

UAVを用いた公共測量での数値地形図作成について

渡邊 健太¹・大井 哲哉²・山崎 友子²

¹信濃川下流河川事務所 前) 管理課 現) 海岸課 (〒951-8153 新潟市中央区文京町14-13)

²信濃川下流河川事務所 管理課 (〒951-8153 新潟市中央区文京町14-13)

近年建設産業へのICTの導入は活発化しており、2016年3月30日には国土地理院よりUAV（無人航空機）を公共測量に導入するための「UAVを用いた公共測量マニュアル（案）」及び「公共測量におけるUAVの使用に関する安全基準（案）」が策定、公表された。本稿はこれらの制定前に実施したUAVを用いた公共測量での数値地形図作成について、精度検証を行った結果を報告するものである。また、UAVによる空中写真測量成果から三次元点群測量を実施して作成した三次元点群データについても報告する。

キーワード UAV, 空中三角測量, 三次元点群測量, 公共測量, 精度検証

1. はじめに

今後、我が国において生産年齢人口が減少することが予想されている中、建設分野において生産性向上は避けられない課題である。これに対して、現在国土交通省では新たに、建設現場における生産性を向上させ、魅力ある建設現場を目指すことを目的とした、i-Construction（アイ・コンストラクション）という取り組みを進めている。このi-Constructionでは、2016年度から新たに15の新基準及び積算基準を導入し、建設事業プロセス全体の最適化を図ろうとしている。この2016年度から新たに導入する新基準は調査・測量、施工、検査と多岐の分野にわたっており、調査・測量では国土地理院より「UAVを用いた公共測量マニュアル（案）」が新規に策定されている。このマニュアルでは、UAVで撮影した空中写真を用いて測量を行う場合における、精度確保のための基準や作業手順等を定めており、UAVの利用による今後の公共測量の最適化が期待されている。またUAVの利用は公共測量だけに留まらず、2015年4月15日山形県最上郡戸沢村の砂子沢川での地滑り発生現場では、国土地理院がUAVで撮影した映像から2秒ごとに切り出した静止画を基に3Dモデルと簡易オルソ画像を作成しており、UAVの幅広い活躍が期待できる（図-1）。

今回、信濃川下流河川事務所では「UAVを用いた公共測量マニュアル（案）」の策定に先立ち2015年11月に、測量業務においてUAVを用いた公共測量を行なった。本稿では、全国で3例目となるUAVを用いた公共測量につい

て、精度検証した結果を報告する。

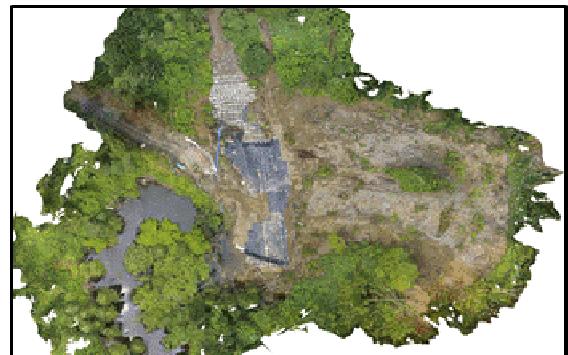


図-1 UAVで撮影した映像から作成した土砂災害現場の簡易オルソ画像（国土地理院HPより）

2. 公共測量としての手続き

公共測量は測量法第5条に規定されている測量で、同第33条で観測方法などを規定した作業規程を定めて実施することが求められている。作業規程で観測方法などが定められていない新技術を用いる場合は、精度が確保できることを検証するとともに、検証にあたっては国土地理院長に意見を求めることとなっている。

今回のUAVを用いた測量は、実施した2015年11月時点で「国土交通省公共測量作業規程の準則」で定めのない新しい測量技術であることから、準則第17条に定める「機器等及び作業方法に関する特例」に則り、国土地理院の意見や実証実験の結果で確認された、UAVマニュア

ルに基づき実施した。

3. 空中写真による数値地形図作成

(1) 測量箇所

今回UAVを用いた空中写真測量は信濃川下流域の「三条市信濃町地区」(図-2)において実施した。測量した箇所は河川区域で、空中写真測量の大きな妨げとなるような樹木等はない箇所である。



図-2 調査位置図

(2) 作業フローチャート

UAVを用いた数値地形図作成のフローチャートと従来のトータルステーションを用いた現地測量のフローチャートを図-3に示す。作業工程数で現地測量とUAVを用いた数値地形図作成のフローチャートを比較すると、UAVの方が多くの工程を必要とすることがわかる。今回のUAVを用いた公共測量の実施手法等について、フローの工程順に以下にまとめた。

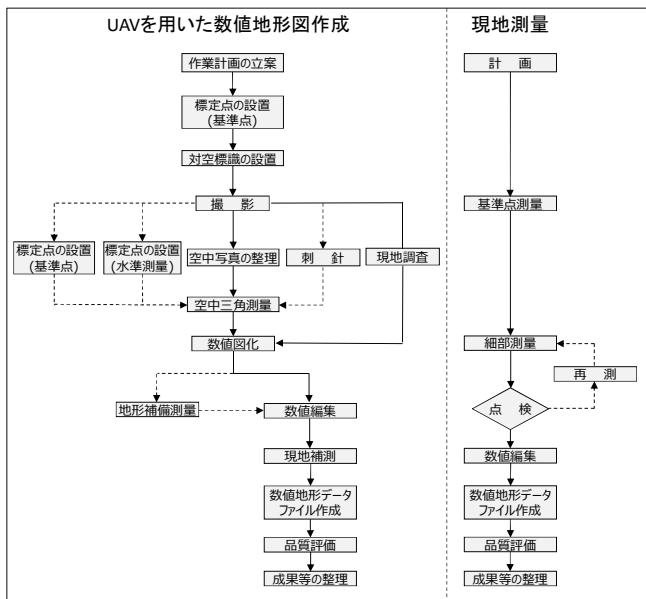


図-3 フローチャート

a) 標定点の設置

UAVによる空中写真の撮影に先立ち、後続作業の空中三角測量の実施に必要となる水平位置及び標高の基準となる点(標定点)を設置した(写真-1)。標定点の座標は、水平位置をネットワーク型RTK法により、標高を簡易水準測量より観測した。今回のUAVによる測量では、UAVで撮影するコースの数と1コースあたりの平均モデル数から、標定点を14点設置した。また、空中写真から標定点の写真座標を認識しやすいように、対空標識を設置した。

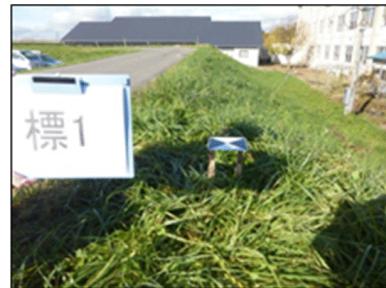


写真-1 標定点(対空標識付)

b) 撮影

今回の測量では撮影範囲及び図化範囲を図-4のように計画し、地図情報レベル250の数値地形図データファイルを作成できる対地高度(98.5m)や重複率(オーバーラップ60%, サイドラップ30%)の条件で、UAVの操作を自律航行(オートパイロット)として撮影した。

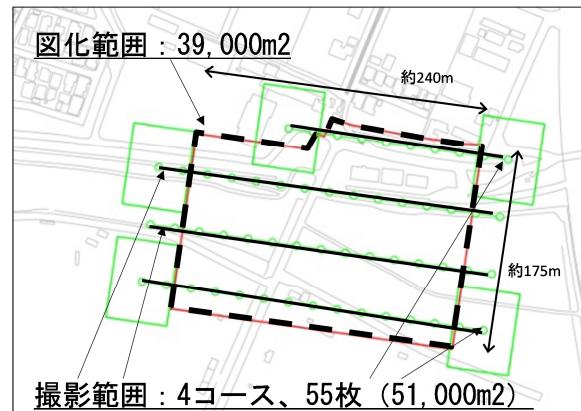


図-4 撮影範囲及び図化範囲

使用したUAVとデジタルカメラを写真-2に示す。



写真-2 使用したUAVとデジタルカメラ

今回のUAVによる測量では市販デジタルカメラを公共測量に利用したため、デジタルカメラのレンズの歪み等で測量成果に誤差が出ないように（公社）日本測量協会に依頼しカメラキャリブレーションを行い、歪み等の値を算出し把握した。

また、UAVによって撮影した空中写真から判断が困難な各種表現事項、他の地物に隠れた箇所については現地調査を実施し、補完した。

c) 空中三角測量

標定点とパスポイント及びタイポイントの写真座標、カメラキャリブレーションデータを用いて、空中写真の外部標定要素及び共役点の測地座標を、地図情報レベル250の制限値で求めた（図-5）。パスポイントとは同じコース内で連続する空中写真を連結する点であり、タイポイントとは隣接するコースの空中写真を連結する点を指しており、あわせて共役点といわれる。

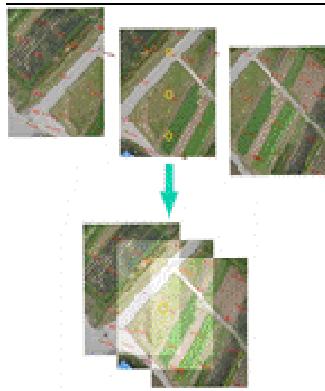


図-5 共役点取得

d) 数値図化

空中三角測量及び現地調査等の結果に基づいて、各種表現事項をデジタルステレオ図化機（SUMMIT）により測定し、地図情報を数値形式に地図情報レベル500で取得・記録した（図-6）。なお、地図情報レベル500は、精度検証に用いる現地測量の地図情報レベル500に合わせたためである。

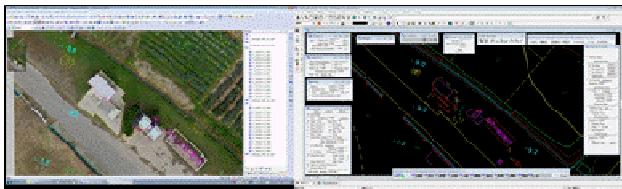


図-6 デジタルステレオ図化機による図化

また、数値図化において疑義が生じた箇所について、現地測量を部分的に実施し、補完した。

（3）精度検証

測量の精度について、国土地理院へ提出したUAVマニュアルに基づいて検証した結果を表-1にまとめる。検証点は信濃川下流河川事務所が設置・管理している公共

基準点を基に測量して設置した。全体の傾向として標高の方が水平位置より較差が大きいことが確認できるが、地図情報レベル250の空中三角測量、地図情報レベル500の数値図化とともに制限値内に収まった。

表-1 測量精度検証

地図情報レベル	項目	単位	較差(残差)	制限値
250	標定点残差(水平位置)	標準偏差	m 0.003	0.06
	最大値	m	0.004	0.12
	標定点残差(標高)	標準偏差	m 0.006	0.06
	最大値	m	0.010	0.12
500	共役点の交会残差	標準偏差	画素 0.4	1.5
	最大値	画素	1.2	3
	図化による検証点較差(水平位置)	標準偏差	m 0.030	0.25
	最大値	m	0.064	-
500	図化による検証点較差(標高)	標準偏差	m 0.080	0.25
	最大値	m	-0.196	-

また、これと別に現地測量により作成した、数値地形図との水平位置の比較及び簡易水準測量との標高の比較による測量精度の検証も行なった（表-2）。

表-2 測量結果との比較

地図情報レベル	項目	単位	較差	制限値
500	水平位置較差(検証点10箇所)	標準偏差	m 0.121	0.25
	最大値	m	0.183	-
500	標高較差(検証点23箇所)	標準偏差	m 0.084	0.25
	最大値	m	0.178	-

水平位置較差については、標準偏差で0.121m、最大値で0.183mであり、国土交通省公共測量作業規程における地図情報レベル500地形図データの水平位置の精度、標準偏差で0.25m以内を満たしており、最大値でも満たしていた。標高較差に関しては、標準偏差で0.084m、最大値で0.178mであった。

また検証点毎では、地盤が強固な舗装道路や砂利道で較差が小さく、畑や枯れ芝地で大きくなる傾向がみられた。これらはUAVを用いた公共測量は空中写真から数値地形図を作成するため、草木を空中写真でとらえる場合は実際の地面ではなくその上にある葉などを地面と認識してしまい、そこで数cmの誤差が生じるためと思われる。しかし、このことを加味しても、国土交通省公共測量作業規程における地図情報レベル500地形図データの標高位置の精度は、標準偏差で制限値の0.25m以内であり、水平位置較差と同様に、標準偏差、最大値においても満たしていることがわかった。

（4）安全管理

今回の測量は、国土地理院による「UAVを用いた公共測量マニュアル（案）」及び「公共測量におけるUAVの使用に関する安全基準（案）」の公表前に実施したものであるため、（一社）日本写真測量学会が2015年5月15日に公表した「測量調査に供する小型無人航空機を安全に運航するための手引き」を参考に安全対策を実施した。

a) 関係者の許可

作業範囲とその周辺の土地所有者及び当該行政機関に對してUAVの作業内容を説明し、了解を得た。また作業範囲に一般道路が含まれるため、警察署へ道路使用許可の届出を行った。

他にUAVに関する許可申請の必要性が考えられる。2015年11月17日公布、同年12月10日に改正されたUAVに関する航空法では、UAVを人または建物、車両などの物件との間を30m以上距離をとって飛行することとしており、これが難しい場合は航空局へ許可・承認の手続きをとることとしている。今回のUAVを用いた公共測量では、UAVが建物から30m未満を飛行することがあったが、空中写真撮影日が航空法改正前であったことから対象とはならないため、航空局へ許可・承認手続きはとらなかった。しかし、UAVの事故防止のため、前述の「測量調査に供する小型無人航空機を安全に運航するための手引き」を参考に十分な安全対策を実施した（次項以降参照）。

b) 飛行体制

UAVによる空中写真撮影にあたり、UAVの飛行体制の人員を表-3のように組んだ。UAVの離着陸場を撮影範囲全体を見渡せる堤防道路上とし、作業範囲の地形から保安員は2名として、連絡用通信機により離着陸場にいる作業班長と連絡体制を敷いた（写真-3）。

表-3 UAVの飛行体制の人員構成

飛行体制の人員構成	役割
作業班長	UAVの飛行に関するすべてに責任を持ち、操縦者に対しては操縦方法を指示できる権限を持つ
整備者	UAVの整備点検を行う。UAVに関する一定の知識が必要
操縦者	常にUAVを視認しながら操縦を行う。UAVの飛行に関する一定の知識と経験が必要
モニター監視者	テレメトリーにより送られてくる緯度・経度や高度などの情報を基にUAVの状態を読み取り、作業班長あるいは操縦者に伝える
機体監視者	常に飛行中のUAV及び気候を監視する
保安員	常に飛行範囲への侵入する恐れがある第三者に対して注意を払い、侵入を制止するための適切な対応をとる。必要に応じ複数名配置する

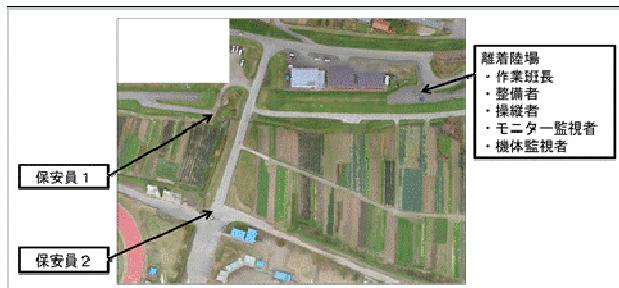


写真-3 作業人員の配置

c) その他

他に人為的なミスによるUAVの事故がなくなるように、開始前、UAV飛行前、終了後の3段階に分けたチェックを実行した。また、風雨はUAVの故障の原因となりやすいため、雨天、強風下でのUAVの飛行は避けた。

(5) UAVを用いた公共測量地形図についての評価

今回は安価でホビーリー的イメージの強いUAVや市販デジタルカメラを使用しても、公共測量に適合する品質の測

量成果を得られることが確認できた。UAVは、航空法や無線バッテリーなどの制約から1回につき数百mの飛行範囲に限定されるため、航空写真測量のように広域の作業には適さないが、低空で撮影できるメリットから現地測量と同様に地図情報レベル250の数値地形図を取得することが可能である。また、UAVでは圧倒的な高解像度画像を取得することができ、他方面への利用、例として災害現場での現況把握も期待できる。UAVにより取得できる画像の解像度については、航空機により取得できる画像と比較すると、UAVでは「植物」や「畑」ではなく「キャベツ」と認識できることがわかる（写真-4）。



写真-4 UAVと航空機により取得できる画像の比較

この他にUAVのメリット・デメリットについて、トータルステーション(TS)と比較する（表-4）。

表-4 UAVとTSのメリット・デメリット

比較項目	UAVを用いた空中測量	TSによる現地測量
① 取得する地図成果	地形図以外にも写真や動画も取得できる	○ 测量成果は図形や座標データである △
② 測量作業における安全性	常にUAVの墜落に気を配る必要がある	× 手元に機器があるため比較的安全
③ 測量範囲	立ち入り困難な場所でも撮影・図化が可能	○ 立ち入れない場所では観測できない ×
④ 測量対象	撮影した地形・地物以外は図化できない	× 樹木下でも観測や図化が可能
⑤ 新たな地図利用の展開	オルソフォトや三次元点群データなど発展的利活用	○ 测量成果の利用範囲は限られる ×
⑥ GNSS受信下の現場環境	GNSSが受信できる環境下でないと撮影は難しい	× GNSSは測量作業にほぼ関係ない ○

UAV自体のデメリットである測量作業中の安全確保には、既述したように、多くの注意を配る必要があり、撮影範囲の広がりに伴い保安員の増員や飛行体制自体の見直しの必要がある。

また、今回のUAVを用いた数値地形図作成と現地測量にかかるコストを実作業人日で比較すると、現地測量に比べUAVを用いた測量の方が1.1倍のコストがかかることとなった。これはまだ作業に不慣れで多くの標定点を設置する必要があること、現地測量に比べ成果品が多くなること、厳格な安全管理が必要であることが原因と考えられる。しかし、今後の技術者の経験や技術の進展に伴い、現地測量並みのコストでの実現も可能と考えられる。

4. 空中写真による三次元点群測量

UAVを用いた空中写真による三次元点群測量は、着工

前測量や出来形測量など土木工事現場での土量管理に用いることを前提に、平面位置及び高さともに精度が最大0.05m以内になるように検討されており、i-Constructionにおいては設計施工現場での活用が期待されている。

今回、前章のUAVを用いた数値地形図作成における空中写真測量成果を利用し、三次元点群測量データを作成した。使用した空中写真は、数値地形図作成を目的として撮影されたものであり、国土地理院が策定した「UAVを用いた公共測量マニュアル（案）」に則った三次元点群データとはならない（表-5）。しかし、UAVを用いて作成した数値地形図の精度検証やUAV測量の付加価値を確認する目的で実施した。

表-5 今回使用した空中写真成果と公表された「UAVを用いた公共測量マニュアル（案）」の比較

比較項目	単位	今回使用した空中写真成果	「UAVマニュアル（案）」で実施する場合
地上画素寸法	m	0.015	0.01
オーバーラップ（重複率）	%	60	90
サドラップ（重複率）	%	30	60
対地高度	m	98.5	65.8
標定点（検証点）	点	14	21（内検証点9）
写真枚数	枚	55（4コース）	620（9コース）

(1) 作業フローチャート

空中写真による三次元点群測量のフローチャートを図-7に示す。

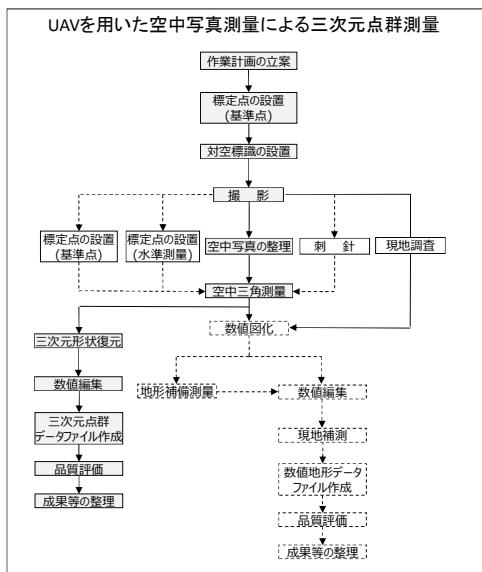


図-7 フローチャート

「空中三角測量」までの作業フローはUAVを用いた数値地形図作成と同じであるが、その後「三次元形状復元」と「三次元点群データファイル作成」において三次元形状ソフト（自動標高抽出用ソフトウェアMATCH-T）を使用し、写真の特徴点の抽出、標高点の観測、外部標定要素の算出、標高点の抽出、標高点へ写真の色情報を属性として付与、標高点から不整三角網を作成して写真画像を貼り付ける処理を行い、三次元点群データを作成す

る（図-8）。



図-8 空中写真測量成果より作成した三次元色付き点群

(2) 三次元点群データの検証

数値地形図作成の精度検証において利用した23箇所の簡易水準測量成果を、UAV図化の標高値と三次元点群標高値で較差を検証した（表-6）。検証点23箇所の結果からは、最大較差、標準偏差において三次元点群測量がUAV図化の値に劣る結果となった。

表-6 標高較差（検証点23箇所）

比較項目	単位	三次元点群測量	UAV図化
最大較差	m	0.410	0.178
標準偏差	m	0.104	0.084
絶対値平均較差	m	0.063	0.068

しかし、三次元点群測量は、標準偏差及び絶対値平均較差に対して、最大較差が突出して劣っており、不良箇所として除去すべき値が含まれていると考えられる。国土地理院より公表された「UAVを用いた公共測量マニュアル（案）」でも三次元点群を複数の方向から表示し不良箇所を取り除く必要があるとしている。そこで検証点23箇所から最大較差0.410mの検証点を除去し、検証点22箇所で再度検証した。結果、各比較項目とも三次元点群測量がUAV図化の値より優れた結果となった（表-7）。

表-7 標高較差（検証点22箇所）

比較項目	単位	三次元点群測量	UAV図化
最大較差	m	0.137	0.178
標準偏差	m	0.061	0.085
絶対値平均較差	m	0.047	0.071

また、検証点の地目による品質への影響を確認するために、先の検証点22箇所で地目別に分類した比較表を整理した（表-8）。

表-8 地目別標高較差（検証点22箇所）

地目（検証点数）	単位	三次元点群測量			UAV図化		
		最大較差	標準偏差	絶対値平均較差	最大較差	標準偏差	絶対値平均較差
舗装道路(13点)	cm	13.7	6.0	4.5	17.8	8.0	6.0
砂利道(5点)	cm	5.5	3.4	2.7	8.9	1.9	5.8
枯れ芝地(2点)	cm	10.1	9.5	6.7	17.1	7.4	11.9
畑(2点)	cm	-12.9	12.1	8.6	-14.1	2.3	12.5

標本数が少ないため根拠としては弱いが、三次元点群測量、UAV図化とも砂利道で精度が高い傾向が見受けられた。三次元点群測量のみに關しては、畑において精度

が不安定であった。これらについてはUAV図化と同様に空中写真を基に作成しているからと考えられる。

今回の結果から、三次元点群測量では三次元点群データが検証点の地目による影響を受けることに留意する必要があることが確認できた。しかし、国土地理院より公表された「UAVを用いた公共測量マニュアル（案）」では、三次元点群データ作成にあたって不良箇所を判別する明確な基準がないため、不良箇所を判断する数値基準またはそれに代替する基準の策定が今後の課題と考える。

5. まとめ

今回の検証から、地図情報レベル500の数値地形図作成について、UAVを用いた測量で十分に精度を確保できることが証明できた。

しかし、UAVを用いた公共測量は既存の測量方法と比べて、作業工程や取得するデータ量が多い。航空写真測量よりも高い測量精度が求められることが予想されるこ

とから、UAVを用いた公共測量には人為的なミスによる測量精度の低下を防ぐ慎重さが必要である。また、国土地理院より公表された「UAVを用いた公共測量マニュアル（案）」には、空中三角測量と数値図化において不明瞭な箇所を補完する工程を提示しているが、その補完工程も機械的なものではなく技術者の判断によるもので、今後改善を検討すべきであると考える。

現状ではUAVを用いた公共測量は、安全面、コスト面及び作業量において既存手法に比べてマイナスの側面もあるが、三次元点群データなど新たな価値を生み出せる面もあり、撮影場所の条件や測量成果の利用目的に応じて既存の測量手法の補間や代替手法として、十分な効果を発揮すると思われる。

謝辞：本論文の執筆にあたり、資料提供、助言を与えてくださった関係各位に感謝の意を表します。