, backward, and left and right directions simultaneously. The images captured at a certain angle are particularly useful for understanding the damaged buildings. Since these images are captured from multiple directions, the 3D information can be extracted, and this information can generate 3D-TIN. For the practical utilization of the 3D-TIN, the biggest challenge is to speed up the processing of 3D-TIN creation from a large amount of images captured by the oblique camera. Further, we have been implementing the 3D-TIN system in parallel to the internal processing. In this paper, we present an overview of the implementation.

Keywords: 3D-TIN (3D-TIN) , SfM/MVS (Structure from Motion/Multi-View Stereo) , データベース (Database)

1. はじめに

Society5.0 実現へ向け、データの収集とその利活用が促進されており、収集されるビッグデータを効率的に扱って価値を生み出すシステムとして、データベースの重要性が高まっている。我々は近年の新しいハードウェア環境（ディスアグリゲートドコンピューティング、メモリーコア、大容量メモリ、不揮発性メモリ）を活用するデータベースの研究開発を進めており、同時にこのデータベースの有用性の実証のために、これまででは実現できなかった新しい業務へ適用することを目指している。その一つとして、大規模災害発生後の対応に利用できる 3D-TIN の高速作成に取り組んでいる。

大規模災害発生後における国や地方公共団体の対応は、初動段階、応急段階、復興・復旧段階、と遷移していく。こうした段階に応じた対応の中で、可能な限り早い段階で広域かつ多彩な被災状況の情報

を収集・整理していくことは、その後の対策を迅速に講じていくために非常に重要である。特に、応急段階は災害発生から数時間から数日間で情報が徐々に集まり始め、様々な情報が混在してくる段階である。しかし、実際には、初動段階では局所的かつ不確実な情報や、応急段階では逆に混在する多くの情報の整理に追われ、効果的にこれらの情報を活用することが難しいのが現実である。また、こうした情報を整理するプラットフォームも存在しないのが現実である。

一方、近年航空機オブリークカメラと呼ばれる多方向空中写真撮影システムが開発され、航空機の直下方向および前後左右の斜め方向の空中写真を同時に撮影することが可能となった。斜め方向の空中写真は、従来利用されてきた直下方向の空中写真に比べ、建物の被災状態などを把握するのが容易であることから、特に重要な被災情報源となりえる。また、

* 非会員 株式会社パスコ (PASCO Corporation)
〒153-0042 東京都目黒区青葉台 4-9-6 E-mail : taotha7751@pasco.co.jp
** 正会員 株式会社パスコ (PASCO Corporation)
*** 非会員 名古屋大学 (Nagoya University)
**** 正会員 名古屋大学 (Nagoya University)
***** 非会員 株式会社ノーチラス・テクノロジーズ (NAUTILUS Technologies, Inc.)

これらの写真をもとに SfM (Structure from Motion) 技術を用いることで、広範囲な撮影領域の 3D-TIN (三角形網で構成される 3 次元サーフェスモデル) を自動的に作成することが可能である。従って、この航空機オブリークカメラによる撮影を被災後の初期段階で実施できれば、広域かつ詳細な状況把握や、情報を整理するプラットフォームとなりえる 3D-TIN の作成・利活用が可能となる。

しかし、膨大な空中写真からの有益な情報抽出や SfM 技術による 3D-TIN 作成には、現状では非常に多くの時間を要し、被災後の初動段階から応急段階での利活用は難しい。そこで、撮影画像から 3D-TIN を作成する時間を短縮し、被災後の広域情報および RDB ベースのプラットフォームの提供を、より迅速かつ効率的に行えるようにすることを目指す。具体的には、災害救助の基準とされる 72 時間までの対応に利用できることを目標とする。

空中写真から 3D-TIN 作成を行うソフトウェアに関して、主に有償のものを対象として精度検証や比較が行われている (早坂ら (2015), 中野 (2016), 阪田 (2019))。また若泉ら (2020) は、開発した可搬型 SfM/MVS システムにより 6000×4000 ピクセルの画像 430 枚を 20 分以内で処理したことを報告している。本研究では、航空機オブリークカメラによるより大規模な範囲の撮影に対して、オープンソースのソフトウェアやライブラリを利用し、3D-TIN 作成の高速化の取り組みと、2 時点の 3D-TIN データからの差分抽出を行った。その内容を報告する。

2. 手法

本研究で採用した 3D-TIN 作成の手法を、以下に説明する。なお、本研究では、以下の 2 点を基本的な方針としている。

- ・既存のオープンソースのソフトウェアやライブラリを使用する。
- ・並列処理による高速化を目指す。

2.1. データ取得

①使用機材



図 1 Leica RCD30 Oblique の外観
(Lieca Geosystems 社 WEB サイトより)

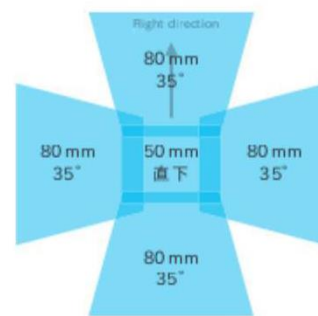


図 2 フットプリントのイメージ
(Lieca Geosystems 社 WEB サイトより)

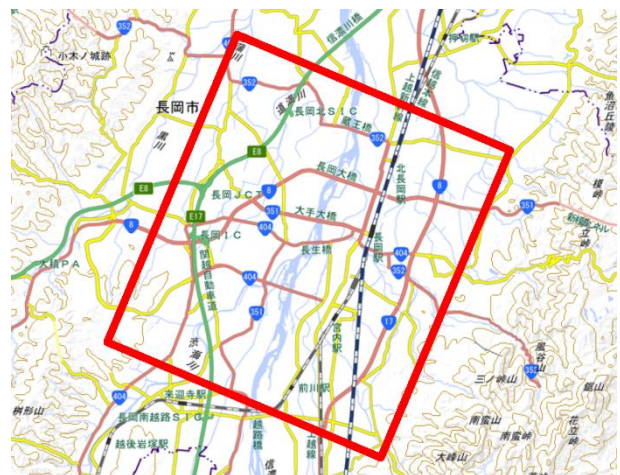


図 3 対象範囲 (背景は地理院地図を使用)

航空機オブリークカメラとは、通常の航空写真用カメラのように直下方向の画像だけでなく、斜め方向の画像も同時に取得することのできる航空写真撮影システムである。本研究では、撮影用機材として LeicaGeosystems 社の Leica RCD30 Oblique を使用した。Leica RCD30 Oblique では、直下方向に向けた 1 つのカメラに加え、前後左右の斜め方向に向けた 4

つのカメラを搭載している。カメラの外観を図1に、撮影のフットプリントのイメージを図2に示す。

②対象地域

本研究では、新潟県長岡市の、長岡市役所及び長岡駅を含む比較的平坦な地区を対象とした。本研究の対象範囲を図3に示す。

③撮影

上述した対象範囲に対して、3D-TINを作成するための航空機オブリークカメラによる撮影計画を策定し、撮影を実施した。計画した撮影の諸元表を、表1に示す。また、撮影計画図を図4に示す。撮影は2018年11月と2019年11月に実施した。

2.2. 使用ソフトウェア

本研究では、開発したシステムを広く一般に利用してもらうために、開発のベースにはオープンソースソフトウェアを使用することとし、SfMにはopenMVGを、MVSにはopenMVSを使用した。

openMVGはSfMのオープンソースのライブラリとして広く利用されており、MPL2ライセンスで商用、非商用を問わず利用可能である。

openMVSは、Multi-View Stereoのオープンソースのライブラリであり、openMVS自体はAGPLライセンス、依存しているサードパーティのライブラリはそれぞれのライセンスに従うが、いずれも商用、非商用を問わず利用可能である。

2.3. 処理フロー

処理フローを図5に示す。また、各工程について以下に説明する。

2.3.1. 前処理

openMVGとopenMVSで効率的かつ高速に処理を行うために、前処理として、対象範囲の分割、画像の切り抜き、カメラモデルの変換及び画像の投影変換を行った。それぞれの内容について以下に説明する。

①対象範囲の分割

本研究では3D-TIN作成の高速化を図るために、内部処理の並列化を行う。そのため、対象範囲を一边が約200m×200mの処理単位に分割し、それぞれの処理単位に対する処理を並列化して行うことにより、高速化を目指した。

表1 撮影諸元表

対地高度	1223m
地上画素寸法(直下)	12cm
画像サイズ(ピクセル)	10336×7788
サイドラップ率	60%
オーバーラップ率	80%
コース数	25
写真ポイント数	2117
写真総数	10585

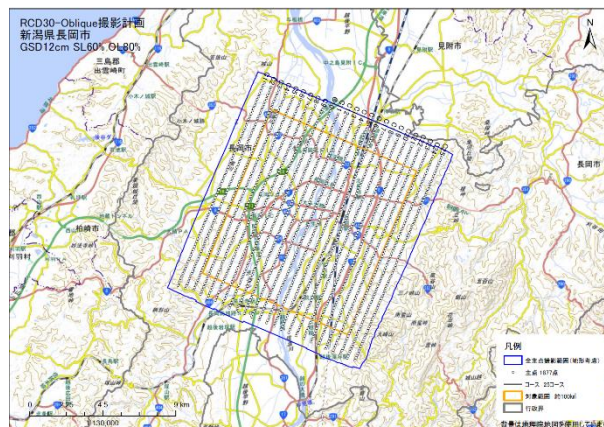


図4 撮影計画図(背景は地理院地図を使用)

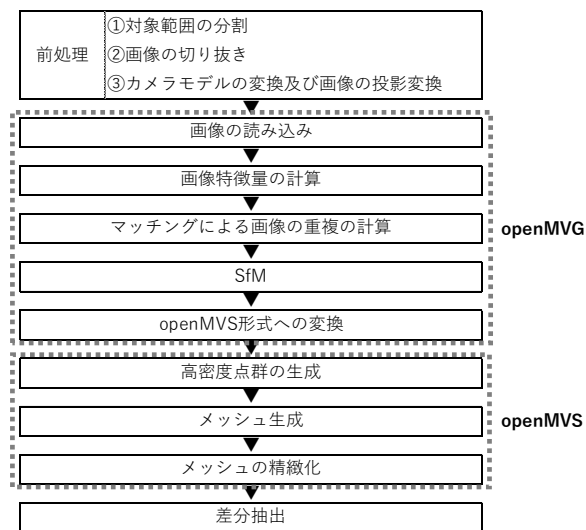


図5 処理フロー

②画像の切り抜き

本研究で使用した航空機オブリークカメラのうち、直下に向けたカメラの場合、地上画素寸法が12cmなので、画像に写る範囲は約935m×1240mとなる。

斜めに向けられたカメラの場合は、画像に写る範囲がさらに広がる。したがって、それぞれの処理単位（約 $200\text{m} \times 200\text{m}$ ）は、1 枚の撮影画像に写る範囲と比較すると小さい。本研究で使用したソフトウェアでは、処理対象となる画像のサイズが計算量と比例するため、処理対象とする画像の範囲を絞り込むこととした。

画像の範囲を絞り込む方法として、画像の不要な範囲を黒くしたマスクを利用する方法と、画像のうち必要な部分のみを切り抜いて利用する方法が考えられる。本研究では、取り込むファイルのサイズも小さくすることのできる後者の方法を採用した。

まず、処理単位ごとに、その範囲が写っている撮影画像を選び出した。次に、撮影画像ごとに、処理単位の範囲が写っている画像範囲を特定し、バウンディングボックスで切り抜いた。ここで切り抜いた画像を入力画像とした。

③カメラモデルの変換及び画像の投影変換

撮影画像から一部のみを切り抜いて利用する場合、画像座標系が変わり、そのままでは一般のソフトウェアやライブラリが使用できないことから、切り抜いた画像に合わせて仮想的にカメラモデルを変換し、切り抜いた画像を新たなカメラモデルの画像平面上に投影する変換を行った。

2.3.2. 画像の読み込み

ここから 2.3.6 までは openMVG での処理である。

最初の工程では、openMVG_main_SfMInit_InitImageListing のコマンドにより、使用する画像を読み込み、画像情報（画像名、画像サイズ、カメラキャリブレーション情報）を json 形式のファイルとして格納した。なお openMVG では Exif 情報に記録されたカメラの GNSS 情報を使用した場合、ECEF 直交座標系が適用されるが、そのままでは openMVS において桁数が大きすぎる問題が生じることから、平面直角座標系に変換後、一定のシフト値を適用した座標値を使用した。また、画像は撮影画像から切り抜いて使用しているため、歪曲収差を使用しないカメラモデルとした。

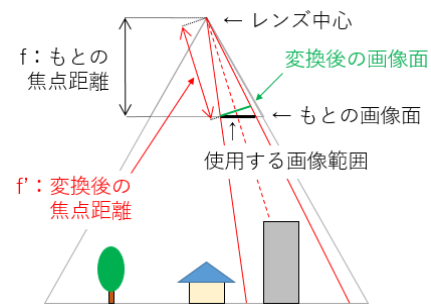


図6 カメラモデルの変換

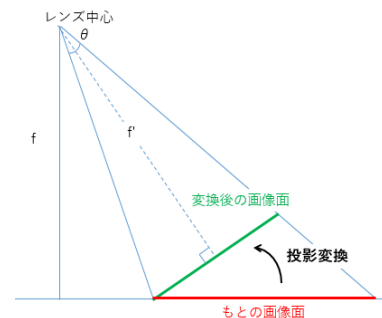


図7 画像の投影変換

2.3.3. 画像特徴量の計算

openMVG_main_ComputeFeatures のコマンドにより、画像特徴量を計算した。画像特徴量として SIFT, AKAZE_FLOAT, AKAZE_MLDB を選択できるが、ここでは SIFT を使用した。

2.3.4. マッチングによる画像の重複の計算

前項で計算した画像特徴量を使って、openMVG_main_ComputeMatches のコマンドにより特徴量のマッチングを行い、画像の重複を計算した。

2.3.5. SfM

画像の特徴点の位置と撮影時のカメラの位置・姿勢を同時に計算し、対象物の疎な点群を生成した。openMVG では SfM の手法として、openMVG_main_IncrementalSfM と openMVG_main_GlobalSfM の2つが選択できるが、ここでは openMVG_main_GlobalSfM を使用した。また、大規模災害発生後の活用を想定していることから GCP は利用せず、カメラパラメータは調整計算に含めないこととした。

2.3.6. openMVS 形式ファイルへの変換

openMVG_main_openMVG2openMVS のコマンドにより、SfM の計算結果を openMVS で読み込める形式のファイルに変換した。

2.3.7. 高密度点群の生成

ここから 2.3.10 までは openMVS での処理である。

SfM による疎な点群だけでは点密度が不足しているため、DensifyPointCloud のコマンドにより、高密度な点群を生成した。密な点群の生成のための手法として、Patch-Match と Semi-Global Matching を選択できる。ここでは Semi-Global Matching を使用した。

2.3.8. メッシュの再構築

ReconstructMesh のコマンドにより、前項までに生成された点群から、メッシュを再構築した。

2.3.9. メッシュの精緻化

RefineMesh のコマンドにより、前工程で生成したメッシュを精緻化した。この工程は必須ではないが、実施することによりメッシュの形状が向上することが確認できたので実施することとした。

2.3.10. テクスチャの生成

TextureMesh のコマンドにより、テクスチャ付きのメッシュを生成した。

2.3.11. 差分抽出

2 時点のデータから、時系列変化と考えられるメッシュの差分を抽出した。差分の抽出にはメッシュの頂点の点群を使用した。具体的には、1 時点目の各頂点から一定距離以内にある 2 時点目の頂点を検索し、1 時点目のいずれの頂点からも一定距離に入らない 2 時点目の頂点を差分として抽出した。これを 1 時点目と 2 時点目のデータを入れ替えることにより、変化のあった場所の上面と下面を抽出した。

4. 結果

3D-TIN 作成の試行の結果として、処理時間、3D-TIN の形状、差分抽出結果について以下に述べる。

4.1. 処理時間

本研究の対象範囲全域を処理するのに、6 時間 59 分を要した。ただし各処理において、同じパラメータでもうまく処理できる場合と非常に時間を要する場合があります。一定時間で処理が終わらない場合は再度処理を流すように設定しているため、処理に要する時間にはばらつきがある。また処理が完了しないブロックも複数あった。処理対象の大部分が河川となっていることが原因と考えられる。

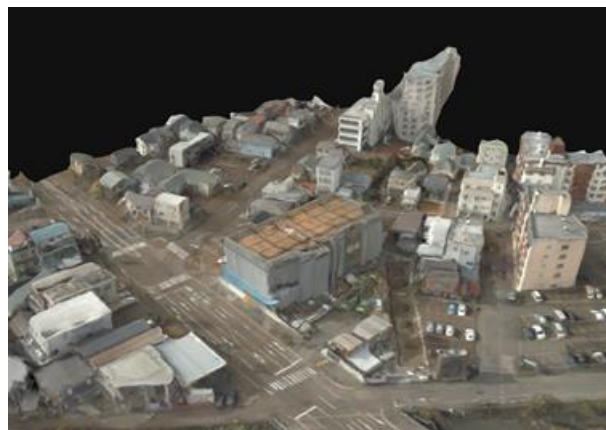


図 8 3D-TIN (上：2018 年，下：2019 年)

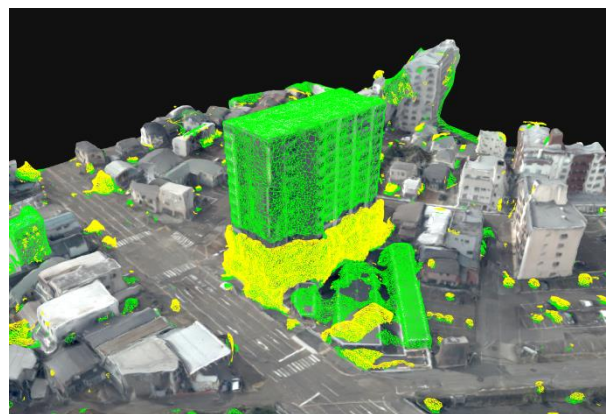


図 9 差分抽出結果

4.2. 3D-TIN の形状

2018 年撮影データ及び 2019 年撮影データから作成した 3D-TIN を図 8 に示す。図 8 に示した箇所は、2018 年はマンションの建設中、2019 年ではマンション完成後となっており、次の差分抽出の例にも同じ場所を使用した。3D-TIN は、拡大して表示すると、建物の角が丸くなったり、平坦な道路に多少の凹凸

ができたりしているものの、概ね良好に作成されていることが確認できた。

4.3. 差分抽出結果

2 時点間で差分を抽出した結果を図 9 に示す。検索範囲は 1m とした。本研究での 3D-TIN 作成は GCP を使用せず GNSS の精度のみで作成されているため、位置を合わせるため 1 時点目のデータを XYZ 方向にそれぞれ 0.5m 移動した上で差分を抽出した。1 時点目データから 2 時点目データを検索した差分を緑色、2 時点目データから 1 時点目データを検索した結果を黄色とした。新たに建設されたマンションの高層部や駐輪場が緑に、取り除かれた建設用の足場や囲いが黄色になっているのが確認できる。

5. おわりに

本研究では、大規模災害発生後の活用を目指し、航空機オブリークカメラ撮影画像から高速に 3D-TIN を作成する試みを行った。処理にはオープンソースのライブラリ openMVG と openMVS を利用し、内部処理を並列化することにより、対象とした約 10km×10km の範囲を約 7 時間で処理することができた。処理結果の 3D-TIN は概ね良好に作成されており、地形の変化や家屋倒壊等をするための差分抽出にも十分耐えうるものであると考えられる。

今後は、山間部等異なる条件における試行、処理結果の結合方法の検討、処理速度及び成功率の向上、3D-TIN の形状再現の品質向上等に取り組む予定である。

謝辞

本研究は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（New Energy and Industrial Technology Development Organization : NEDO）の「高効率・高速処理を可能とする AI チップ・次世代コンピューティングの技術開発／次世代コンピューティング技術の開発／実社会の事象をリアルタイム処理可能な次世代データ処理基盤技術の研究開発」の一環として実施している検討内容の一部である。また検討にあたり長岡市にご協力いただいた。記して謝意を表したい。

参考文献

- openMVG, <https://openmvg.readthedocs.io/en/latest/>, 2020-08-24 アクセス
- openMVS, <http://cdcseacave.github.io/openMVS/>, 2020-08-24 アクセス
- 早坂寿人・大野裕幸・大塚力・関谷洋史・瀧繁幸 (2015), UAV による空撮写真を用いた三次元モデリングソフトウェアの精度検証, 国土地理院時報, 127, 107-116.
- 中野一也 (2016), 解説 : Structure from Motion (SfM), 第三回 SfM による三次元形状復元ソフトウェアについて, 写真測量とリモートセンシング, 55, 321-324.
- 阪田知彦 (2019), モデリングソフトウェアによる建物被害検出結果の比較検証, 第 28 回地理情報システム学会学術研究発表大会講演論文集
- 若泉拓磨・新名恭仁・水上幸治 (2020), カメラアイ : 可搬型 SfM/MVS システム「UAV-Map3D」の開発, 写真測量とリモートセンシング, 59, 102-103
- Leica RCD30 Oblique, https://w3.leica-geosystems.com/downloads123/zz/airborne/RCD30_Oblique/Flyer/Leica_RCD30_Oblique_FLY_ja.pdf, 2020-08-24 アクセス
- Moulon, P., Monasse, P., and Renaud Marlet, R., 2012. Adaptive Structure from Motion with a Contrario Model Estimation. Proc. of ACCV 2012, 257-270.
- Moulon, P., Monasse, P., Marlet, R., 2013. Global Fusion of Relative Motions for Robust, Accurate and Scalable Structure from Motion. Proc. of ICCV 2013, 3248-3255.