

小型ドローンを利用したSfM法による屋外構造物の三次元計測

鹿納晴尚*・藤沢 敦*

* 東北大学総合学術博物館

3-D measurement of open-air structures using mini drone with SfM method

Harumasa Kano*, Atsushi Fujisawa*

* The Tohoku University Museum

Abstract: Recently, 3-D measurement from unmanned aerial vehicles (UAV / drone) using structure from motion (SfM) photogrammetry is become popular in measuring. SfM measuring using drone usually applies in good visibly area, however, reconstructed 3-D data by SfM of complicated constructions in the open air located urban area are poor accuracy measurements. In this paper, we report that 3-D measurement by SfM photogrammetry applied for complicated constructions located outdoor city area, combined with aerial photographs using drone and photographs of hand-held camera. We measured the main gate of Tohoku University and Ogawa Memorial Park located in Katahira Campus of Tohoku University, Sendai City, Miyagi Prefecture. As a result, SfM photogrammetry used photographs taken by a small drone and hand-held camera is applicable to high-precise measurement for complex objects in outside.

Keywords: 3-D measurement, SfM, aerial and hand-held camera photographs, complex objects in outside.

はじめに

異なる位置から撮影した多数の写真を利用した SfM (Structure From Motion) 法による三次元計測は、近年急速に普及してきた。文化財の記録方法としても、その有効性が確認され、活用が急速に進んでいる (金田 2014)。ただ、SfM 法による三次元計測は、撮影に使用する機材や撮影方法などによって、その精度などが大きく変わる。しかし文化財調査においては、必要とされる精度や、その精度を確保するための具体的撮影方法などを検討した論考は極めて少ない。

著者の所属する東北大学総合学術博物館では、東日本大震災の震災遺構の 3 次元アーカイブ構築事業を行ってきた (鹿納ほか 2018)。その一環として、福島県の原因事故による帰還困難区域に所在する装飾古墳の清戸迫横穴の 3 次元計測も行ってきた (藤沢・鹿納・吉野・小池 2017)。これらの 3 次元計測では、対象資料の特質に合わせて、SfM 法

を含むさまざまな計測方法を試みてきた。それらの知見を踏まえ、2020 年度からは、科学研究費補助金 (基盤研究 A) による「石材構築文化財の保全のための 3 次元デジタルアーカイブの標準化の研究」を、藤沢が研究代表者となって行っている。

東北大学では、創立当初から続く片平キャンパスに残っている歴史的建造物などを、国の登録有形文化財 (建造物) に登録し、その価値を明確化するとともに、市民に広く公開する取り組みを進めている。2017 年に 5 件について登録がなされ、2020 年度には残る 9 件の建造物の登録のために準備を進めてきた。登録にあたっては平面図などの資料提出が求められるが、登録候補の一つである東北大学正門については図面が作成されていなかった。また、片平キャンパスの一角にある小川記念園は、第 4 代総長小川正孝を偲んで 1933 年に造られた小公園である。小川記念園は、名勝地関係として登録記念物に登録することを目指しており、建造物とは扱いが異なるが登録の準備を進めており、こち

らも図面作成の必要があった。

この東北大学正門と小川記念園は、門柱や擁壁の一部に、花崗岩を使用している部分もあり（内山・蟹澤 2020）、上記した科研費の研究の一環として3次元計測を行い、そのデータから図面を作成することとした。両者とも、屋外の比較的面積のある対象であったため、比較的広い範囲を俯瞰して撮影することが望ましいと考えられた。しかし片平キャンパスは、航空法の人口密集地となるため、UAV（ドローン）の飛行には制限がある。そのため、航空法の規制を受けない小型ドローンを利用した SfM 法で3次元化することを試み、撮影方法と精度の関係などを検証することを目的とした。

なお本論は、両名の協議をもとに、はじめにとまとめを藤沢が、それ以外を鹿納が分担して執筆した。

1. 計測概要

本研究で3次元計測を実施した対象は、宮城県仙台市青葉区片平の東北大学片平キャンパスにある東北大学正門と小川記念園である。

片平キャンパスは、原稿執筆時の2020年現在、航空法で人口密集地に分類され、機体重量200g以上のUAV（ドローン）では、その飛行に許可申請が必要となる。一方、重量が200グラム未満のUAV（ドローン）は空港周辺等の規制空域を除き、規制対象外となり、申請等は不要となる¹⁾。本研究では、市街地における屋外構造物として、東北大学正門と小川記念園について、200グラム未満の模型飛行機であるDJI社製Mavic Mini（以下Mavic Mini）での上空からの写真撮影（以下空中撮影）を行い、SfM法による3次元計測を実施した。さらに、Mavic Miniでは撮影できなかった箇所や詳細なデータが必要な場所についてデジタル一眼レフカメラを使用して手持ちで撮影（以下地上撮影）を行い、これらの撮影したデータを基にAgisoft社製のMetashape Professionalを用いて色付き点群データ形式の3次元化処理を行った。

1-1. 使用機材について

本研究において空中撮影に使用した小型ドローンは、DJI社製Mavic Miniである。Mavic Miniのカメラスペックは以下のとおりである²⁾。

センサーサイズ 1/2.3インチ CMOS（6.2×4.7mm）、有効画素数：12MP、レンズ 視野角（Field of View、以下FOV）：83°、35mm判換算：24mm。絞り：F/2.8、撮影範囲：1m～∞、ISO感度 写真：100～1600（オート）、100～3200（マニュアル）、シャッター速度 電子シャッター：4～1/8000秒、静止画サイズ 4.3：4000×3000 16:9:4000×2250というスペックであり、絞り値（F値）が固定である。なお、本研究では、16:9のサイズで撮影している。一方、地上撮影で使用したデジタル一眼レフカメラは、

ボディはキヤノン製EOS6D Mark IIで、使用した交換レンズは、EF16-35mm F2.8L III USMとEF24mm F2.8 IS USMである。センサーサイズは、約35.9×24.0mm、記録画素数は約2600万（6240×4160）画素である。ズームレンズのEF16-35mmを使用した撮影では、焦点距離を16mmに固定して行った。16mmレンズでの視野角FOVは約107°である。本レンズでは、F値を16に固定し撮影した。一度目の撮影データを処理した結果、撮影不足分があったことから、追加として24mmのレンズで撮影を行っている。24mmレンズのFOVは84°であり、F値は10に設定した。

1-2. 撮影距離と地上分解能について

空中撮影および地上撮影では、センサーのサイズ、使用レンズの焦点距離と撮影距離により、その分解能が変化する。一般的な航空測量では、必要な地上分解能を以下の式を用いて算出している（石塚ほか、2018）。

$$H(m) = \{px(\text{pixel}) \times FL(\text{mm}) \times Lpx(\text{m}/\text{pixel})\} / SZ(\text{mm}) \cdots \text{式}(1)$$

式(1)では、H(m) = 撮影高度、px = 画像サイズ（pixel数）、FL(mm) = 焦点距離、Lpx(m/pixel) = 地上画素寸法、SZ(mm) = センサーサイズである。

この計算式から、撮影距離と焦点距離をもとにグラフ化することで、Mavic Mini、DJI Phantom 4 Pro（総合学術博物館で所有）、EOS6D Mark II（焦点距離16mm、24mm）での撮影距離と画素寸法の変化を表すことができる（図1）。

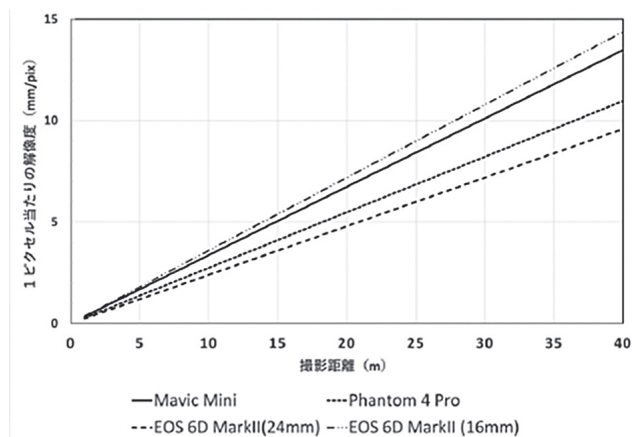


図1. 機材ごとの撮影距離と解像度の関係

図1は、横軸を撮影距離、縦軸を1ピクセル当たりのサイズとしたとき、DJI Phantom 4 Pro、Mavic Mini、EOS 6D Mark II（レンズ焦点距離16mmと24mm）それぞれの場合の関係を示したグラフである。地上解像度1cmのものを見分けるためには、サンプリング定理から、1ピクセル当たり5mm未満の地上解像度が必要である。Mavic Miniは15m

の距離で約 5.05mm であり、1 cm の分解能を持つ解像度を出すためには、地上から 15m 弱ほどの高度で空中撮影する必要がある。同様に Phantom 4 Pro では、約 18m、EOS6D Mark II では、焦点距離 24mm レンズの時に約 20 m からの撮影、16mm レンズの時に約 14 m からの撮影で 1cm の分解能を持つ解像度の撮影ができることを示す。なお、本研究では、Mavic Mini での空中撮影高度を、主に 3m ~ 10m 程度とした。上空 10 m で撮影した場合 3.4mm ほどの地上分解能があることになる。一方、地上撮影では、本研究、計測の目的が図面作成であるため、計測対象の解像度が数 mm 以下の解像度になるように、対象から 5 m 以内に近づいて撮影を行うようにした。

1-3. 被写界深度

写真撮影では、ピントを合わせた面の前後にある程度ピントが合う範囲がある。これを被写界深度といい、これは、1 画素ごとのセンサーサイズ (画素ピッチ)、撮影距離 (ピント面)、レンズの焦点距離と F 値 (絞り) で決まる。三次元化のための画像は、ピントが合っている部分が多いほど、特徴点を抽出できるため、対象と被写界深度の関係を考慮に入れて撮影する必要がある。図 2 にピント距離と被写界深度、F 値の関係を示す。

計算式は一般に

$$\text{前方被写界深度} = (\text{許容錯乱半径} \times F \text{ 値} \times \text{物体距離}^2) / (\text{焦点距離}^2 + \text{許容錯乱円径} \times F \text{ 値} \times \text{物体距離}) \quad \dots \text{式 (2-1)}$$

$$\text{後方被写界深度} = (\text{許容錯乱半径} \times F \text{ 値} \times \text{物体距離}^2) / (\text{焦点距離}^2 - \text{許容錯乱円径} \times F \text{ 値} \times \text{物体距離}) \quad \dots \text{式 (2-2)}$$

である。この場合、許容錯乱円径を画素ピッチに読み替えて計算を行うと、図 2 のようなグラフとなる。

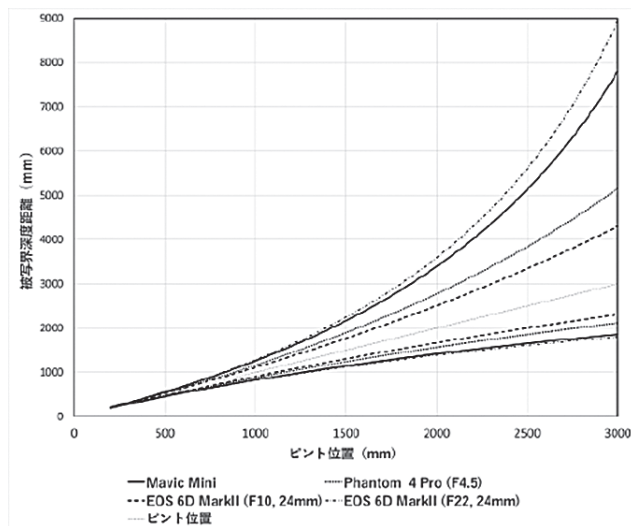


図 2 撮影距離と被写界深度幅

前方被写界深度と後方被写界深度の間がピントの合う範囲となる。図 2 に示したグラフに用いた数値は以下の通りである。

機種	画素ピッチ	F 値	レンズ焦点距離
Mavic Mini	約 0.0015mm (1.55 μm)	F2.8	4.49mm
Phantom 4 Pro	約 0.0024mm (2.4 μm)	F4.5	8.8mm
EOS 6D Mark II	約 0.0058mm (5.8 μm)	F10 および F22	24mm

図 2 で示したように、計算上では、EOS 6D Mark II に 24mm レンズで F 値を 22 にしたものと Mavic Mini はかなり近い被写界深度が得られる。しかし、1 ピクセル当たりの解像度が異なることを考慮に入れる必要がある。Mavic Mini は、画像センサーが小さく、F 値が小さいが、大きな被写界深度を得ることができるため、比較的三次元化に向いていると考えられる。しかし、Mavic Mini の解像度は、EOS 6D Mark II に比べると相当劣ること、さらに、センサーサイズが小さいため、詳細な三次元化のための、3mm 以下の地上解像度でブレのない写真を撮影するためには、日中の屋外のような比較的明るい環境下で、10 m 以下の低空から撮影する必要がある。

なお、画素ピッチが大きいほど、センサーで拾う光の量が大きくなるため画質が良くなる。この場合、EOS 6D Mark II が有利である。一方、F 値は一眼レフカメラで、絞りがあがるレンズや絞りを搭載した Phantom 4 Pro では調整できるが、Mavic Mini では、F 値は 2.8 で固定である。三次元化を目的とした撮影では、使用するカメラの特性を十分把握しておく必要がある。

2. 空中撮影について

Mavic Mini (小型ドローン) での撮影では、操縦者の他に周囲の状況を確認する要員の、複数での作業を原則とした。実際には、気象条件の確認、周辺の人通りや交通状況、さらに上空の様子等に十分注意を払って空中撮影を行った。最近の小型ドローンは、ホバリングが比較的安定しているので、強風や雨天でない限り比較的安全に滞空し、安定した撮影が可能となっている。なお、空中撮影は、ホバリングの状態で行っている。これは、ローリングシャッターによる歪みができるだけ出ないようにするためである。ここでは、気象条件により、飛行時間、撮影時に注意を要した部分や撮影方法について、東北大学正門と小川記念園に分けて記載する。

2-1. 東北大学正門

東北大学正門の空中撮影は 2020 年 9 月 19 日 (土) に行った。正門は、4 本の石造の門柱とその間に鉄の門扉があり、広場が市道側に台形に広がっている (図 3)。中央の門柱の間は約 4.5 m、最も高い門柱の高さは約 4.2 m、門扉中央と市道歩道まで距離は約 10 m である。正門と正門前広場周辺

には、樹高が高く、枝が横に広がるマツやスギなどの樹木が多くあり、広く地上が目視できる位置は南側の門柱2つを通る動線に限られていた。正門の空中撮影を実施するにあたり、計測範囲を東側の構内（範囲 A）と西側の広場（範囲 B）の二つに分け、両方をつなぐ測線として、図4に示した上空が空いていて見通せる動線に測線 A-B を設定し、空中撮影を行った。なお、測線 A-B は、土日に人の出入りがある通用口（図3の右二つの門柱の間）の上を通らないように設定している。撮影高度は、地上から5m～8m程度である。標定点は4か所設定し、トータルステーションとレベルを用いて別途計測した。なお、標定点は、図5のように、1辺10cmの四角をX字に白と黒で色分けした標識を作成し、中心に穴をあけて測量釘が中央に来るように設置した。



図5 標定点の例



図3 市道側から見た東北大学正門（地上撮影）。
右が南側、左が北側。

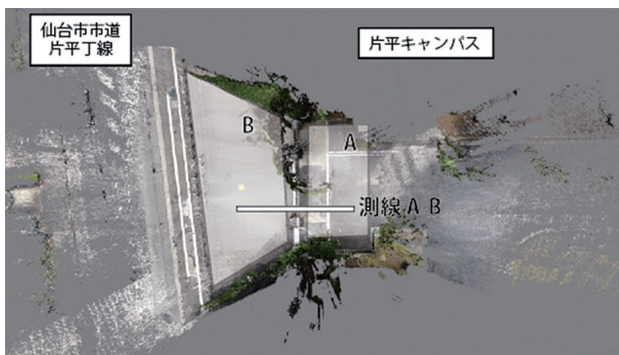


図4 正門での撮影エリアの区分

まず、範囲 A、B において、基本的な構造物を計測・把握するため、下向きで撮影を行い、水平移動を繰り返して、撮影範囲が他の写真と8割程度重なるように撮影を行った。さらに斜め撮影で門柱などの構造物の形状が分かるように多視点からの撮影も実施した（図6）。なお、空中撮影では、4本ある門柱のうち、北側2本の門柱は、マツの枝が垂れ下がり、その上面を Mavic Mini で視認、撮影することができなかった。



図6 上空撮影による斜め撮影の例

空中撮影で撮影した枚数は243枚である。飛行回数は3回で、1回の飛行時間は約8分であった。なお、Mavic Mini 搭載の GPS で GPS 信号が得られた場合は、撮影データ内に緯度経度及び高度の位置情報が保存されている。空中撮影位置は図7に示した。

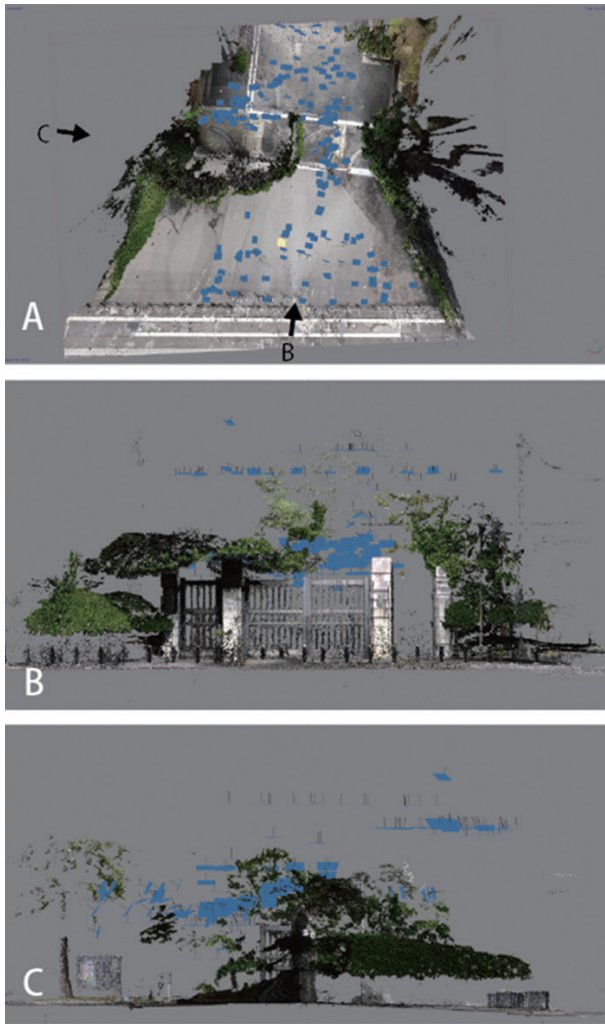


図7 東北大学正門の空中撮影位置（青で示した位置）
A: 平面図 B: 立面図 C: 側面図

次に、Mavic Mini で上空撮影を実施した日時での気象概要を示す。東北大学正門を空中撮影した 2020 年 9 月 19 日（土）は、小雨のち晴れであった（表 1）。仙台気象台で記録された平均風速は 2.9～5.2m/s で、瞬間最大風速も 6.1～8.3m/s と比較的強い。飛行時間については、比較的風が強かったためホバリングでの電池使用量が多く、一回の飛行で 8 分ほどの飛行時間となった。一方、風の影響で、植木の枝が揺れたり、Mavic Mini が風に煽られたりすることもあり、枝葉や構造物と Mavic Mini との距離は最低でも 1m 程度は開けるように撮影を行った。

2-2. 小川記念園

小川記念園は、図 8 A に示すような扇形状をしており、交差点の角を軸としたとき、その扇の辺の部分の長さはおよそ 17 m、扇の頂点を結ぶ直線距離はおよそ 25 m の広さである。小川記念園の空中撮影は 2020 年 11 月 6 日に実施した。Mavic Mini での空中撮影は、地上から約 3～5 m の高度で撮影し、計測対象範囲を網羅するように撮影した。さらに全体の位置関係が分かるように約 10 m と 20 m の高度で場所を移動して 30 枚弱の撮影、同様に 25～30 m の高度で 5 枚の空中撮影を実施し、合計で 320 枚の空中撮影を行った（図 8）。小川記念園のキャンパス側壁の裏手には、ヒマラヤスギが 15 本ほど壁に沿って植えられており、枝が記念園の敷地内まで伸びてきており、キャンパス側の壁面直上からの空中撮影は断念し、枝葉が入らない離れた上空から斜め下方向にカメラを向けて構造物前面の撮影を実施した（図 9）。標定点は 4 か所設置し、トータルステーションとレベルで別途測量を行った。空中撮影では、壁面裏側にある標定点は撮影できないため、地上撮影で補った。

表 1 2020 年 9 月 19 日の仙台気象台での観測データ 気象庁ホームページより抜粋

時分	気圧(hPa)		降水量 (mm)	気温 (°C)	相対湿度 (%)	風向・風速(m/s)				日照 時間 (分)
	現地	海面				平均	風向	最大瞬間	風向	
11:10	1007.4	1012.4	--	24	55	4.9	西北西	8	北西	0
11:20	1007.5	1012.5	--	24	54	5.2	西北西	8.3	北西	0
11:30	1007.4	1012.4	--	24.4	55	3.2	西北西	6.4	西北西	0
11:40	1007.2	1012.2	--	24.7	55	4.2	西北西	6.4	西北西	1
11:50	1007.1	1012.1	--	25	56	2.9	西北西	6.1	西北西	3

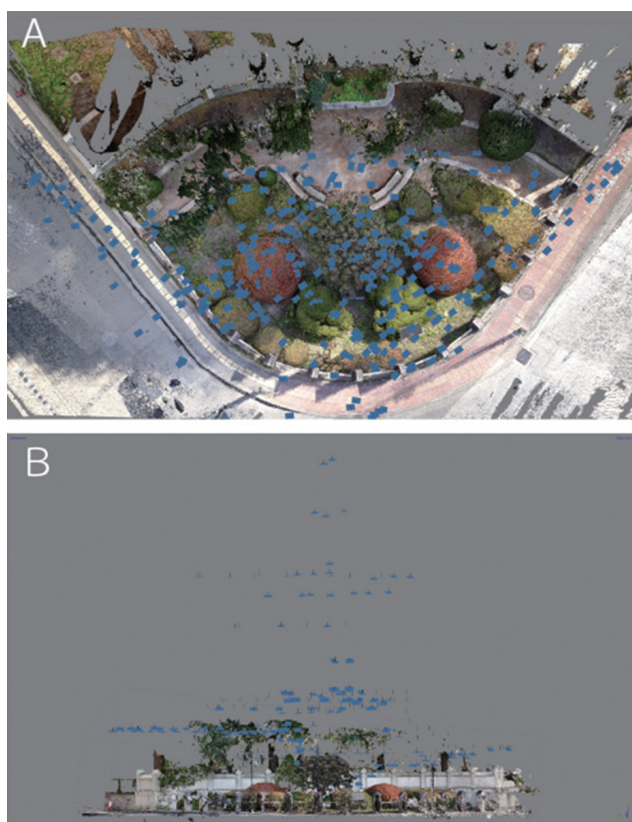


図8 小川記念園の空中撮影位置（青色の四角）
A: 平面図。B: 立面図

空中撮影時の天候は表2に示した通り、曇のち晴で、仙台気象台での観測データでは、平均風速0.9～3m/s、最大瞬間風速2.1～5.1m/sと比較的穏やかであった。風が穏やかで、ホバリングでの電池使用量が抑えられたため、一回の飛行で10～11分ほどの飛行時間となり、正門での撮影時に比べ2分ほど長い滞空時間となった。小川記念園での空中撮影の飛行回数は3回である。



図9 小川記念園での空中斜め撮影の例。上にヒマラヤスギの枝葉が写る

3. 地上撮影について

地上撮影は、空中撮影で撮影できなかった範囲を補足するために実施したものである。以下に正門と記念園に分け撮影条件等について記載する。

3-1. 東北大学正門

正門での地上撮影は、まず、Mavic Miniで空中撮影した後、撮影で十分撮影できなかった範囲を確認してから実施した。計測対象とした構造物からの撮影距離は普通2～4mほどであった。2020年9月19日（空中撮影と同日）に使用した機材は、ボディがEOS 6D Mark II、レンズはEF16-35mmを使用し、焦点距離を16mm、F値を16で固定し撮影した。ブレを減らすため、ISO感度を3200に設定し、絞り優先モードで574枚撮影した。撮影では、Mavic Miniによる撮影データとの合成をすることから、主要な門柱や地面等も合わせて三次元化できるように、これらの対象を含む広範囲な撮影を心掛けた。空中撮影、地上撮影のデータから、ソフトウェア（Agisoft社製Metashape）を使い、空中撮影データと合わせて三次元化処理を行った。生成された三次元データを検証後、

表2 2020年11月6日の仙台気象台での観測データ 気象庁ホームページより抜粋

時分	気圧(hPa)		降水量 (mm)	気温 (°C)	相対湿度 (%)	風向・風速(m/s)				日照 時間 (分)
	現地	海面				平均	風向	最大瞬間	風向	
10:10	1020.1	1025.4	--	15.2	60	0.9	西北西	2.1	西	7
10:20	1020.1	1025.4	--	15.4	58	1.7	西南西	2.9	南	2
10:30	1020	1025.2	--	16.6	57	2.2	南西	3.3	南南西	5
10:40	1019.9	1025.1	--	16.7	55	2.6	南南西	4.2	南	10
10:50	1019.7	1024.9	--	16.8	52	3	南	5.1	南	10

撮影が不十分な箇所について、同年 10 月 13 日（撮影枚数：38）、11 月 6 日（撮影枚数：207）に再撮影を行った。特に、正門前広場の壁面とその裏側は Mavic Mini で撮影できなかった上、同日の地上撮影データで合成がうまくいかなかったので、地上撮影を念入りに実施した。撮影方法は、対象となる面に対しできるだけ正対して 2～3 m ほど離れて立ち、対象面に対し並行に移動しながら撮影を行った。撮影間隔は、普通に歩く程度の歩幅程度（50～60cm）である。三次元化に使用できた地上撮影データの撮影位置は図 10 のピンク色で示した位置となった。

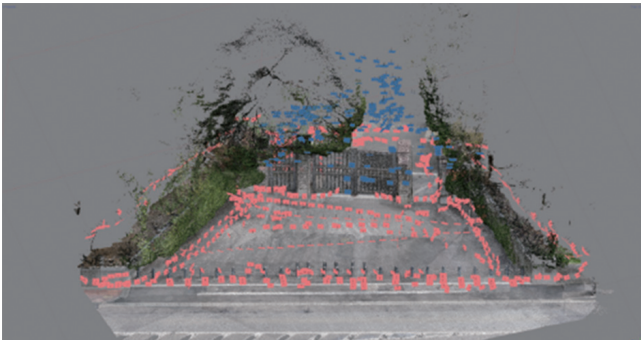


図 10 東北大学正門の地上撮影位置（ピンクで示す）。

3-2. 小川記念園での地上撮影

小川記念園での地上撮影は、空中撮影後に実施し、使用機材は EOS 6D Mark II、使用レンズは単焦点 24mm である。ISO は 1250、F 値は 10 に設定し、絞り優先モードで 639 枚撮影した。撮影位置を、図 11 に示した。地上撮影では、歩道（道路）に面した小さな柱の側面と、キャンパス側の壁面裏のヒマラヤスギが植えられている周辺および壁面裏周辺を重点的に撮影した。さらに、壁面の裏のヒマラヤスギ周辺は盛土がされており、壁面近くに立つと、壁越しに記念園を見渡することができることから、壁裏側から記念園内の撮影および壁面裏側、記念園内部と壁面が同時に写る撮影（図 12）も行った。

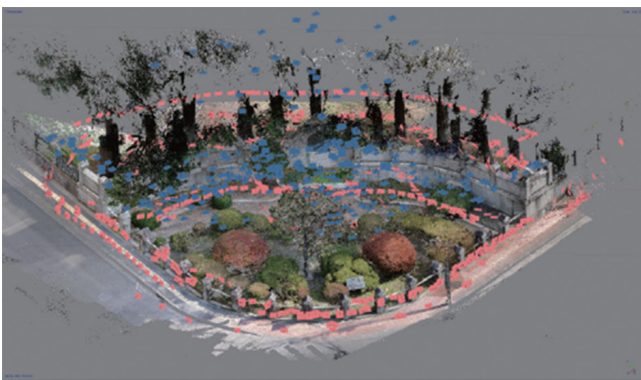


図 11 小川記念園での地上撮影位置（ピンクで示す）



図 12 地上撮影による壁面裏側からの写真の例

4. SfM による三次元化

空中撮影と地上撮影で得られた写真から、SfM ソフトウェアである Agisoft 社製 Metashape Professional（使用バージョン：1.6.5）を使い、三次元化を行った。初めは、空中撮影と地上撮影で得られたすべての写真を取り込み、写真のアライメント（位置合わせ）を実行し、その後、高密度クラウドを作成した。また、Mavic Mini で撮影したデータだけを使って三次元化処理を行い、全体を使った場合との比較を行った。Metashape での写真のアライメント処理時の設定は、精度を高く、キーポイントおよびタイポイント設定を 0 にしてそれぞれのポイント制限数をなくした状態で計算を行った。その後、アライメントの計算ができない写真については、写真毎に再度アライメントの計算を実行した。この処理でもアライメントの位置が計算できない場合は、撮影範囲のまとまりごと（chunk）にわけ、それぞれアライメントの計算と高密度クラウド作成を行い、それぞれのチャンクに共通する特徴点にポイントを 4 か所以上設定し、そのポイントを基準にして位置合わせを順々に実行し合成（merge）を行った。最終的に、9 割程度の写真についてアライメントの計算ができた。全体で写真のアライメントの計算が終わった後で、高密度クラウドの作成を行った。高密度クラウドの作成では、信頼度の計算を行い、信頼度の低いもの（信頼度 0～3 と計算されたもの）については削除した。以下に東北大学正門と小川記念園について詳述する。

4-1. 東北大学正門での三次元化

東北大学正門の撮影データによる Metashape での三次元化は、空中撮影 242 枚、地上撮影 667 枚を合成して完成した。信頼度の比較的高い点（Metashape で信頼度 4 以上）を採用したところ、点群数は、155,336,024 点となった。全体の様子を図 13 に示す。

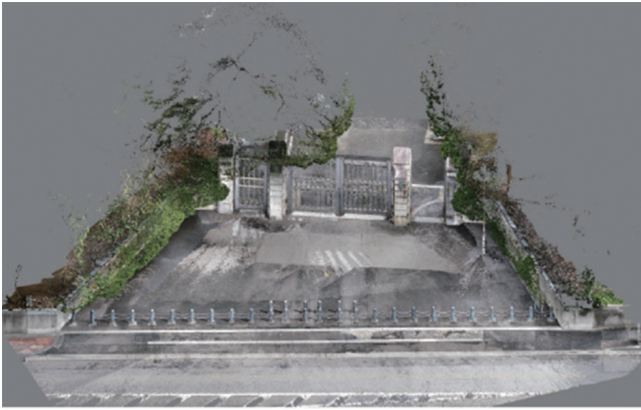


図 13 斜め上から見た東北大学正門の正射影画像

空中撮影だけで三次元化した場合、空中撮影では、安全を考えて、人や構造物に衝突しないように安全な距離をあけて撮影したり、測線を設定しているため、どうしても撮影および三次元化できない場所が発生した。その結果、図 14 の東北大学の銘板ある門柱の側面（図 14 - A）、木の陰に隠れていた門柱の側面および広場の壁面（図 15-A）のようにデータが欠損することが多数発生した。地上撮影で欠損部分を撮影して、空中、地上両方のデータを組み合わせることによって三次元化した場合を、図 14 - B、図 15 - B にそれぞれ示した。

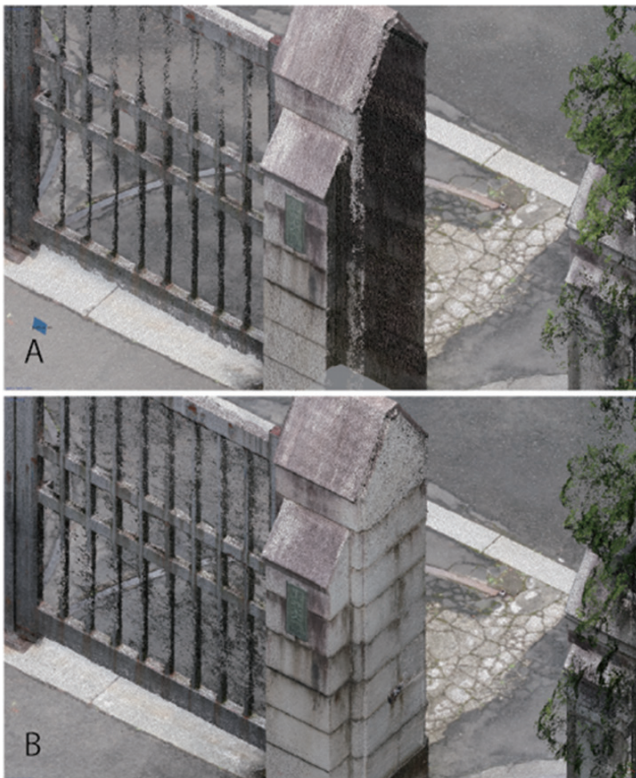


図 14 東北大学の銘板がある門柱の三次元データ（正射影）。
A：Mavic Mini の写真だけで再構成したもの。
B：地上撮影を追加して再構成したもの。

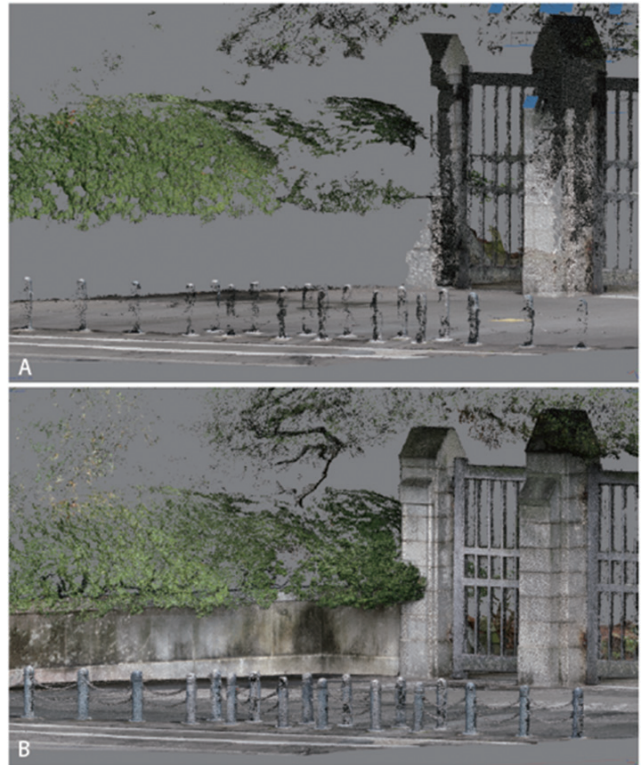


図 15 木の陰に隠れていた北側の門柱と壁面の三次元データ（正射影）。A：Mavic Mini の写真だけで撮影再構成したもの。B：地上撮影を追加して再構成したもの。

空中撮影と地上撮影を組み合わせることで、Mavic Mini での欠損部分が三次元化できていることが分かった。空中撮影データだけでは三次元化できないところについては、地上撮影で補うという方法は非常に有効である。一方、地上撮影で補う場合、例えば、門柱の三次元データは、Mavic Mini と EOS 6D Mark II では色味が異なるため、若干色が変化した結果になることがある。これは、Metashape でデータ作成時に信頼度でフィルタリングすることで、より高精度の地上撮影のデータが選択されることが多く、結果としてあまり気にならないようになる。

次に解像度について述べる。地上面の解像度については、点群データ中の一辺 10cm の標定点を示すマーカーの一辺あたりの点群を数えたところ、40～42 個であった。これは、1cm 当たり 4 個ほどであり、1 点当たり 2.5mm ほどの分解能であった。Mavic Mini の撮影高度が 5～8 m であるので、図 1 のグラフでの 8 m の値にほぼ合致している。一方、門柱表面と広場壁面で同様に数えてみたところ、1 点当たり約 1.5～2.0 mm の分解能であった。これは EOS 6D Mark II の焦点距離 16mm のレンズで約 4～6 m の距離、焦点距離 24 mm のレンズで約 6～9 m 離れた場合の解像度に一致する。実際の主要な地上撮影では 16mm のレンズで撮影距離

を2～3 m、感度 (ISO) を3200 にして撮影したため、微細構造が詳細にとらえられていなかった可能性がある。



図 16 点群データで表示した一辺 10cm の標定点マーカー。

一方で、データ作成時に思うように合成できない場合が認められた。これは広場北側の壁面の上面及び裏側である (図 17)。この場所は植樹が密集し、枝や葉が長く伸びて、広場から構造物上面部分が植え込みによって見ることができない状態であった。また、裏側から広場側と歩道側の撮影も試みたが、植栽でほとんど様子を確認することができなかった。さらに、市道にある歩道から構造物上面及び裏面の撮影を試みたものの、同様に壁面裏側はほとんど見通せなかった。最終的には、広場を含む表側の高密度クラウ

ドと、壁面裏側の高密度クラウドデータから、おおよその特徴点を見つけ、そこにマーカーを追加して設置し、何度も表示を入れ替えながらマーカー基準で複数の chunk 間で位置合わせをして、より正確な位置合わせになるようにした。位置合わせ終了後にすべての chunk を合成した後で、高密度クラウド作成処理を行った。その結果が図 17 である。このことから、見えにくい構造物の撮影については、共通の特徴点をとらえられるように撮影位置を相当考慮する必要がある。

なお、東北大学正門の計測は、登録有形文化財の申請用の図面を作成することが一つの目的であるため、作成した点群データを標定点でスケール合わせしたのち、信頼度の低い点群を除いてファイルに出力した。出力した点群データをエリジオン社製の大規模点群処理ソフトウェア InfiPoints で読み込み、平面図と立面図の基本となるオルソ画像を出力するとともに、必要な寸法の計測を行い、その画像と計測データをもとに、構造物を Adobe 社の Illustrator でトレースして図面を作成した (図 18)。

4-2. 小川記念園での三次元化

空中撮影と地上撮影のデータを使用して三次元化した結果は、図 19 に示した。空中撮影だけで三次元化した場合は、対象とする記念園内の大構造については相当の範囲で三次元化できた (図 20)。しかしながら、壁面裏側と、歩道横の柵柱の側面については、空中撮影ができなかったため、三次元化できていない。そこで、地上撮影と組み合わせることで三次元化を実施したところ、壁面裏側の 9 割ほどが写真のアライメントが成功した。一方、歩道横の柵柱周辺や壁面裏側の一部については合成がうまくいかず、いくつかの合成できる範囲に分けて三次元化を行い、それぞれの範囲に 4

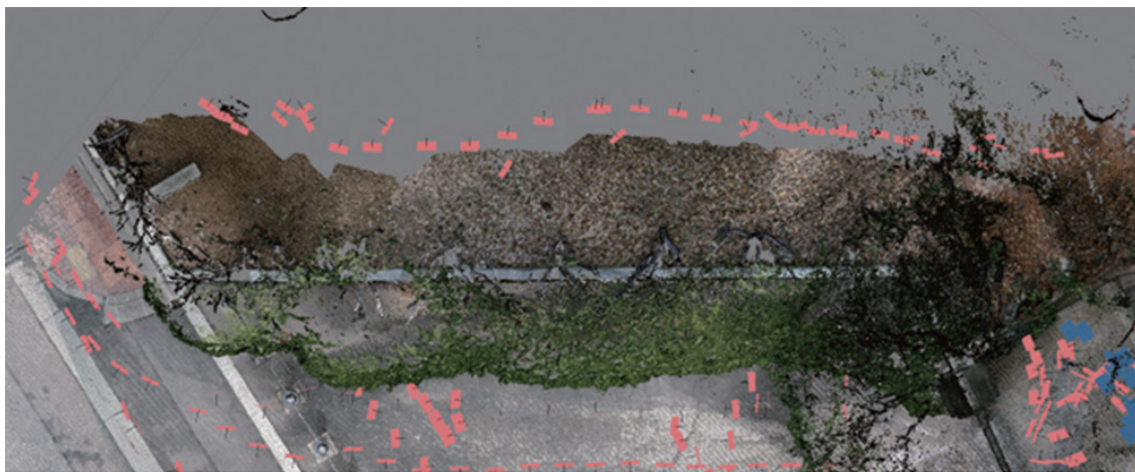


図 17 再構成された広場北側の壁面と裏側部分の平面図。空中撮影では植木に遮られ、三次元化されていない部分を地上撮影で補ったもの。

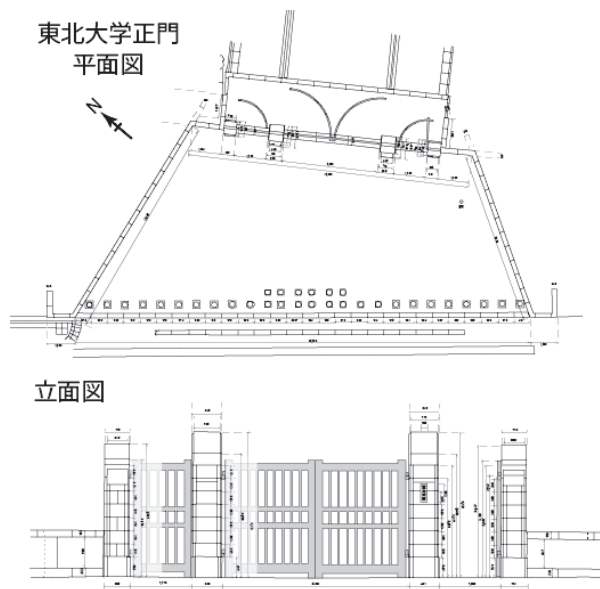


図 18 三次元点群データから作成した東北大学正門の図面



図 20 空中撮影だけで三次元化した小川記念園
(A: 俯瞰図、B: 歩道側門柱、C: 壁面裏)

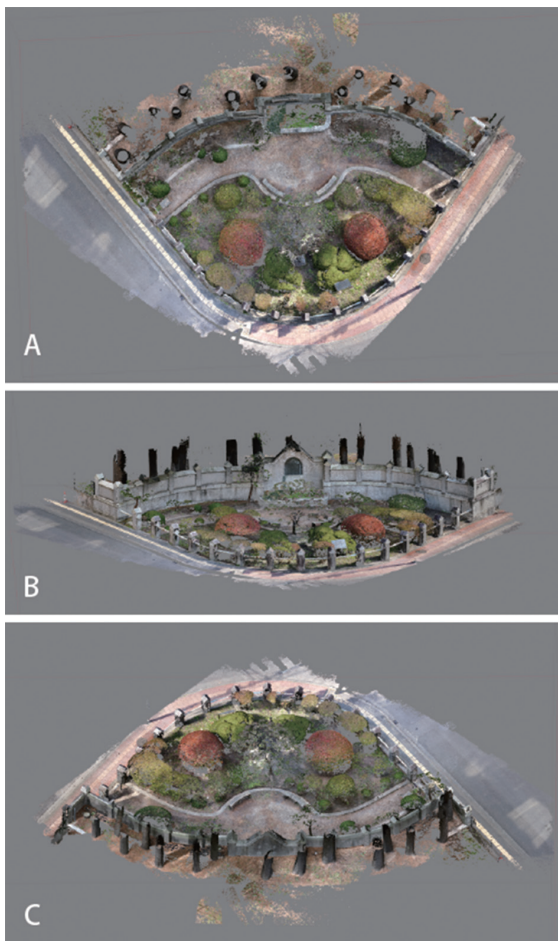


図 19 小川記念園の空中および地上撮影データから作成した三次元データ
A: 平面図 B: 俯瞰図 C: 記念園裏からの俯瞰図

つ以上の特徴点を設定し、それらの点を基準に位置合わせを行うことで全体の合成を行った。最終的には、空中撮影の 320 枚、地上撮影の 578 枚、合計 898 枚の写真で合成でき、出力された色付き点群数は 99,212,008 個の三次元データができた (図 19)。歩道側の門柱の一部については、点群の精度と密度が落ちている。これについては、交差点に近く、撮影が十分にできなかったためと考えられる。

空中撮影だけのデータと、地上撮影を追加したデータを比較したところ、明らかに解像度に違いがみられた。例として、交差点近くにある幅 90cm の解説板のデータを図 21 に示した。空中撮影で作成した場合の解像度は、点群の大きさやコントラストを調整しても、解説文の文字がつぶれて解読が難しい状態であるが、地上撮影を追加したデータでは、コントラストを操作すれば解説文を読むことができる解像度になっている。

なお、小川記念園での計測は、登録記念物の登録に向けた基本情報の提供を目的としていたため、詳細な線画図面は作成せず、点群データから作成した平面図と立面図と、植樹された種類の位置 (図 22) に利用した。

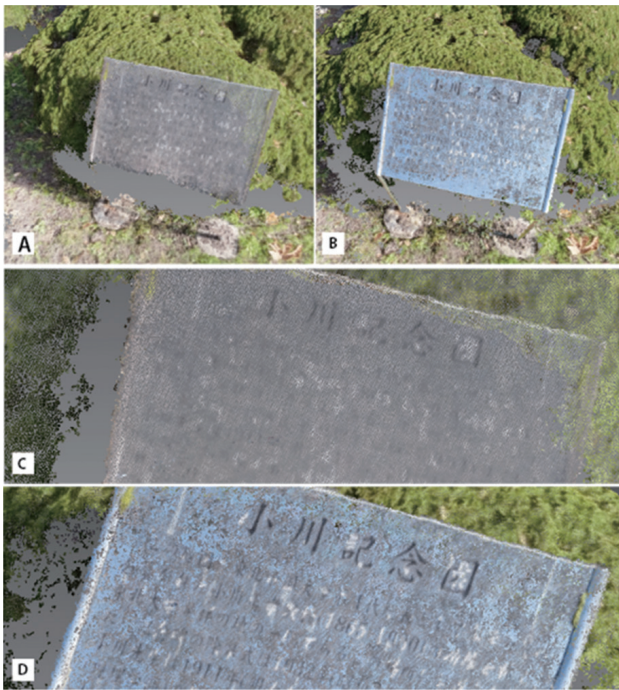


図 21 小川記念園の解説板の三次元データ
A：空中撮影だけのデータ B：地上撮影を追加したデータ C：Aの拡大図 D：Bの拡大図

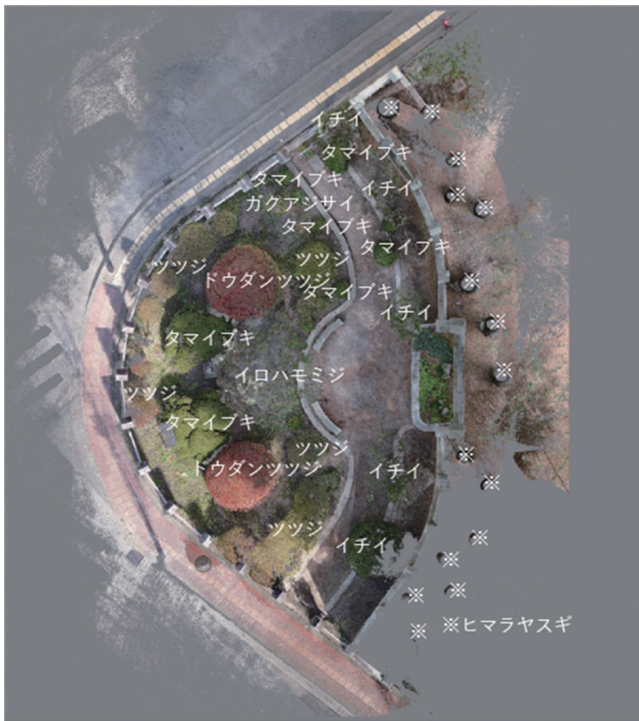


図 22 植樹の種類位置図（樹種同定は東北大学植物園伊東拓朗氏による）

まとめ

小型ドローンによる多視点空中撮影を使った、屋外にある構造物の三次元化を行った結果、撮影ができる範囲での三次元化は、良好な結果を示した。計測範囲の一边が20m前後と、やや広い範囲の計測のため、小型ドローンでの撮影は、効率的であった。1点あたり2.5mm程度の分解能があり、門柱などの構造物以外の舗装路面などは、この方法から得られる精度でも充分であると考えられる。正門門柱のように、高さが2mを越える構造物の場合、地上据え置き型のレーザー計測機器では、高い部分の計測に欠損が生じる危険性がある。この点でも、小型ドローンを利用した方法は有効である。ただ本研究のように、市街地の屋外にある構造物の計測で、小型ドローンを使う場合は、一般の航空測量に比べると相当低い高度で撮影する必要がある。このため、ドローンでの撮影時には周辺に十分気を付けて実施する必要がある。このような点に留意して実施するならば、比較的広い範囲の計測については、非常に効率的な計測方法である。

一方、ドローンでの多視点撮影ができない場所については、地上撮影で補うことで、詳細に三次元化をすることができた。ドローンでの撮影だけでは、精度が充分でない部分も、地上撮影で補うことで、1点あたり1.5～2.0mm程度の分解能となり、精度を高めることができた。しかし、石材の経年劣化を点検するために、亀裂の詳細な変化を捉えるためには、より高い精度が必要となる。そのような目的のためには、SfM法では撮影方法を工夫することが必要となり、あるいは計測方法自体を変えることが必要となる。

このように、屋外構造物の三次元化には小型ドローンでの空中撮影は非常に有効であり、必要な精度を出すためには、地上撮影も組み合わせて計測することで、かなりの精度を出すことができることが明らかになったと考えられる。今後も、計測事例を増やし、計測方法と精度についての知見を蓄積していきたい。

謝辞

本論文の査読者の国立文化財機構奈良文化財研究所の金田明大埋蔵文化財センター遺跡・調査技術研究室長には、有益な指摘をいただきました。ここに感謝いたします。本研究はJSPS科研費20H00019および18H00014の助成を受けたものです。

註

- 1) 2020年12月8日の朝日新聞の報道では、国土交通省が規制の強化の検討をはじめ、今後は100g未満が規制対象外となる政令改正が検討されているとのことであり、改正された場合、人口密集地等での三次元データ用デジ

タルカメラ撮影に支障を及ぼすと考えられる。

- 2) <https://www.dji.com/jp/mavic-mini/specs> 2020 年 11 月 13 日閲覧。

引用・参考文献

- 石塚直樹・岩崎亘典・坂本利弘 2018 『ドローンを用いたほ場計測マニュアル（不陸（凹凸）編）』国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構 農業環境変動研究センター
https://www.naro.affrc.go.jp/publicity_report/publication/files/drone_unevenness.pdf
- 内山隆弘・蟹澤聰史 2020 「東北大学片平キャンパスにおける歴史的建造物の石材に関する研究」『Bulletin of the Tohoku University Museum』No.19、21～37 頁、東北大学総合学術博物館
- 金田明大 2014 「Structure from Motion による遺構計測の試行」『奈良文化財研究所紀要』44～45 頁、奈良文化財研究所
- 鹿納晴尚・西弘嗣・藤澤敦・佐々木理・高嶋礼詩・根本潤 2018 「東日本大震災遺構 3次元クラウドデータアーカイブ構築公開事業中間報告」『Bulletin of the Tohoku University Museum』No.17、139～183 頁、東北大学総合学術博物館
- 藤澤敦・鹿納晴尚・吉野高光・小池雄利亜 2017 「福島県清戸迫横穴の高精細 3次元計測—原発事故帰還困難区域所在文化財の保全と活用—」『日本文化財科学会第 34 回大会研究発表要旨集』pp.60～61、日本文化財科学会