

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

STUDY ON CORRECTION FACTOR FOR WATER SURFACE REFRACTION IN UNDERWATER PHOTOGRAMMETRY USING UAV AND SFM-MVS

神野有生¹・米原千絵²・IGD Yudha Partama³・

小室隆⁴・乾隆帝⁵・後藤益滋⁶・赤松良久⁷

Ariyo KANNO, Chie YONEHARA, IGD Yudha Partama,
Takashi KOMURO, Ryutei INUI, Masuji GOTO and Yoshihisa AKAMATSU

¹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）

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 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（理） 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（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）

⁶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）

⁷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）

Photogrammetry of shallow water bottoms by UAV and SfM-MVS technology is attracting attention for its low cost and efficiency. One of the problems of this technique is the underestimation of water depth due to the refraction of light at the water surface. The issue is usually addressed by multiplying the apparent depth of water by a constant called refraction correction factor. Conventionally, 1.34 (relative refractive index of air and water) is used as the factor, but it is geometrically too small. In this study, we investigated the optimum refraction correction factor through 20 simulations by using a popular MVS software and 7 field experiments. The optimum values obtained in the field experiments was highly variable, although our simulation indicated that a single value is generally applicable.

Key Words : shallow water bottom, refraction correction factor, Multi-View Stereo

1. はじめに

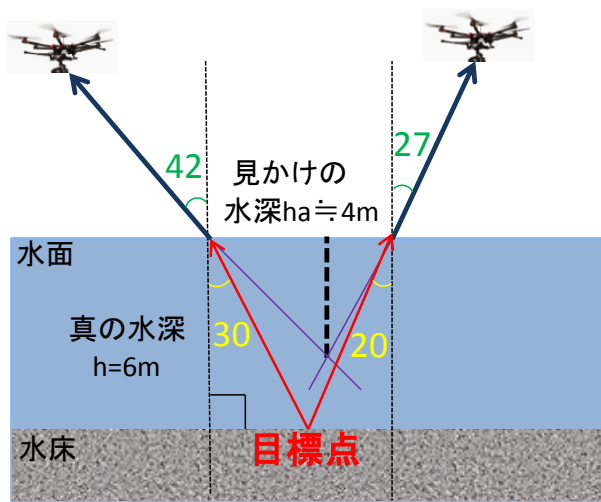
水底の地形は航行や施工など、多くの人間活動の基盤情報であり、かつ時間変化するため、十分な空間密度と頻度でモニタリングすることが望ましい。しかし、従来のTS等による測量や音響測深、LiDAR測量は、労力やコストが大きく、例えば、河川の定期縦横断測量は約5年に1回、約200 m間隔で行われるにすぎない。

一方で近年、UAV (Unmanned Aerial Vehicle : 通称ドローン) による空撮と、SfM (Structure from Motion) ・MVS (Multi-View Stereo)を実装したソフトウェアによる写真測量がその低廉性・効率性等から急速に普及しており、河川や海の浅瀬など浅水底の地形計測への応用も期待されている^{1),2)}。ここでSfMとは、複数位置で撮影された画像間の対応付けから疎な3次元点群を生成し、カメ

ラパラメータ（カメラの位置・姿勢情報の外部パラメータと焦点距離などの内部パラメータ）を推定する技術であり、MVSとはSfMの結果に基づいてより密な画像間の対応付けを行い、密な点群の座標推定を行う技術である。

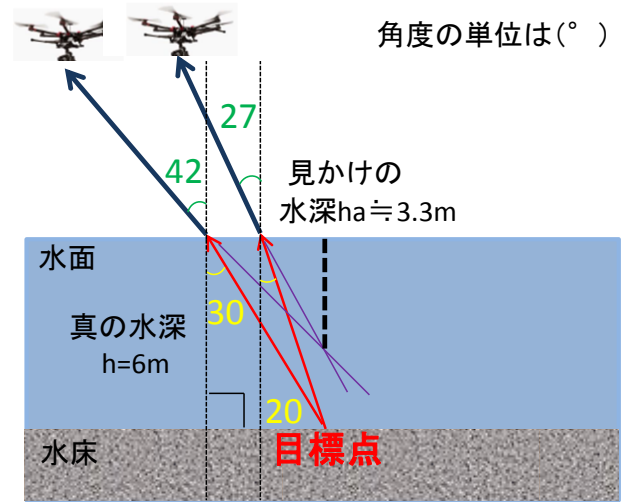
しかし、この技術を浅水底の地形計測に応用する際、水面での光の反射や屈折、波などにより、陸上と比べて精度が低下するという問題がある。本研究では、光の屈折によって見かけの点が真の位置より高い位置に生成されてしまう問題に着目する。SfMにおいては冠水部をマスクすることでこの問題を回避できるほか、そもそも冠水部に生成される点が陸上部と比べて非常に少ないことが多い。一方MVSでは、この問題は河床高の過大評価（水深の過小評価）に直結する。そこで対策として、通常のMVS解析で得られる見かけの水深に、ある定数（屈折補正係数）を乗じることが行われている。

屈折補正係数には従来、水と空気の相対屈折率（約



最適屈折補正係数 $=6/4=1.5$

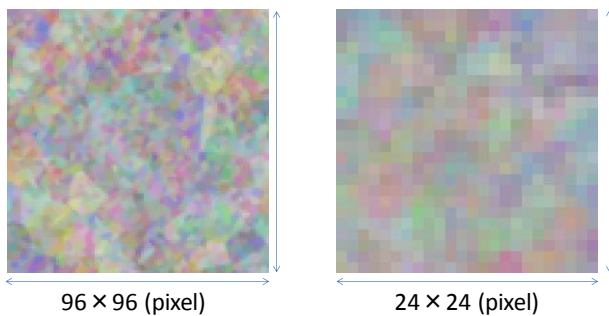
(i) 2視点が正対する場合



最適屈折補正係数 $=6/3.3\div 1.8$

(ii) 2視点が同じ側にある場合

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単純な場合）



(i) 高度水深比30

(ii) 高度水深比120

図-2 シミュレーションのための撮影画像の例（切り抜き）

1.34) が広く用いられてきた³⁾⁻⁵⁾。しかし図-1のように、最も単純な2視点の場合でも、撮影位置と目標点（画像間に対応付けられ、座標を推定する点；密な点群に含まれる点）の位置関係が異なれば、真の水深に対して光の屈折による見かけの水深が異なり、最適な屈折補正係数（以下、最適屈折補正係数）が異なる。実際には様々な位置から多数の画像を撮影するため、より複雑な幾何条件となる。さらにスネルの法則に基づけば、水と空気の相対屈折率は、屈折補正係数としては常に過小である。

神野ら⁶⁾は代替案として、2視点・多視点についてのシミュレーションと2サイトの現地実験から、現場ごとに冠水部数点の現地測量に基づいて屈折補正係数を合わせ込むことを提案した。しかし、神野ら⁶⁾のシミュレーションは見かけの点を、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いる点や、カメラの視野を現実的に扱っていない点で、実務に用いられているMVSソフトウェアを用いた解析を再現できていない可能性がある。また、冠水部の現地測量は容易ではなく、その実行可能性は流況や予算によって制約される。

そこで本研究では、実務で広く用いられているMVS

ソフトウェアを用いた多条件のシミュレーションに基づき、最適屈折補正係数の変動特性と、合わせ込みが難しい場合でも妥当な結果を与える汎用的な値について検討した。また、著者らがこれまでにを行った計7回の現地実験の結果（うち2回は未発表）も、この検討に活用した。

2. シミュレーション

(1) 方法

a) CGの作成と撮影

次の手順で、CGの作成と撮影を行った。

- 3DCGソフトのBlender（ver2.78cとver2.79）によって、水面屈折のみを考慮した水面と水底をともに平面で作成した。水底のテクスチャは、図-2のように非常に画像間に対応付けが成功しやすいランダムなテクスチャを複数混合したものとした（水底テクスチャの違いが最適屈折補正係数の空間分布に大きな影響を与えないことは別途確認した）。
- UAVの自動飛行による撮影を模して、理想的なピンホールカメラ（ピンホールカメラとはレンズの代わりに針穴を開けた歪みのないカメラのことで、本シミュレーションでは焦点距離以外の内部パラメータがゼロ；35 mm版換算の焦点距離24 mm，解像度1500×2000 画素）を、水面での撮影範囲から計算した重複率（隣り合う画像どうしの重なり割合）で水面上空に規則的に設置し、撮影（Cyclesエンジンによるレンダリング）を行った。
- 高度水深比・重複率による最適屈折補正係数の空間分布への影響をみるため、4種類の高度水深比（30，60，90，120）と5種類の重複率（X方向70%Y方向90%，X方向60%Y方向80%，X方向

50%Y方向70%, X方向40%Y方向60%, X方向30%Y方向50%)の全ての組み合わせ(合計20ケース)について撮影を行った。重複率は水面において定義し、X方向を画像の長辺、Y方向を画像の短辺に平行な方向として設定した。また原理的に、撮影高度と水深を等倍すると同じ結果になるため、高度水深比を条件とし、水深を一定にして撮影高度を変化させた。

b) MVS解析

次の手順で、MVS解析を行った。

1. 撮影した画像をSfM-MVSソフトウェア(Agisoft PhotoScan Professional ver. 1.3.2と1.3.4)に読み込み、MVS(Multi-View Stereo)解析を行った。両バージョンで得られる結果の差は軽微であることを、1ケースを例に確認している。
2. カメラ位置・姿勢情報、内部パラメータ(焦点距離)に真値を与えて、MVS処理を行った。ソフト上の設定について、品質は「最高」、深度フィルタは「強」とした。
3. 密な点群生成後、DEM(Digital Elevation Model)を構築し、ラスタファイルとして保存した。DEM構築時の内挿補間の設定は「無効」とした。高度とDEMのセルサイズの比は1303-1326であった。

c) 最適屈折補正係数の空間分布と空間統計量の計算

次の手順で、最適屈折補正係数の空間分布を解析した。

1. 真の水深(CGで設定した水深)をMVS解析で得られたDEMで除し、図-3のような、最適屈折補正係数の画像(空間分布図)を作成した。
2. 各ケースの分布図で、撮影領域の中央部付近における最適屈折補正係数の空間分布は、現実に対象領域より十分大きい範囲で撮影を行った場合の対象領域内のそれに対応する。この中央部付近では最適屈折補正係数が小さい領域と大きい領域が明確に分かれ、規則的に繰り返されている。以下、最適屈折補正係数が大きい領域を「尾根」、小さい領域を「谷」と呼ぶ。尾根と谷の境界は、ほぼ、水面における画像の撮影範囲の境界に相当する。そこで各ケースについて、撮影条件からこの境界を計算し、図-3の黒枠内のような「尾根」と「谷」が2つずつ含まれる領域における最適屈折補正係数の空間統計量を評価した。

(2) 結果

a) 各ケースにおける最適屈折補正係数の空間統計量

表-1に、20ケース全てについて、最適屈折補正係数の空間統計量(平均値、最小値、中央値、最大値)を示す。また、図-4、図-5に、1点を写す画像枚数の空間平均値(x, y 方向の重複率を r_x, r_y として、 $(1 - r_x)(1 - r_y)$ の逆数)と各ケースの最適屈折補正係数の空間平均値との関係、各ケースの最適屈折補正係数の空間統計量との関係

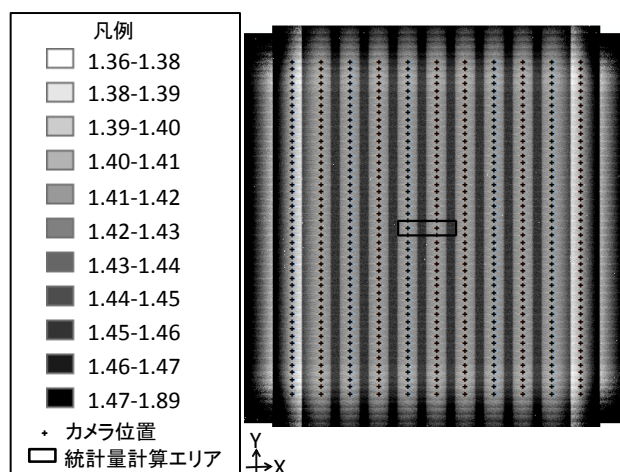


図-3 シミュレーションで得た最適屈折補正係数の空間分布の例(高度水深比30, 重複率X方向70%Y方向90%の場合)

表-1 シミュレーションにおけるケース別の最適屈折補正係数の空間統計量

高度 水深比	重複率(%)		最適屈折補正係数の空間統計量			
	X	Y	平均値	最小値	中央値	最大値
30	70	90	1.429	1.403	1.420	1.466
	60	80	1.423	1.376	1.417	1.465
	50	70	1.427	1.387	1.424	1.492
	40	60	1.412	1.325	1.416	1.488
	30	50	1.411	1.340	1.413	1.497
60	70	90	1.429	1.397	1.423	1.473
	60	80	1.423	1.365	1.413	1.474
	50	70	1.427	1.355	1.424	1.500
	40	60	1.412	1.299	1.416	1.497
	30	50	1.411	1.317	1.413	1.509
90	70	90	1.428	1.389	1.425	1.481
	60	80	1.424	1.359	1.417	1.483
	50	70	1.426	1.312	1.423	1.517
	40	60	1.410	1.273	1.416	1.508
	30	50	1.410	1.300	1.414	1.518
120	70	90	1.428	1.383	1.426	1.484
	60	80	1.420	1.344	1.415	1.493
	50	70	1.425	1.312	1.422	1.524
	40	60	1.409	1.244	1.416	1.522
	30	50	1.413	1.285	1.419	1.547

を示す。

表-1より、各ケースの最適屈折補正係数の空間平均値は1.409-1.429、空間的な中央値も1.413-1.426の狭い範囲に収まり、それらの全ケースに関する平均値は、空間平均値については1.420、空間的な中央値については1.419となった。図-4より、最適屈折補正係数の空間平均値は、重複率とともに増加する傾向が示唆されるが、変動幅は1.409-1.429程度と小さく、高度水深比への依存性はみられなかった。また図-5より、第1四分位数(25%値)・第3四分位数(75%値)は、高度水深比・重複率によらずほぼ1.380-1.460の区間にあり、仮に1.420を一律に用い

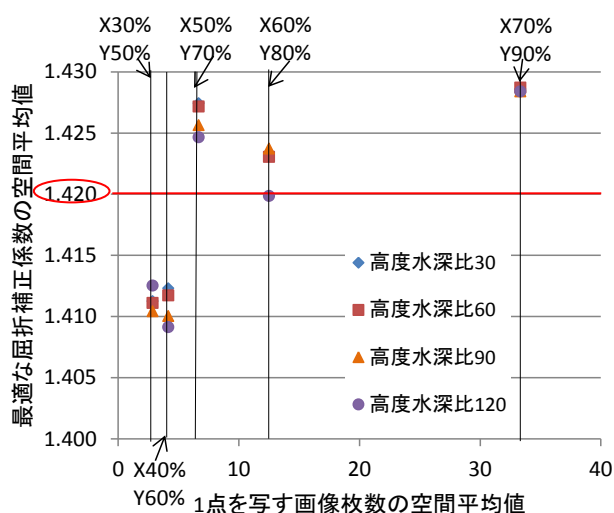


図-4 各ケースについての高度水深比・重複率と空間平均値の関係

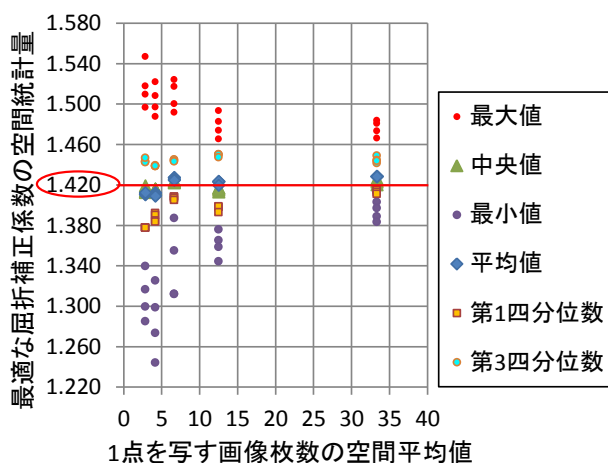


図-5 各ケースについての重複率と空間統計量の関係

た場合でも、対象領域の面積の半分以上は、見かけの水深1 mあたり約4%以内の誤差で補正できることがわかる。

b) 最適屈折補正係数の全ケースに関する統計量

図-6に、各ケースの最適屈折補正係数画像から300000画素を無作為抽出して得た画素集合について、最適屈折補正係数のヒストグラムを示す。最適屈折補正係数は左右非対称の分布を示し、区間1.390-1.460、特に1.410-1.420で頻度が大きく、この区間に2つのピークが認められた。また、この画素集合に関する最適屈折補正係数の5%値が1.361、95%値は1.465であったことから、90%の点で1.361-1.465の間にあり、第1四分位数は1.400、第3四分位数は1.445であったことから、50%の点で1.400-1.445の間にあることが分かる。また、屈折補正係数として一律に1.420を適用した場合、見かけの水深1mあたりの誤差は、90%の点で+側0.0454 m、-側0.0592 m以内となり、50%の点で+側0.0248 m、-側0.0196 m以内となった。

実際の測量においての各ケースの空間平均値を参照することを想定すると、実際のMVSでは、水面反射、波、

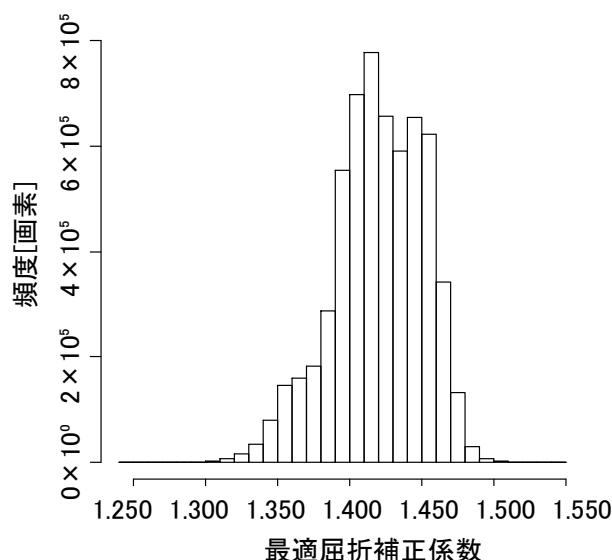


図-6 全ケースについての最適屈折補正係数のヒストグラム

水中での光の消散などの影響により、各点の座標推定に使われる画像数は本シミュレーションより少ないと予想され、かつ一般的なソフトウェアではその程度は知り得ない。よって実質的な高度水深比・重複率がどのケースと対応しているかが分からない。しかし上記の結果より、最適屈折補正係数に空間平均値の平均である1.420を用いれば、高度水深比・重複率に関わらず、空間平均としてほぼ正しい補正が可能であると期待される。

c) 既往のシミュレーション結果との比較

神野ら⁶⁾のシミュレーション結果では、重複率が十分に大きいとき、最適屈折補正係数の平均が約1.445に漸近しており、この値は本研究で得られた代表値1.420より大きい。原因の候補として、冒頭に述べたような、神野ら⁶⁾のシミュレーションと実際のMVSソフトウェアの処理の違いや、前者では本研究よりも画角が大きい(94度)カメラを想定していることが挙げられる。原因の特定や、本研究のシミュレーションで画角を変えた場合の最適屈折補正係数の挙動の解明は、今後の課題である。

3. 現地実験

(1) 方法

本稿でいう現地実験は、河川や海岸において神野ら⁶⁾の提案手法で最適屈折補正係数を求めるものである。具体的には、水底上の数十点を対象に、現地測量に基づいて得た水深と、UAV空撮画像のSfM-MVS解析から得た見かけの水深から、最小二乗法により最適屈折補正係数を求める。

本研究では、表-2に主な条件を示す、著者らが行った7回の現地実験の結果をとりまとめた。表-2の中で実験1, 2は神野ら⁶⁾で発表済みであり、実験4と5は未発表である。実験3, 6, 7に関しては神野ら⁷⁾の水面反射軽減技術を利用

表-2 現地実験の主な条件と水中検証点の標高に関するRMS誤差

実験 番号	場所		年月日	日照	撮影 高度 [m]	平均 重複率 [%]	地上 解像度 [m/pix]	標定 点数	水中 検証 点数	水中検証点の水深 [m]				最適な 屈折補正 係数	RMS 誤差 [m]
	水域名	詳細								最小	平均	最大	標準 偏差		
1	佐波川	人丸橋下流部	2016/01/06	無	25	66	0.011	16	39	0.223	0.616	1.073	0.200	1.722	0.113
2	佐波川	金波堰跡上流部	2016/05/23	有	30	68	0.013	20	17	0.289	0.590	0.905	0.177	1.594	0.062
3	佐波川	人丸橋下流部	2017/01/13	無	30	76	0.010	10	35	0.236	0.687	1.232	0.314	1.157	0.028
4	佐波川	中央橋下流部水路	2017/09/20	無	60	78	0.017	22	18	0.966	1.005	1.027	0.018	1.507	0.061
5	錦川	錦帯橋下流部	2017/12/04	無	64	76	0.016	38	46	0.014	0.601	1.247	0.434	1.326	0.024
6	周防灘	秋穂半島東岸	2017/01/31	有	30	76	0.011	7	92	0.017	0.991	2.275	0.697	1.250	0.066
7	周防灘	秋穂半島東岸	2017/12/12	無	30	78	0.012	10	55	0.023	0.585	1.441	0.351	1.327	0.081

しており、現地作業の詳細はPartama et al.⁸⁾に示している。

現地実験の詳細な手順は次の通りである。

1. UAVによる多数の写真撮影を行った。UAVとしては、実験1, 2ではDJI Phantom 3 Professional, 実験3, 6, 7ではDJI Phantom 4を用いた。これらのカメラは4000×3000画素、画角の公称値は94度で、フォーカスは無限遠に固定されていた。実験4, 5ではDJI Phantom 4 Proを用いた。カメラの画角の公称値は84度、画素数は実験4では5472×3078画素、実験5では5472×3648画素で、マニュアルフォーカスを使用した。
2. 標定点（対空標識を置いた陸上の点で、SfM解析に用いる）と水中検証点（対空標識のない水底上の点で、最適屈折補正係数の推定と精度評価に用いる）の現地測量を行った。現地測量には、実験6, 7ではTSを、その他ではVRS方式のRTK-GNSSを用いた。図-7に、実験5に関する標定点・水中検証点などの配置を例示する。
3. 撮影した画像と標定点の地上測量結果を用いて、Agisoft PhotoScan Professional ver. 1.2.6-1.3.4によりSfM解析を行った。このとき標定点は、ジオリファレンスに加え、バンドル調整におけるカメラパラメータの最適化にも利用した。
4. 同ソフトによりMVS解析を行って密な点群を生成し、水中検証点と水際の点（5-40点）の見かけの標高を求めた。
5. 水際の点の標高の地上測量値（実験2, 3, 5）またはMVS解析による推定値（実験1, 4, 6, 7）を用いて、各水中検証点に関する水面高を推定する。推定の方法としては、水位分布に応じて、線形の空間内挿（実験1-4）または平均（実験5-7）を用いた。
6. 各水中検証点について、見かけの水深（水面高推定値－見かけの標高）と現地測量ベースの実スケール水深（水面高推定値－標高の現地測量値）を求めた。
7. 最小二乗法（全水中検証点に関する水深推定誤差のRMSの最小化）により、最適屈折補正係数を求めた。ここで水深推定誤差は、水深推定値（見かけの水深に屈折補正係数を乗じたもの）と現地測量ベースの実スケール水深との差である。標高の推定誤差を、推定した標高（水面高推定値－水深推定値）と標高の現地測量値との

差と定義すれば、その絶対値やRMSは水深推定誤差のそれと等しい。

8. 屈折補正係数を全水中検証点に合わせ込んだ場合の冠水部の標高（あるいは水深）推定精度を評価するため、水中検証点に関する標高推定のleave-one-out交差検証を行った。具体的には、全水中検証点のうち1点を除いて屈折補正係数を最適化し、取り置いた1点で標高（あるいは水深）の推定誤差を求める試行を、取り置く1点を水中検証点の数だけ変えて行い、誤差のRMSを評価する。

(2) 結果

表-2に、各実験について、上記の手順7で得られた最適屈折補正係数と、手順8の交差検証で得られたRMS誤差を示す。最適屈折補正係数について、7回の実験に関する平均は1.412と、2のシミュレーションで全ケースを代表する値として得られた1.420に近い値となった。しかし、その実験によるばらつきは1.157-1.722と大きく、4回の実験では理論上の最小値である水と空気の相対屈折率（約1.34）を下回った。

図-8には、屈折補正係数として手順7で得られる最適値（表-2）を用いた場合、手順8の各試行で得られる値を用いた場合に加え、従来係数の1.34や、2で得られた1.420を用いた場合について、水中検証点に関する標高推定のRMS誤差を示す。7回中4回の実験で、従来係数1.34を用いた場合のRMS誤差が、1.42を用いた場合のRMS誤差より小さくなっている。さらに、後者が前者の2.45倍に達する実験（実験5）や、後者が前者より0.069 mも大きい実験（実験6）もあり、屈折補正係数として1.34より1.42が適しているとは言えない。

このような現地実験とシミュレーションの乖離の原因として、現地実験の手順3（SfM）におけるカメラパラメータの推定誤差が考えられる。一般に冠水部では、水面での光の屈折や波、太陽光・天空光の水面反射、光の消散などの影響で、水底上の点の画像間の対応付けが成功しにくいと、推定の根拠となる疎な点群が少数となり、信頼性も低い。その結果、カメラパラメータの推定誤差が大きくなり、手順4のMVSにおける水深推定において、特定の領域で水深に過小評価・過大評価のバイアスが生じうる。手順7で得られる最適屈折補正係数は、屈折によ

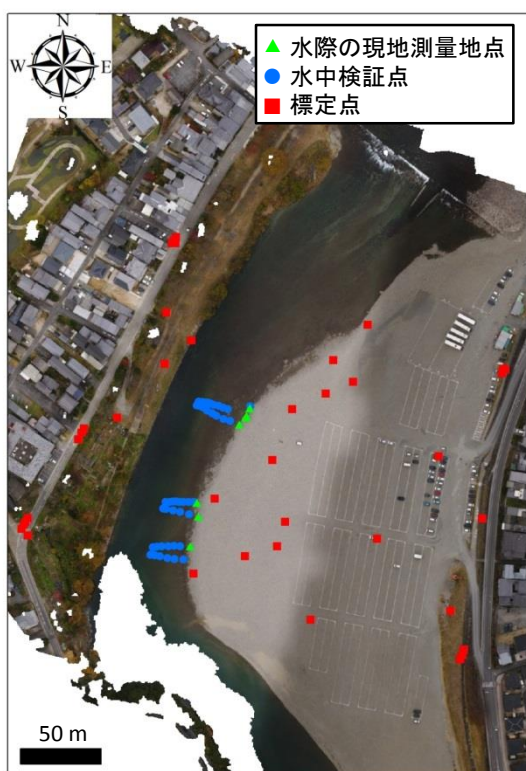


図-7 実験5における標定点・水中検証点の配置
(背景は得られたDEMに基づいて作成したオルソ画像)

る水深の過小評価と同時に、そのようなバイアスを補正するものとなるため、見かけ上の変動が大きくなる可能性がある。冠水部を含むSfMにおけるカメラパラメータの推定誤差の特性と、それを低減する方法については、今後より詳細に検討する必要がある。

4. 結論

本研究では、UAV写真測量による浅水底の地形計測において、水面での光の屈折による水深の過小評価を補正するための、屈折補正係数について検討した。具体的には、実務で広く用いられているMVSソフトウェアを使用した20ケースの高度水深比と重複率でのシミュレーションと、計7回の現地実験のそれぞれの結果から、最適屈折補正係数の変動特性と、合わせ込みが難しい場合でも妥当な結果を与える汎用的な値について検討した。

シミュレーションの結果、最適屈折補正係数の空間平均値は、高度水深比・重複率によらず1.409-1.429の狭い範囲に収まった。7回の現地実験の平均は1.412と、シミュレーション全ケースの空間平均値の平均1.420と概ね一致したが、一方で7回の現地実験における最適屈折補正係数は、1.157-1.722と大きくばらつき、7回のうち4回では理論上の最小値である1.34を下回った。原因としてSfMにおけるカメラパラメータの推定バイアスが考えられる。

よって、屈折補正係数は現場ごとに合わせ込むことが望ましいが、そのための冠水部数点の現地測量

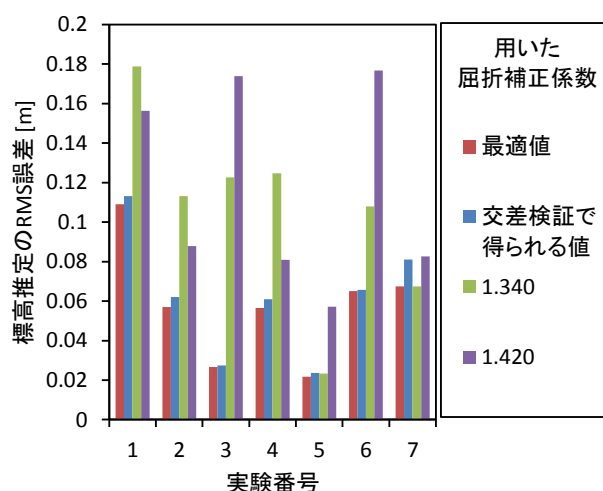


図-8 水中検証点に関する標高推定のRMS誤差

が難しい場合や、自動追尾式TS等を利用したカメラ座標の精密測位によりSfMのバイアスを抑制できる場合には、屈折補正係数1.420を用いることが、1.34より高精度を得るための選択肢であると考えられる。

参考文献

- 1) 原田守啓, 荒川貴都, 大井照隆, 鈴木英夫, 沢田和秀: UAVと水域可視化処理による河川地形計測手法の検討, 河川技術論文集, vol.22, pp.67-72, 2016.
- 2) 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.I_1105-I_1110, 2016.
- 3) 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.
- 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) 神野有生, 赤松良久, I GD Yudha PARTAMA, 乾隆帝, 後藤益滋, 掛波優作, 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, 河川技術論文集, vol. 23, pp.185-190, 2017.
- 7) 神野有生, 上田修靖, I GD Yudha PARTAMA, 赤松良久, 関根雅彦, UAVを用いた浅水底の写真測量のための水面反射軽減技術, 土木学会第72回年次学術講演会講演概要集, 2017.
- 8) Partama, I.G.Y, Kanno, A, Ueda, M, Akamatsu, Y, Inui, R, Sekine, M, Yamamoto, K, Imai, T. and Higuchi, T.: Removal of Water-Surface Reflection Effects with a Temporal Minimum Filter for UAV-Based Shallow-Water Photogrammetry, Earth Surface Processes and Landforms, submitted.

(2018. 4. 3受付)