

ドローンで撮影した画像を用いた コンクリート製補強土壁の3次元点群モデル構築実験

3D point cloud model construction experiment of concrete reinforced soil wall using images taken by drone

北見工業大学 工学部	学生会員	○工藤 将暉(Masaki Kudo)
北見工業大学 工学部	正会員	宮森 保紀(Yasunori Miyamori)
北見工業大学 工学部	学生会員	佐藤 瑛典(Eisuke Sato)
川田テクノロジー株式会社		林 篤史(Atsushi Hayashi)
大日本コンサルタント株式会社	正会員	小林 大(Dai Kobayashi)

1. はじめに

我が国では、老朽化インフラが増加する一方で技術者は減少傾向にあり、業務の効率化などを目的とした新技術の導入が進められている¹⁾。このうち3次元モデルについては、2012年に国土交通省がCIM (Construction Information Modeling) の試行業務を開始するところから様々な取り組みがなされ、現在でも盛んに研究開発が行われている^{2), 3)}。また、ドローンについては、空撮や測量のみならずインフラの高所での点検作業など様々な分野で活用が進んでいる⁴⁾⁻⁶⁾。

構造物の3次元モデルの生成方法として、近年、SfM (Structure from Motion) 技術の活用が広がっている。SfMは一般的なデジタルカメラで撮影した画像からモデルを構築できる手軽さに加え、ひび割れなどの損傷の情報を記録することが出来る⁴⁾。またその撮影手段となるドローンについても、性能向上により空撮で取得した画像から作成した3次元モデルで構造物の点検が行われるようになってきた。SfMを用いた構造物の寸法計測やひび割れ幅の計測精度に関する研究も行われている⁷⁾。

しかし対象構造物の形状が複雑な場合、撮影時の死角によりSfMモデルに欠損が生じる場合が多い⁸⁾。そこで本研究では構造物の変状を精度よく確認するための手法を確立するため、コンクリート製補強土壁を対象に、インフラ点検用ドローンにより撮影した画像からSfMソフトウェアで3次元点群モデルを構築した。この過程で、モデルに欠損を生じさせない撮影方法を検証し、構造物の面外変形やひび割れについて点群モデルの精度を確認

した。また、現場で撮影した多数の画像データを解析拠点に速やかに伝送するために、第5世代移动通信システム(5G)を用いた。ここではその結果を報告する。

2. コンクリート製補強土壁撮影実験

本研究では、図-1の延長33,836mm、最大高さ6,000mmの台形状のコンクリート製補強土壁を対象とした。この構造物は北見工業大学オホーツク地域創生研究パーク内に研究用に施工されたもので、コンクリート製スキンの一部に面外へのはらみ出しやひび割れが発生している。

まず対象を10ブロックに分割し、各ブロックに座標の基準となる円形マーカ(直径100mm、中心直径2mm)を4枚ずつ設置し、あらかじめトータルステーション(TS)で3次元座標を取得した。ブロック分けとマーカの配置を図-2に示す。撮影はブロックごとに行い、SfMのた



図-1 対象構造物のコンクリート製補強土壁

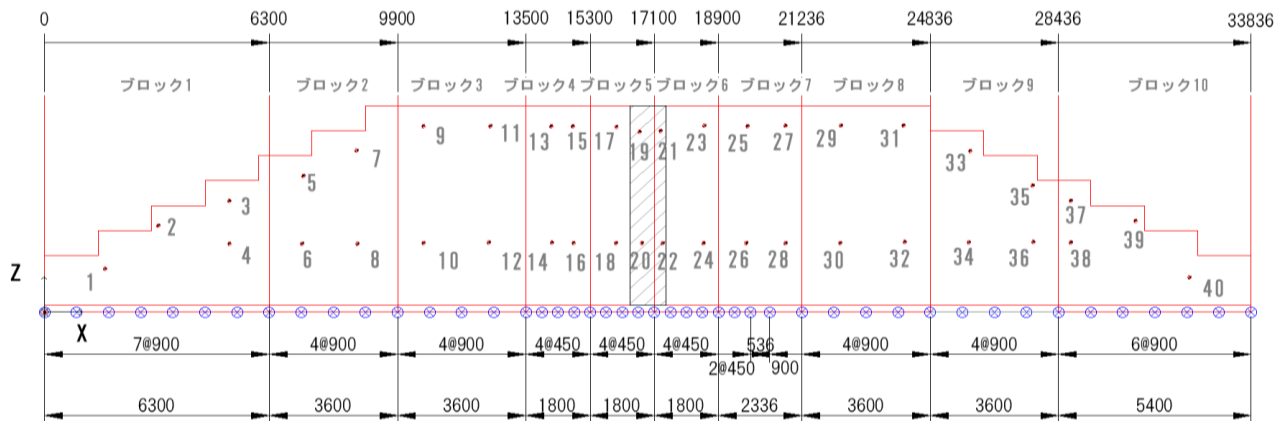


図-2 撮影ブロック

めの写真撮影時のオーバーラップ率は、Z 方向は 90%，X 方向はブロック 1~3、8~10 で 60%，ブロック 4~7 で 80%とした。ブロック 4~7 では壁の中心にある凹部の精度を向上させるため、オーバーラップ率を高くした。また、面外の変形を把握するため、壁面に対して正面・右斜め・左斜めの 3 方向から撮影を行った。

ドローンは川田テクノロジー株式会社のマルコで、デジタルカメラはソニー製の $\alpha 6000$ をドローン上部に固定している。ドローンとカメラを図-3 に、カメラの設定を表-1 に示す。ドローンと対象構造物の間隔は 2m を基本とした。撮影時のドローンの移動速度は 300mm/s で上昇・降下させ、自動連写で秒間 2 枚の静止画を取得した。ドローン 1 回の飛行で 1 ブロックの 1 方向の写真を撮影し、画像データを保管する SD カードは 1 ブロックごとに交換する。斜めからの撮影は機体の角度は変えず、カメラを取り付ける角度を左右約 30°回転させて行った。写真は合計で 12464 枚 (75.13GB) 撮影した。

撮影後は、モデル構築に使用できる画像を選択し、研究パーク内に設置された NTT ドコモ社の 5G 基地局を介して、国立情報学研究所の研究データ管理基盤 GaKuNin RDM⁹⁾に画像データをアップロードした。アップロード直後に大学内の研究室で画像をダウンロードして SfM 解析を行った。なお、GaKuNin RDM は、本実験時は実証実験中であった。

3. SfM による対象構造物のモデル化

3.1 モデル生成手順

SfM とは、移動するカメラから取得した画像に映った対象の 3 次元的形状と、カメラの動きを同時に復元する手法のことである。SfM ソフトウェアの典型的な処理過程は、初めに画像からタイポイントを取得する。次にバンドル法によるカメラの位置と姿勢、及びタイポイントの 3 次元座標の算出を行う。さらに多視点画像計測による点群を生成することで 3 次元モデルが構築される¹⁰⁾。

本研究では 3 次元点群モデルの構築に Agisoft 社の PhotoScan Pro¹¹⁾を用いた。使用したコンピュータとソフトウェアを表-2 に示す。PhotoScan では撮影した画像を読み込み、アライメントを行うことで各画像のカメラの位置と向きを見つけ、低密度な 3 次元点群モデルを構築する。次にマーカーの検出を行い、マーカーに TS 測量で取得した座標を入力することで 3 次元座標を算出させた。そのうえで高密度ポイントクラウド構築を行い、高密度な 3 次元点群モデルを構築した。PhotoScan ではアライメントで精度を、高密度ポイントクラウド構築では品質を定めることができ、共に最低、低、中、高、最高の 5 段階である。

3.2 ブロックごとのモデル

モデルの構築を 1 ブロック (チャンク) ずつ行った。アライメントの精度を中、高密度ポイントクラウド構築

の品質を最低で行った。使用した写真枚数を表-3 に示す。1~10 ブロックのモデル構築時間の合計は 6 時間 45 分 9 秒だった。構築したモデルを図-4 に示す。歪みや欠損が無く色味の再現度も良好である。TS で取得したマーカーの座標とモデル上のマーカーの座標の差は最大で X 方向に 21.63mm だが、ブロックの X 方向長さに対して約 0.6% と構造全体に対しては高精度にモデル化ができた。図-5



図-3 インフラ点検用ドローン

表-1 カメラの設定

機種	SONY $\alpha 6000$
画像ファイル形式	Jpeg
画像サイズ	12MB
記録画素数	6000×3376(20M)
ISO 感度	自動
絞り値	自動
焦点距離	20mm
シャッタースピード	1/1250s
撮影モード	シャッタースピード優先

表-2 モデル構築用のコンピュータとソフトウェア

OS	Windows10 Pro ver.1903
CPU	Intel Corei7-6900K 3.20GHz
GPU	GeForce GTX 1080 Ti x4
メモリ	DDR4-2400 16GB ×8
モデル構築用ソフトウェア	PhotoScan Pro Version : 1.4.1

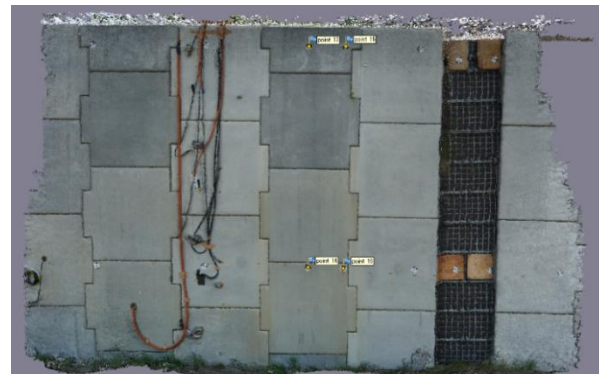


図-4 3次元点群モデル (ブロック 4)

表-3 モデル構築に使用した写真枚数

ブロック	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
枚数	433	448	547	583	623	609	722	532	401	331
データ量	3.02	2.70	3.09	3.02	3.08	2.95	3.54	2.85	2.30	2.03

に示す通り、撮影の死角になり欠損しやすいと考えられる凹部も、斜め方向から撮影を行ったことで再現できた。図-6のひび割れは、品質最低のモデル（図-6(a)）では確認できなかったため、品質を中に変更し再構築することで確認できた（図-6(b)）。また写真と比べるとモデルは解像度が低くなっているが、モデル構築時の解像度の設定をさらに高くすることで改善は可能である。

3.3 ひび割れ幅の確認

ひび割れ幅の測定を、壁面に貼り付けたクラックスケールと比較することで試みた。検討は3次元点群モデルとオルソモザイク画像で行った。3次元点群モデルはアライメントの精度が中、高密度ポイントクラウド構築の品質が中のモデルを使用した。オルソモザイクはPhotoScanで精度を中でアライメントを行ったうえで、メッシュを「自由形状(3D)」で構築し、メッシュをもとに平面のオルソモザイクを作成した。図-6のように、点群モデルではクラックスケールの文字や線が潰れてしまい確認できなかったが、オルソモザイクでは構築時にシームライン編集機能により画像を鮮明にすることができ、クラックスケールの線との比較で、ひび割れ幅を0.8mmと確認することができた。

3.4 壁の面外変形の確認

図-7にブロック4の点群モデルにおける壁面のはらみ出し箇所の例を示す。はらみ出し量を定量的に確認するため、点群モデルにおける基準点のY座標から壁の面外変形量を計算した。図-3のマーカー9,10のようにほぼ同一のX座標に位置する上下のマーカーについて、上側から下側のY座標を引いて変形量とした。基準点のY座標はPhotoScanの定規モードで得た。図-8にTS測量と点群モデルでの面外変形量を示す。

図-8では点群モデルとTS測量から求めた変形量は概ね一致しており、モデルから壁の変状を確認することが可能である。コンクリート壁の右側は左側に比べて変形が大きくなっているが、壁の背面土の土質の違いが原因だと考えられる。なお、X方向15,604mmでは点群モデルとTS測量の水平距離に差がある。この箇所は凹部でコンクリートスキンが無い場合、マーカーを木板に貼り付けて補強土壁に取り付けたが固定が不十分であり、TS測量から撮影までの3日間で木板がずれた可能性がある。

本研究ではモデル構築時間を重視し、高密度ポイントクラウドの品質を最低にした。図-7の解像度はそれほど高くなく、画像としての精細さは劣るが、点の座標を一定の精度で求めることができることから、災害後に変状の発生や進行が疑われる構造物に対して、速やかに変形を定量的に確認することが期待される。

3.5 全体モデル

対象構造物全体を1つのモデルとするため、ブロック1～3、4～7、8～10の3つのチャンクに分けてモデルを構築し、さらにチャンクを結合させることで図-9のような全体モデルを構築した。ブロックごとのモデルと同様に面外の変形やひび割れが確認できた。しかし図-10に示す通り、テクスチャの乱れや、マーカーを含むモデルが結合部でずれて二重になるなどの不具合が発生した。したがって、構造物の点検などの業務に用いる場合は、



(a) 点群モデル

(b) 写真

図-5 ブロック6の凹部左側面



(a) 点群モデル（最低）



(b) 点群モデル（中）



(c) オルソモザイク

図-6 ひび割れ部の拡大



図-7 コンクリートスキンのはらみ出し

チャンクを結合させず個別のモデルを用いる方が適切であることが分かった。

4. おわりに

本研究ではコンクリート製補強土壁を対象として、ド

ローンによって撮影を行い、取得した画像から3次元点群モデルを生成し、凹凸部の欠損が生じないモデルを構築するための撮影方法、またひび割れなどの損傷や変状の把握が可能か検討した。

- 1) ドローンによって高所を含む広範囲を効率的かつ安全に撮影できる。複数方向から撮影し死角を無くすことで欠損のない点群モデルを構築できる。
- 2) ひび割れも点群モデルで確認できるが、ひび割れ幅はオルソモザイクから求める方が適している。
- 3) 画像を3方向から撮影することと、TS測量によって得たマーカーの座標値から、点群モデル上で構造物の面外変形を精度よく確認できた。
- 4) 分割して構築したモデルを結合し全体モデルを構築できるが、部分ごとに定量的な評価を行う場合は結合して全体モデルを構築する必要はない。

今後の課題として、本研究では座標取得と精度向上のためマーカーを40枚設置したが、設置に時間がかかり非効率的である。今後はマーカーを減らしても精度が確保できるモデル構築方法の検討が必要である。

謝辞

本研究は、科学研究費 基盤(C)課題番号 18K04317 の助成を受けて実施しました。5G 通信環境については NTT ドコモ社に提供いただきました。コンクリート壁の使用については北見工業大学地圏工学分野にご協力いただきました。また、実験の準備については北見工業大学工学部の八尾早知繪氏にご協力いただきました。ここに記し感謝いたします。

参考文献

- 1) 国土交通省：令和2年版国土交通白書, 2020.
- 2) 矢吹信喜：CIM 入門—建設生産システムの変革—, 理工図書, 2016.
- 3) 清水智弘, 吉川眞, 瀧浪秀元, 御崎哲一, 高橋康将, 中山忠雅, 内田修, 近藤健一：3D モデルを用いた橋梁維持管理システムの開発, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), 69 巻, 2 号, pp. I_45-I_53, 2013.
- 4) 西村正三：光学的計測法を用いた新しい橋梁点検手法に

ついて, 精密工学会誌, 80 巻 11 号, pp.970-974, 2014.

- 5) 田中龍児, 外山泉, 石澤直樹：UAV による近接写真測量の精度検証, 第一工業大学研究報告, 第 32 号, pp.63-66, 2020.
- 6) 金平徳之, 林篤史, 平井正之, 樫本祥：ドローンを利用した橋梁点検システムの開発〜マルコ™の概要と今後の展開〜, 川田技報, Vol.38, pp.22-27, 2019.
- 7) 山根達郎, 上野雄也, 叶井和樹, 泉翔太, 全邦釘：Semantic Segmentation を用いた橋梁 3 次元モデルへのひび割れ位置の反映, AI・データサイエンス論文集, 1 巻, J1 号, pp.194-497, 2020.
- 8) 川野公平, 青山憲明, 寺口敏生, 関谷浩孝：土木分野における既存構造物の簡易な 3 次元モデル作成方法に関する研究, 土木情報学シンポジウム講演集, vol.43, pp.181-184, 2018.
- 9) 国立情報学研究所 オープンサイエンス基盤研究センター：大学における研究データ管理を支援する新しいサービス (GaKuNin RDM), 大学教育と情報, No.2, pp.40-55, 2019.
- 10) 布施孝志：解説 Structure from Motion (SfM) 第二回 SfM と多視点ステレオ, 55 巻, 第 4 号, pp.259-262, 2016.
- 11) クウサツ・ドットコム：Agisoft PhotoScan Professional Edition Version1.3 日本語ユーザーズマニュアル Ver.1.0, 2017.

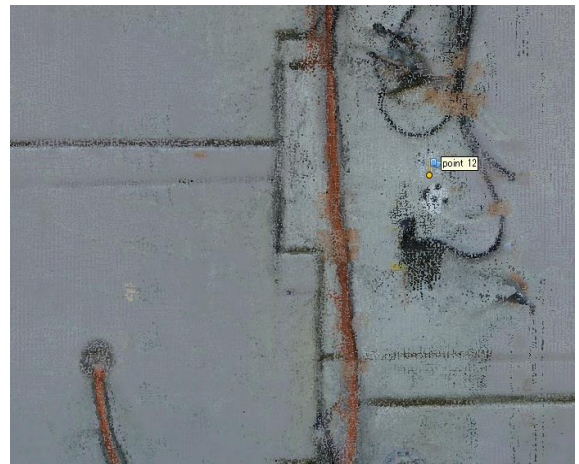


図-10 全体モデルのずれとテクスチャの乱れ

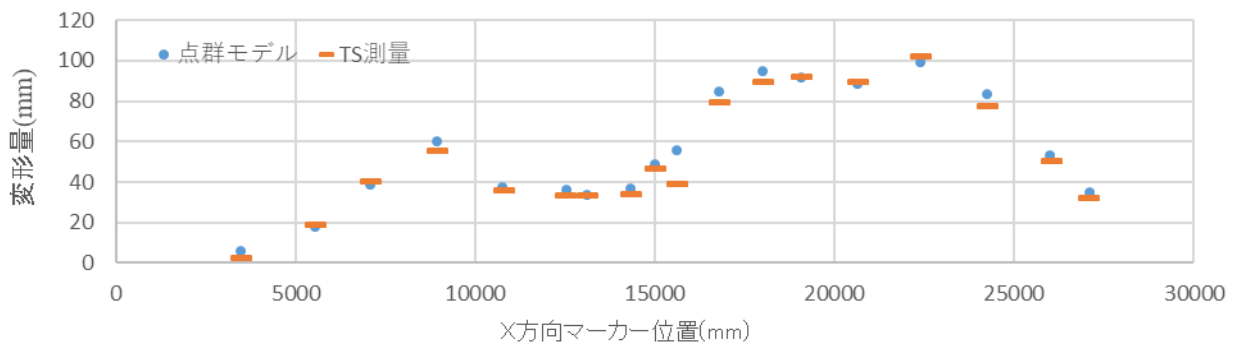


図-8 TS 測量と点群モデルでの上下マーカー間の水平距離



図-9 全体モデル