

中小河川を対象としたUAV写真測量を用いた 河道管理手法に関する研究

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・那須野新・天谷香織・佐藤慶治・檜舘晋

(株) 復建技術コンサルタント 技術センター (〒980-0012 仙台市青葉区錦町一丁目7番25号)

本研究は、中小河川のUAV写真測量を用いて容易かつ安価に流下能力を評価する方法を開発することを目的として、撮影時期、撮影方向などのUAV写真撮影方法を検討した。加えて、SfMによって構築された3次元点群から河道横断面図を作成し、流下断面積の精度を検証した。

これらの結果から、植生が少ない冬季に垂直方向と斜め方向の両方のUAV画像を用いてSfMを行った場合、河道の地表面を高精度に再現できることがわかった。さらに提案したUAV写真測量による流下断面積は、従来の地上横断測量による流下断面積と比較して誤差が7.0%であり、作業時間を1/3に短縮できることがわかった。

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、洪水氾濫が頻発しており、洪水対策や治水安全度の把握ために適切な河川の流下能力の評価が求められている。しかし、自治体の財政的な事情により、流下能力を把握することは全国的に厳しい状況である。

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る。

それらに対し、UAV搭載カメラで撮影した画像の写真合成により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、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UAV写真測量の利活用が限定的となっている。

以上の課題に対し、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が、著者ら現地実証で証明された。

一方、中小河川は、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、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る。これらの特徴に対し、従来実施の垂直写真のみ

の写真合成では、流下能力評価に用いる地表面の標高や樹木情報の取得は困難であると想定される。よって、斜め写真を写真合成に加えるなど、河道の特徴に応じた撮影や3次元点群処理の手法を開発するべきと考える。



写真-1 検証サイトの河道状況 (著者らが撮影)

そこで本研究では、中小河川を対象に、異なる条件下でUAV写真撮影(撮影時期、垂直写真撮影と斜め写真撮影)を実施した。そして、得られた各画像から算出した3次元点群を用い地表面の標高や樹木情報を算出した。これらに対し、地上横断測量を用いる従来手法を真値として、流下断面積の精度の比較、および技術者に係る作業時間の比較を行った。以上の実証を通じて、流下能力評価用に最適なUAV写真測量手法を開発する。

2. 方法

(1) 検証サイト概要

本研究では、仙台市が管理する梅田川を検証サイトとした。検証の対象は、市街地を流下する延長約1.7kmの掘り込み河道の区間とした。川幅は5~10m程度、平均河床勾配は1/100である。河道の状況として、落葉樹のヤナギ等が繁茂しており、写真-1に示すように樹木が堤防をオーバーハングしている区間がある。また、護岸は5分程度の立ち護岸となっている。

(2) UAV写真測量による流下能力評価（新手法）

a) UAV写真撮影

Phantom4 Pro (DJI社製) を用い夏季の2018年6月15日とPhantom4 RTK (DJI社製) を用い冬季の2018年12月13日に、UAVによる写真撮影を行った。撮影は横断方向60m、縦断方向1,730mの範囲を実施した。飛行ルートは流軸に沿って自律飛行を行い、飛行速度約2m/sで静止画撮影を実施した。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。次に、カメラ向きおよび対地高度を図-1に示す。樹木が堤防をオーバーハングしている状況下においても、地表面を画像として捉えるように、垂直写真に加え対岸から斜め方向の写真撮影を実施した。地上画素寸法が垂直写真と斜め写真とでほぼ同じになるように

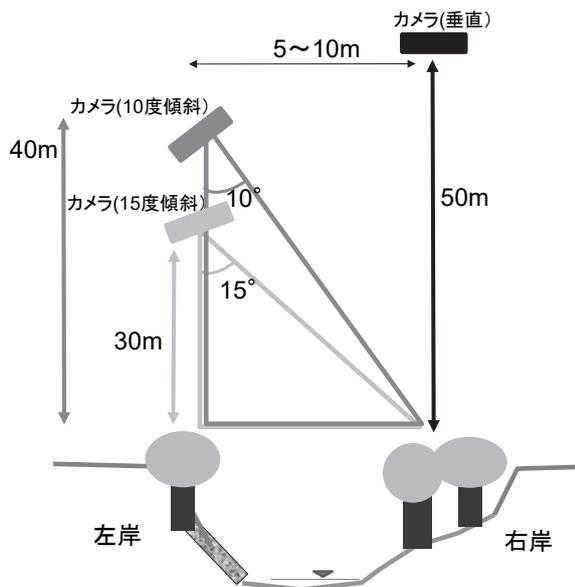


図-1 UAV写真撮影のカメラ向きおよび対地高度（横断面図）

それぞれの対地高度を調整した。これは垂直写真と斜め写真とで地上画素寸法が大きく異なる場合、SfM処理ができないという著者らの経験を踏まえたものである。

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から、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。処理には、市販のAgisoft Photoscanを用いた。Photoscanに入力する解析パラメータは一般的な設定を使用した。3次元点群発生密度は、

静止画の場合で約600点/m²であった。

c) 3次元点群から地表面標高および樹木情報を抽出

技術者の手作業により以下の抽出を実施した。まず、UAV静止画像から植生が繁茂している領域と繁茂していない領域とに分類する。繁茂領域は、3次元点群の鉛直方向の各変動の最低点を示す点群を抽出し、それらの点群から線形補間することや、繁茂していない領域から線形補間することにより地表面の標高を求める。繁茂していない領域は、堤防の端点や最深河床などを捉えている3次元点群を抽出した。これらの抽出された3次元点群により横断面図を作成した。次に、SfMから得られたオルソ画像により把握された樹木繁茂域について、3次元点群の鉛直方向の変動の最高点と最低点の点群の差分値から樹高を推定した。

3. 結果と考察

(1) UAV写真測量と地上測量の地表面標高の比較

UAV写真測量から得られた3次元点群と地上横断測量による地表面の実測標高値との比較を実施した。対象区間において植生が最も繁茂している1000kp付近を比較測線とした。

a) UAV写真撮影の実施時期の比較

UAV写真撮影の実施時期による3次元点群の標高の比較を図-2(c)に示す。夏季に実施したUAV写真測量による3次元点群に対し、冬季の点群の方が地表面の標高を捉える点群が多いことがわかる。これは、図-2(a)(b)に示すUAV垂直写真のとおり、冬季の方が落葉により地面が写りやすくなり、SfM処理に必要な地表面の特徴点をより多く抽出できたことが要因と考える。

b) 垂直写真合成と斜め写真合成の比較

垂直写真のみの合成と垂直写真及び斜め写真の合成との3次元点群の標高差を図-3(a)に示す。垂直写真のみの合成の場合、鉛直方向に河床高がずれていることが確認される。他の横断面図における実測値との比較結果として、ずれていない場合とずれる場合があり、垂直写真のみの合成は不安定であることが把握された。これは流下能力を左右する河床勾配の値に大きく影響するため、垂直写真及び斜め写真の両方を用い合成することが適切であると考えられる。なお、図-3(b)に示す斜め写真の傾斜角度による3次元点群の標高差は確認されなかった。一方、地表面の標高を捉える3次元点群がない領域が一部確認される。この課題に対し、対地高度をさらに下げカメラをより水平方向に傾けるなどの検討が必要と考える。

(2) 3次元点群による横断面図作成および樹高の推定

(1)の感度分析から、流下能力評価に必要な地表面標高を把握するためには、画像の解像度が高い静止画撮影を冬季に実施し、SfMには垂直写真と斜め写真の両方を用いる方法が適していることが把握された。よって、水

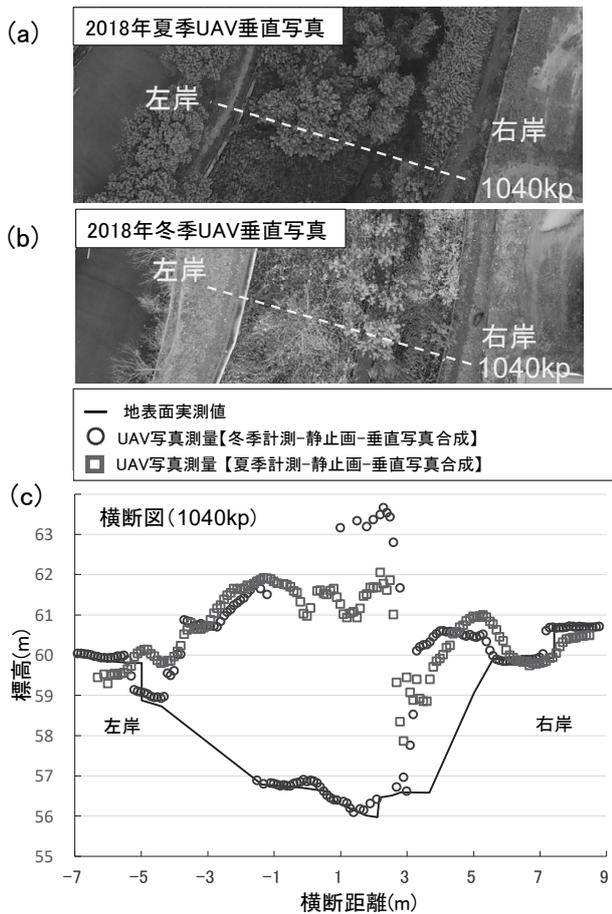


図-2 UAV写真撮影の実施時期の3次元点群の比較 (a: 夏季に撮影したUAV垂直写真, b: 冬季に撮影したUAV垂直写真, c: 1040kp測線の横断面図)

位計算に使用する地表面の横断面図と樹高は、図-4に示す3次元点群を用い、2. (2) c) による方法で地面や樹高を推定した。

a) UAV写真測量から推定した樹高と実測値の比較

樹木が繁茂している5箇所について、冬季のUAV写真測量から得られた3次元点群から推定した樹高と樹木調査による樹高の実測値との比較を図-5に示す。なお、各箇所においてヤナギが繁茂しており、最も高い樹木の樹高を示している。比較結果から、概ね両者は一致しており、UAV写真測量の3次元点群から樹高を推定する方法は有効であることが把握された。

b) UAV写真測量から求めた流下断面積と実測値の比較

流下能力評価に影響する洪水が流下する断面積について、UAV写真測量による方法と実測値である地上横断面測量による方法とで実施した精度の比較を図-6に示す。地上横断面測量を実施した34断面から堰や水門など複雑な構造物が測線にかかっている7断面を除外した27断面で両者を比較した。なお、各横断の流下断面積は各手法で計測した堤防天端高以下から地表面の標高までの面積としている。UAV写真測量による流下断面積は実測値に対し小さく、若干過小評価の傾向となっている。UAV写真測量による誤差として、UAV写真測量の流下断面積と地

上測量との差分値 ΔA を地上測量の流下断面積 A で除した値 $\Delta A/A$ の標準偏差は7.0%であった。

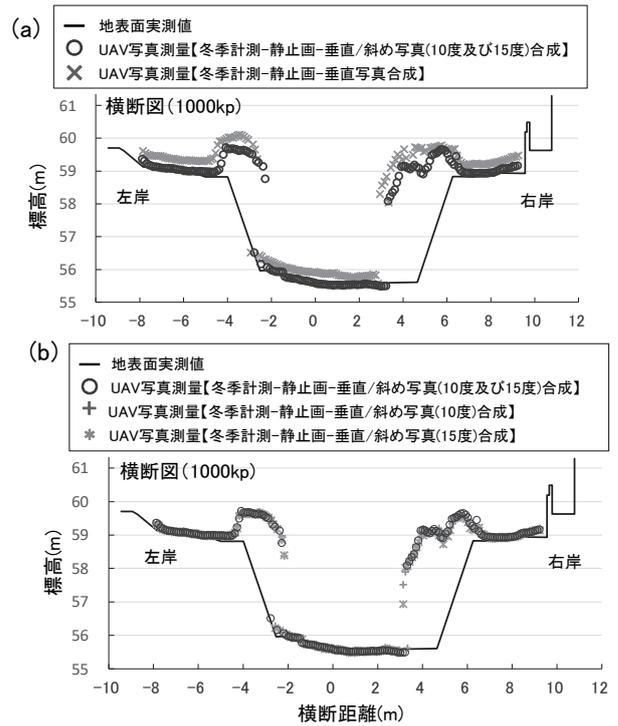


図-3 垂直写真合成と斜め写真合成の3次元点群の比較 (a: 垂直写真のみの合成と垂直写真及び斜め写真の合成との差, b: 合成に使用する斜め写真の角度による差)

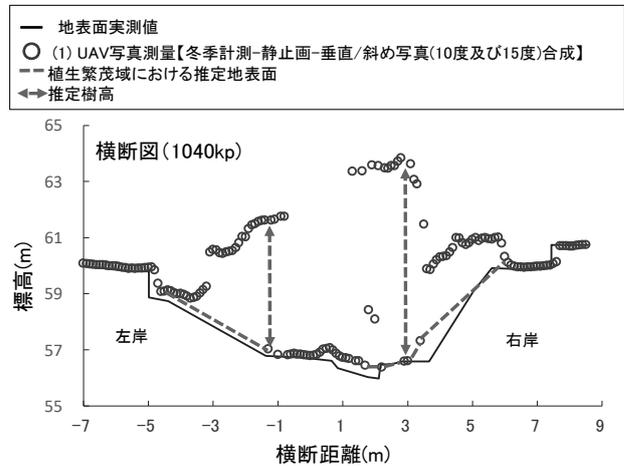


図-4 3次元点群による横断面図作成および樹高の推定

(3) UAV写真測量と地上測量の作業時間比較

UAV写真測量と地上測量について、延長約1,730m区間の実際に要した作業時間を表-1に示す。作業は現地計測の事前準備から流下能力計算に必要な横断面作成や死水域設定までの範囲とした。技術者の作業時間が人件費としてコストに直接影響することから人工を算定している。地上測量の30人工に対しUAV写真測量は11人工であり、約1/3のコストに抑えられている。特に、外業として現地の作業時間が大きく短縮される。UAV写真測量は、

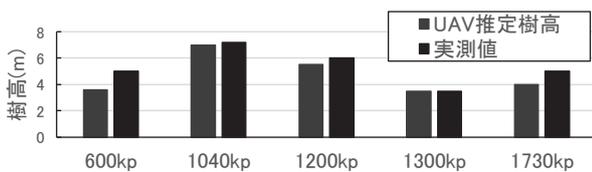


図-5 UAV写真測量による推定樹高と実測値との比較

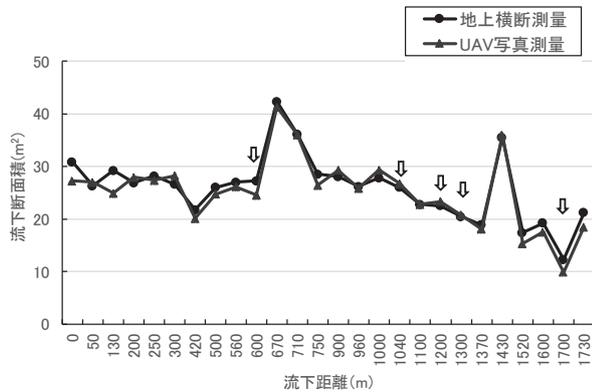


図-6 UAV写真測量と地上横断測量における流下断面積の比較 (▽ : 樹木の繁茂により、水位計算時に死水域設定が必要な断面を示す)

表-1 UAV写真測量と地上横断測量における作業時間の比較

項目	地上測量	UAV写真測量
現地計測 (外業)	手法 トータルステーションにより34断面の地上測量	自律飛行により写真撮影
事前準備	・8時間×2名 現地踏査及び選点作業 ・8時間×2名 GNSSによる基準点設置 【計:4人工】	・4時間×2名 支障物等現場確認 ・8時間×1名 飛行ルートの設定 許可申請等 【計:2人工】
実施作業	・32時間×4名 縦横断測量 ・8時間×4名 樹木調査 【計:20人工】	・8時間×2名 UAV写真撮影 【計:2人工】
横断図作成、死水域設定 (内業)	手法 ・現地で得られたデータ(電子野帳)を測量CADに自動読み込み ・技術者が横断図を作成 ・現地写真および計測データから技術者判断により死水域を設定	・SfMにより点群化し、技術者の手作業により、1)点群変動の最低点を抽出し横断図を作成、2)点群変動の最高点と最低点の差分値から死水域を設定
実施作業	・48時間×1名 計算、作図、整理 【計:6人工】	・16時間×1名 SfM点群化、パソコンによる自動解析に要した120時間は含まない ・40時間×1名 点群から横断図及び死水域設定 【計:7人工】
合計人工	30人工	11人工

雨天時や強風時は実施不可という課題があるが、作業員が河道内に立ち入る必要はなく堤防上から計測できるため、作業員の安全確保の観点からも優れている。一方、横断図作成や死水域設定について、従来手法に対しUAV写真測量は同等の時間を要している。3次元点群の抽出

について、抽出する作業をルール化させ、ルールに基づき作業を自動化させることにより、更なる作業時間の短縮が可能と考える。

(4) UAV写真測量による中小河川の河道管理への活用

以上の中小河川における現地実証から、精度面とコスト面において、UAV写真測量の有効性が把握された。さらに、従来手法に対して新手法のその他の利点について、計算断面の設定と樹木の設定の観点が考えられる。

まず、局所的な断面変化点や堤防の不連続箇所など流下能力に影響する地点を計算断面に任意に設定できる。従来手法である地上測量は作業量の問題から縦断的に粗な横断データとならざるを得ず、流下能力が小さい区間を取りこぼしてしまう可能性がある。一方、新手法であるUAV写真測量は、SfMから得られる3次元点群により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する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できる。これらの地点を計算断面と設定することで適切な流下能力評価が実施可能となる。次に、樹木調査を別途行う必要がなく、3次元点群処理により樹高などを同時に把握し、現地作業を簡素化できる。

以上の検討から、UAV写真測量の流下能力評価への活用の有効性を述べたが、UAV写真測量の処理途中から作成されるデータについて、副次的に他の河道管理への利活用が考えられる。具体的には、1) UAV静止画像を用いて、河道の洗堀や異常堆積、護岸の変状の確認など河川巡視の代替として活用することや、2) 3次元点群を用いて、平常時と被災後の地形の差分データから被災数を迅速に算定し、災害申請等に活用することが想定される。よって、本研究手法は、流下能力評価のみならず、河道管理へ総合的に活用することで、維持管理コスト削減を図りつつ、中小河川の管理の高度化に寄与できると考える。

4. 結論

本研究では、中小河川を対象に、様々な条件で現場の実データを用いて、流下能力評価用に最適なUAV写真測量手法の検証を行った。その結果、植生が落葉している冬季に静止画撮影を実施し、垂直と斜め写真の両方を用いSfMを行うケースが流下断面の形状を精度良く再現できることが分かった。UAV写真測量による流下断面積は、地上測量による手法と比較して、誤差が7.0%であり、1/3の作業時間で実施できる。

さらに、UAV写真測量は勾配や断面の変化点を網羅的かつ連続的に把握可能であり計算断面を任意に設定することや、3次元点群処理により樹高を簡易に把握できることから、新手法は中小河川における流下能力評価に適していると考えられる。