

UAV写真測量技術の中小河川の河道形状把握への適用に関する研究

瀬崎智之・森本洋一・市川 健・那須野 新

1. はじめに

国が管理する河川においては、概ね5年に1度の頻度で行う定期縦横断測量等によって河道の地形変化を把握している。定期縦横断測量は、従来、水準測量やトータルステーション測量で実施されてきたが、近年、ALB（航空レーザ測深）、UAV写真測量や衛星リモートセンシング等の測量技術の進展が著しく、これらを活用して河道を面的に計測し、河川管理をより効果的に行うことが期待されている。すでにALBについてはその有用性が確認され、平成30年には、「河川定期縦横断測量業務実施要領」が改定され、活用が進められているところである。

国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究室では、令和元年度から、特に中小河川の状態把握手法について研究を行っている。この一環として、中小河川の状態把握にUAV写真測量を活用する研究と衛星リモートセンシングを活用する研究にそれぞれ委託研究を行っている。本稿は、そのうちの前者の中間成果について報告するものである。

UAV写真測量については、工事の出来形管理や起工測量等で活用されつつあり、公共測量用マニュアル（案）¹⁾も整備されている。河川管理上の状態把握においても、従前より行われてきた水準測量やトータルステーション測量による定期縦横断測量に比べて、面的な観測が可能である利点があり、活用が期待されている。このためには、工事の出来形管理等では問題になりにくい、河道内に生えている植物や起伏に富んだ地形の影響等について、検討が必要である。

植物や地形の影響でデータの欠損や精度低下が生じることの抑制手段として、垂直写真と同程度の高度でカメラ角度をつけて撮影した斜め写真とを組み合わせることの有効性は既往研究^{2),3)}で確認されている。そこで、本研究では、植生の繁茂状況、河道特性の異なる複数の河川で精度検証を

行うとともに、斜め写真を組み合わせる技術の実装化に向けて、斜め写真の撮影条件を変えた測量を実施し、その効果を確認した。

2. 調査方法

2.1 河道の撮影

検証サイトとして、東北地方の4河川と関東地方の1河川を選定した。各河川の概要を表-1に示す。特に着目すべき点は、植生の状態であり、堤防や表のり面の除草の有無と冬季に植生が倒伏するかしらないかといった点で差がある。

使用機材としては、①流通性が高く比較的安価、②自律飛行が可能、③RTKモジュール（電子基準点でのGNSS観測結果によるリアルタイムの補正情報を受信する装置）を搭載し標定板の設置が不要、といった長所を有するRTK-GNSS搭載の小型UAVを選定した。撮影は、落葉後から降雪前の時期に行うことが有効であることが確認されていることから^{2),3)}、2019年12月6日～12月13日（各河川1～2日間）に実施した。撮影範囲は、横断方向は堤防間（30～350m）、縦断方向は約2kmとした。

飛行ルートは川幅に応じて3～10本設定しており、図-1に示すように、オーバーラップ率80%、サイドラップ率60%、飛行速度3～4m/sである。

垂直写真（撮影高度50m）と併せて、進行方向

表-1 検証サイトの河道特性と植生の繁茂状況

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川	20.7	950	1 (1/200)	礫	100	50	50 以上	高木やや密、草本粗 除草済(川表のり面) 冬季には草本は倒伏
B川	40.9	1,650	2-2 (1/800)	砂	200	50	50 以上	高木密、草本密 除草済(川表のり面) 冬季には草本は倒伏
C川	21.9	160	2-1 (1/400)	砂	50	50	50 以上	木本点在、草本密 除草済(川表のり面) 冬季には草本は倒伏
D川	7.8	140	2-1 (1/400)	砂	50	50	50 以上	木本点在、草本密 除草未 冬季には草本は倒伏
E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 冬季に草本は非倒伏

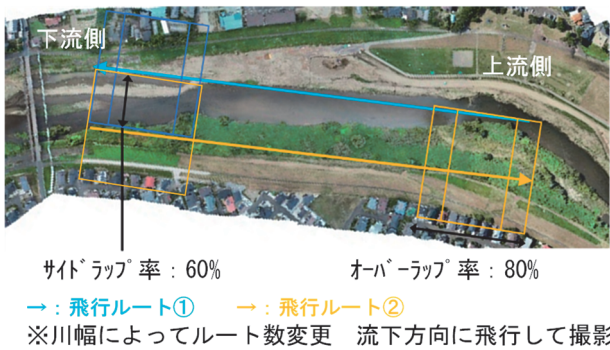


図-1 飛行ルートの設定方法

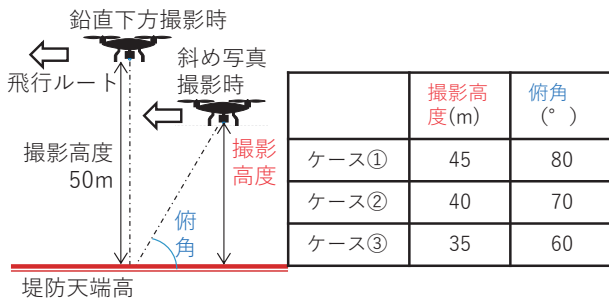


図-2 対地高度とカメラの向きの設定

にカメラを傾けた斜め写真の撮影を行っている。

撮影高度及びカメラ角度は、図-2に示すとおり3ケース設定した。SfM処理（重複して撮影された複数の写真から抽出した多数の特徴点を用い、特徴点の三次元座標等を求める解析処理）を行う上で、垂直写真と斜め写真とで地上解像度を合わせることが重要であり、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ている。

2.2 データ処理

UAV写真撮影から得られた2,000万画素の静止画及びそれらの位置情報と重複対応関係を用いて、SfM処理を行い、発生密度約400点/m²の3次元点群データを作成した。

3次元点群データから、市販のCADソフトを用い、幅10cmに設定した横断測線帯上の点群を自動的に結線して横断図を作成し、断面積を算出している。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

3.1 目標精度

結果を考察する前に、目標とする計測精度を示す。河川定期縦横断測量業務等において、ALBに

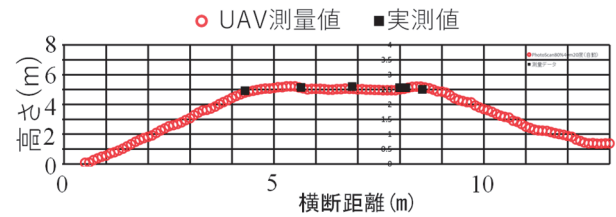


図-3 堤防高の計測結果

表-2 堤防高計測の精度検証結果

対象河川	堤防高の平均誤差 (cm)		
	ケース①	ケース②	ケース③
A川	3.4	8.4	38.2
B川	10.0	10.1	19.4
C川	14.7	7.3	7.1
D川	11.7	6.9	10.2

表-3 橋梁桁下高計測の精度検証結果

対象河川	実測値に対する誤差の割合 (%)		
	ケース①	ケース②	ケース③
A川	9.0	9.9	6.6
C川	2.7	5.8	3.7
D川	2.1	2.5	1.9

よる点群測量の標準的な作業方法や考え方等をまとめた「河川管理用三次元データ活用マニュアル(案)」⁴⁾には、河川管理の目的に応じた三次元データの必要精度が整理されている。これによると、堤防高については5cm程度、河道形状については30cm程度、流下能力を阻害する植生の高さについては50cm程度とされており、これを基本的な目安とする。

河道形状の30cmの誤差は、今回研究対象とする平均水深が5m程度の中小河川では、水深に対して6%程度の誤差であり、マンシングの平均流速公式を用いると、流量では10%の誤差に相当する。同様に、水深で12%の誤差が流量の誤差20%に、水深で18%の誤差が流量の誤差30%に相当する。

河川の川幅が水深の何倍も大きい河川においては、河積（河川の流下断面積）の算出精度は、平均水深の算出精度と同等である。以下では、河積の計測精度についても、上記の目安を参考に考察を行う。

3.2 堤防高・橋梁桁下高の計測

図-3に、C川の堤防のUAV写真測量結果（撮影ケース②）とトータルステーションによる実測値とを比較して示す。図中の黒点と赤点はほぼ一致

している。表-2に、計測区間での実測値を真値とした場合のUAV測量の誤差（二乗平均平方根）を示す。斜め写真の俯角が80°（撮影ケース①）、70°（撮影ケース②）で、10cm前後の平均誤差になっており、目標とする5cmには満たないものの、標定板を設置しない測量でありながら、一定の精度を有することが確認できた。

表-3に、橋脚の桁下高の実測値を真値とした場合のUAV測量の誤差の実測値に対する割合（二乗平均平方根）を示す。桁下高は、特に中小河川において流下阻害となる場合も多く、しばしば計測が必要であるが、3～10%の精度で計測できることがわかった。

3.3 河道地形の計測

河道地形の計測結果の一例を図-4及び図-5に示す。UAV写真測量では、これらの図のような一見して3次元河道表層モデルに見えるような高密度の色つきの点群データが作成される。この成果だけでも管理する河川の地形や地被状況が一目でわかることから、河川管理において有用である。

図-6には、図-4中の赤線で示すC川横断測線上の実測値と3次元点群（撮影ケース②）の一例を比較して示す。なお、図中の黒線がトータルステーションによる実測値、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り、ハッチ部分は兩岸の堤防のり肩までの河積を示している。UAV計測結果は、実測値とほぼ一致している。平均水深が50cm程度である水面下についても、精度良く計測できている。これらの河川では、礫床河川である（A川）、高水敷利用が進んでいる（B川、C川）という理由で植生の量が比較的少なく、観測時点でも植生が枯死して倒伏していることを確認している。

図-7は、図-5中の赤線で示すE川横断測線上の実測値とUAV計測値の比較例を示したものである。ここでもハッチングは、兩岸堤防のり肩までの河積を表している。UAV撮影結果である赤線は実測値である黒線より高い位置にある。C川と異なり、枯死した植生が河川内に多く堆積しているため、点群が枯死した植生の表面付近で発生したものと考えられる。

計測した全河川のUAV測量成果について、実測値に対する誤差の割合を表-4にまとめて示す。まず、河川A、河川B、河川Cについては、1～4%



図-4 UAV写真測量により作成したC川の3次元点群モデル(一部区間)



図-5 UAV写真測量により作成したE川の3次元点群モデル(一部区間)

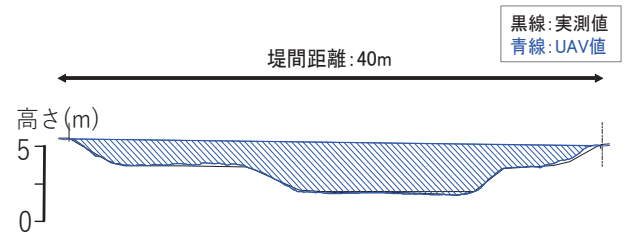


図-6 植生の密度が小さいC川での計測例

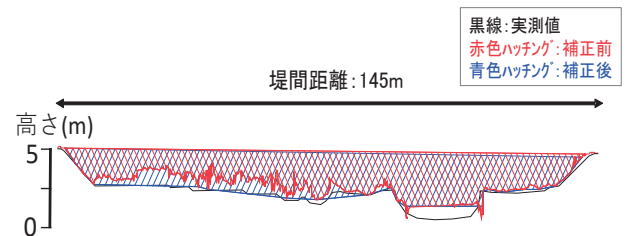


図-7 植生の密度が大きいE川での計測例

表-4 河道計測の精度検証結果

対象河川	実測値に対する誤差の割合 (%)		
	ケース①	ケース②	ケース③
A川	3.5	3.5	3.9
B川	1.1	1.1	2.0
C川	4.3	4.2	4.2
D川	9.8	8.8	8.5
E川(補正前)	18.1	16.1	20.4
E川(補正後)	4.9	7.0	8.9

と高い精度が確認できた。特に俯角80°（撮影ケース①）と70°（撮影ケース②）で、より高い精度で計測できている。これに対して、D川、E川については、実測値との差異がそれぞれ9%

前後、19%前後となった。それぞれ、流下能力算定上で2割、3割程度の差異に相当する。

D川については、冬季に植生が枯死するものの、堤防のり面の除草も実施されていない。E川については関東地方にあるためか、①植生密度が高い、②冬季にあっても植生が倒伏しない、③①②により目視で植生域の地面がほとんどとらえられない、という状況を計測の際に確認している。

次に、植生の表面を計測してしまう誤差が、比較的、簡便な処理によってどの程度除去できるか、検討を行った。具体的には、E川の倒伏していない密な植生のあることが写真で確認される範囲について、技術者が実測値を見ずに、3次元点群の中で低い点をCADソフトで結節する断面図作成を行った。結果を図-7中に青線で示す。これを見ると、高水敷部分は実測値（黒線）に近い形状を示していることがわかる。植生が密生している場合でも斜め写真を加えることで地面近傍でも一定量の点群が生成されているためと考えられる。ただし、E川は水質が悪く、UAV写真測量では水面高を計測してしまっており、水域部の誤差は補正できない。

表-4の下段には、E川の補正後の誤差を記載している。これによると、補正を行った場合の誤差は平均して4.9～8.9%であり、流量1割相当（6%）を少し上回るものもあるが、補正を行えば、精度が大幅に向上する可能性が示唆された。

4. まとめ

中小河川における河道流下断面及び堤防高の把握に最適なUAV写真測量手法を開発するために、河川特性が異なる複数の中小河川で撮影条件を変えた計測を行い、精度の検証を行った。本研究で得られた成果を以下に示す。

(1) UAV写真測量技術により、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）を組み合わせたSfM処理を行うことで、①堤防高、②橋脚の桁下高、③冬季に植生が倒伏する河道の流下断面積を一定の精度で計測することができた。

(2) 高茎草本が密生して冬季にも倒伏しない条件の河川の場合、撮影時期を工夫しても、植生の表面を計測するケースが多く、トータルステーション等で地面を計測する場合と比較して誤差が大きくなる（本ケースでは最大20%）ことがわかった。この場合、植生域について下層の点群を抽出する補正処理を行うことで、5%程度の誤差にまで縮小することが確認できた。

謝 辞

本研究を実施するにあたり、岩手県、宮城県、茨城県及び仙台市の各河川管理者の皆様からデータの提供や現地調査に際して特段のご配慮いただいた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省国土地理院：UAVを用いた公共測量マニュアル（案）、2017
- 2) 齋藤正徳、市川健、湧田雄基、天谷香織、那須野新、小田嶋健太、池内幸司、石川雄章：UAV写真測量における多時期計測データを用いた河道管理手法の検討、河川技術論文集、第24巻、pp.257～262、2018
- 3) 齋藤正徳、市川健、天谷香織、那須野新、佐藤慶治、藤崎雅史、池内幸司、石川雄章：中小河川を対象としたUAV写真測量を用いた流下能力評価手法に関する研究、河川技術論文集、第25巻、pp.169～174、2019
- 4) 国土交通省水管理・国土保全局河川環境課河川保全企画室：河川管理用三次元データ活用マニュアル（案）、2020

瀬崎智之



国土交通省国土技術政策
総合研究所河川研究部河
川研究室 主任研究官
SEZAKI Tomoyuki

森本洋一



国土交通省国土技術政策
総合研究所河川研究部河
川研究室 交流研究員
MORIMOTO Yoichi

市川 健



(株)復建技術コンサルタント
技術センター 課長
ICHIKAWA Ken

那須野 新



(株)復建技術コンサルタント
技術センター 主任
NASUNO Arata