

UAVとSfM-MVSを用いた河道水面下測量技術 における水面屈折補正の高度化

ADVANCED CORRECTION METHOD FOR WATER SURFACE REFRACTION IN RIVERBED PHOTOGRAMMETRY USING UAV AND SFM-MVS

神野有生¹・赤松良久²・I GD Yudha PARTAMA³・

乾隆帝⁴・後藤益滋⁵・掛波優作⁶

Ariyo KANNO, Yoshihisa AKAMATSU, I GD Yudha PARTAMA,
Ryutei INUI, Masuji GOTO and Yusaku KAKENAMI

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

²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)

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

⁴正会員 博(農) 山口大学大学院特命助教 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(工) 山口大学大学院学術研究員 創成科学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

⁶学生会員 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)

Aerial photogrammetry of riverbed using UAV and SfM-MVS suffers from a systematic overestimation of the bottom elevation, due to the refraction of light at the water surface. One feasible correction to this effect is to multiply a factor to the apparent depth estimated by the usual procedure.

In this study, we first simulated the geometrically optimal correction factors under various conditions and showed that the widely used correction factor (1.34) is far from being optimal. Then, we proposed a new empirical method to calculate the correction factor appropriate in each flight mission. We proved the superiority of the proposed method through applications to two sites in Saba River, Yamaguchi prefecture.

Key Words : Aerial photogrammetry, shallow water, least squares

1. はじめに

河道の地形は、河道計画・設計に必要な各種の解析をはじめ、浸食堆積・水質の数値解析、生息場評価など、河川の各種管理・研究業務に欠かせない基盤情報である。しかし、従来の現地測量は必要な労力・コストが大きく、地形モニタリングとしての時空間解像度に限界があった。例えば、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、河道方向に約200 m間隔で行われるに過ぎない。上記の各種業務の信頼性を高めるためには、河道地形をより高頻度・高密度に測量可能な技術が望まれる。

一方で近年、小型のUAV（ドローン）を用いた写真測量が、陸上での簡便かつ高密度な測量技術として着目されている。UAV自体の低廉化・高性能化に加え、撮影した画像から半自動的に3次元形状を推定できる解析技術、すなわちSfM（Structure from Motion；複数位置で

撮影された画像間の対応付けに基づいて3次元点群を生成し、各点の座標、各撮影位置でのカメラの座標・姿勢、およびカメラの内部パラメータを同時推定する技術）とMVS（Multi-View Stereo；SfMの結果を用いてより密な対応付けを行い、密な点群を生成する技術）の確立、それらを実装したソフトウェアの充実もあって、安価・簡単に高解像度の数値標高モデル（以下、標高ラスタ）を得られるようになった。河道への適用実験も行われ、陸上部ではGPS測量に比肩する高精度が報告されている¹⁾²⁾。

UAVを用いた写真測量を河道に実利用する場合、陸上部のみならず冠水部（ただし河床が明瞭に見える範囲）についても標高を推定できれば、より効率的である。水面下の河道地形の空中写真測量は、UAVによるものに限らなければ古くから試みられているが、水面での光の屈折により、通常の解析では河床高を過大評価（水深を過小評価）するという問題（図-1）がある²⁾³⁾。これに対し従来の研究では、図-2に示すフローに従い、通常の

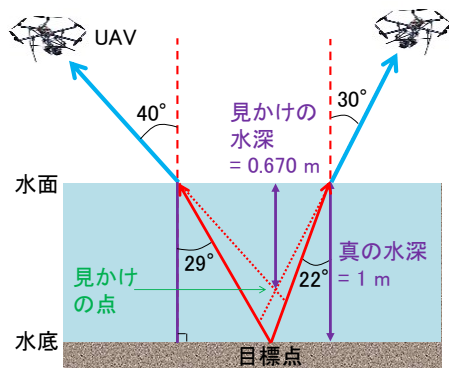


図-1 水面屈折による写真測量への影響の模式図
(撮影位置が2点で目標点と同じ鉛直断面上にある場合)

SfM-MVSで得られる見かけの河床高を、見かけの水深に補正係数を乗じる形で補正する方法が試みられ、補正係数としては水と空気の相対屈折率(約1.34)が広く用いられてきた^{2),4),5)}。

しかし、この補正係数は、全撮影位置が全地点の真上にあるという非現実的条件での理論値に過ぎず^{3),6)}、幾何学的に合理的ではない。そこで本研究では、幾何学的に最適な屈折補正係数に関する基本的なシミュレーションによって従来の補正係数(以下、従来係数)1.34の妥当性を検証したのち(2章)、より合理的に補正係数を求める方法を提案し(3章)、現地実験により、従来係数を用いた場合との精度比較を行った(4章)。

2. 最適な屈折補正係数のシミュレーション

(1) 画像数(撮影位置数)が2の場合

a) 方法

はじめに、目標点の座標推定に使われる画像数(撮影位置数)が2の最も単純な場合について、最適な屈折補正係数(真の水深と見かけの水深の比; 以下、最適係数)のシミュレーションを行った。本稿で目標点とは、SfM-MVSで生成される点群の個々の点を指し、座標推定・屈折補正の対象となる点である。

本シミュレーションでは、水平な水面の下に目標点を設け、両撮影位置との位置関係を様々に変えながら、スネルの法則を用いて目標点の見かけの座標を幾何学的に求め、最適係数を計算した。この比は、目標点から見た両撮影位置の向きを固定したとき、目標点の真の水深や、目標点と両撮影位置との距離に依存しない。この性質を利用し、実際の計算では、水面と目標点の位置を固定し、目標点から見た両撮影位置の天頂角と相対方位角の組み合わせのみを網羅的に変えることにより、一般の位置関係を代表した。天頂角は空気中での値に換算して0 - 40度、相対方位角は0 - 180度の範囲で、それぞれ2度刻みで変化させ、両撮影位置が同一とならない全ての組み合わせ(40020通り)について計算を行った。ここで天頂

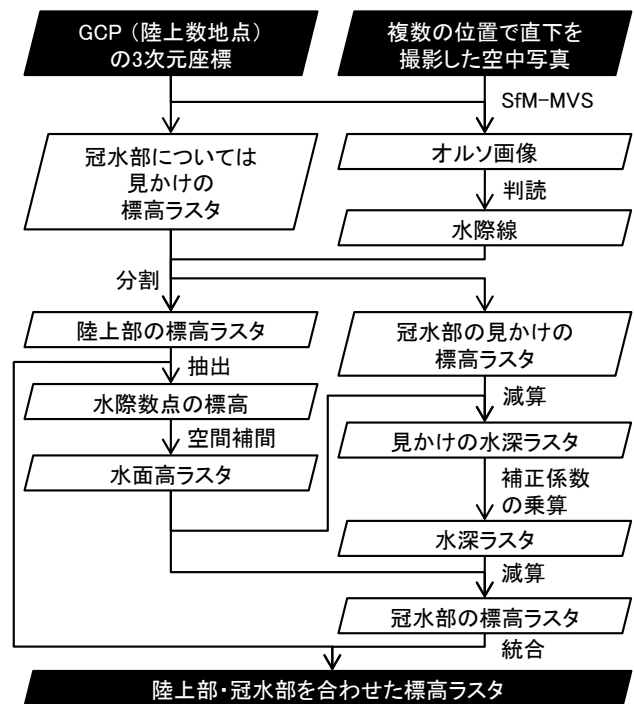


図-2 SfM-MVSを用いた冠水部を含む写真測量のフロー

角40度とは、画角94度・アスペクト比4:3の広角カメラ(例: DJI Phantom 4のカメラ)で直下を撮影する場合の地上撮影範囲を同面積の円で近似したとき、目標点がぎりぎり写る天頂角である。

図-1のように目標点と両撮影位置が同じ鉛直断面上にある場合を除き、両撮影位置からの視線は厳密には交わらない。通常SfM-MVSで得られる見かけの点は、各視線に対する距離が近い妥協点である。本研究のシミュレーションでは見かけの点を、各視線との距離のRMS(二乗平均平方根)が最小の点と定義して求めた。座標推定における各画像の重みの違いは考慮していない。

b) 結果と考察

図-1には、両撮影位置の天頂角がそれぞれ40, 30度、相対方位角が180度の場合の位置関係を模式的に例示している。この場合の最適係数は、 $1 / 0.670 = 1.49$ である。

最適係数は、両撮影位置の天頂角が大きく相対方位角が小さい場合に大きい傾向にあった。実際、最適係数を目的変数、両撮影位置の天頂角と方位角を説明変数、3次回帰スプラインを基底とする加法モデルをあてはめたところ、天頂角の項(スプライン)は5度以上の区間とともに単調増加関数、相対方位角の項は全区間で単調減少関数となった(自由度調整済み決定係数0.794)。

本シミュレーションで検討した40020通りの位置関係全てについて、最適係数は常に従来係数1.34を超え、平均値は1.432、中央値は1.423、標準偏差は0.067、最大値は1.965であった。この平均値を、従来係数1.34で補正を行った場合の補正誤差に換算すると、真の水深1 mあたり0.064 mの水深の過小評価(標高の過大評価)となる。以上から、従来係数が妥当でないことは明らかである。

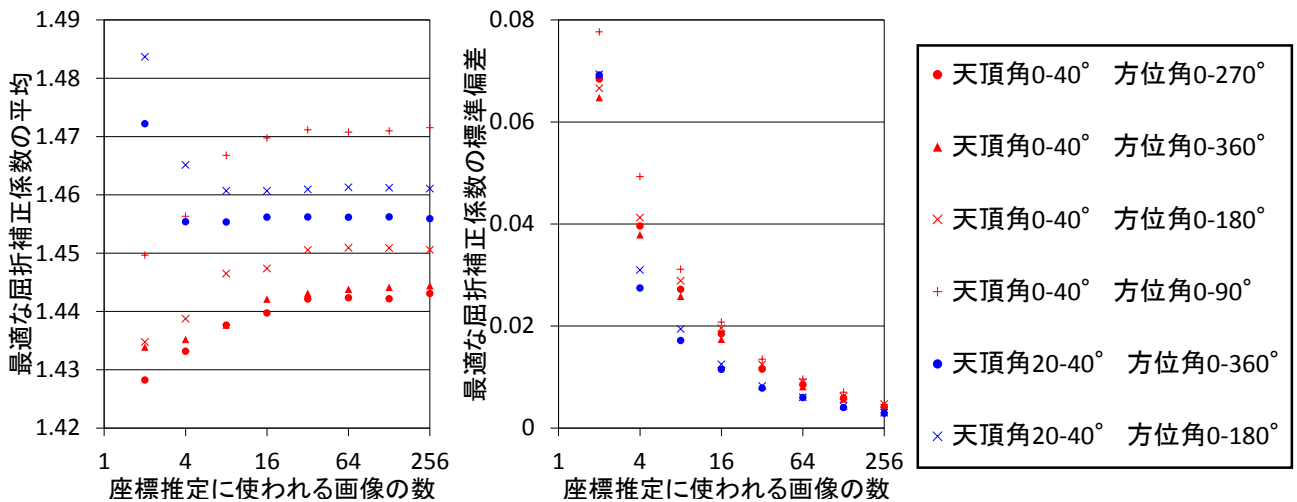


図-3 天頂角・方位角の範囲別にみた、最適係数の平均・標準偏差と推定に使われる画像数（撮影位置数）の関係

(2) 画像数（撮影位置数）が多い場合

a) 方法

次に、より現実に近い条件として、目標点の座標推定に使われる画像数（撮影位置数）が2を超える場合を含むシミュレーションを行った。計算方法は(1)と同様であるが、撮影位置の組み合わせを(1)のようにグリッド状に設定する代わりに、撮影位置をランダムに設置して最適係数を求める試行を、各画像数につき500回行った。

空中写真測量では、個々の目標点は通常3枚以上の画像に写る（撮影範囲に入る）。個々の目標点が写る画像数は、アスペクト比を1:1として概算すると、オーバーラップ率（隣接する画像間で重なっている範囲の割合）が50%の場合4、80%の場合25、90%の場合100、95%の場合400枚となる。一方、SfM-MVSにおいて個々の目標点の座標推定に使われる画像は、その目標点が他の画像と矛盾なく対応付けられた画像のみであり、一般に目標点が写る画像数より少ない。特に水面下の目標点は、水面反射する太陽直達光・天空光の波などによる時間変動により、撮影の瞬間によっては不明瞭となるため、座標推定に使われる画像はさらに少なくなる。以上を踏まえ、本シミュレーションでは座標推定に使われる画像数を 2^n ($n=1, \dots, 8$)と設定するとともに、撮影位置の天頂角・方位角は、設定範囲内に一様分布する疑似乱数で与えた。また、現実には太陽位置、雲の分布、水面状態に依存して、画像上の特定の領域（カメラの姿勢を固定した短時間の撮影ミッションでは撮影位置にあまり依存しない）で水面反射光の強さや不均一性が大きく、目標点が他の画像と対応付けにくくなることが多い。そこで、撮影位置の天頂角・方位角の範囲に関しては、(1)と同様の考え方で0-40度、相対方位角は0-360度としたケースに加え、その範囲の一部に制限したケースも検討した。

b) 結果と考察

図-3に、座標推定に使われる画像数と、その画像数に関する最適係数の標本平均・標本標準偏差との関係を示す。画像数が増えるにつれ、最適係数の標準偏差が小さ

くなるとともに、平均は、天頂角・方位角の範囲に依存した一定値に漸近する傾向がある。従って、十分なオーバーラップ率で撮影を行うことで、各目標点の座標推定に十分数の画像が使われた場合、個々の目標点ごとに（条件が良い瞬間の明瞭さと撮影の瞬間が異なるため）その数が異なっても、最適係数はあまり影響を受けないことが期待される。例として、各目標点の座標推定に16枚以上の画像が使われた場合、画像数の違いによる最適係数の平均の変動幅は0.004未満である。

一方、最適係数が漸近する値は、天頂角・方位角の範囲に依存して最大0.03近く異なることから、たとえ画像数が十分でも、太陽位置、雲の分布、水面状態に関わらず同じ係数を使うことは望ましくない。

3. 新しい補正係数計算法

最適係数を目標点ごとに幾何学的に求めるには、各点の座標推定に使われた各画像の撮影位置や、座標推定における重みが既知でなければならない。しかし、現在の一般的なソフトウェアには、密な点群の各点について、どの画像がどの程度の重みで座標推定に使われたかを出力する機能がないため、これは不可能である。

一方2の結果より、最適係数は、厳密には目標点ごとに異なるものの、十分なオーバーラップ率で撮影を行えば、1つの撮影ミッションについて一定値を与えても差し支えないことが多いことが期待される。

そこで本研究では、撮影ミッションごとに、経験的な補正係数を計算する方法を提案する。この方法では、GCP (Ground Control Point)として陸上での従来型測量（トータルステーションやGPSなどによる測量）を行う機会（通常、撮影当日）に、冠水部の数地点でも河床の測量を行う。その後、図-2のフローで得られる見かけの水深と測量結果を用いて得られる水深（水面高ラスタの値または測量した水面高と測量した河床高の差）の関係

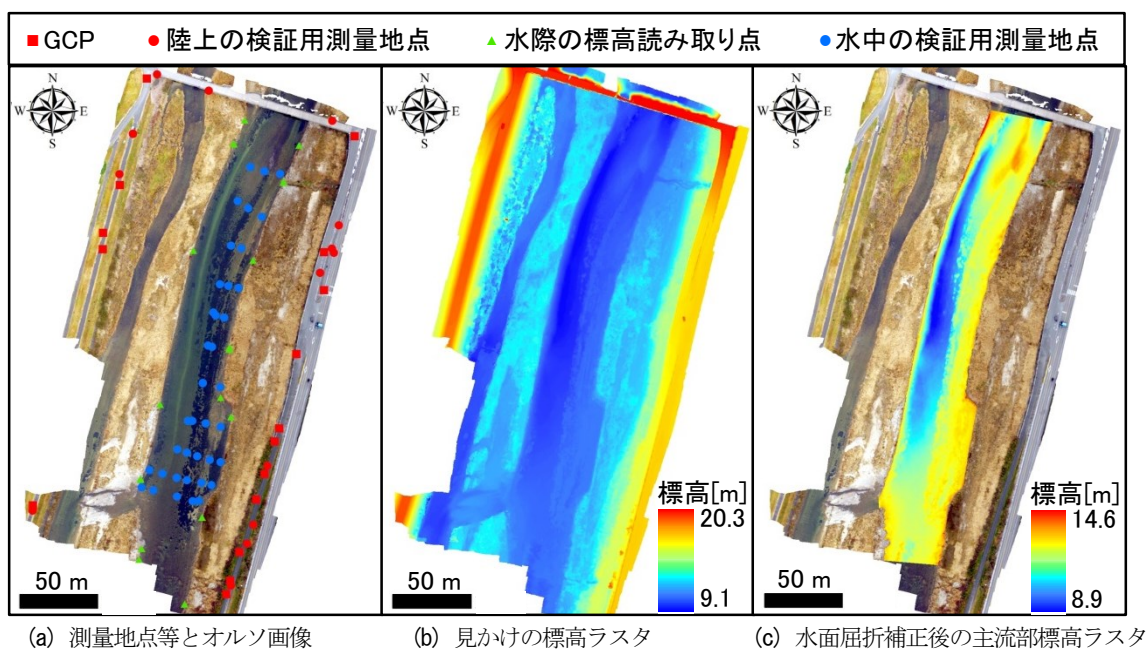


図-4 サイト1における測量地点等の分布と、作成されたオルソ画像、水面屈折補正前後の標高ラスタ

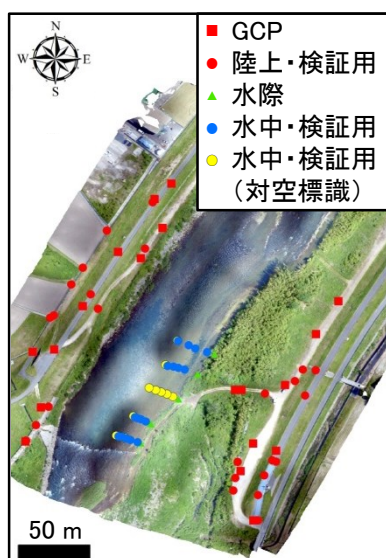


図-5 サイト2における測量地点とオルソ画像

表-1 各サイトにおける画像の撮影条件

	サイト1	サイト2
撮影日	2016/1/6	2016/5/23
撮影時刻	15:47 – 16:15	09:31 – 09:45
日照 (防府)	なし	あり
平均風速 (防府)	2.5 m/s	5 m/s
平均対地高度	約25 m	約30 m
1画素の地上でのサイズ	0.011 m	0.013 m
撮影枚数	270	424
平均オーバーラップ率	66%	68%

4. 現地実験

(1) 方法

a) サイト

現地実験は、山口県を流れる一級河川である佐波川の、人丸橋の下流側（サイト1）および金波堰跡の上流側（サイト2）の2サイトで行った。各サイトの概観として、後述の解析で得たオルソ画像を、図-4(a)と図-5に示す。

b) 測量

図-4(a)と図-5に示す、各サイトの陸上部・冠水部の多地点で、RTK-GPSを用いた測量を行った。陸上の測量地点には、SfM-MVSの結果に世界座標を与えるためのGCPと、陸上に関する精度確認のための検証用測量地点があり、どちらも画像上で特定できるオブジェクト（対空標識、石など）上に設けた。冠水部の測量地点はすべて、冠水部に関する精度検証用である。サイト2の5地点のみ、画像上で特定できる対空標識上に設けた。

c) 画像の撮影

小型UAVであるDJI Phantom 3 Professionalを用いて、表-1の条件で、鉛直下向きの画像撮影を行った。カメラ

に基づき、後者の推定誤差のRMSを最小とする補正係数を求める。言い換えれば、冠水部数地点の測量結果を用いて得られる水深を目的変数、見かけの水深を説明変数として、切片のない線形単回帰モデルの係数（傾き）を最小二乗法により推定し、これを補正係数とする方法である。この方法を提案した英語または日本語の発表済み論文は、著者らの調べた限りで存在しない。以下、この新しい補正係数を提案係数と呼ぶ。

屈折補正を、水深に関する切片を含む単回帰モデルによって行う方法は、海外では既に提案されている⁷⁾。しかし、この切片には光学的・幾何学的な意味付けがなく、統計学的にも、図-2の過程で生じる各種の誤差のバイアスが含まれるに過ぎない。また、切片を含めると回帰係数が2つとなり、その信頼性の高い推定にはより多地点での冠水部の測量が必要になるというデメリットがある。

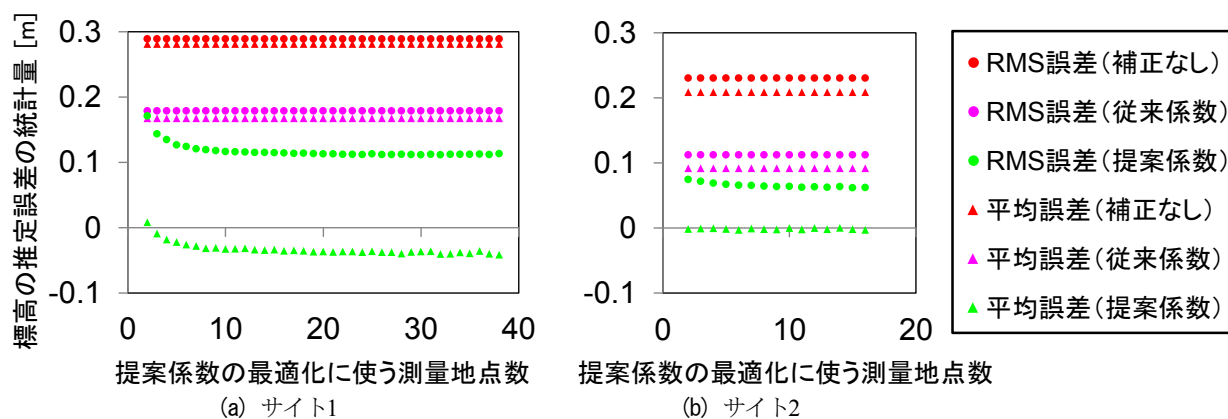


図-6 交差検証により得られたRMS・平均誤差と、提案係数の較正に使う水中測量地点数の関係

の画角（対角）は94度、画素数は4000×3000である。

d) 写真測量の処理

GCPの測量と画像撮影の結果を用いて、補正係数として従来係数1.34を用いた場合と提案係数を用いた場合の2通りについて、図-2のフローに基づく処理を行った。SfM-MVSによる標高ラスタ（図-4(b)）、オルソ画像（図-4(a)および図-5）の作成には、商用の写真測量ソフトウェアAgisoft PhotoScan Professionalを用いた。

水際の点の標高について、サイト1では図-4(a)に示す15地点の標高を標高ラスタより読み取ったが、サイト2では植生の影響で水際の判読が難しかったため、撮影直後に図-5に示す左岸の水際5地点でRTK-GPS測量を行い、その結果を与えた。

e) 画像上で特定できる地点での各軸方向の精度検証

画像上で特定できる検証用測量地点については、UTM zone 52N座標系におけるX, Y方向の誤差および標高（冠水部の地点は見かけの標高）の誤差を評価した。ここで、X, Y方向の誤差は、オルソ画像上で特定した当該地点のX, Y座標と、測量した座標との差である。標高の誤差は、オルソ画像上で特定した当該地点の座標における標高ラスタの値と、測量した標高との差である。

f) 冠水部の標高に関する精度の交差検証

対空標識のない冠水部の検証用測量地点を用いて、交差検証によって標高に関する誤差を評価した。具体的には、無作為抽出した一部の地点の測量結果を用いて提案係数を最適化し、他の点の屈折補正を行って誤差を計算する試行を、最適化に用いる測量地点数（以下、最適化用測量地点数）を変えながら各1000回行い、1000試行に関する誤差の統計量を評価した。ここでの誤差の定義は、推定されたX, Y座標における標高ラスタの値と測量した標高との差であり、X, Y座標の推定誤差の寄与を含む。

(2) 結果と考察

a) 標高ラスタ

図-4(b)(c)に、得られた標高ラスタと、主流部に水面屈折補正を行った後の標高（河床高）ラスタを、それぞれサイト1について例示する。

表-2 画像上で特定できる検証用測量地点の座標に関するRMS誤差 [m]（水中の標高に屈折補正を行っていない場合）。

サイト	区分	X	Y	XY合成	標高
1	陸上	0.033	0.019	0.038	0.041
2	陸上	0.031	0.032	0.044	0.037
2	水中	0.051	0.051	0.072	0.125

b) 画像上で特定できる地点での水平・鉛直方向の誤差

表-2に示すように、陸上の地点については、水平方向のRMS誤差（XY合成；三平方の定理でX, Y軸方向のRMS誤差を合成）と鉛直方向のRMS誤差が0.04 m程度で同じ水準にあった。水中の地点については、水平方向のRMS誤差は陸上の約1.7倍にとどまったのに対し、屈折補正を行っていない標高のRMS誤差が陸上の約3.2倍に増えており、標高の推定精度の改善が水面下の写真測量の主課題であることが再確認される。

c) 冠水部の標高に関する誤差の交差検証結果

図-6に、交差検証で得られたRMS誤差・平均誤差と、最適化用測量地点数との関係を示す。比較用に、屈折補正をしなかった場合、従来係数を用いた場合の値も示す。

両サイトに共通して、RMS誤差および平均誤差の絶対値は、提案指数に関する最適化用測量地点数に関わらず、補正なし、従来係数使用、提案係数使用、の順に小さくなった。提案係数を用いた場合のRMS誤差は、最適化用測量地点数の増加とともに減少し、一定値に漸近する傾向があった（最小二乗法の原理より自明）。最適化用測量地点数が5の場合、サイト1, 2におけるRMS誤差はそれぞれ0.127 m, 0.067 mであり、従来係数使用の場合のRMS誤差0.179 m, 0.112 mをそれぞれ29%, 40%下回った。

図-6のように、補正なしの場合、従来係数使用の場合の平均誤差は、いずれのサイトでも正であり、RMS誤差の80%以上であった。これは、誤差の大半が過大評価バイアス成分であること、従来係数ではその補正が不十分であることを示している。一方で提案係数を用いた場合、他の場合と比べての平均誤差の絶対値が非常に小さく、屈折によるバイアスを十分に補正できていることが示唆される。ただし、サイト1での標高に関する平均誤差は

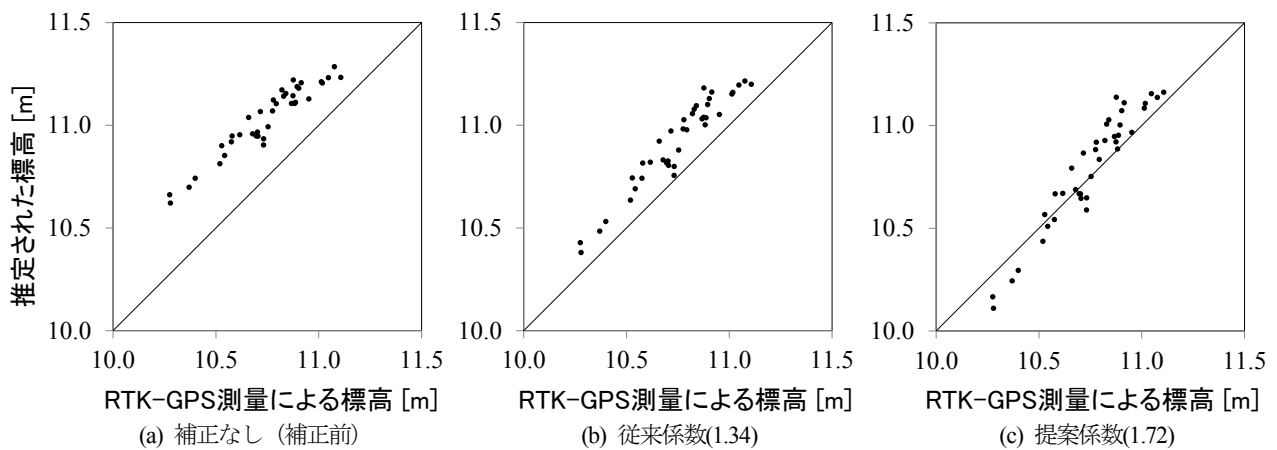


図-7 サイト1の冠水部における標高の推定値とRTK-GPS測量値の散布図（補正係数別）

最適化用の測量地点数の増加とともに減少し、最大で0.041 mの過小評価傾向を示した。水際の点の標高を実測したサイト2では平均誤差がほぼゼロであることを考慮すると、この過剰補正の原因として、水際の点の標高推定と読み取りの誤差が疑われる。

補正の視覚的な理解のため、提案係数の最適化に全検証用測量地点を用いた場合における標高の推定値と実測値の散布図を、サイト1について補正係数別に例示する（図-7）。従来係数による補正は、標高の過大評価バイアスを改善するものの不十分であり、提案係数によって更なるバイアスの低減が可能であることが読み取れる。

なお、この場合の提案係数は、サイト1, 2でそれぞれ1.72, 1.60であり、2 (2) で得られた最適係数（図-3）をも大きく上回った。原因として、画像間の対応付けに成功する画像上の領域（座標推定に使われた画像の撮影位置の天頂角・方位角の範囲）が、2 (2) の想定した以上に画像の片側の端付近に偏っていた可能性がある。

5. 結論

本研究では、UAVとSfM-MVSを用いた河道冠水部の写真測量に関して、水面での光の屈折によって河床が浅く見える効果を補正するために、見かけの水深に乗じるべき補正係数について検討し、次の結論を得た。

1. 最適な補正係数は、目標点（座標を推定する点）と、その座標推定に使われた画像の撮影位置との位置関係により異なる。しかし、各目標点の座標推定に十分多くの画像が使われる場合、画像の数や撮影位置による変動が小さい。
2. そこで、補正係数を1つの撮影ミッションで一定として、冠水部の河床数地点の測量に基づいて経験的に与える、新しい補正係数の計算法を提案した。2サイトでの現地実験の結果、新しい補正係数は従来の補正係数1.34と大きく異なり、これを用いることで、従来係数を用いた場合と比べて大幅な誤差

低減が可能であることが示された。

謝辞：本研究は公益財団法人河川財団の河川基金(285311021)、山口県官学共同研究（代表：赤松良久）、JSPS科研費(16K21194)の助成を受けて実施した。

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, pp.1105-1110, 2016.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) Westaway, R.M, Lane S.N. and Hicks, D.M.: The development of an automated correction procedure for digital photogrammetry for the study of wide, shallow, gravel-bed rivers, Earth Surface Processes and Landforms, Vol. 25, pp. 209-226, 2000.
- 5) 掛波優作, 神野有生, 赤松良久, I GD Yudha Partama, 乾隆帝: 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, 河川技術論文集, Vol.22, pp.79-84, 2016.
- 6) Murase, T., Tanaka, M., Tani, T., Miyashita, Y., Ohkawa, N., Ishiguro, S., Suzuki, Y., Kayanne, H., and Yamano, H.: A photogrammetric correction procedure for light refraction effects at a two-medium boundary, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol.74, No. 9, pp. 1129-1136, 2008.
- 7) Hsu, P.H., and Wang, C.K., Acquiring underwater DSM using close-range photogrammetry, Asian Conference on Remote Sensing 2011, 2011.

(2017. 4. 3受付)