

河道沿い2コース撮影を用いた小規模河川における UAV 写真測量の精度検証

(Accuracy Validation of UAV-based Photogrammetry on Small Rivers using Two-Course Flight Design)

山口大学大学院 垣原 巧, 山口大学大学院 神野 有生¹

1. はじめに

近年の豪雨増加に伴い、河道の流下能力評価や、土砂堆積・河積阻害・川幅縮小などの変状監視の重要性が増している。一方で現状では、予算の制約から十分に測量されていない河川が多く、ある調査では半数以上の自治体が、管轄する二級河川の定期測量を実施していない¹⁾。こうした状況下、低コストと高精度を両立し得る測量手段として、近年低廉化した UAV (Unmanned Aerial Vehicle) による空撮写真を用いた SfM (Structure from Motion) 解析による UAV 写真測量が注目されている²⁾。この技術は河道のうち、密な植生に覆われていない陸地部分や浅い冠水部を測量可能であり、多数の写真を多様な位置・向きで撮るほど高精度を得られる。0.1 m 程度の精度を確保しつつコスト (撮影枚数や標定点の数などに依存) を抑えられるような、効率的な撮影方法の確立が期待される。

このようなニーズに応えるため、著者ら³⁾は 2023 年に、一般の陸地で用いられる 2 次元的な撮影方法 (図-1) を、幅の狭い小規模河川向けに簡略化した撮影方法「河道沿い 2 コース撮影」(図-2) を提案した。この撮影方法は、UAV の飛行を兩岸堤防沿いの 2 コースのみで済ませることで、撮影枚数やターンに要する時間を抑制するものである。加えて撮影位置の RTK-GNSS 測位が可能な UAV を用いれば、コース数・撮影枚数が小さいことによる SfM の精度不足を補うとともに、撮影位置でモデルをジオリファレンスすることで、標定点を省略できる可能性もある。著者ら³⁾はさらに、実際に小規模河川の約 250 m の区間 (図-3) を対象に、RTK-GNSS 測位が可能な UAV を用いて、「河道沿い 2 コース撮影」に基づく SfM の精度検証実験を行った。結果として、ジオリファレンスを地上の標定点に基づいて行った場合には、検証点誤差の RMS (3 軸方向の成分の合成値) が 0.053 m と小さくなったが、UAV による撮影位置の RTK-GNSS 測位解に依って行った場合には、検証点誤差

RMS が 0.114 m となった。著者らは主要な誤差要因として、片コースの測位における整数バイアスの誤推定に伴う測位解の鉛直バイアスにより、不正な回転が生じた可能性を挙げた (この実験では各コースの撮影の間にバッテリーを交換したため、バイアスが増えた可能性があった)。実際に、東側コースの測位解に一律に -0.03 m の人工的なバイアスを加えると、検証点誤差 RMS が 0.059 m まで低減した。幅が狭く比較的直線的な河道では、コース別のわずかな鉛直バイアスによってコース軸周りの回転が生じる。今後は 2 コースの撮影をバッテリー交換なく行う方法での、事例の蓄積が望まれる。

そこで本研究では、撮影位置の RTK-GNSS 測位について整数値バイアスの変化が生じにくい条件のもと、「河道沿い 2 コース撮影」に基づく SfM の精度検証実験を、既往研究³⁾と同じ小規模河川の同じ区間を同様に撮影することで実施し、結果を考察した。

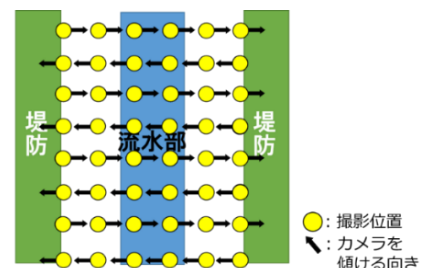


図-1 2次元的な撮影手法の例を示した模式図
(一定ピッチ角蛇行撮影)

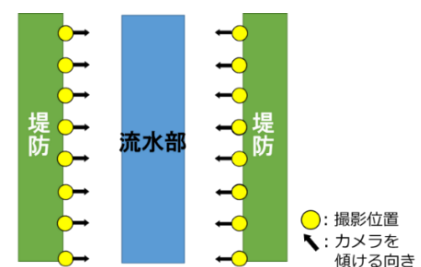


図-2 開発した河道沿い2コース撮影の模式図

¹ 責任著者。Email: kanno@yamaguchi-u.ac.jp

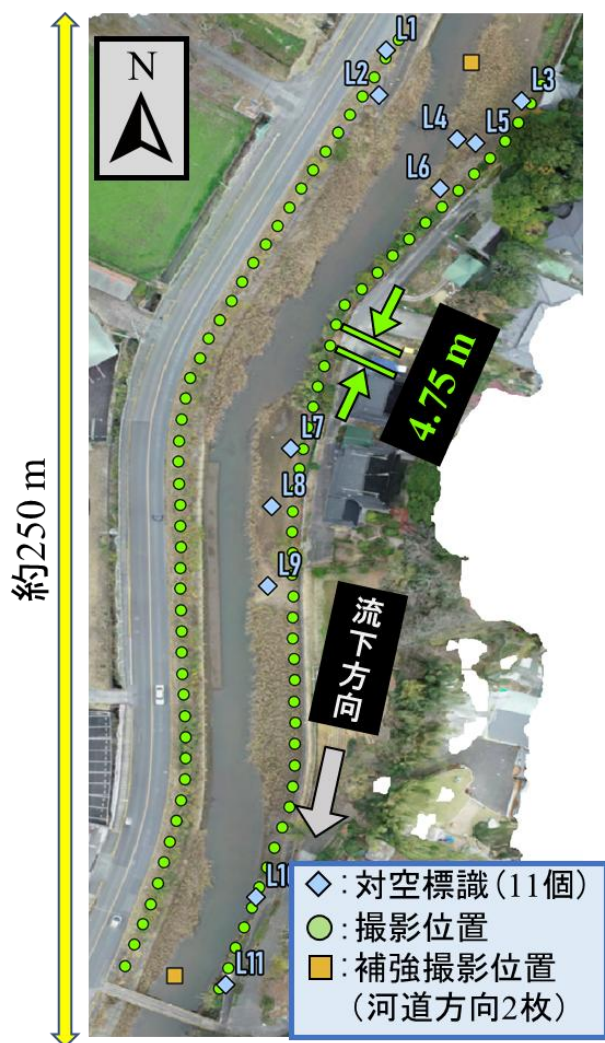


図-3 対象領域全景（オルソモザイク画像）と撮影位置・補強撮影位置および対空標識の配置

2. 現地実験

a) 実験方法

図-3 に対象区間の全景及び、撮影位置・対空標識などの配置を示す。配置した 11 個の対空標識は後述の各解析において、未知の座標点として評価に使用する用途（検証点），または既知の座標点として解析に使用する用途（標定点）で用いる。各対空標識は RTK-GNSS 測位による地上測量で正確な座標を取得した。使用 UAV は DJI の Phantom 4 RTK であり、この搭載カメラによる撮影写真の画素サイズは 5472×3648 pix である。天底角（鉛直下向きからの角度）は 20°，撮影時の UAV の対水面高度は約 72 m，同一コース内の撮影位置の間隔は 4.75 m である。撮影枚数は、各コース 47 枚の計 94 枚，対象領域の河道幅は、19~25 m 程度である。撮影は、実基準局方式で 2 回，VRS（仮想基準局）方式で 1 回行ったが、実



図-4 撮影写真の例（東岸上流部で撮影した写真）

表-1 Case 1~4 のバンドル調整・ジオリファレンスに用いた情報

Case	バンドル調整		ジオリファレンス	
	撮影位置 情報	標定点	撮影位置 情報	標定点
1	使用		使用	
2	使用		使用	使用 (L1,L3,L11)
3	使用	使用 (全11個)	使用	使用 (全11個)
4	使用			使用 (全11個)

基準局方式には RTK-GNSS 測位に問題が生じたため、本稿では VRS 方式で撮影した写真を使用した解析のみ扱う。撮影した写真の一例を図-4 に示す。

b) SfM 解析と誤差評価の主な流れ

RTK-GNSS 測位により取得した撮影位置情報を含んだ UAV による空撮写真を用いて SfM 解析を実施する。まず、各写真の特徴点を抽出し、特徴量を計算する。次に、類似の特徴点を持つ写真間で特徴点同士のマッチング（タイポイントの生成）をする。続いて、カメラパラメータ（各写真の撮影位置・向き、レンズの焦点距離・歪みなど）の推定・最適化（バンドル調整）を行い、最後にジオリファレンス（世界座標系への合わせ込み）を行う。その後、複数枚の写真上の対空標識の中心の一点を自動検出および判読し、各カメラパラメータをもとにそれらの点の座標の三角測量を行う。最終的にそれらの測量結果を用いて、検証点誤差（検証点の三角測量による座標推定値と地上測量結果の差）や標定点残差（ジオリファレンスの過程で標定点の座標を最適化で余った値）等々を評価す

表-2 Case 1 における各対空標識の検証点誤差 (m)

対空標識	Case 1			
	東西	南北	鉛直	三軸合成
L1	0.000	-0.006	0.176	0.176
L2	0.038	-0.007	0.181	0.185
L3	0.026	-0.011	0.100	0.103
L4	-0.016	0.023	0.139	0.142
L5	0.008	-0.026	0.135	0.138
L6	0.035	-0.022	0.060	0.073
L7	0.002	-0.005	0.142	0.143
L8	-0.001	0.009	0.165	0.165
L9	0.002	0.010	0.167	0.168
L10	0.022	-0.011	0.136	0.138
L11	0.001	0.018	0.173	0.174
RMS	0.019	0.015	0.147	0.149
標準偏差	0.016	0.015	0.035	0.032

る。うち標定点に関しては、バンドル調整に使用する
場合や、ジオリファレンスにのみ用いる場合がある。
なお本研究では Agisoft の Metashape (ver.2.1.2) を使用
する。実施した解析は表-1 に示した Case 1~4 の 4 種
類であるが、本稿では Case 2, 3 の結果は割愛する。
本稿の Case 1 は、既往研究³⁾の画像セット A+B の場
合の Case 2 に対応する (撮影計画・解析方法が同一)。

c) 撮影の結果

撮影した全ての写真について、撮影位置の RTK-
GNSS 測位解は FIX 解 (整数値バイアスを推定でき
た測位解) であった。撮影時のバッテリー交換も行わ
なかったため、既往研究³⁾と異なり、整数値バイアス
の変化は回避できたものと考えられる。

d) Case 1 の解析結果

表-2 に Case 1 における各対空標識の検証点誤差
(m)を示す。水平方向の誤差は RTK-GNSS 測位誤差の
レベル (0.04 m 程度) と小さいものの、鉛直方向の
誤差が大きく、三軸合成の誤差もほとんどが 0.1 m 以
上であり、RMS は 0.149 m と、既往研究³⁾の対応ケ
ース (0.114 m)を超えた。また既往研究³⁾の対応ケ
ースと比べて、水平誤差が小さく鉛直誤差が大きい点
に特徴があった。その主な原因として、SfM により
推定した地表面の形状が誤っていた可能性、地表面
の形状は正しいがそれに対する撮影位置 (対地撮影
位置) が誤っていた可能性が挙げられる。

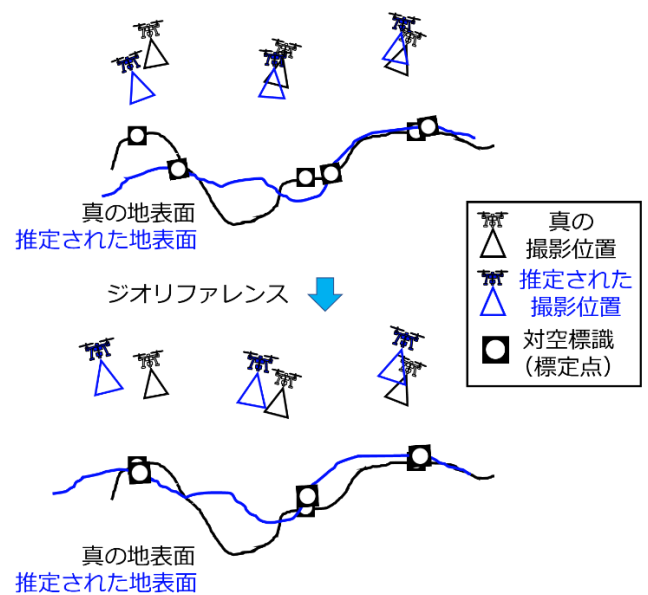


図-5 推定された地表面の形状が誤っている場合の
ジオリファレンス

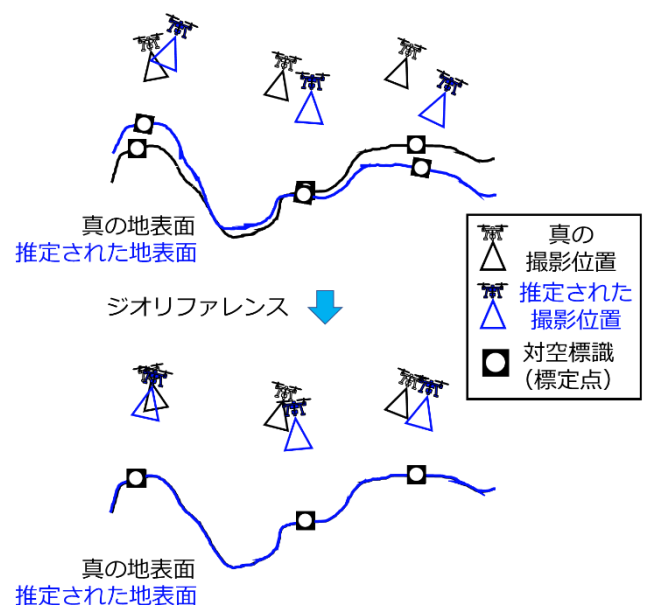


図-6 推定された地表面の形状は正しいが、対地撮
影位置が誤っている場合のジオリファレンス

e) Case 4 の解析の図解と結果

標定点を用いてジオリファレンスを行う Case 4 の
解析の図解として、図-5 に推定された地表面の形状
が誤っている場合のジオリファレンスの例を、図-6
に推定された地表面の形状は正しいが、対地撮影位
置が誤っている場合のジオリファレンスの例を示す。
図-5 より、地表面の形状が誤っていると、標定点残
差が大きくなり、推定値と真値の座標系を合わせら

表-3 Case 4 における各対空標識の標定点残差 (m)

対空標識	Case 4			
	東西	南北	鉛直	三軸合成
L1	-0.016	0.002	0.004	0.016
L2	0.017	0.001	0.001	0.017
L3	0.010	-0.003	0.000	0.011
L4	-0.019	0.022	0.002	0.029
L5	-0.002	-0.015	0.002	0.015
L6	0.017	-0.013	-0.006	0.022
L7	-0.006	-0.002	-0.004	0.007
L8	-0.007	0.007	-0.001	0.009
L9	-0.004	0.007	0.000	0.008
L10	0.013	-0.011	0.000	0.017
L11	-0.004	0.007	0.002	0.008
RMS	0.012	0.010	0.003	0.016
標準偏差	0.012	0.010	0.003	0.007

表-4 Case 4 における各軸方向の撮影位置誤差 (m)

撮影位置誤差(m)	Case 4		
	東西	南北	鉛直
最大値	-0.154	0.052	-0.088
最小値	-0.201	0.012	-0.237
標準偏差	0.008	0.009	0.034
誤差RMS	0.174	0.032	0.174

れない。さらに図-6 より、対地撮影位置が誤っていると、撮影位置誤差が大きくなる。

表-3 に各対空標識の標定点残差 (m)を、表-4 に撮影位置誤差 (m)を示す。表-3 より、各軸方向の標定点残差やその RMS (Root Mean Square)は 0.02 m 未満であり、推定された地表面の形状は大きく間違っていないことが示された。また表-4 より、南北方向の撮影位置誤差は全体的に小さいが、東西・鉛直方向にともに誤差 RMS にして 0.174 m と大きく対地撮影位置がずれており、また両者ともに全てが負の誤差であったため、具体的には撮影位置の推定値が実測値と比較して、全体が西側かつ鉛直下側（地表面側）に誤推定されていたことが明らかになった。

3. 現地実験の考察

本研究の現地実験では、既往研究³⁾と同じ小規模

河川の同じ区間を、撮影位置の RTK-GNSS 測位解にコース間で異なる鉛直バイアスが生じないように工夫しつつ、既往研究³⁾と同様に撮影し、同様の解析 (Case 1)を行った。しかし前章に示したように、既往研究の対応ケースと比べて水平誤差は小さく、鉛直誤差は大きいという結果になった。

もちろん、複数回の現地実験の常として、既往研究³⁾とは植生の繁茂状況、風の条件、一部の検証点の配置などが異なり、安易な比較はすべきでない。しかし詳細な解析 (Case 4)により、地表面とカメラの相対位置の推定に誤りがあることが示されており、河道沿い 2 コース撮影による写真群から得られたタイポイントは、撮影位置の RTK-GNSS 測位解をバンドル調整に動員しても、カメラパラメータの推定に不十分となりやすい恐れがある。

撮影位置を動員しないバンドル調整では、特定の単純な撮影計画を用いた場合、カメラパラメータの一部が不定 (共線条件式の解が無数にある状態) となることが知られている⁴⁾。河道沿い 2 コース撮影は、両コースが完全な直線である場合、一定ピッチ角蛇行撮影 (Constant-Pitch (CP) flight pattern) の特別な、より単純な撮影計画とみなせるため、一定ピッチ角蛇行撮影を用いた場合に存在が示されている焦点距離 f などの不定性⁵⁾を少なくとも継承する。河道が直線的であることは多いと考えられ、今回の対象区間でも、両コースは直線に近いと言えなくもない。また、河道の勾配が小さく、全写真の撮影位置を同一高度に計画したため、撮影位置の RTK-GNSS 測位解をバンドル調整に動員しても、焦点距離 f の推定の補助になりにくかった恐れがある (この可能性について、現時点では厳密な検討はしていない)。そのため今回の現地実験でも、一定ピッチ角蛇行撮影から継承した上記の不定性が、焦点距離 f などの推定の不安定性として現れた可能性がある。以下では対策として、補強撮影を用いた対策と、非植生タイポイントの増強による対策の 2 つを検討した。

4. 補強撮影を用いた対策

河道沿い 2 コース撮影の簡便性を極力損なわず、効率性に重きを置いた補強撮影の方法として、対象領域の上端から下流側、下端から上流側にそれぞれ河道方向の撮影を加える方法と、河道中心での鉛直

表-5 補強撮影を加えて実施した Case 5, 6 のバンドル調整・ジオリファレンスに用いた情報

Case	バンドル調整		ジオリファレンス	
	撮影位置 情報	標定点	撮影位置 情報	標定点
5	使用		使用	
6	使用		使用	使用 (全11個)

下向き撮影を 1 コースだけ加える方法を提案する。これにより、一定ピッチ角蛇行撮影の特別な場合からの離脱や、異コース間のマッチングの橋渡しにより、カメラパラメータの推定が改善することが見込まれる。本来であれば、実際に現地で追加の補強用写真を撮影し、解析に使用できることが望ましいが、現場の再現が困難であることなどから、CG 空間でのレンダリングを用いた。具体的には、撮影位置情報と標定点を使用した現地写真の SfM 解析で得た点群データを用いて、MVS (Multi-View Stereo) とメッシュ化処理 (近接する点同士を結び、面として構築する処理) を行い、CG モデルを作成した。そのモデルをレンダリングし、補強撮影の写真とみなして、現地の写真群に追加して解析を実施した。なお使用した CG モデルにおいて、水面や河床の再現は困難であったため、モデル内の該当箇所は削除して用いた。

検証する補強撮影の方法としては 2 種類であるが、河道方向への補強撮影を加える手法に関して、上流端および下流端に 1 枚ずつ (計 2 枚) を加えるものと、対象領域の内側でもう 1 枚ずつ撮影を加え、上流側 2 枚・下流側 2 枚の計 4 枚で補強するものも検証した。河道方向の補強撮影は天底角 20°である。また、鉛直下向きの補強撮影では、計 24 枚の鉛直下向き撮影を加えた。最後に、これらの補強撮影全 28 枚 (河道方向撮影 4 枚と鉛直下向き撮影 24 枚) を追加した解析も実施した。本概要では紙面の都合上、上流端および下流端に 1 枚ずつ (計 2 枚) を加えたもののみ紹介する。図-3 内に、2 枚の補強撮影の撮影位置を示した。なお SfM 解析には、補強撮影の位置情報は使用しなかった。加えて補強撮影の写真上では、対空標識の中心点の自動検出・判読は行わなかった。補強撮影の高度は、現地実験と同じ 72 m とした。表-5

表-6 Case 5 における各対空標識の検証点誤差 (m)

対空標識	Case 5			
	東西	南北	鉛直	三軸合成
L1	0.002	0.003	0.081	0.081
L2	0.027	-0.004	0.072	0.077
L3	0.016	-0.011	0.062	0.065
L4	-0.001	0.006	0.068	0.068
L5	0.008	-0.023	0.059	0.064
L6	0.021	-0.019	0.068	0.074
L7	0.001	-0.004	0.071	0.071
L8	-0.001	0.009	0.089	0.089
L9	0.002	0.010	0.077	0.078
L10	0.015	-0.005	0.077	0.078
L11	-0.001	0.018	0.091	0.093
RMS	0.013	0.012	0.075	0.077
標準偏差	0.010	0.012	0.010	0.009

表-7 Case 6 における各軸方向の撮影位置誤差 (m)

撮影位置誤差(m)	Case 6		
	東西	南北	鉛直
最大値	-0.029	0.027	-0.047
最小値	-0.077	-0.015	-0.109
標準偏差	0.008	0.009	0.014
誤差RMS	0.050	0.010	0.080

に補強撮影を加えた写真セットで実施する SfM 解析に使用した情報を示す。実施した解析は、Case 5 と Case 6 であり、それぞれ Case 1 と Case 4 と同じ条件の解析である。

表-6 に Case 5 における検証点誤差 (m) を示す。補強写真を加える前の Case 1 では、0.15 m 程度あった鉛直方向および三軸合成の検証点誤差 RMS が、0.075 m 程度まで大幅に低減されており、補強写真の追加による改善がみられた。

表-7 に Case 6 における撮影位置誤差 (m) を示す。補強撮影の追加により、東西・鉛直方向の誤差 RMS が 0.174 m からそれぞれ 0.050 m と 0.080 m となっており、補強写真の追加が対地撮影位置の誤りを大きく改善したことが分かる。以上より、少数枚の補強撮影の追加が、河道沿い 2 コース撮影の脆弱性の解消に対して有効である可能性を示したといえる。

表-8 補強撮影を加えて実施した Case 7, 8 のバンドル調整・ジオリファレンスに用いた情報

Case	バンドル調整		ジオリファレンス	
	撮影位置 情報	標定点	撮影位置 情報	標定点
7	使用		使用	
8	使用		使用	使用 (全11個)

表-9 Case 7における各対空標識の検証点誤差 (m)

対空標識	Case 7			
	東西	南北	鉛直	三軸合成
L1	0.008	0.003	0.071	0.071
L2	0.038	-0.007	0.070	0.080
L3	0.026	-0.015	0.060	0.067
L4	0.009	0.003	0.073	0.073
L5	0.018	-0.026	0.066	0.074
L6	0.029	-0.023	0.073	0.082
L7	0.007	-0.011	0.074	0.075
L8	0.004	0.002	0.094	0.094
L9	0.006	0.001	0.078	0.078
L10	0.012	-0.006	0.095	0.096
L11	-0.003	0.023	0.108	0.111
RMS	0.018	0.014	0.080	0.083
標準偏差	0.012	0.013	0.014	0.012

表-10 Case 8における各軸方向の撮影位置誤差 (m)

撮影位置誤差(m)	Case 8		
	東西	南北	鉛直
最大値	-0.004	0.024	-0.046
最小値	-0.063	-0.023	-0.114
標準偏差	0.011	0.010	0.015
誤差RMS	0.030	0.011	0.082

5. 非植生タイポイントの追加による対策

河道内外に存在する植生は、その複雑な立体構造と風による揺れのため、タイポイントの質と密度を下げる要因、結果としてカメラパラメータの不安定性を助長する要因となる。そこで、カメラパラメータの推定を補助するため、解析前に予め対象領域内の

植生でない点を、タイポイントとして増強する対策を試みた。具体的には、対象領域内の植生でない 100 点に、Metashape の Guided Marker Placement と Refine Markers 機能を活用してタイポイント（Metashape 上の呼称は「マーカー」）を定義し、その状態で Case 1 と Case 4 と同様の SfM 解析を実施した。それらの解析を Case 7 と Case8 とした（表-8）。

表-9に Case 7における検証点誤差 (m)を示す。Case 1 で 0.15 m 程度あった鉛直方向および三軸合成の検証点誤差 RMS が、両者 0.083 m 以下まで大きく低減しており、非植生タイポイントの追加による改善がみられた。

表-10に Case 8における撮影位置誤差 (m)を示す。Case 4 で東西・鉛直方向に 0.174 m あった誤差 RMS がそれぞれ 0.030 m, 0.082 m と、どちらも 0.1 m 以下になっており、非植生タイポイントの追加により対地撮影位置の誤りを大きく改善できていたことが分かる。以上のことから、非植生タイポイントを追加による対策も脆弱性の解消に有効であることが分かった。

6. まとめ

河道沿い 2 コース撮影を用いた UAV 写真測量の実験を小規模河川で実施したところ、撮影位置の RTK-GNSS 測位解をバンドル調整に動員しても、地表の検証点に 0.1 m を超える鉛直誤差を生じ、カメラパラメータの推定が不十分であった。つまり河道沿い 2 コース撮影の弱点は、既往研究が指摘した、コース軸周りのジオリファレンスの回転が生じやすいという点だけではないことが明らかになった。

カメラパラメータの推定精度が不十分であった原因として、コースが直線の場合に存在する可能性のある内部パラメータの不定性に由来する、カメラパラメータ推定の不安定性が挙げられる。そこで対策として、少数枚の補強撮影を追加して不定性の影響を回避する方法や、非植生タイポイントを追加してカメラパラメータ推定の安定性を向上させる方法を検討し、これらによって検証点誤差を大きく低減できる可能性を示した。

謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費(22K04333)の助成を受け

て実施した。

参考文献

- 1) 市川健, 佐藤翔輔, 橋本雅和, 天谷香織, 今村文彦: 中小河川の維持管理に関する実態調査, 日本自然災害学会誌 41-1, pp.39-55, 2022.
- 2) 高橋剛一郎, 角貝亮, 宮本卓, 松浦良輝, 滝口裕次, 小川光雄, 宮平永一郎, 林達夫: UAV を用いた河道地形測量手法の検討, 土木学会論文集 G (環境), Vol.75, No.5, I_313-I_322, 2019.
- 3) 垣原巧, 神野有生, 近淳之介, 町野公康, 松田祥嗣, 笠野寛太, Truc Thanh Ho, 関根雅彦, 山本浩一, 今井剛, 樋口隆哉: 小規模河道の UAV 写真測量のための 2 コース撮影手法の提案, 日本写真測量学会令和 5 年度年次学術講演会発表論文集, pp.31-32, 2023.
- 4) Peter Sturm, Critical Motion Sequences for Monocular Self-Calibration and Uncalibrated Euclidean Reconstruction, IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR '97), pp.1100-1105, 1997.
- 5) Ho TT, Sato R, Kanno A, Imai T, Yamamoto K, Higuchi T: Indeterminacy of Camera Intrinsic Parameters in Structure from Motion Using Images from Constant-Pitch Flight Design, Remote Sensing, 17 (12) 2030, 2025.