

UAV-SfM手法を用いた高解像度かつ簡便な 河道測量技術の検証

VALIDATION OF HIGH-RESOLUTION AND SIMPLE RIVER SURVEY TECHNIQUE USING UAV-SFM METHOD

掛波優作¹・神野有生²・赤松良久³・I GD Yudha Partama⁴・乾 隆帝⁵
Yusaku KAKENAMI, Ariyo KANNO, Yoshihisa AKAMATSU, I GD Yudha Partama and
Ryutei INUI

¹学生会員 工学 山口大学大学院 創成科学研究科建設環境系専攻
(〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

²正会員 博(環境) 山口大学大学院助教 創成科学研究科建設環境系専攻
(〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

³正会員 博(工) 山口大学大学院准教授 創成科学研究科建設環境系専攻
(〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

⁴非会員 修(工) 山口大学大学院 理工学研究科システム設計工学専攻
(〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

⁵正会員 博(農) 山口大学大学院特命助教 創成科学研究科建設環境系専攻
(〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

This study tested the accuracy and precision of the UAV-SfM method, an automated photogrammetry technique called SfM (Structure from Motion) using multiple pictures taken by UAV (Unmanned Air Vehicle), in a section of Saba river, Yamaguchi, Japan. The method was applied in the submerged area as well as in the exposed area, taking into account the refraction at the water surface, for the first time in domestic rivers.

When the resultant DEM (Digital Elevation Model) is considered as the map of riverbed elevation, the RMS error and R^2 of UAV-SfM were 0.165 m and 0.93, respectively. In pixels with thick algal cover, large apparent overestimations reaching 0.351 m at maximum were observed because UAV-SfM actually measures the algae surface elevation, not the riverbed elevation. Error analyses also showed that the refraction correction method adopted in this study is working well in spite of its simplicity.

Key Words : *underwater photogrammetry, fluvial topography, Digital Surface Model, drone*

1. はじめに

河道地形は、河道計画・設計をはじめ、浸食堆積・水質の数値解析、氾濫解析、生息場評価など、河川における様々な管理・研究業務に不可欠な基盤情報である。しかし、従来の現地測量は労力・コストが大きく、モニタリングの時空間解像度に限界があった。国内の1級河川についても、定期測量は一般に数年に1回、河道方向に200 m程度の間隔で行われるに過ぎない。上に列挙した各種の業務の信頼性を高めるには、より高頻度・高密度の測量が不可欠である。

広範囲を高い空間解像度で測量する技術として、複数位置から撮影した空中写真に基づき、視差を利用して標高分布を測定する空中写真測量が、古くから存在する。ただし空中写真測量は、航空機を用いるコストや、撮影後の処理(画像間で対応する点すなわち特徴点のマッチングなど)に手間がかかることにより、用途は限定されていた。一方で近年、UAV(特にマルチコプター;いわゆるドローン)・デジタルカメラが低廉化・高性能化するとともに、写真測量における自動的な画像処理技術であるSfM(Structure from Motion)が確立し、パーソナル・コンピュータ向けのGUI付きソフトウェアも登場した。その結果、UAVによる空中写真にSfMを適用する

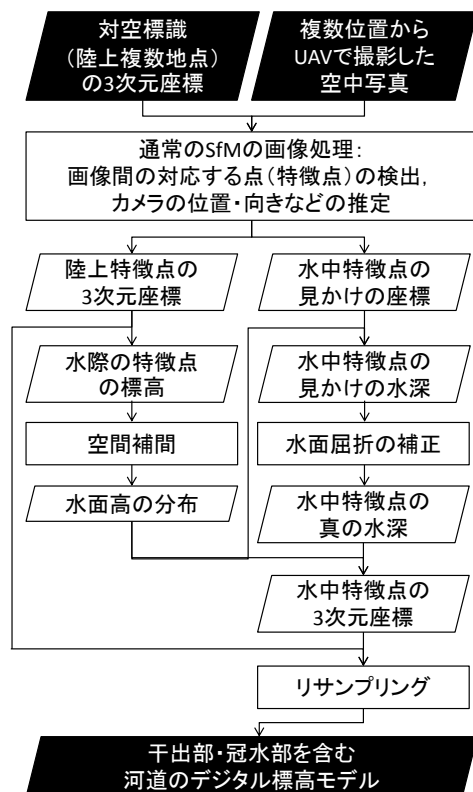


図-1 冠水部分を含むUAV-SfM手法のフロー

わゆるUAV-SfM手法により、安価・簡便に空中写真測量を行い、高解像度のデジタル標高モデルを得ることが可能になった。既に陸上（非冠水部分）については検証が進み、UAV-SfM手法が実利用に耐える精密さ（本稿では精度と確度を合わせた概念として精密さの語を用いる）を有することが明らかになっている。国内では、河道での検証は一例に限られる¹⁾ものの、水に接する領域としては海岸堤防²⁾、波食棚³⁾、干潟⁴⁾などで検証が進んでいる。

加えて、空中写真測量を河道の冠水部分へ適用する試みも、UAV-SfM手法が一般化する前から、航空写真を用いて国内外で行われてきた^{5),6)}。冠水した河床は、水面における光の屈折により、実際よりも水深が浅く見える。すなわち、屈折を無視して通常の写真測量の画像処理を行うと、冠水部分の底面高を過大評価することになる。この問題に対し、Westaway et al. (2001)⁵⁾は、通常処理によってデジタル標高モデルを作成した後、見かけの水深を真の水深に近似的に変換する補正係数を、幾何光学に基づいて提案した。同時に、その補正を行う際の水深と底面高の相互変換に必要な水面高を、水際の画素の標高推定値の空間補間により推定する方法を提案し、図-1に示すような冠水部分を含む写真測量のフローを確立した。Lane et al. (2010)⁷⁾は、冠水部分の写真測量と、深いほど色が暗く写る原理による水深推定を相補的に組み合わせることで、画像情報をより高度に活用する地形推定方法を提案するに至っている。

このように、冠水部分を含む空中写真測量について、

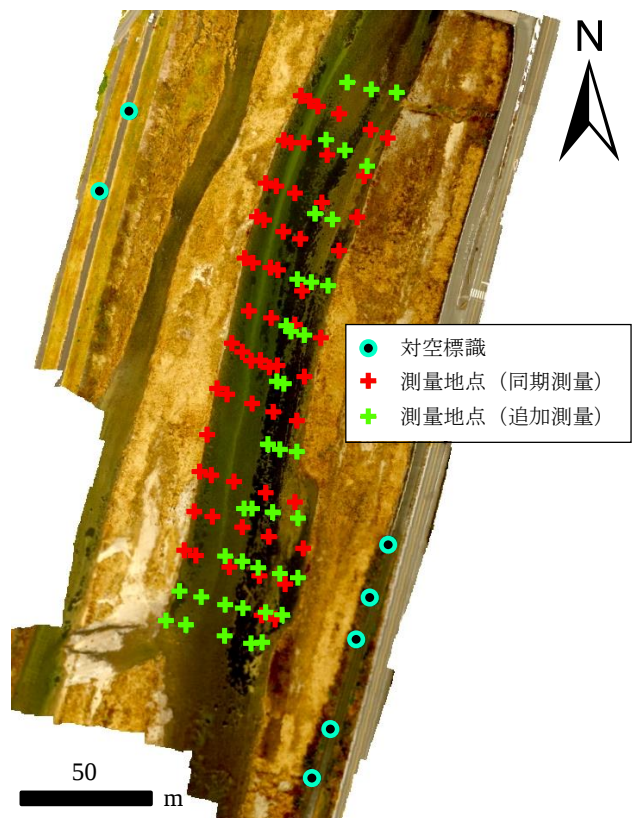


図-2 検証サイトのオルソ画像と測量地点

航空写真を用いた場合には多くの研究が行われてきたものの、より高い解像度（cmオーダー）を有するUAV-SfM手法に関しては、未だ精密さの検証が始まったばかりである。Woodget et al. (2015)⁸⁾は、UAV-SfM手法を河道の冠水部分に適用して検証した最初の公知例であることを主張している。国内でも、冠水部分を含めてUAV-SfMを適用した例は一例存在する¹⁾ものの、水面屈折の補正をしていないため、冠水部分の底面高を過大評価している。UAV-SfM手法は、従来の現地測量に比べ圧倒的な頻度・密度の地形把握を実現し得る画期性を持つため、国内でも、海外で開発された水面屈折の補正を施した上で、定量的な精密さの評価と誤差特性の解明を行うことが望まれる。

そこで本研究では、UAV-SfM手法を国内の河道で初めて、冠水部分については水面屈折を考慮して適用し、精密さを検証するとともに、誤差特性の解明を試みた。以下、2で現地調査と解析の方法を説明した後、3で精密さと誤差特性の評価結果を示し、考察する。

2. 方法

(1) 現地調査

検証サイトは、佐波川の、河口からの距離が約8.5kmに位置する約250mの区間とした。図-2に、検証サイトの空中写真（オルソ画像）を示す。

まず、空中写真撮影とほぼ同期した測量（同期測量）として、2016年1月5日に、図-2に示すように縦横断方向に約15mピッチで、底面高のRTK-GPS測量を行った。機器としてはTrimble R4 GNSS（ニコン・トリンブル）を用いた。

次に、2016年1月6日に、対象区間において陸上対空標識の設置と測量、およびドローンによる空中写真撮影を行った。対空標識は右岸に2個、左岸に5個の計7個設置した。空中写真撮影は、高度約25mからほぼ鉛直下向きに、約5～10mピッチで行い、270枚の画像を得た。

さらに、底質がSfMへ与える影響を評価するための追加測量として、2016年3月17日に再度、図-2に示す地点で、RTK-GPS測量を行った。この追加測量では、各測量地点を水面直下からデジタルカメラによって撮影し、事後に目視判定した。目視判定では、底質をオオカナダモ、砂、礫の3種に分類し、写真全体のうち、大礫が50%以上を占めているものを礫、大礫が50%未満のものを砂とした。加えて追加測量では、河床がオオカナダモで覆われている箇所では、底面高だけでなく、オオカナダモの表面の標高も測定した。同期測量と追加測量の間に、地形が変化するような目立った出水はなかった。

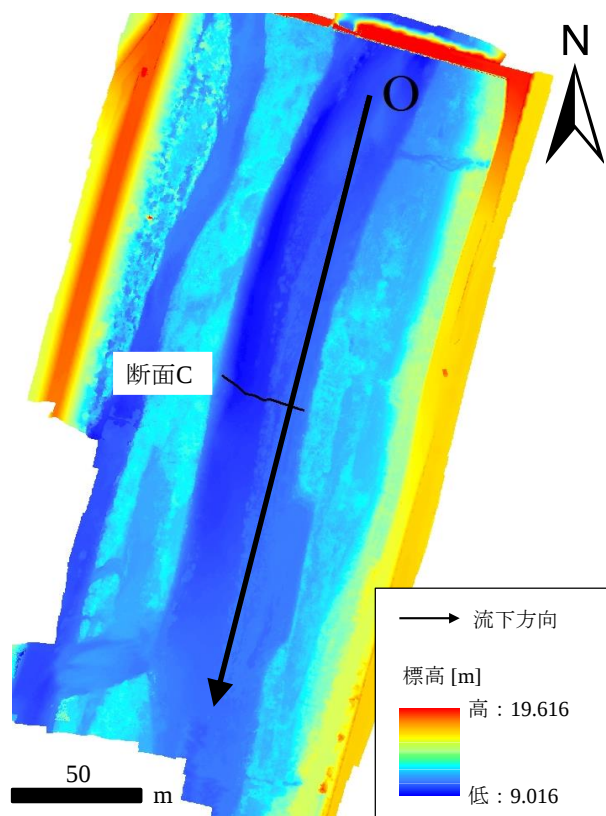


図-3 写真測量で得られたデジタル標高モデル
(水面屈折補正前)

(2) デジタル標高モデルの作成

現地調査で得られた空中写真と対空標識の測量結果を元に、図-1のフローによりデジタル標高モデルを作成した。ソフトウェアとして、通常のSfMの画像処理にはPhotoScan (Agisoft) , その後の処理にはArcGIS10.2 (ESRI) を用いた。空間補間には、3次多項式による2次元補間を用いた。

水面屈折の補正に関して、Westaway et al. (2001) による補正係数は、撮影位置ごとに補正係数が変わってしまうという欠点を有する。実際の各特徴点の3次元座標の推定には複数位置の空中写真が用いられているが、どの位置を用いて補正係数を計算すべきか明らかでない。そこで本研究では、撮影位置によらない簡易的な補正方法として、補正係数を水の空気に対する相対屈折率(1.34) とする方法 (Woodget et al. 2015) を用いた。すなわち、見かけの水深に相対屈折率を乗じて、真の水深を推定した。

(3) 精確さの評価と誤差の解析

図-2 に示した RTK-GPS による各測量地点（陸上の対空標識と冠水部分の測量地点の両方）について、(2) で得られた写真測量で得られたデジタル標高モデルの、RTK-GPS で測定された水平座標を含む画素における標高を、RTK-GPS による標高測量値と比較し、前者と後者の差を写真測量による標高の推定誤差とした。この定義で計算される標高の推定誤差には、写真測量による水平座標の推定誤差による測量地点と画素のミスマッチに

よって生じる見かけの誤差を含んでいることに注意が必要である。推定誤差の統計量として、精度の指標である標準偏差と、確度の指標である平均、および精度と確度を総合的に評価する統計量である RMS (2 乗平均平方根) を評価した。

さらに、標高の推定誤差と、底質、水深、および河道方向の位置との関係を調べ、誤差の要因について考察した。

3. 結果と考察

(1) デジタル標高モデル

図-3に、UAV-SfM手法で得られた、水面屈折補正前のデジタル標高モデルを示す。図-4には、水面屈折補正後のデジタル標高モデルを、冠水部分について示す。これらの図より、堤防から水面下に至る河道地形が詳細に表現されている様子が観察できる。なお、この河川区間は逆勾配であり、下流側で標高が高くなっているのは誤りではない。

(2) 対空標識の座標の推定誤差

表-1に、陸上に設置した対空標識の座標の推定誤差（写真測量による推定値－RTK-GPSによる実測値）の統計量を示す。水平・鉛直座標に関する推定誤差のRMS

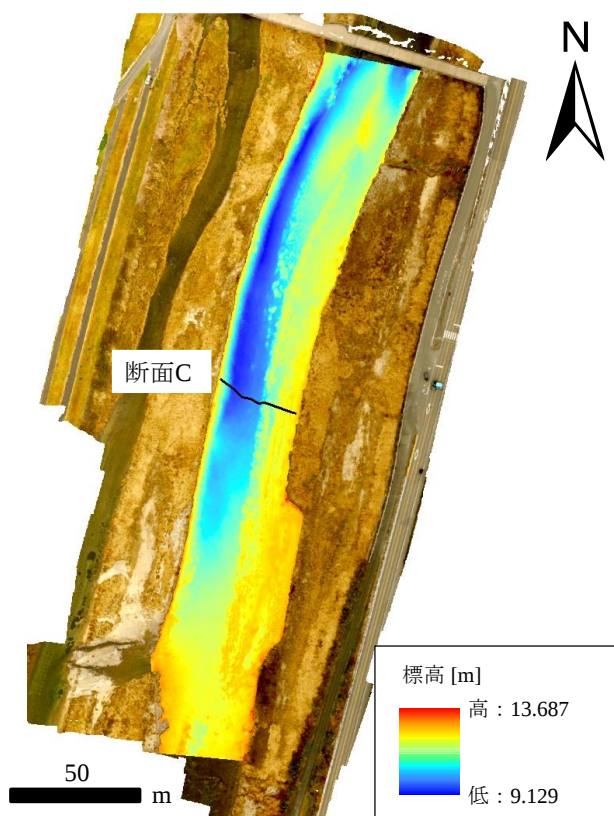


図-4 写真測量で得られたデジタル標高モデル
(水面屈折補正後)

表-1 対空標識の座標の推定誤差の統計量 (測地系はWGS-84, 投影座標系はUTM第53系)

座標	平均 [m]	標準偏差 [m]	RMS [m]	データ 数
x座標	0.004	0.002	0.004	7
y座標	-0.002	0.017	0.017	7
z座標 (標高)	0.005	0.012	0.013	7

は、それぞれ0.017 m (表-1の元データから、X成分とY成分を合成して計算)、0.013 mと、一般的なRTK-GPSの測位誤差と同オーダーであった。また、図-5に例示するように、座標の推定誤差と河道方向位置 (図-3のOを原点とし矢印の方向に設けた軸上の座標) との明確な関係も見られなかった。これらの結果より、屈折のある水面を含む空中写真からでも、カメラ位置・姿勢の正確な推定と、それによる陸上地点の正確な測位が可能であることが示唆される。

(3) 底面高推定誤差

写真測量で得られる水面下の標高は原理的に表面高 (底質の表面すなわち上面の標高; 底面高と差があるのは、底質が植生のときのみ) であるが、河川測量では底面高 (河床高; 植生の場合、植生の基部の砂泥の標高) が求められる。そこで、写真測量で得られた標高を底面高とみなしたときの精度を把握するため、図-6に、同期測量におけるRTK-GPS測量値と、写真測量による水面

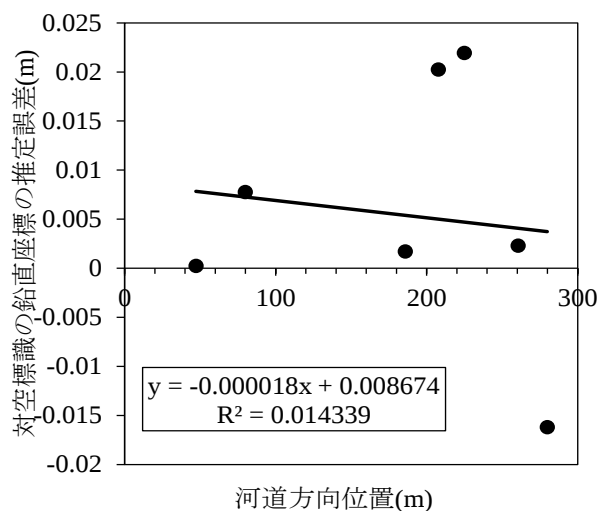


図-5 対空標識の鉛直座標の推定誤差と河道方向位置の関係

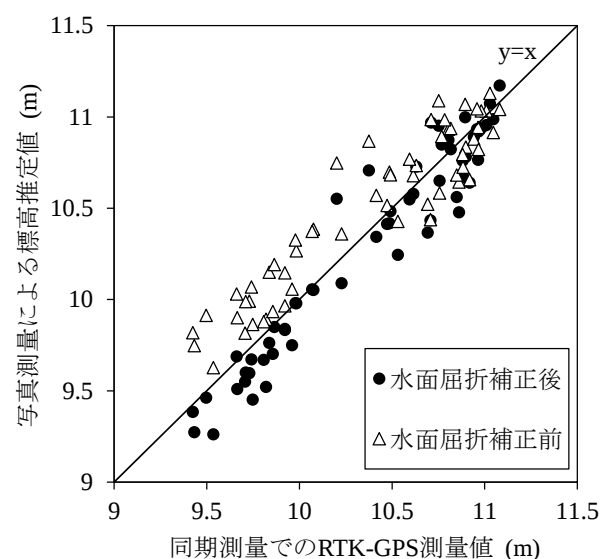


図-6 同期測量におけるRTK-GPS測量値と、写真測量による水面屈折補正前後の標高推定値の関係

屈折補正前後の標高推定値の散布図を示す。この場合の底面高の推定誤差 (写真測量による推定値－RTK-GPSによる実測値) の統計量は、平均が-0.068 m (わずかな過小評価傾向)、RMSが0.165 mであった。推定値を実測値で説明する単回帰直線の決定係数は0.93と大きく、写真測量の結果を底面高とみなしても、全体的には良好な精度となった。一方で、測量地点のうち、推定誤差が最も大きい2点 (0.351 m, 0.333 m) は、写真の目視判読からオオカナダモの分布域にあった。当該領域では実際に数十cm厚のオオカナダモが確認されており、写真測量がオオカナダモの表面高を推定することにより、結果を底面高として扱った場合には大幅な過大評価となることが示唆される。

(4) 標高推定誤差と諸条件の関係

a) 底質の影響

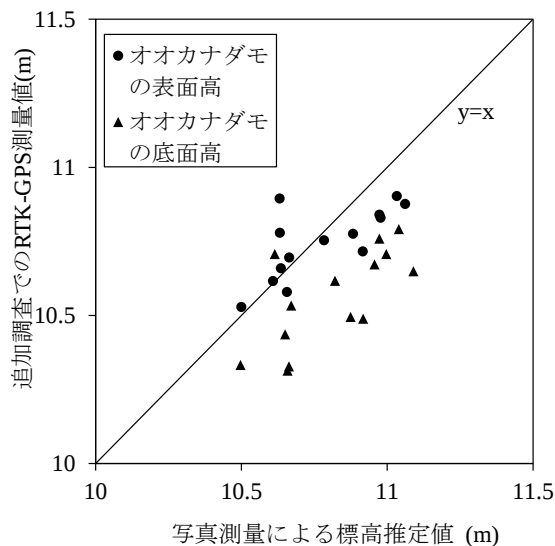


図-7 追加調査で測定したオオカナダモの表面高・底面高のRTK-GPS測量値と、写真測量による標高推定値の関係

表-2 追加測量に関する底質別の標高推定誤差統計量

底質	平均	標準偏差	RMS	データ数
オオカナダモ	0.036	0.127	0.132	14
砂	-0.064	0.129	0.144	16
礫	-0.168	0.215	0.273	9
全種総計	-0.05213	0.1709546	0.179	39

オオカナダモの影響をより詳しく見るため、図-7に、追加測量で測定したオオカナダモの表面高・底面高のRTK-GPS測量値と、写真測量による標高推定値の関係を示す。図-7より、写真測量はその原理から予想されるように、オオカナダモの底面高よりも表面高とよく一致しており、底面高とみなした場合には過大評価傾向にあることが明らかである。

表-2に、追加測量に関して、底質別の表面高推定誤差（すなわち、オオカナダモについては表面の測量値を用いている）の統計量を示す。表-2より、写真測量による標高を表面高とみなした場合、オオカナダモに関する推定誤差のRMSは、砂のそれと同程度であり、むしろ小さいことがわかる。RMSのうちのバイアス成分（平均）に関しては、絶対値にして砂の半分程度であり、ばらつき成分（標準偏差）に関しては、砂のそれと同程度である。よって写真測量は、表面高を測っていることに注意すれば、決してオオカナダモを苦手とするわけではなく、砂と同程度の精確さで推定できることがわかる。

表-2からわかるように、3分類の底質のうち最も推定誤差のRMSが大きかったのは礫であり、礫のRMSはオオカナダモ・砂の約2倍であった。また、そのバイアス成分・ばらつき成分も、ともに3分類中最大であった。一因として、礫はその上部と下部で標高の差が大きいため、写真測量による数画素程度（0.1 m以内程度）の水平座標推定誤差による、測量地点とデジタル標高モデルの画素のミスマッチが、大きな見かけの標高推定誤差

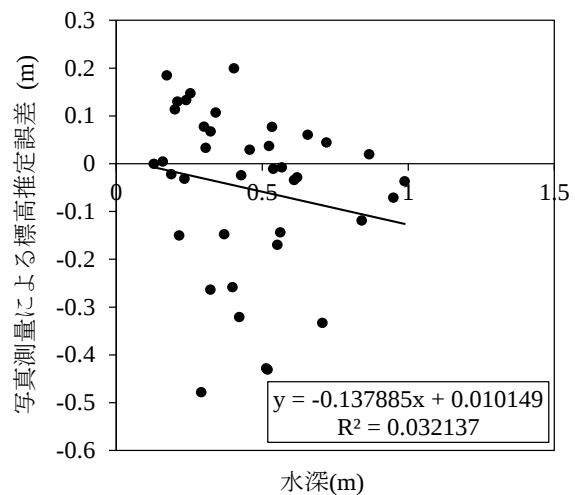


図-8 写真測量による標高推定誤差と水深の関係

を生みやすいことが挙げられる。表-1に示した陸上の水平位置推定誤差はRMSにして0.017 mに過ぎないが、冠水部分の水平座標推定誤差は、波などによる空間的に不均一な水面勾配や、それによる光の集束によって底面にできる時空間的に非定常なパターンなどの影響で、それよりも顕著に大きいものと考えられる。この問題を明らかにするためには、今後、水中にも対空標識を置いた実験を行い、水面下に関する水平位置推定誤差を定量評価する必要がある。

b) 水深の影響

図-8に、オオカナダモの分布する地点を除いた追加測量地点について、写真測量による標高の推定誤差と水深の関係を示す。ただし、横軸の水深は、空間補間で推定した水位から測量した底面高を差し引いて求めているため、完全な実測値ではない。図-8によれば、水深と標高の推定誤差の間に明確な関係は見られず（回帰直線の傾きと決定係数が小さい）、水深が深くなるにつれ誤差が大きくなる傾向もないことから、本研究で用いた単純な水面屈折補正について、問題点は見いだせない。

水面屈折補正の効果を例示するため、図-9に、図-3、図-4に示した断面C（後述の河道方向位置に依存するバイアスが小さい断面）における、同期測量における標高の測量値と、水面屈折補正前後の推定値の分布を示す。この図からも、水面屈折補正が正しく機能していることが明らかである。

c) 河道方向位置の影響

図-10に、追加調査に基づく標高（ただし表面高）の推定誤差と河道方向位置の関係を、底質のタイプ別に示す。図-10より、UAV-SfM手法は、上流側では標高を過小評価し、下流側では過大評価している。この河道方向の推定誤差のトレンドは、図-5に示した対空標識に関するトレンドと比べて100倍以上大きく符号も逆である

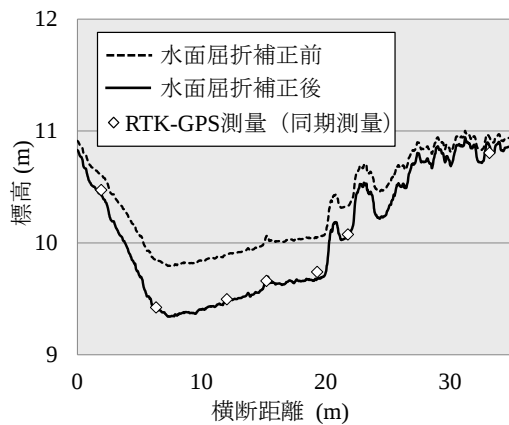


図-9 断面Cにおける、水面屈折補正前後の標高の推定値と、RTK-GPSによる測量値の分布

ため、SfMにおける鉛直軸の推定誤差によるものではない。さらに、どの底質でも同様のトレンドがみられることから底質によるものではなく、今後、原因の究明が必要である。

4. 結論

本研究では、UAV-SfM手法を用いた河道測量技術を国内で初めて、冠水部分について水面での光の屈折を考慮して適用し、精度を検証するとともに、誤差特性の解明を試みた。結論を以下に示す。

- 1) 河道のように、その大部分を水面が占めるような地形でも、カメラ位置・姿勢の正確な推定と、それによる陸上地点の正確な測位が可能である。
- 2) 写真測量で得られる標高は原理的に表面高であるため、底面高（河床高）として扱くと、オオカナダモのような植生のある地点で過大評価となる。
- 3) 水面屈折の補正は、見かけの水深に屈折率を乗じる単純な方法でも、主要な誤差要因にはならない。

今後は、水中にも対空標識を置いた実験により、本研究で解明できなかった、底質が礫の地点で誤差が大きい理由や、河道方向の誤差のトレンドの原因の解明、補正方法の検討を行う予定である。また、UAV-SfM手法を用いた河道測量技術を、より多種多様な河川環境に適用することで、実用化に向けたさらなる知見を得ることが望まれる。

謝辞：本研究は国土交通省受託研究「佐波川の河床掘削・堰撤去が河川環境に与える影響の研究、研究代表者：赤松良久」の一環として行われた。本研究に際して、国土交通省中国地方整備局から貴重なデータの提供を頂いた。ここに記して謝意を表す。

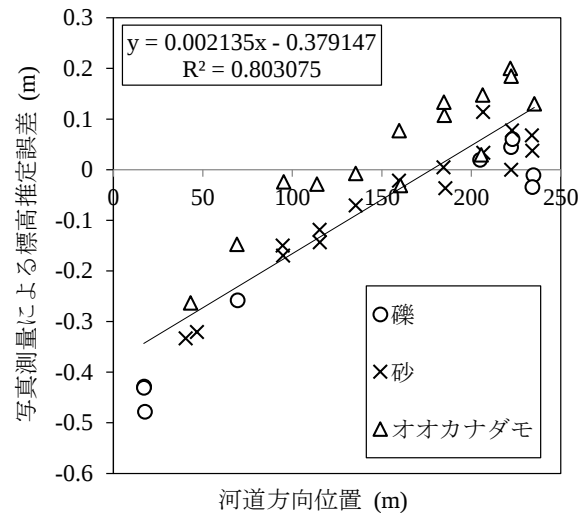


図-10 追加測量に基づく写真測量による標高（表面高）の推定誤差と河道方向位置の関係

参考文献

- 1) 渡辺 豊，河原能久：UAVを利用した空中写真の河川地形計測への適用性，土木学会論文集B1（水工学），Vol.72，No.4/I_1105-I_1110，2016。
- 2) 大石 哲，白谷栄作，桐 博英，高橋順二，水上幸治，村木広和：UAVを使った低空画像解析による海岸堤防の劣化状態の検出，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol.71，No.2/I_1717-I_1722，2015。
- 3) 小花和宏之，早川裕一，齋藤 仁，ゴメス クリストファー：UAV-SfM手法と地上レーザ測量により得られたDSMの比較，写真測量とリモートセンシング，Vol.53，No.2，pp.67-74，2014。
- 4) 伊豫岡宏樹，浜田晃規，渡辺亮一，山崎惟義：UAV-SfM手法を用いた干潟地形変化の把握，土木学会年次学術講演会講演概要集，Vol.70，ROMBUNNO.V II-045，2016。
- 5) Westaway, R.M, Lane S.N. and Hicks, D.M.: Remote sensing of clear-water, shallow, gravel-bed rivers using digital photogrammetry, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol.67, pp.1271-1281, 2001.
- 6) 知念正尚，田港朝之：デジタル航空写真を用いた海底地形調査について，平成21年度沖縄ブロック国土交通研究会，2009。
- 7) Lane, S.N, Widdison, P.E, Thomas, R.E, Ashworth, P.J, Best, J.L, Lunt, I.A, Sambrook Smith, G.H. and Simpson, C.J.: Quantification of braided river channel change using archival digital image analysis, *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol.35, pp.971-985, 2010.
- 8) Woodget, A.S, Carbonneau, P.E, Visser, F. and Maddock, I.P.: Quantifying submerged fluvial topography using hyperspatial resolution UAS imagery and structure from motion photogrammetry, *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol.40, pp.47-64, 2015.

(2016. 4. 4受付)