

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 Evaluation of the image-based modeling software using photographs taken from UAV

基本図情報部 早坂寿人・大野裕幸・大塚力・関谷洋史¹・瀧繁幸
National Mapping Department Hisato HAYASAKA, Hiroyuki OHNO,
Tsutomu OTSUKA, Hiroshi SEKIYA, Shigeyuki TAKI

要 旨

マルチローター方式の無人航空機（Unmanned Aerial Vehicle；以下「UAV」という。）を用いて、国営ひたち海浜公園において自律飛行による空中写真的撮影を行った。その後、撮影した写真から3種類の三次元モデリングソフトウェアを用いてそれぞれ三次元モデルを作成した。作成した三次元モデルの精度を確認するため、三次元モデルから作成したオルソ画像及び点群データと現地で観測した検証点データを用いて、各条件での精度を対比した。更に、得られた三次元モデルの視覚的評価を実施した。以上により、利用が進んでいる市販の3種類の三次元モデリングソフトウェアの精度検証を実施した。

1. はじめに

空中写真を撮影する手段としては、有人の航空機等がこれまで一般的であった。近年、地上画素寸法がより小さい空中写真を従来よりも低廉かつ簡便に撮影できる手段として、UAV が注目を集めている。特に災害対応において UAV が撮影に用いられるようになりつつあり、例えば、飛田ほか（2014）が固定翼型の UAV を用いて西之島の空中写真を撮影し、拡大する島の面積や体積の算出を行っている。また、回転翼型の UAV では、井上ほか（2014）が自然災害時の空撮及び三次元モデル、オルソ画像及び標高データ作成について考察を深めている。また、名草ほか（2015）は土砂災害のあったエリアで UAV から取得した写真と主点位置座標から地形モデルを作成して精度検証を行っている。災害発生直後に撮影を実施した事例としては、渡辺ほか（2015）による2014年8月豪雨による広島市の土砂災害時の空撮がある。

UAV で撮影した写真からのオルソ画像及び標高データの解析には、コンピュータビジョン由來の多視点幾何による撮影位置の推定と三次元形状の復元（SfM：Structure from Motion 及び MVS：Multi-View Stereo）等の技術を利用した三次元モデリングソフトウェアが使用されている。SfM や MVS 等の技術を利用したソフトウェアで解析を行うと、撮影された複数の写真の内部標定要素及び外部標定要素を求めたのちに、三次元モデルの構築が行われる。作成された三次元モデルからは、オルソ画像や三次元点群データ（DSM）を作成することができる。

このような解析方法を用いて作成した三次元モデルについては、再現性に関する定性的な評価や、災害の発生状況の把握に資する精度検証は行われているが、UAV を測量に用いることを前提として精度検証した事例はあまり見られない。

そこで、市販のよく使われている3種類のソフトウェアで作成した三次元モデルの精度検証を行うこととした。精度検証にあたっては、ソフトウェアから作成される成果物であるオルソ画像を水平方向の精度検証に利用し、三次元点群データを高さ方向の精度検証に用いた。空中写真是マルチローター方式の UAV で撮影したものを使用し、カメラ設定や重複率を変更した複数条件下で三次元モデルの作成を行い、オルソ画像と三次元点群データを出力した。現地では基準点を取得して三次元モデルの作成に利用したほか、水平・高さ精度の検証のために検証点も取得して RMSE（平均二乗誤差）を算出する比較対象とした。また、3種類の三次元モデリングソフトウェアで作成した三次元モデルについて、建物に注目した視覚的な再現性の評価やモデルの断面の形状について比較を行うとともに、三次元モデルの構造物上の特徴点の座標について現地の同じ構造物で取得した検証点との比較も行った。これらの検討内容について、現地撮影に関する諸事項や三次元モデル作成及び精度検証等から得られた知見を報告する。

2. UAV による空中写真撮影

2.1 撮影に使用した UAV について

空中写真的撮影には、エンルート社製 UAV の ZionPro800（写真-1、表-1）を使用した。本撮影に使用した機種のようなマルチローター方式の UAV は、自動車等で機体の運搬がしやすく、離発着に広い敷地を要しないなど運用性が高い。動力は電気モーター式であり、エンジン式の UAV と比べて相対的にメンテナンスが容易であり、導入コストも低いため、様々な空撮シーンで活用が進んでいる。一方、航行速度・航続距離（バッテリーの容量）の点から範囲撮影には限界がある。また、機種によっては購入してからすぐにフライトさせることが可能であることから、安全管理が重要な課題となっている。



写真-1 撮影に使用した UAV
(エンルート社製 ZionPro800)

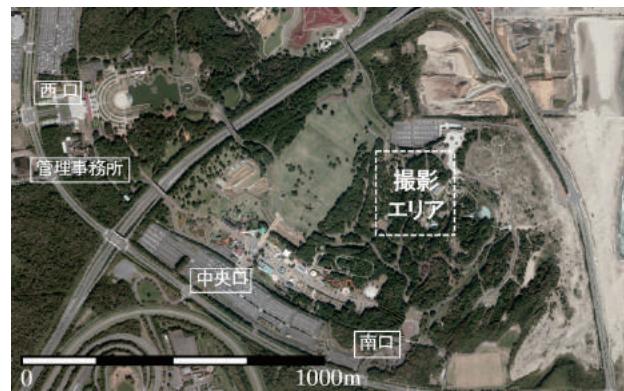


図-2 撮影位置図 (国営ひたち海浜公園)

表-1 UAV 諸元

項目	概要
機体形式	マルチローター方式(6軸)
動力	モーター式(バッテリ駆動)
大きさ	モータ離隔30cm
飛行時間/回	10~13分
飛行高度	計画高度130m
操作	プログラミング/手動

2.2 撮影場所の選定

撮影は、関東地方整備局国営常陸海浜公園事務所の協力を得て、休園である平成26年12月15日(月)に国営ひたち海浜公園(茨城県ひたちなか市:図-1)にて撮影を行った。撮影場所の選定にあたっては安全性を最も重視し、UAVの飛行エリアに第三者が近接しない環境であること、航空法による管制を受けない地域であること、無線機器を扱う関係上、電波環境が良好であることを条件とした。撮影範囲は図-2の撮影エリア(約250m×200m)とした。



図-1 撮影場所 (茨城県ひたちなか市)

2.3 カメラ

カメラは、できるだけ高解像度の空中写真を撮影するため、ミラーレス一眼レフカメラの SONY α6000(表-2)をジンバルで装着した。レンズは広範囲を撮影するため、単焦点の焦点距離16mm(35mm換算で24mm)と35mm(35mm換算で52.5mm)のものを使用し、撮影は2秒間隔の自動撮影で実施した。また、マニュアルフォーカス(以下「MF」という。)でピントを無限遠に設定しての撮影とオートフォーカス(以下「AF」という。)を使用した撮影を行った。

表-2 カメラ諸元

項目	概要
機種名	SONY α6000
焦点距離	16mm/35mm
総重量	約350g
大きさ	約120×70×50mm
画素数	6000pix×4000pix
シャッタ	速度固定・リモート制御

2.4 撮影条件と撮影計画

対地高度は航空法で定める国土交通大臣への通報を要しない130mとした。対地高度130m時の地上画素寸法は16mmレンズ使用時で約32mm、35mmレンズ使用時で約15mmである。撮影計画は、SfMやMVSといった多視点幾何による三次元モデル作成を行うことから、重複率を十分確保するためオーバーラップ率90%、サイドラップ率60%とし、東西南北方向の垂直撮影及び斜め撮影を行うこととした。斜め撮影に関してはカメラを俯角45度に設定した。参考として、16mmレンズで南北方向に飛行して撮影を計画した場合の撮影コースと撮影位置を示したものが図-3である。

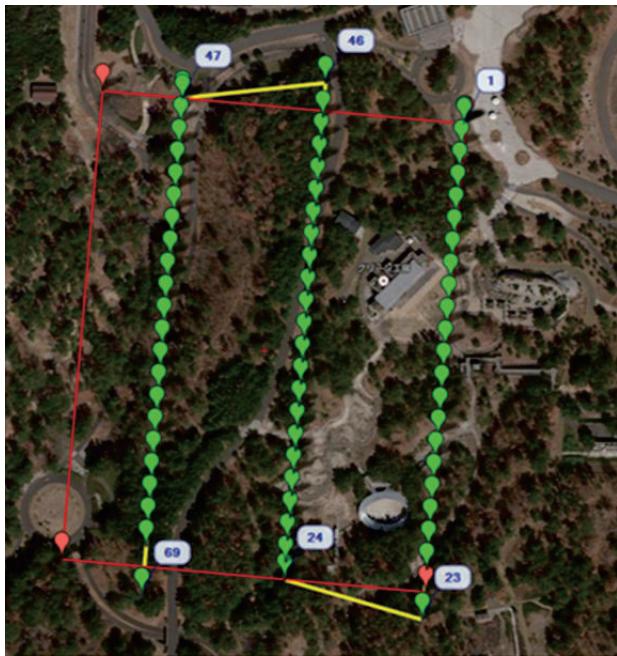


図-3 撮影位置（緑点；番号は撮影番号）

2.5 撮影作業と安全管理

実際の撮影作業にあたっては、運航中のトラブルへの対応手順書の作成、運行開始前の機材チェック、天候確認（雨・雪・霧のおそれがなく、風速 5m 以下）、飛行計測区域内への立ち入り制限（見張り員の配置）、飛行中の監視、フライト後の機材チェックなどを実施し、安全確保に万全を期した。安全管理を徹底するには、事前の計画が非常に重要である。特に飛行計画区域への立ち入り制限を行い、第三者の進入を排して安全を確保するためには、見張り員を計画的に配置することや、飛行計画区域と UAV の対地高度に応じた緩衝エリアを設けることが必要であり、現地の図面と予察が求められる。また、当日は見張り員との円滑な連絡のために無線機器（トランシーバ）を使用した。

撮影に際しては、UAV の 1 フライト毎に撮影データを取り出して、目視で写真の確認を行ながら作業を行った。今回使用した三次元モデリングソフトウェアの一つの Pix4Dmapper には簡易レポートを短時間で作成できる機能があり、写真の重複状況（図-4）、簡易オルソ及び標高データ（図-5）のイメージが確認でき、現場でのデータ確認に利便性が高いため、フライト毎に確認を行った。

撮影作業の冒頭に実施した MF 無限遠撮影（表-3、番号 1,2）後に写真の目視確認をしたところ、写真が不鮮明であることが確認された（図-6）。AF による焦点距離の変化の影響が後続の精度検証に影響を与えることが想起されるものの、写真の不鮮明さから起きる判読精度低下の影響を考慮して、以後は AF での撮影を行った（表-3）。

なお、UAV と地上局との通信を行うテレメトリー（飛行中の機器情報や映像の送信などを行うもの）が頻繁に途切れたため、アンテナ交換などの手当は行ったものの、最後まで原因が判明しなかった。また、撮影時は冬季で冷え込む時期であったことからバッテリーの残量管理には注意を払って撮影していたが、観測中の電圧異常を検出し、急遽帰還させるフライトがあった。

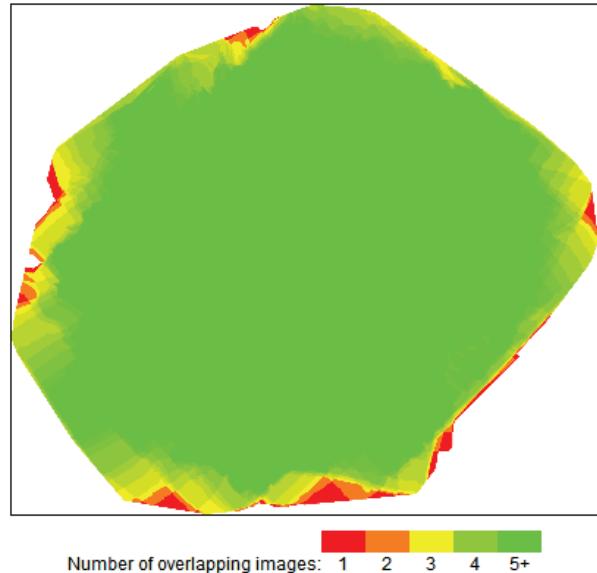


図-4 写真の重複状況

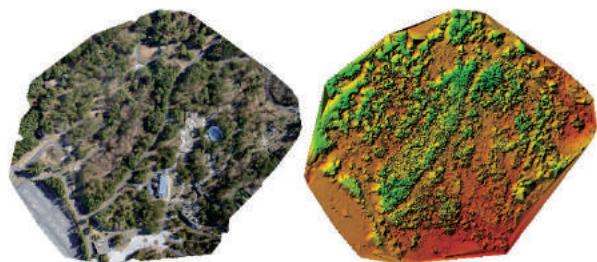


図-5 簡易オルソ（左）及び標高データ（右）

表-3 撮影写真一覧

番号	撮影方向	MF/AF	焦点距離	測線	枚数
1	垂直	MF	16mm	南北	71
2	垂直	MF	16mm	東西	54
3	垂直	AF	16mm	南北	69
4	垂直	AF	35mm	南北	214
5	垂直	AF	35mm	東西	128
6	斜め(北向)	AF	16mm	南北	72
7	斜め(南向)	AF	16mm	南北	72
8	斜め(東向)	AF	16mm	南北	72
9	斜め(西向)	AF	16mm	南北	75



図-6 MF と AF の写真対比

3. 精度検証

3.1 三次元モデルの作成

水平精度・高さ精度の検証を行うにあたり、まず三次元モデルの作成を行った。三次元モデルは、三次元モデリングソフトウェア3種類、カメラのフォーカス方式2通り及び内部標定要素の与え方3種類の3つの条件を設定し、各条件を組み合わせた合計18種類の条件の下でそれぞれ作成した。使用した三次元モデリングソフトウェアは、表-4に示す3種類である。カメラのフォーカス方式は、MFとAFの違いを検証できるよう表-3の番号1（以下「M16」という。）及び番号3（以下「A16」という。）の写真を使用した。

表-4 使用した三次元モデリングソフトウェア

メーカー	名称	バージョン
Acute3D	Smart3DCapture	Ultimate edition v3.1.0.3700
Pix4D	Pix4Dmapper	Revision 1.2.88
AgiSoft	PhotoScan	Professional Edition Version 1.0.4 build1847

写真測量において内部標定要素は精度に大きな影響を与える要素であるから、内部標定要素に関して次の3条件を設定した。

1) Fix(jas)

（公社）日本測量協会のカメラキャリブレーションサービスによって検定を受けた値（焦点距離、主点位置のズレ、放射方向歪み、接線方向歪み；以下「カメラ検定結果」という。）を固定値として使用して解析したもの。

2) nom

カメラの公称値（焦点距離）を初期値として与え、三次元モデリングソフトウェアのセルフキャリブレーションによる値の補正を行ったもの。

3) jas

カメラ検定結果を初期値として与え、三次元モデリングソフトウェアのセルフキャリブレーションによる値の補正を行ったもの。

一方、本検証の機材ではカメラの撮影位置と撮影方向を示す外部標定要素6成分は取得できないため、ソフトウェアのSfMによる推定結果を用いた。その他の設定に関してはソフトウェアの推奨設定を用いた。

3.2 基準点と検証点

三次元モデルに地理座標を与えるため、基準点を撮影区域の四隅及び中心に設置した（図-7）。また、三次元モデルの精度検証に用いるため、作業地域全体に均等になるように18点の検証点を配置した。基準点及び検証点に設置した対空標識を写真-2に示す。基準点及び検証点の観測は、ネットワーク型RTK法（VRS方式）による単点観測法及びVRS方式による観測点からトータルステーションによる放射法を用いて行った。



図-7 基準点（▲;5点）及び検証点（●;18点）の配置図



写真-2 使用した対空標識

3.3 オルソ画像による水平精度

水平精度の検証には、各条件で作成した三次元モデルから出力したオルソ画像を使用した。水平精度の検証方法は、3.2で取得した検証点座標を真値とみなして、オルソ画像から読み取った検証点座標との差分を取り、RMSEを求める方法とした。その結果を図-8に示す。

図-8によると、ソフトウェアを問わずカメラの内部標定要素をFix(jas)とした場合の精度が他のケースと比べて一律に悪い結果となった。諸条件による精度の違いを確認するため、Fix(jas)を除いた値(図-9)を確認すると、おおむねRMSEが5cm前後となっている。M16がA16と比べて精度が悪く出ているのは、MFでは焦点が合わず不鮮明な写真(図-6)となったことが実際に判読する上で障害となつたことが要因として考えられる。また、本検証ではnomとjasの間での有意な違いは確認できなかった。



図-8 水平精度

M16 : 16mm レンズ・マニュアルフォーカス
A16 : 16mm レンズ・オートフォーカス

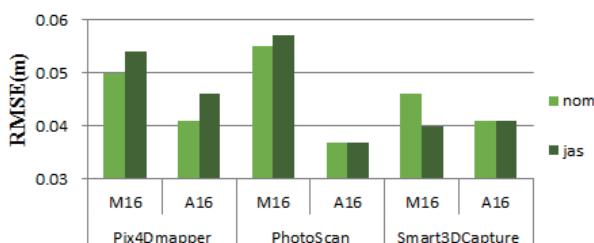


図-9 Fix(jas)を除いた水平精度

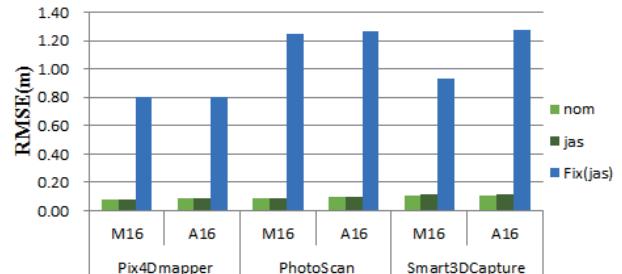


図-10 高さ精度

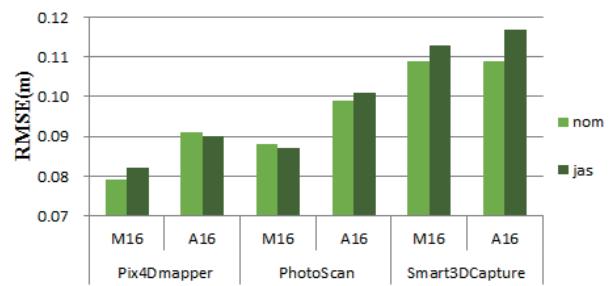


図-11 Fix(jas)を除いた高さ精度

3.4 点群を用いた高さ精度

次に高さ精度の検証には、各条件で作成した三次元モデルから出力した点群データを使用した。高さ精度の検証方法は、検証点の測量結果による高さを真値とみなし、検証点の周囲50cm以内に発生した三次元点群データの高さを水平距離による加重平均した値(以下「加重平均値」という。)を算出して真値との差を算出し、RMSEを求める方法とした。

図-10を確認すると、Fix(jas)が水平精度の検証時以上に著しく悪い結果となったため、Fix(jas)を除いた図-11において比較を行った。何れのソフトウェアにおいてもセルフキャリブレーションを行った結果についてはRMSEが12cm以下の精度となった。各ソフトウェアを確認すると、AFがMFと比べて精度が若干低下しているように見受けられるほか、他のソフトウェアと比べSmart3DCaptureの精度が低い傾向が見受けられるが、有意な差と言えるかどうかはこの結果のみからは判断できない。

これらのことから、水平・高さ双方でセルフキャリブレーションを行うことが精度を高めるために効果的であることが各ソフトウェアで確認された。そのため、以降の検証ではセルフキャリブレーションを行った結果を用いることとした。また、本検証では、撮影した写真の多くに基準点が含まれているという、セルフキャリブレーションを行うには好条件と考えられる撮影条件であったためか、カメラ検定結果を初期値に与えずともほぼ同様の精度が得られていることから、カメラ公称値を用いたnomを使用して比較することとした。AFとMFについては、ほぼ同様の傾向を示していることから判読性の良い

AF を用いることとした。

3.5 重複率の変化が精度に与える影響

3.3 及び 3.4 の結果から、A16 の写真で nom により作成した三次元モデルで重複率の変化が精度に与える影響に関する評価を行った。重複率の減少による影響を考慮するため、計画したオーバーラップ 90%・サイドラップ 60%に加え、オーバーラップ 70%・サイドラップ 20%及びオーバーラップ 60%・サイドラップ 20%を追加して、精度検証を実施した。

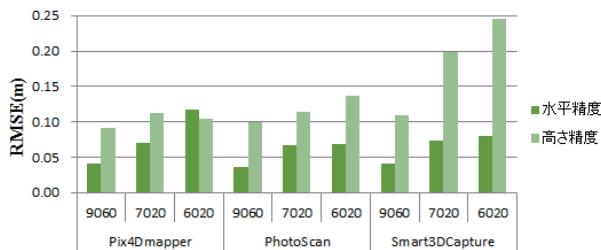


図-12 重複率の変化による精度比較

9060：オーバーラップ 90%・サイドラップ 60%
7020, 6020 についても同様。

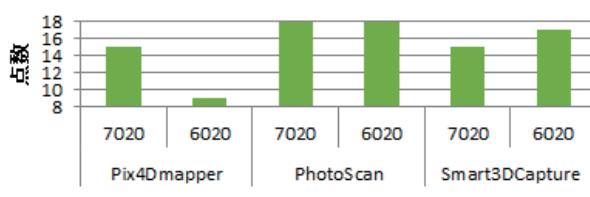


図-13 点群の発生に成功した検証点数

図-12 から、各ソフトウェアにより程度の差はあるものの、重複率の減少に伴って、水平・高さともに精度が落ちる傾向が確認できる。なお、重複率が低下するとマッチングの不良によって検証点の周囲に点群が発生しない場合があり、加重平均値を求められない点があったため、点群の発生に成功した検証点の数は一定とはならなかった（図-13）。Pix4Dmapper は重複率の減少に伴い点群の発生に成功した検証点数の低下が顕著である一方、PhotoScan は 18 点全てで発生するなど、ソフトウェアごとに特徴が見られる結果となった。

参考に Pix4Dmapper の簡易レポート（図-14）を確認すると、オーバーラップ率の低下に伴い、オルソ・DSM の作成範囲が狭まっているほか、DSM が粗くなっていることが読み取れる。写真の重複をみると、オーバーラップ 60% サイドラップ 20%において、画像下部においてマッチング不良が起きていることが確認できる。

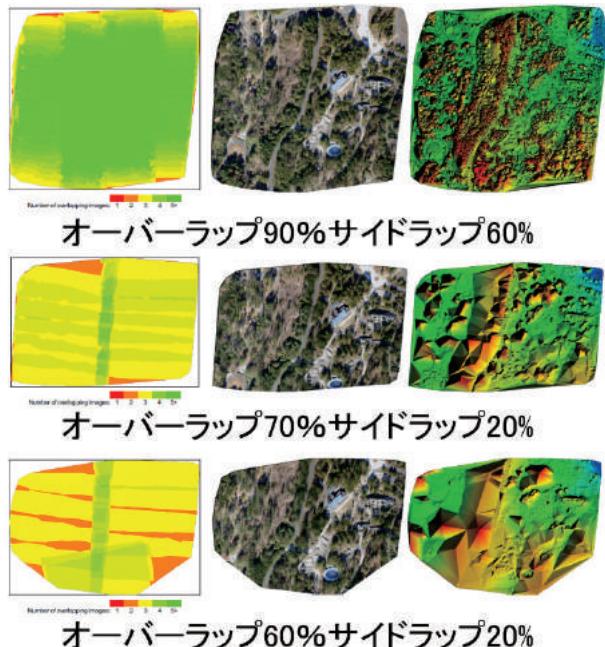




写真-3 写真の対比

(上：16mm レンズ 下：35mm レンズ)

3.7 斜め撮影を追加した場合の精度

三次元モデルの作成において、垂直写真に壁面などの再現性を高めるために撮影した斜め写真を加えた三次元モデルと、垂直写真のみで生成された三次元モデルとの差異について評価を行った。図-15において、「垂直のみ」とはA16を使用したもの、

「斜め+」とは、A16に加えて俯角45度の斜め撮影（表-3の番号6～9）を使用したものである。図-16を確認すると、斜め撮影を加えたものは精度が若干低下していることが確認された。地上画素寸法が垂直に比べて粗い斜め撮影の写真を追加していることや、撮影範囲が限定されていたことから斜め撮影では十全に基準点が写っていないことなどの影響が考えられる。

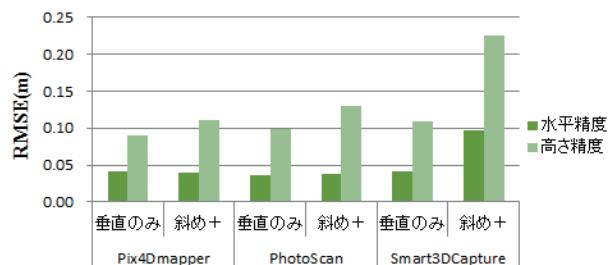


図-16 斜め写真を加えたモデルとの比較



図-17 三次元モデルの比較

4. 三次元モデルの評価

4.1 各ソフトウェアにおける視覚的な評価

三次元モデルの再現性を視覚的に評価するために、図-17 の建物 A 及び建物 B を対象として比較を行った。三次元モデルの作成では前述の 3 種類のソフトウェアを用いて、3.7 で作成した「斜め+」のモデルを使用した。再現性は処理設定にも依存すると思われるが、ここでは他のソフトウェアとの比較のため、標準的な設定の処理結果で評価した。図-17 が視覚的評価の対象とした建物の斜め写真と三次元モデルである。各三次元モデルにおいてほぼ同様の位置から鳥瞰表示している。

Smart3DCapture によるモデルは、看板や建物 A の柱などの壁面のテクスチャも十分識別できることから、本検証の 3 種類のモデルの中では再現性が最も高い結果となった。

PhotoScan によるモデルは、建物は再現されていたが、テクスチャがぼやける結果となった。また、建物の屋根部分のエッジが正確に再現されておらず、Smart3DCapture に比べて再現性が劣る結果となった。

Pix4Dmapper については、ベータ版の機能を用いて三次元モデルの作成を試みたが、建物 A や樹木の側面に注目すると、柱や枝などが表現されていなかった。

4.2 斜め写真による再現性の変化

3.7 と同様に、斜め写真による影響を確認するため、垂直写真のみで再現された三次元モデルと、斜め写真を加えて再現した三次元モデルの差異を確認した。ソフトウェアはモデルの再現性が最も良好な Smart3DCapture を用いた。

図-18 において建物 B の壁面を比較すると、垂直のみのものではテクスチャが伸ばされていて不鮮明なものが、斜め写真を含めたものでは斜め写真がテクスチャとして貼り付けられ、再現性が向上していることが確認できる。

4.3 断面図を用いた評価

三次元モデルの再現性について別の視覚的な観点から評価するため、建物 A の一部について、図-19 及び図-20 のように検証点を含む断面図を用いて再現性を確認した。図-19 は各モデルから抽出した点群を用いて断面図を作成したものであり、図-20 はテクスチャが貼り付けられる前の三次元モデルについて断面図を作成したものである。検証点については 3.2 に挙げたもののに建物の角などを観測して取得している。図-19 及び図-20 における赤枠は断面のエリア、赤の点は検証点の位置を示している。ソフトウェアごとの傾向を見ると、PhotoScan では建物のエッジが抽出されていないため、検証点との乖離が確認できる一方、Smart3DCapture では建物のエッジまで形状が再現されていることが明確に読み取れる。また、点群と三次元モデルを比べてみると、PhotoScan と Smart3DCapture において同様の形状を示している。Pix4Dmapper では他のソフトウェアに比べ点群が分散しており、図-19 の建物の断面を見ると、エッジが不明瞭であった。



図-18 斜め写真による再現性の比較

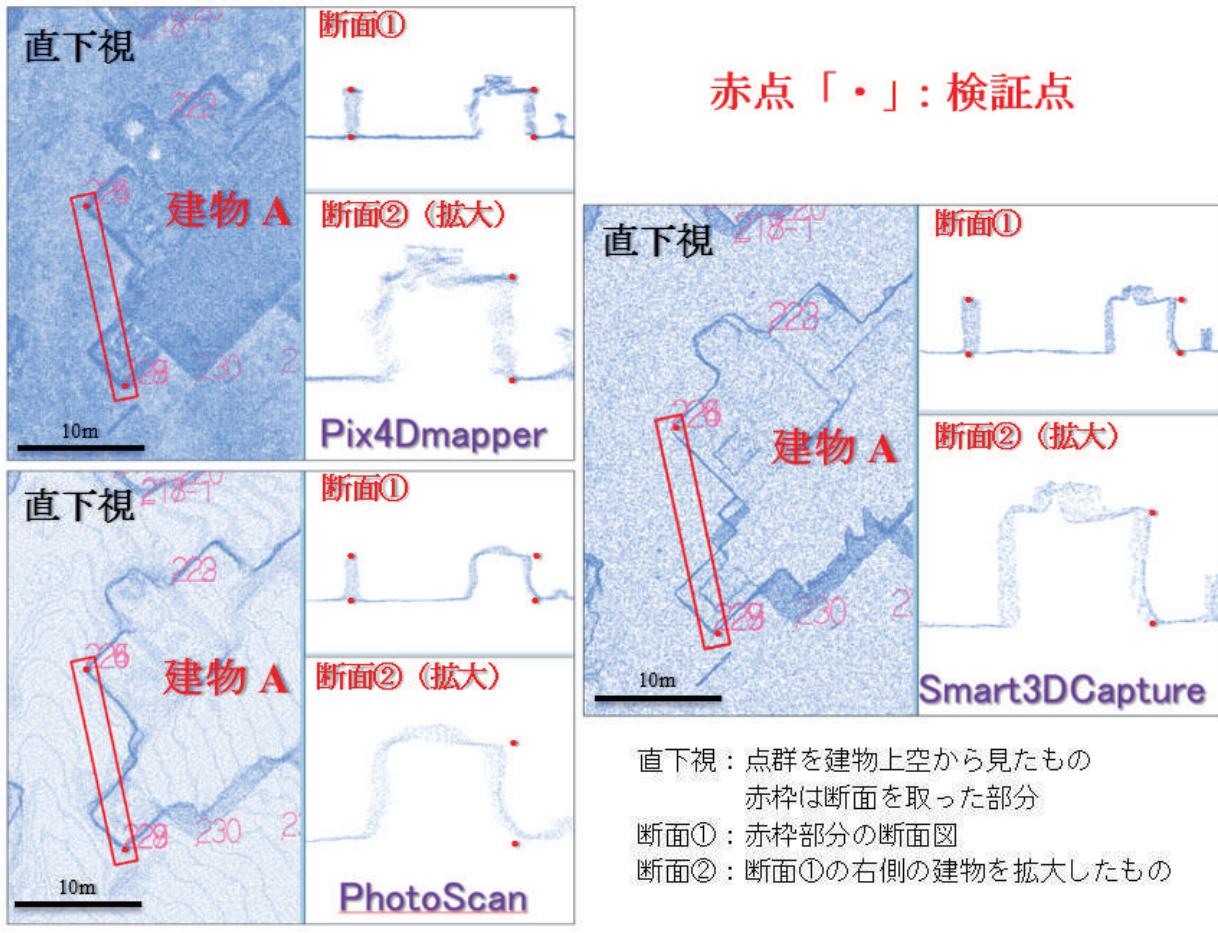


図-19 断面図（点群）による比較

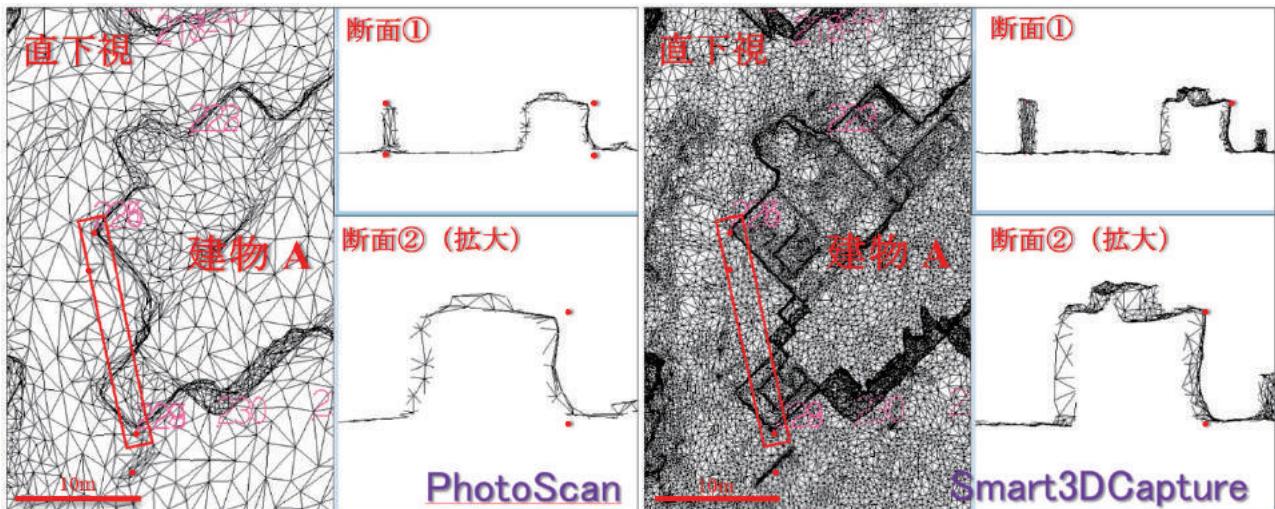


図-20 断面図（三次元モデル）による比較

4.4 特徴点座標の計測

視覚的な再現性が良好な Smart3DCapture による斜め撮影を追加した三次元モデルを使用して、三次元モデルの中の特徴点（図-21）の座標の計測を行い、現地で観測した検証点座標との差（表-5）を算出して定量的な評価を行った。三次元モデル中の特徴点座標の計測には、Acute3D 社の提供しているビュ

アを用いた。結果として、三次元モデルでの計測結果及び検証点の座標を用いて算出した誤差は、建物 A 上端と建物 C 屋根で水平位置が若干ずれているものの、3.3 及び 3.4 の精度検証の結果（セルフキャリブレーションを行ったもの）と大きく変わらない結果であった。



図-21 実写真上での特徴点の位置

表-5 計測した座標に対する誤差

計測対象	誤差(m)		
	X	Y	H
建物A上端	0.004	0.12	0.061
建物A下部	-0.033	-0.028	0.113
建物C屋根	-0.172	-0.131	-0.041
建物C床	-0.05	0.036	0.152

5.まとめ

本研究では UAV により撮影した空中写真から、各ソフトウェアによって作成された三次元モデルの精度検証を行った。

その結果、内部標定要素について諸元値を固定した解析と比べ、セルフキャリブレーションを用いて諸元値を補正した解析が精度に優れる傾向を確認した。特に撮影区域内に 5 点ある基準点のうち少なくとも 1 点写っている写真的割合が十分高い場合は（精度確保する上で良好な条件の下では）セルフキャリブレーションに際してカメラ検定結果を用い公称値を使用してもほぼ同等の精度が得られる結果となった。セルフキャリブレーションを用いた本検証の条件下では、地上画素寸法約 32mm の写真を用

いて、RMSE が水平で 4cm～5cm 程度、高さで 8cm～12cm 程度という結果を得た。

また、解析に用いる写真の重複率が精度に影響を与えることが明らかとなつたほか、焦点距離の異なるレンズでの比較で三次元モデリングソフトウェアにおいても基線高度比の影響が考えられる等、新たな知見を得ることができた。

三次元モデルの視覚的評価については、本検証時点では、Smart3DCapture でエッジがよく抽出されていること（図-20）が確認でき、建物側面のテクスチャまで表現されていた（図-17）。各ソフトウェアはバージョンアップが頻繁に実施されており、性能の向上が日進月歩といえる状況であることから今後再現性や解析精度が向上していくことが期待される。

今後の課題として、災害時の UAV による空撮の活用などを想定すると、本検証のような好条件下で撮影・解析ができるとは考え難く、基準点が取得できない、もしくは取得できても数や精度に問題があるといった条件を想定した検討が必要と考える。また、この方式で作成したオルソ画像や三次元点群の精度は従来の空中写真測量の手法で作成した成果と比較して相対的に悪くはなく、測量に用いる手段として十分検討に値する精度を有していることから、今後、精度管理方法の検討を進め、基本測量、公共測量への導入に向けた調査検討を行っていく。

謝辞

本研究を進めるにあたり、撮影場所にご協力頂いた国営常陸海浜公園事務所に感謝の意を表します。

（公開日：平成 27 年 9 月 16 日）

参考文献

- 井上公、内山庄一郎、鈴木比奈子（2014）：自然災害調査研究のためのマルチコプター空撮技術、防災科学技術研究所研究報告 No. 81
- 名草一成、島田徹、桜井亘、酒井良、奥山悠木、富井隆春（2015）：2 周波 GPS シンクロ撮影システムを搭載した UAV 撮影の精度検証、日本写真測量学会平成 27 年度年次学術講演会発表論文集、11-14.
- 飛田幹男、神谷泉、岩橋純子、中埜貴元、高桑紀之（2014）：無人航空機による西之島空中写真の撮影とその分析、国土地理院時報、125、115-124.
- 飛田幹男、神谷泉、中埜貴元、岩橋純子、大角光司、高桑紀之（2014）：無人機による西之島地形計測の高精度化、国土地理院時報、125、145-154.
- 内山庄一郎、井上 公、鈴木比奈子（2014）：SfM を用いた三次元モデルの生成と災害調査への活用可能性に関する研究、防災科学技術研究所研究報告 No. 81
- 渡辺豊、福田信行（2015）：マルチコプターでの広島災害の適用、日本写真測量学会平成 27 年度年次学術講演会発表論文集、77-78.