

RTK-GNSS搭載型UAVによる複数天底角・複数高度撮影に基づく標定点を用いない河道写真測量

RIVER PHOTOGRAMMETRY WITHOUT CONTROL POINTS USING IMAGES OF MULTIPLE ANGLES AND ALTITUDES BY RTK-GNSS UAV

小室 隆¹・浦川 貴季²・米原 千絵³

宮崎 真弘⁴・神野 有生⁵・赤松 良久⁶

Takashi KOMURO, Takatoshi URAKAWA, Chie YONEHARA,
Masahiro MIYAZAKI, Ariyo KANNO and Yoshihisa AKAMATSU

¹正会員 博(理) 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所
(〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

²非会員 工学 山口大学大学院 創成科学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

³非会員 工学 山口大学大学院 創成科学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

⁴非会員 工学 山口大学大学院 創成科学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

⁵正会員 博(環境) 山口大学大学院准教授 創成科学研究科
(〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

⁶正会員 博(工) 山口大学大学院准教授 創成科学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

In UAV photogrammetry, the installation of control points (coordinate known points used for SfM analysis) is a bottleneck for field work. Since the new UAV, DJI Phantom 4 RTK, gives high-accuracy shooting position coordinates to each image. It may be possible to without the control points depending on the device of shooting and analysis. Therefore, in this research, using Phantom 4 RTK image at multiple nadir angles and altitudes that are theoretically effective for accuracy improvement was performed, and surveying accuracy was verified using image data only.

In this research, using UAV photogrammetry which does not use the control point, it is not enough to just make the nadir angle of photographing plural, but the accuracy can be secured by pluralizing the photographing altitude. In underwater, it was shown that a refraction correction factor of 1.42 can be applied.

Key Words : RTK-GNSS, UAV, photogrammetry, water surface reflection

1. はじめに

UAV (Unmanned Aerial Vehicle) を用いた空中写真測量は、従来のようにトータルステーションやGNSS測量器を用いた測量や航空機(セスナ)を用いた空中写真測量に加え、近年では利用が促進され、国土交通省が進めるi-constructionにおける測量作業においても適用されている。UAV写真測量の利点は、低価格での導入・運用、高解像度写真の撮影、高頻度な撮影、立ち入りが困難な箇所での撮影が可能である。UAVにより撮影された画像はSfM-MVS (Structure from Motion-Multi View Stereo) により、単体の画像からオルソ画像とDSM (Digital Surface Model) を作成することが可能である¹⁾。多くのUAVに

はGPSが内蔵され、撮影された画像には座標が与えられる。しかし、その精度は低いため、SfM-MVSを行う際には撮影範囲内に設置した対空標識を測量し、座標値を取得し、SfM-MVSを行う際にその座標値を付与することで精度の高いDSMを作成することができる。この座標値を与える点を標定点と呼ぶ。しかし、現場状況によって撮影対象範囲内に標定点を過不足なく設置することが出来ず、UAV写真測量が行えない地域も多い。

2018年にRTK-GNSSが搭載された新型のUAVであるPhantom 4 RTK (以降P4RTK) がDJIから販売された。P4RTKの公開されている精度は垂直方向に1.5 cm、水平方向に1 cmであることから、現地での標定点の設置を最小限に抑えることが可能と考えられる。そこで本研究ではP4RTKを用いて、標定点を用いない場合における

UAV写真測量の精度検証を実河川にて行った。

新型UAVのDJI Phantom 4 RTKは、各画像に高精度な撮影位置座標を与えるため、撮影・解析の工夫次第では、標定点を省略できる可能性がある。UAV写真測量では平行撮影画像だけでなく、角度をつけた斜め撮影画像を組み込みSfMをすることで精度が向上することが分かっている²⁾。

そこで本研究では、実河川で本機を用い、精度向上に理論上有効な複数天底角（鉛直下からの傾き）・複数高度での撮影を行って、画像データのみによる測量精度を検証した。

2. 精度検証方法

(1) 現地作業

a) 検証点の設置と測量

本研究では、2019年1月に山口県を流れる一級河川である佐波川の河口から約16 km上流の中央橋付近においてP4RTKを用いた現地実験を行った。対象領域の概要を図-1に示す。対象領域内には、陸上に23点、水中に37点（図-2）の検証点を設けた。陸上検証点は、陸上に設置した対空標識の中心に定義した。水中検証点は、対象領域内の冠水部の一部のエリアにおいて、短径が目測10 cm以上で、上面が概ね平坦な石を探し、その中心付近に定義した（水中に対空標識などを置いたわけではない）。各検証点について、Trimble R8s GNSSを用いたネットワーク型RTK-GNSS測量により、3次元直交座標の測定を行った。3次元直交座標系は、平面直角座標系第3系のY軸の向きにX軸、X軸の向きにY軸、鉛直上向きにZ軸を設けたものとした。x, y, z座標のそれぞれについて、陸上検証点については10エポック×3～12セットの測定値の平均を、水中検証点については10エポック×1セットの測定値の平均を、実測値と定義した。陸上検証点のうち12セットの測定を行なった点（図-1の検証点番号1）について、これらの平均に関する標準誤差の、全12セットに関するRMSは、0.0043 mであった。また、水中検証点が分布するエリアの1地点において、ネットワーク型RTK-GNSS測量（10エポック×3セット）と巻き尺を用いて、水面のz座標を求めた。エリアが小さく、当日は流速・水位変化ともに小さかったことから、この1つの値を水面高の実測値と定義した。その上で各水中検証点について、水面高の実測値と水底の実測値の差を求め、水深の実測値と定義した。本検証では2018年にDJI社から発売されたUAVのPhantom 4 RTK（以降P4RTKとする）を使用した。P4RTKは、重量は1,391 g、カメラセンサは1インチCMOSを搭載し、RTK-GNSSを搭載している。なお、搭載されているRTK-GNSSの公開されている測位精度は、垂直方向に1.5 cm+1 ppm(RMS)、水平方向に1 cm+1 ppm(RMS)となっている。

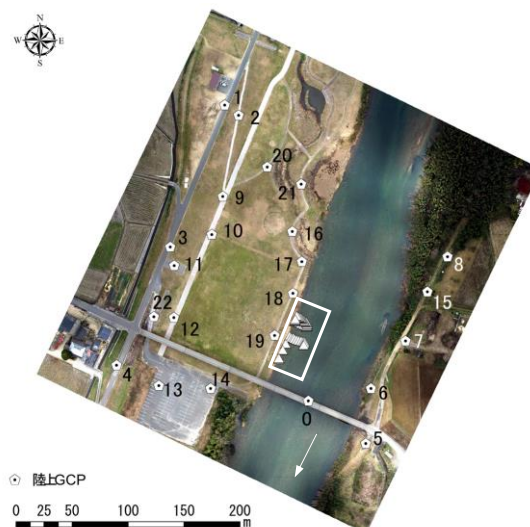


図-1 撮影対象範囲および検証点位置



図-2 水中検証点設置位置（図-1中の白枠内を拡大）

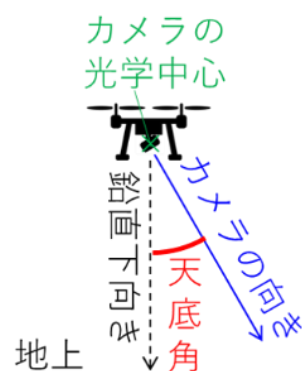


図-3 天底角のイメージ

b) 撮影

撮影の諸条件および飛行経路は付属のアプリケーションのGS RTKを用いて設定した。撮影対象範囲は約330×360 mとし、撮影高度100 m、コース前後左右重複率

は80%とし、天底角0度（鉛直下向き）で329枚、天底角5度で335枚の写真撮影を行った。天底角とは鉛直下向きとカメラの向きがなす角度である（図-3）。また、1地点において高度50 mで22枚の撮影（天底角0-26度）も行った。

(2) 解析

a) 概要

現地作業で得たデータを用いて、陸上・水中検証点に関するUAV写真測量の誤差評価を目的とした解析を行った。対空標識を置いた陸上検証点については、x, y, z座標別の誤差を、水中検証点については、水面での光の屈折によって浅く推定される効果を神野ら(2018)³⁾の方法により補正した上で、水深に関する誤差（x, y座標の誤差も間接的に含まれる）の評価を行った。以下の説明に登場するSfM、三角測量、MVS、DSM・オルソモザイク画像の作成には、Agisoft PhotoScan Professional ver 1.4.3を用いている。

b) SfM(Structure from Motion)

はじめに、P4RTKによる全686枚の空撮画像と各画像の撮影位置測位結果（x, y, z座標）を用いて、SfMにより、カメラパラメータを推定した。ここでカメラパラメータとは、各画像の撮影の位置・向き、および全画像共通とする内部パラメータ（画角や歪みなど、カメラの幾何特性に関するパラメータ）である。SfMには原寸サイズの画像を入力した。カメラモデルにおいて考慮した内部パラメータはf, cx, k1, k2, k3, p1, p2である。本研究におけるSfMは、高度100 mの画像のみを用いたケースA、加えて高度50 mの画像も用いたケースB、さらに高度50 m画像のz座標に重み（両高度の画像の重みの合計が等しくなるように設定）を付けたケースC、の3ケースを行った。

ケースAは、従来型の下向き平行撮影（天底角0度の画像329枚）に、ほぼ同数の斜め撮影（天底角5度の画像335枚）を加えたケースである。従来型の平行撮影と比べて高精度が期待されるが、それでも撮影高度が100 mと大きいため、内部パラメータのわずかな推定誤差が、地表面の高さの大きな推定誤差に結びつく恐れがある。例えば、最も基本的な内部パラメータであるf（画面距離）をもし0.5%だけ過小評価すれば、地表面のz座標を0.5 m過大評価することになる。そこでケースBは、高度50m画像を追加することによって、これらの画像の撮影位置測位情報に基づいて内部パラメータの推定誤差を矯正することを企図している。ケースBに用いた高度50 mの画像は、天底角が0-26度の傾きを持った画像を22枚使用した。撮影高度の複数化により、幾何学的にも内部パラメータを正しく推定しやすくなる。ただし、高度100 m画像と比べて高度50m画像の枚数が約30分の1と少ないため、撮影位置測位情報も高度100 m画像のものが圧倒

的に効いてしまい、内部パラメータの矯正が不十分となる恐れがある。ケースCはこの問題に対処し、高度50 m画像がもつ高度情報を、高度100 m画像と全体として同等に効かせることを企図したものである。

c) 陸上検証点の精度評価

次に、全ての画像とカメラパラメータを用いて、陸上検証点を定義した対空標識を自動検出し、三角測量の原理により、陸上検証点の座標を推定した。その後、各陸上検証点のx, y, z座標について、推定値と実測値の差を誤差と定義し、評価した。

d) 水中検証点の精度評価

水中検証点が分布するエリアについては、DSM（見かけの水底高ラスタ）を水面高の実測値から差し引くことで見かけの水底ラスタを作り、さらに神野ら(2018)³⁾が提案した水面屈折補正係数1.42を乗じて実スケールの水底ラスタとした。ここで「見かけの」とは、「水面屈折により浅く見えていることをまだ補正していない」という意味である。水深ラスタを作成後、RTK-GNSSにより実測したx, y座標を含む水深ラスタ画素を特定し、その画素の値を水深推定値とした。また水深の推定値と実測値との差を水中検証点に関する誤差と定義し、評価した。ここでの水面屈折補正計算はArcGIS 10.2.2を用いている。

e) 派生成果物の作成

また、全ての画像とカメラパラメータを用いて、MVS (Multi-View Stereo)により密な点群を、その後DSM (Digital Surface Model)、オルソモザイク画像（図-1、図-2の背景に使用）を順に作成した。しかしこれらの派生成果物は、陸上検証点の精度評価には用いていない。

3. 結果

(1) 陸上検証点の精度検証結果

図-4に各撮影条件における陸上検証点を用いた精度検証結果を示す。各解析のz成分について見ると、高度100 mの画像のみを用いたケースAは0.367～0.471 m、ケースAに高度50 mの複数天底角で撮影した画像を組み合わせたケースBは0.129～0.239 m、ケースAとケースBに加えて50 mの複数天底角の画像のz座標に重みをつけたケースCでは0.013～0.1 mとなり、ケースCの撮影方法を用いた場合が最も誤差が小さい結果となった。ケースAでz成分の大きな誤差が生じ、ケースB, Cとそれらが改善した原因として、2(2)で懸念された内部パラメータの推定誤差が挙げられる。実際、ケースA, B, Cにおける内部パラメータfの推定値はそれぞれ、3640.58216, 3648.28915, 3652.7195であり、最も高精度であったケー

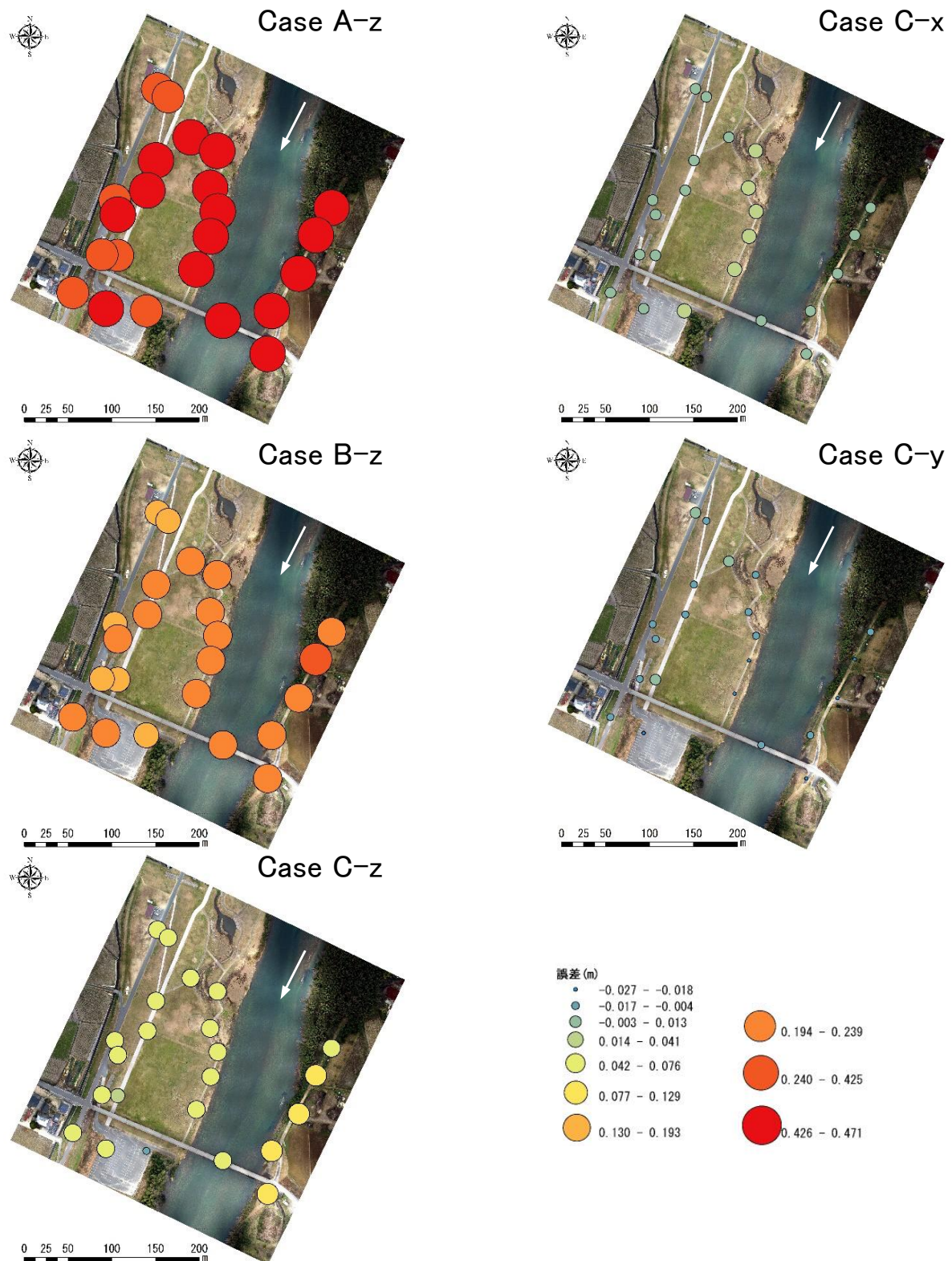


図-4 ケースA, ケースB, ケースCにおけるx,y,z成分の誤差

スCを基準とすれば、ケースAでは内部パラメータを0.33%過小評価していることになる。

ケースC-z成分においては左岸側で誤差が大きくなった。これはケースCで行った複数高度撮影（高度50 m）

が、1地点のみでの実施であり、さらには撮影方向が右岸、上流、下流方向に複数角度で撮影したためであり、左岸側を含む画像を撮影していなかったために左岸側で誤差が大きくなったと考えられる。また、ケースCのz成

表-1 各解析ケースにおけるx,y,z成分の平均誤差

	x	y	z
ケースA	0.016	-0.007	0.437
ケースB	0.013	-0.011	0.201
ケースC	0.008	-0.012	0.062

単位 (m)

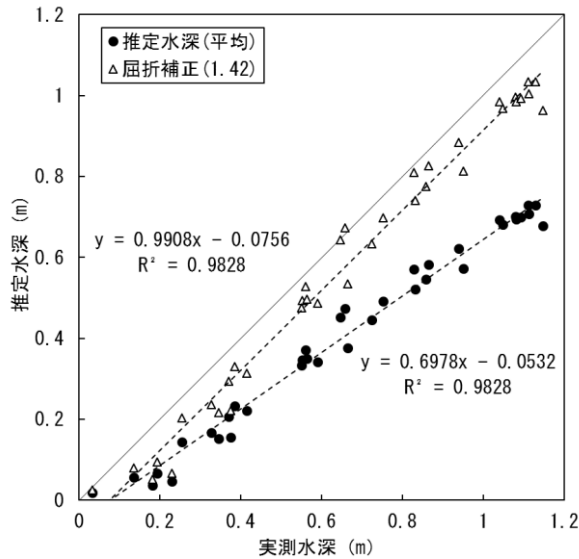


図-5 実測水深とSfMによる推定水深の関係

分がケースAとケースBと比べて極端に誤差が小さくなった要因としては、z成分に重みを付けたためと考えられる。

ケースCにおけるx成分とy成分の誤差については、x成分は-0.001～0.022 m、y成分は-0.027～0.003 mであり、誤差が非常に小さい。ケースA-x成分は-0.021～0.038 m、y成分は-0.037～0.016 m、ケースB-x成分は-0.010～0.031、y成分は-0.027～0.009 mである。表-1には各解析ケースにおける平均誤差を示している。

(2) 水中検証点の精度検証結果

ケースCを用いた場合の水中検証点について精度検証を行った。水中検証点について、神野ら (2018) ³⁾が提唱した補正係数1.42を用いた場合の誤差のRMSが0.093 mに留まった。このRMSを最小にする補正係数を実測水深から求めると(実測水深に合わせ込むと) 1.433であり、1.42と近い値となった。さらに、leave-one-out交差検証(水中検証点のうち1点を除いて、他の水中検証点に関する誤差のRMSを最小にする補正係数を求め、除いた1点に適用して誤差を評価する試行を、水中検証点の数だけ繰り返すこと)による誤差のRMSを評価したところ0.089 mとなり、補正係数として1.42を用いた場合の誤差のRMS : 0.093 mと比べて差は0.004 m (4.3%)にとどまった。このことから、1.42は実測水深に合わせ込んだ場合

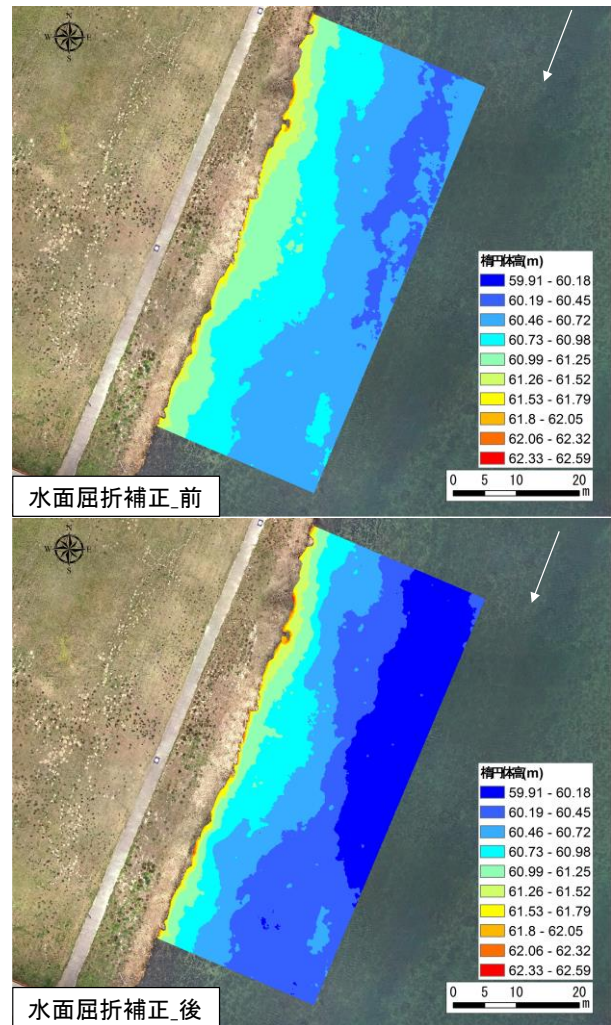


図-6 水面屈折補正計算前後の検証点エリアの楕円体高
(上：水面屈折補正前，下：水面屈折補正後)

と遜色ない精度を与えたと言える。

図-5には水中検証点の実測値と推定水深の散布図を示す。横軸に実測水深をとり、縦軸に推定水深を示す。なお推定水深(平均)はSfM-MVSにより得られた水底の点群について水中検証点近傍半径5 cmを抽出し、平均したものを水面高から差し引いたものであり、屈折補正(1.42)は推定水深(平均)に水面屈折補正係数1.42を乗じたものとする。図-5から実測水深と推定水深は、良好に一致していることが分かる。この結果から、UAV写真測量では少なくとも水深1 mでは十分な精度を保った測量が出来ることが明らかとなった。

1.42による屈折補正後の水深も、実測水深を平均して0.082 mほど過小評価しているが、この過小評価量は、ケースCにおける陸上検証点における誤差z成分の平均0.062 m(表-1)もしくはそれに補正係数1.42を乗じて得られる0.088 mと同レベルである。本実験では水面高は実測ベースで与えているため、ケースCにおいても僅かに残っていたz成分の過大評価は、そのまま補正前の推定水深(図-5の推定水深(平均))の過小評価となるが、

それが屈折補正後の水深に反映されたものと考えられる。

(3) 水面屈折補正後のDSM

図-6に水面屈折補正計算を行ったコンター図を楕円体高で示す。水面屈折補正計算を行うことで、補正前に高く表示されていた部分においては低く補正することができた。補正を行う前では、流心に近づくにつれ楕円体高が低くなっていたが、補正後では補正前と比べ、60.46-60.72 mの範囲において僅かな地形変化も捉えており、59.91-60.18 mの最も低いエリアが拡大し、より地形を正確に表現にしていることが分かる。また相対的に、61.53-61.79 mより高い範囲においては、水面屈折補正を行なっても大きな変化は見られなかった。

この結果からP4RTKを用いて撮影した画像をもとに、SfM-MVSを行ない、水面屈折補正1.42を乗じることで河床地形を、より正確に表現することができると明らかとなった。

4. まとめ

本研究においてRTK-GNSSを搭載したP4RTKを用いて、標定点を用いずにP4RTK単体のみを用いて、撮影方法を変化させることにより得られる精度について、以下の結果を得た。

- 1) 高度100 mからの単一高度撮影では、斜め撮影が含まれていても、誤差(xyz合成)のRMSが0.438 mとなり、この主要因は地表面の高さを平均0.437 mも過大評価していることにある。これは、単一高度撮影では内部パラメータのわずかな推定誤差が、撮影位置測位情報によって矯正されずに、鉛直方向のスケールの推定誤差に結び付いたためと考えられる。
- 2) 高度50 mから撮影した画像を加え、その撮影位置測位情報のz成分に、高度100 mから撮影した画像と全体として同等の重みを加えることで、地表面の高さの過大評価は平均0.062 mに抑えられ、誤差のRMSも0.069 mになった。

- 3) 冠水部についても、屈折補正係数1.42を用いた場合、実測水深と推定水深は良好に一致し(誤差のRMSは0.093 m)、水面屈折補正係数1.42の有効性を示すことができた。
- 4) 撮影位置の高精度測位が可能なUAVを用いた写真測量では、複数天底角・複数高度撮影という撮影の工夫や、両高度でのz座標の重みの平等化という解析の工夫により、標定点を完全に省略できる場合があることが示された。今後、より多くの条件で現地実験・シミュレーションを重ね、複数天底角・複数高度撮影の標準的な実施方法を確立していくことが課題である。

謝辞：本研究は文部科学省科学研究費補助金基盤研究(B)(研究課題番号：17H03314、研究代表者：赤松良久)、文部科学省科学研究費補助金若手研究(B)(研究課題番号：16K21194、研究代表者：神野有生)の助成を受けて実施した。

参考文献

- 1) 内山庄一郎, 中田高, 井上公, 熊原康博, 杉田暁, 井筒潤, 後藤秀昭, 福井弘道, 鈴木比奈子, 谷口薫: 小型UAVとSfMソフトウェアを用いた断層変位 地形把握の試み-根尾谷断層水鳥断層崖を例に-, 活断層研究, 第40号, pp35-42, 2014.
- 2) 酒井健吾, 山本遼介, 長谷川宏一, 泉岳樹, 松山洋: 小型UAVから撮影された直下視画像と斜め視画像を用いた森林樹冠のDSM作成, 日本リモートセンシング学会誌, Vol.36, No.4, pp388-397, 2016.
- 3) 神野有生, 米原千絵, I GD Yudha Partama, 小室隆, 乾隆帝, 後藤益滋, 赤松良久: UAVとSfM-MVSを用いた河床冠水部の写真測量のための水面屈折補正係数に関する検討, 河川技術論文集, 第24巻, pp.19-24, 2018.

(2019. 4. 2受付)