

植生が繁茂した中小河川におけるUAV写真測量を用いた河道形状把握手法の開発

いちかわけん なすのあらた あまやかおり さとうけいじ ならだてすすむ
市川健¹・那須野新¹・天谷香織¹・佐藤慶治¹・檜館晋¹

¹株式会社復建技術コンサルタント（〒980-0012 仙台市青葉区錦町1丁目7番25号）

多くの中小河川では、正確な河道形状データの不足により流下能力が適切に評価されていない。簡易かつ安価な河道形状把握手法としてUAV写真測量が挙げられるが、植生下の地表面標高の把握が困難であった。本研究では、中小河川における流下断面及び堤防高の把握に最適なUAV写真測量手法の開発を目的として、河川特性が異なる中小河川（6河川）において、高度・カメラ角度の撮影条件を変化させたUAV写真測量による3次元点群と実測値との比較検証を行った。その結果、冬季撮影の高度50m・鉛直下方と高度40m・俯角70度のケースにおいて、流下断面積の誤差率4~5%（RMSPE）、堤防高の誤差8~10cmが再現できた。

Key Words : UAV写真測量, SfM, 河道管理, 中小河川

1. はじめに

自治体管理の中小河川において、洪水による氾濫が頻発しており、治水対策や浸水想定のために河川の流下能力の評価が求められている。流下能力評価を行うためには、河道の流下断面積等の測量データが必要となるが、多くの中小河川では測量データが不足しており、正確な河道形状が把握されていない。併せて、自治体の財政事情により、流下能力評価が進められていない状況である。

流下能力評価に必要な地表面の標高を把握する手法として、従来の地上横断測量や、Unmanned Aerial Vehicle（以下、UAV）とレーザーを組み合わせたUAVレーザー測量が開発されているが、計測費用が高価であり、自治体で容易に業務委託できるものではない。

それらに対し、UAV搭載カメラで撮影した画像を用い、写真合成により3次元形状を復元する技術（以下、SfM：Structure from Motion）により地形を把握するUAV写真測量はコスト的に優れている。しかし、この手法は、植生繁茂下の地表面の標高を捉えにくいという欠点があるため、河道形状把握への利活用が限定的となっている。また、UAV-SfMの河川管理への活用に関連する既往研究として、砂防ダム上流の土砂捕捉量算定、河床表層の粒径の平面分布算定、等多くの事例があるが、植生繁茂下の地表面の標高や流下断面積、樹木繁茂量等を推定する研究は行われていない。

以上の課題に対し、筆者らは、国管理河川において、

UAV写真撮影方法やSfMから得られた3次元点群の処理方法の工夫により、植生繁茂下の地表面の標高や樹木繁茂量を推定できることを現地実証で証明している。

また、仙台市管理の中小河川でも現地実証を行っている。このフィールドは、堤防上の樹木が河床をオーバーハングし上空から河道内が見えにくい区間が存在、法勾配が5分の立ち護岸を有する掘り込み区間が存在する等の特徴があった。それらに対し、冬季にUAV写真撮影を実施し、垂直写真に斜め写真を加えSfMを行うことで、植生下の地表面標高を把握できることが確認された。

しかしながら、市街地内での撮影であったことから、撮影高度やカメラ角度に制限があり、幅10m程度の掘り込み河道に限定されていたことから、現地実証のカバー範囲としては不十分である。

以上のことより、植生繁茂下におけるUAV写真測量から取得される点群のさらなる精度向上、及び特性が異なる河川への適用を図るためには、斜め写真の仕様（撮影高度・カメラ角度）の検討が必要と考える。

そこで本研究では、植生が繁茂した中小河川における流下断面積、及び堤防高の把握に最適なUAV写真測量手法を開発することを目的として、複数の河川で実証を行った。具体的には、河川特性が異なる複数の中小河川を選定し、斜め写真の撮影条件を変化させUAV写真測量を実施した。そして、得られた各画像を用いてSfMにより算出した3次元点群から流下断面積や堤防高等を算出し、これらに対し、地上横断測量を真値として、流下

表-1 検証サイトの概要一覧

| 河川管理者 | 河川名 | 流路延長 (km) | 計画高水流量 (m ³ /s) | セグメント (河床勾配) | 河床材料 | 平均川幅 (m) | 平均水深 (cm) | 透視度 (cm) | 植生 |
|-------|---------|-----------|----------------------------|---------------|------|----------|-----------|----------|---------------------|
| A県 | (二級) K川 | 20.7 | 950 | 1 (1/200) | 礫 | 100 | 50 | 50以上 | 高木やや密 草本粗 除草済 |
| B県 | (一級) S川 | 63.4 | 1,600 | 2-2 (1/2,500) | 砂 | 250 | 200 | 50 | 高木やや密 草本密 除草未 |
| C県 | (二級) N川 | 40.9 | 1,650 | 2-2 (1/800) | 砂 | 200 | 50 | 50以上 | 高木密 草本密 除草済 |
| | (一級) T川 | 21.9 | 160 | 2-1 (1/400) | 砂 | 50 | 50 | 50以上 | 木本点在 草本密 除草済 |
| | (一級) N川 | 7.8 | 140 | 2-1 (1/400) | 砂 | 50 | 50 | 50以上 | 木本点在 草本密 除草未 |
| D市 | (二級) K川 | 3.9 | 97 | 2-1 (1/400) | 砂 | 50 | 50 | 50以上 | 木本点在 草本密 除草済 |

断面積や堤防高の精度の比較を行った。

得られた結果から、河道特性に応じたUAV写真測量の標準手法やUAV写真測量で得られる3次元点群や写真の副次的な河道管理への活用方策について考察する。

2. 方法

(1) 検証サイト概要

本研究では、セグメントや植生の繁茂状況、除草の有無等に着目し、東北地方～関東地方の4自治体6河川を選定し検証サイトとした。各河川の概要を表-1に整理した。

特筆すべき点に除草の有無と冬季における植生の枯死状態がある。6河川のうち、B県S川は農道に面する箇所以外は除草が未実施で、夏季にヨシやクズ類が繁茂し、冬季でも植生が完全に枯死しない状況であった。なお、B県は関東地方、その他5河川は東北地方に位置する。

(2) UAV写真測量による河道形状把握手法 (新手法)

a) UAV写真撮影 (撮影高度とカメラ角度)

本研究の主要機材であるUAVは、流通性が高く、自律飛行が可能で、RTKモジュールを搭載した標定板の設置を不要とするPhantom4 RTK (DJI社製)を選定した。撮影時期は、植生や降雪の影響を考慮し、落葉後から降雪前の2019年12月6日～12月13日 (各河川1～2日間)とした。撮影範囲は、横断方向は川幅 (30～350m)、縦断方向は約2kmとした。飛行ルートは図-1に示すように流軸に沿って、オーバーラップ率80%、サイドラップ率60%とし、飛行速度3～4m/sで静止画撮影を実施した。飛行ルート数は、川幅に応じて3～10本に設定した。なお、安全面の観点から、飛行ルートは河川区域内とし、対地高度を30m以上確保するよう設定している。

SfMに使用するUAV写真は、垂直写真 (撮影高度50m) と斜め写真とした。撮影高度、及びカメラ角度、撮影ケースを図-2、表-2に示す。撮影高度とカメラ角度の組合せから撮影ケースは3ケースとした。斜め写真の撮影向きは、流軸方向を向いて撮影を行った。また、それぞれの写真の地上解像度が1.5cm/pixとなるように、斜め写真の撮影高度とカメラ角度を設定した。



サイドラップ率：60% オーバーラップ率：80%
 →：飛行ルート(右岸より) ←：飛行ルート(左岸より)
 ※川幅によって本数の変更あり 流軸に沿って撮影

図-1 UAV写真撮影の飛行ルートの一例 (平面図)

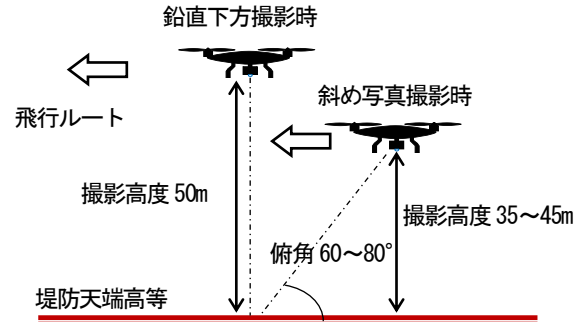


図-2 UAV写真撮影のカメラ向きおよび対地高度 (横断面図)

表-2 UAV写真撮影の垂直写真と斜め写真条件一覧

| 撮影ケース | 高度 | カメラ角度 |
|--------|--------------------|-------------------|
| 撮影ケース① | ・ 高度50m ・ 高度45m | ・ 鉛直下方 ・ 俯角80度 |
| 撮影ケース② | ・ 高度50m ・ 高度40m | ・ 鉛直下方 ・ 俯角70度 |
| 撮影ケース③ | ・ 高度50m ・ 高度35m | ・ 鉛直下方 ・ 俯角60度 |

なお、カメラ角度や地上解像度の設定にあたり、カメラの向きを水平に近づけすぎないように、垂直写真と斜め写真の地上解像度が異なるよう工夫をしている。

b) SfMによる3次元点群発生

UAV写真撮影から得られた2,000万画素の静止画を用いて、撮影時の位置情報、及び写真相互の重複対応関係に基づき、SfM処理により水平方向と鉛直方向の位置情報を持つ3次元点群を作成した。写真合成ソフトは、市販のMetashape (Agisoft社)を使用した。解析パラメータは一般的な設定値を採用した。なお、SfMから得られた3次元点群の発生密度は、約400点/m²であった。

c) 3次元点群から流下断面積、及び堤防高の抽出

3次元点群から流下断面積、及び堤防高の抽出作業は、低コスト化と技術者による差異が生じないように可能な限り自動化を行った。SfMから得られた3次元点群による横断面図作成には、市販のCADソフトであるV-nas (川田テクノシステム社)を用いた。横断面図は、横断線の幅を10cmに設定し、その線上で得られる点群をCADソフト上で自動的に結線して作図を行った。堤防高については、堤防天端の点群標高を直接読み取った。

3. 結果と考察

(1) UAV写真測量と地上測量の流下断面積の比較

UAV写真測量による3次元点群から得られた流下断面積と地上横断測量による地表面の実測標高値から得られた流下断面積の比較を行った。

ここでは比較対象区分を植生状況に着目し、「植生の影響が少ない河川（植生の繁茂が少ない河川、及び植生が密に繁茂しても冬季に枯死する河川）」と「植生の影響が多い河川（植生が密に繁茂し除草せず冬季にも完全に枯死しない河川）」に区分した。ただし、D市管理のK川は実測値が得られていないため比較対象から除外した。なお、実測値は河川管理者が工事や委託業務で実施した従来手法により取得した地上横断測量データである。

a) 植生の影響が少ない河川

植生の影響が少ない河川（4河川、14断面）の実測値とUAV写真測量から得られた3次元点群の比較結果を表-3 (a) に示す。撮影高度、及びカメラ角度と流下断面積の誤差を整理すると、誤差（実測値とUAV写真測量値のRMSPE）は1.1～9.8%であった。4河川のうち、C県管理のN川（一級河川）については、誤差が大きく生じる傾向が見られた。N川は冬季に植生が枯死するものの、定期的な除草が実施されていない河川である。そのため、枯死した植生が河川内に多く堆積し、その影響を受け点群が枯死した植生の表面付近で発生し、他の3河川と比べて誤差が大きく生じたと考える。

撮影ケース3ケースを比較すると、垂直写真（撮影高度50m）に撮影高度40m、俯角70度の写真を組み合わせてSfMを実施した場合、各河川の平均誤差が4.4%と最も小さい結果を示した。これは、流量の浮子観測誤差（1割程度以上）より小さい誤差である。

また、図-3にはC県管理のT川における実測値と3次元点群（撮影高度40m・俯角70度の写真を使用したケース）の比較結果を示した。図中の黒線が実測値、青線が3次元点群からCADソフトで自動結線した線分である。3次元点群が実測値よりもやや上方向に作図されている部分が見られるが、これは他の断面でも確認できる共通した事象である。3次元点群の一部が地表面ではなく、枯れた植生の茎や根本付近の葉の影響を受け、それらの表面にて点群が発生したためと考える。

b) 植生の影響が多い河川

植生の影響が多い河川（1河川、2断面）の実測値とUAV写真測量から得られた流下断面積の誤差を表-3

(b) に示す。誤差（実測値とUAV写真測量値のRMSPE）は、断面補正を行わない場合は20%程度、断面補正を実施した場合は7～9%程度であった。なお、ここで「断面補正なし」とは、SfM解析で得られた3次元点群を、技術的に全く手を加えずCADソフトで自動的に結線したものである。また、「断面補正あり」とは、UAV写真撮影で得られた静止画や現地踏査結果、高水

表-3 (a) 植生の影響が少ない河川での流下断面積の比較

| 対象河川 | 精度検証項目 | 撮影ケース | | | |
|------------|--------|-------------------|------------------|------------------|-----|
| | | ① | ② | ③ | |
| | | 鉛直下方 45m俯角80度 | 鉛直下方 40m俯角70度 | 鉛直下方 35m俯角60度 | |
| A県 K川 | 二級河川 | 流下断面積 RMSPE(%) | 3.5 | 3.5 | 3.9 |
| C県 N川 | 二級河川 | | 1.1 | 1.1 | 2.0 |
| C県 T川 | 一級河川 | | 4.3 | 4.2 | 4.2 |
| C県 N川 | 一級河川 | | 9.8 | 8.8 | 8.5 |
| 平均RMSPE(%) | | | 4.7 | 4.4 | 4.7 |

(n=14断面)

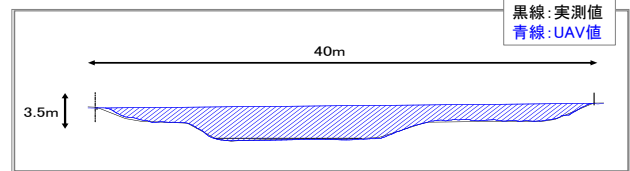


図-3 T川実測値と点群の流下断面積比較結果
(撮影高度40m、俯角70度)

敷の形状等を鑑み、3次元点群の中で低い位置を示した点を参照し、河川技術者がCADソフトで断面を補正したものを指す。

図-4には、B県管理のS川の実測値と断面補正前後の横断図を整理した。黒線が実測値、赤線が補正前の点群から自動結線により取得した横断図、青線は河川技術者が補正作業を行った横断図である。なお、ここで示した断面補正の方法であるが、技術者によって差異が生じないよう、次のようなルールを定めて実施した。

- ・ UAV写真測量から得られたオルソ画像や空撮写真を用いて、作成した点群からエラーデータ（水面等で乱反射している点群等）の削除
 - ・ エラーデータを削除した点群の最低点を選定し、断面の補正
 - ・ 現地踏査結果（植生繁茂範囲、植生高等）を反映し、横断図の植生繁茂箇所の再修正
 - ・ 周辺で再度断面を取得し、補正断面の確認、修正
- 植生が冬季でも完全に枯死せず、植生の影響が多い河川では、単純に得られた点群を自動的に結線するのではなく、河川技術者がいくつかの情報を整理したうえで断面補正を行うことで、誤差を7～9%程度（補正前の半分以下）まで改善できることが把握された。

(2) 3次元点群による堤防高の推定

堤防高を把握するため、UAV写真測量から得られた3次元点群と地上横断測量から得られた実測値を比較した。堤防高の実測値は、前述の流下断面積の比較検討で用いた横断データの堤防天端部の標高値を採用した。また、UAV写真測量時の撮影高度やカメラ角度、SfM解析仕様は流下断面積検討時と同様に設定した。

植生の影響が少ない河川（4河川、14断面、両岸）の実測値とUAV写真測量から得られた3次元点群の比較結果を表-4に示す。撮影高度、及びカメラ角度と堤防高の誤差を整理すると、誤差（実測値とUAV写真測量値のRMSE）は3～38cmであった。撮影ケース3ケースを比較すると、垂直写真（撮影高度50m）に撮影高度40m、

表-3 (b) 植生の影響が多い河川での流下断面積

| 対象河川 | 対象断面 | 精度検証項目 | 断面補正有無 | 撮影ケース② | |
|----------|------|--------|--------|--------|----------|
| | | | | 鉛直下方 | 40m俯角70度 |
| B県 S川 | a | 流下断面積 | 補正なし | 20.3 | |
| | | | 補正あり | 9.4 | |
| | 補正なし | | 18.9 | | |
| | 補正あり | | 7.6 | | |

(n=2断面)

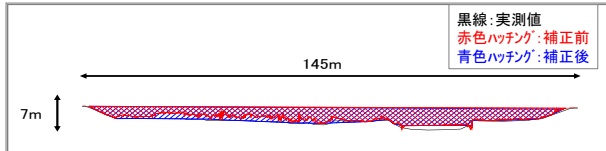


図-4 植生が枯死しない条件下での断面補正例 (S川)

俯角70度の写真を組み合わせてSfMを実施した場合、各河川の平均誤差が8cmと最も小さい結果を示した。

ここで、UAV写真測量から得られる堤防高の精度について、C県管理のT川を例にして考える。T川の河川幅は50m程度であるため、表-5に示した河川定期横断測量の陸部で求められる測量精度は約6cmとなる。垂直写真（撮影高度50m）に撮影高度40m、俯角70度の写真を組み合わせてSfMを実施した場合の誤差は7cmであり、これより河川定期横断測量の陸部で求められる測量精度と同程度と考えられる。

また、図-5には、C県管理のT川における実測値と3次元点群（高度40m・俯角70度の写真を使用したケース）の堤防高の比較例を示した。図中の黒点が実測値、赤点がUAV写真測量から得られた点群である。表-4に示す誤差は、実測値である黒点とその直近に位置する赤点の標高値との差を示している。

(3) UAV写真測量による中小河川の河道管理への活用

以上より、河川特性が異なる複数の中小河川における現地実証から、植生が繁茂する中小河川の流下断面積、及び堤防高等の把握にUAV写真測量が精度・技術面の評価から有効であることが把握された。

従来手法である地上横断測量は、作業量の問題から縦断的に粗な横断データを取得せざるを得ず、流下能力が小さい区間の取りこぼしが発生する可能性がある。一方、新手法であるUAV写真測量は、SfMから得られる3次元点群によって面的に地形データを取得することができ、流下能力評価に影響を及ぼす局所的な河道の変化を取りこぼさず網羅的に把握することが可能である。

流下能力評価に資する解析手法として、平面二次元不定流解析 (iRIC) による計算を行う場合は、SfMで得られた3次元点群データを活用することで計算格子作成時間の大幅な削減（コストダウン）と流下能力弱点箇所の見落とし防止に効果があると考えられる。

4. 結論

本研究では、河川特性が異なる複数の中小河川を対象

表-4 植生の影響が少ない河川での堤防高の比較

| 対象河川 | 精度検証項目 | 撮影ケース | | |
|-----------|--------|----------|----------|----------|
| | | ① | ② | ③ |
| | | 鉛直下方 | 鉛直下方 | 鉛直下方 |
| | | 45m俯角80度 | 40m俯角70度 | 35m俯角60度 |
| A県 K川 | 二級河川 | 0.03 | 0.08 | 0.38 |
| C県 N川 | 二級河川 | 0.10 | 0.10 | 0.19 |
| C県 T川 | 一級河川 | 0.15 | 0.07 | 0.07 |
| C県 N川 | 一級河川 | 0.12 | 0.07 | 0.10 |
| 平均RMSE(m) | | 0.10 | 0.08 | 0.19 |

(n=28箇所)

表-5 陸部横断測量の精度

| 区分 | 距離 | 標高 | 摘要 |
|----|-------|----------------------------------------|-------------------------|
| 平地 | L/500 | $2\text{cm} + 5\text{cm}\sqrt{L/100}$ | Lは中心杭等と末端見通杭の測定距離 (m単位) |
| 山地 | L/300 | $2\text{cm} + 15\text{cm}\sqrt{L/100}$ | |

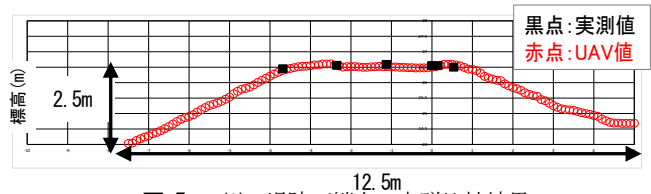


図-5 T川の堤防天端上の点群比較結果

に、撮影条件を変えたUAV写真を用いSfMから算出した3次元点群と現場の実データを比較し実証を行い、植生が繁茂する中小河川における流下断面積、及び堤防高の把握に最適なUAV写真測量手法を開発した。本研究で得られた成果を以下に示す。

- (1) UAV写真撮影方法として、木本類が落葉している冬季に草本類が枯死している条件のもとで静止画撮影を実施し、垂直写真（撮影高度50m・カメラ方向垂直）と斜め写真（撮影高度40m・俯角70度）の両方を用いてSfMを行うケースが河川の流下断面形状、及び堤防高を最も精度良く再現できた。各河川の平均誤差は、流下断面積で4.4%、堤防高で8cmであった。
- (2) 除草をせず冬季に草本類が完全に枯死しない条件の河川の場合でも、地表面付近に発生した点群等を利用し、河川技術者が断面補正を行うことで流下断面積の誤差を18.9%から7.6%に低減させることが可能であった。このとき断面補正に掛かる時間は、1断面あたり0.5時間程度でありコスト面には大きく影響しない。一方、今後、断面作成のルール化、AI等の活用による自動化を図ることで更なるコスト低減が可能になると考える。これより、新手法は今後一層、流下能力評価や維持管理の必要性が高まる中小河川に適していると考えられる。

謝辞：本研究は国土交通省河川砂防技術開発公募「平成31年度、課題名：新技術を活用した中小河川の堤防・河道点検又は分析・評価技術の開発、研究テーマ名：中小河川を対象としたUAV写真測量による流下能力評価手法に関する技術研究開発、研究代表者：復建技術コンサルタント・市川健」の成果を利用したものである。