地形測量の精度向上に資する技術開発

実施期間　平成 30 年度～令和 3 年度
企画部　廣瀬　勝
企画部測量指導課　髙橋　祥　伊藤　裕之

1. 概要

国土交通省で推進している取組である i-Construction では，測量・設計・施工・維持管理の建設生産プロセス全体で生産性向上を図ることを目指している．生産性の向上や品質の確保を図るためには，建設生産プロセスの最上流である測量段階から測量データの 3D 化を図り，これを設計，施工，維持管理の各段階に流通・利活用することが重要である．

国土地理院では，効率的に測量データを 3D 化するための技術開発を加速するため，平成 30 年度から令和 3 年度まで，官民研究開発投資拡大プログラム（PRISM）予算を活用し，技術の正確性や信頼性をさらに向上させるための「地形測量の精度向上に資する技術開発」を進めてきた．

2. 実施内容及び得られた成果と課題

地形測量の精度向上に資する技術開発として，以下の取組を実施した．

2.1 UAV レーザ測量の精度向上に資するオープンイノベーション

国土地理院では，平成 30 年 3 月に「UAV 搭載型レーザスキャナを用いた公共測量マニュアル（案）」を公表し，公共測量において UAV レーザを活用するための環境を整えてきた．

平成 30 年度は，このマニュアルで示す作業工程をベースとして一層の精度向上，作業効率化を目指す取組として，オープンイノベーションにより，UAV レーザ測量に関連する機器・ソフトウェアの技術開発に参加する企業等を広く募集した．応募のあった企業等を一堂に会してマッチングイベントを開催することで開発チームを結成し，チームごとに UAV レーザ測量の精度向上，作業効率化に資する技術開発を実施した．2.1.1～2.1.3 に，実施した各技術開発の要求仕様を示す．また，開発された機器・ソフトウェア等について評価した結果を 2.1.4 に示す．

2.1.1 UAV レーザ測量機器（レーザ測距装置，GNSS/IMU，UAV 機体）　開発チーム：2 チーム

要求仕様	
精度	・3 次元点群データの制限値±5cm 以内の精度及び取得点密度 100 点/m^2 以上を確保する UAV レーザ測量機器であること．
効率性	・平地で 0.3km^2 の範囲の測量（現地到着～機器撤収までの作業．作業方法は「UAV 搭載型レーザスキャナを用いた公共測量マニュアル（案）」（平成 30 年 3 月）に基づく．ただし，調整用基準点等の設置作業を除く．）を，制限値±5cm 以内の精度及び取得点密度 100 点/m^2 以上，40 分以内（初期化の時間も含む）で実施可能な UAV レーザ測量機器であること． ・UAV は自律航行ができること．

2.1.2 フィルタリング作業を効率化するソフトウェアの開発　開発チーム：2 チーム

要求仕様	
精度	・0.3km^2 の範囲を取得点密度 100 点/m^2 以上で取得したデータのフィルタリング処理結果に含まれる過剰なデータ（地表面以外の点データ）の割合が 10%以内であること．また，本来フィルタリング処理結果に含まれるべき漏れのデータの割合が 10%以内であること．
効率性	・0.3km^2 の範囲を取得点密度 100 点/m^2 以上で取得したデータのフィルタリング処理を 0.5 時間以内で実施可能であること．

2.1.3 UAV レーザ測量の飛行計画を支援するツールの開発　　開発チーム：2 チーム

要求仕様	
精度	・0.3km^2 の範囲（高低差のある傾斜地）の飛行計画について，取得漏れエリアを出すことなく全域を計測する飛行計画を自動策定可能であること．
効率性	・計測範囲や標高データを入力し，視覚表示して飛行計画を練ることの可能なツール．（ツールは計測現場で使用する事を考慮してノート PC 等のモバイル機器で動作すること） ・0.3km^2 の範囲（高低差のある傾斜地）の飛行計画を 0.5 時間以内で策定可能であること．

2.1.4 UAV レーザ測量の精度向上に資するオープンイノベーションにより得られた成果

それぞれの技術開発の主な検証結果は，以下のとおりである．

○UAV レーザ測量機器（レーザ測距装置，GNSS/IMU，UAV 機体）

開発機器は，既存機器よりも短い時間で作業を完了できたものの，要求仕様（0.3km^2 を 40 分以内に計測）を達成できた機器はなかった（要求仕様では，一回のフライトで全域を計測する目標を立てたが，いずれの機器もバッテリー交換等のため途中で離発着する時間が必要であった.）．バッテリー交換のための離発着回数を減らすことができれば,より要求仕様に近づけるものと考えられる．

○フィルタリング作業を効率化するソフトウェアの開発

要求仕様は 0.3km^2 を 0.5 時間以内に計測することだが，0.6km^2 を実施し，いずれのソフトウェアも 0.5 時間以内で出力できた．

○UAV レーザ測量の飛行計画を支援するツールの開発

いずれのツールも，飛行計画を PC 上で作成し UAV の操縦機器等に転送するまでを 0.5 時間以内で完了し，要求仕様を満たした．

開発された技術は，UAV レーザ測量の精度向上や効率化を促進するともに，「UAV 搭載型レーザスキャナを用いた公共測量マニュアル（案）」（令和 2 年 3 月）の改正時の参考情報として活用した．

2.2 航空レーザ測深の精度向上に資するオープンイノベーション

国土地理院では，平成 31 年 4 月に「航空レーザ測深機を用いた公共測量マニュアル（案）」を公表し，公共測量において航空レーザ測深を活用するための環境を整えてきた．航空レーザ測深は，深浅測量に代わる測量として期待されており，精度の確保された三次元データを効率的に取得するための技術開発を加速させる必要があった．

令和元年度は，航空レーザ測深の精度向上，作業効率化による測量分野の生産性向上を目指す取組

として，オープンイノベーションにより，航空レーザ測深の精度向上に資する技術開発に参加する企業等を募集し，フィルタリング作業を効率化するソフトウェアの開発を実施した．2.2.1 に，実施した技術開発の要求仕様を示す．また，開発されたソフトウェアについて，実証実験により評価した結果を 2.2.2 に示す．

2.2.1 フィルタリング作業を効率化するソフトウェアの開発　　開発チーム：2 チーム

募集テーマ	航空レーザ測深で取得された水中部のデータの処理等にかかる時間を短縮し，効率化を実現するソフトウェアを開発・構築すること．
要求仕様	
効率性	・AI の活用等によりできるだけ処理を自動化することで，1km^2 の範囲を取得点密度 1 点/m^2 程度で取得した水中部のデータのフィルタリング処理を 8 時間以内（作業者の手動によるフィルタリング処理時間は含まない．）で実施可能であること．
正確性	・1km^2 の範囲を取得点密度 1 点/m^2 程度で取得した水中部のデータのフィルタリング処理結果（自動による処理）に含まれる過剰なデータ（水面と水底以外の点データ）の割合が 20%以内であること．また，本来フィルタリング処理結果に含まれるべき漏れのデータの割合が 20%以内であること．

2.2.2 航空レーザ測深の精度向上に資するオープンイノベーションにより得られた成果と課題

検証では，効率性についてはいずれのソフトウェアも要求仕様を概ね満たしたものの，正確性については最適なパラメータの設定（検証では，どの河川においても共通のパラメータを用いてフィルタリング処理を実施したため，過剰・漏れの数値にバラツキが大きく出たことから，正確性向上のためには，河川に応じたパラメータの設定が必要不可欠．）や機械処理の精度向上（漏れ率は要求仕様の 20%以内で，機械学習により一定の効果があったものの，過剰率は 20%以上であったことは，人的処理と機械的処理による差が考えられる．）といった課題が明らかになった．これらの課題を踏まえ，自動処理による計算結果を最終的な測量成果として利用するための更なる開発が期待される．

2.3 RTK-UAV 写真測量に関する検証

国土地理院で作成した「UAV を用いた公共測量マニュアル（案）（平成 28 年 3 月作成：平成 29 年 3 月改正）」（令和 2 年 3 月に作業規程の準則（以下「準則」という．）に反映．）に規定されていない RTK 測位による UAV 機体の座標値を使用した UAV 写真測量及び UAV 写真点群測量について，標定点測量の省力化による作業の効率化が図れるか，令和元年度から令和 2 年度にかけて，以下の検証作業を行った．

2.3.1 令和元年度 RTK-UAV 写真測量に関する検証

○ UAV 写真点群測量 三次元形状復元に関する検証：標定点数の違いによる影響評価

・撮影場所：ASITE 空間情報技術試験フィールド（御殿場市）において，三次元形状復元ソフトウェアを用いて，以下の①～④の条件で空中三角測量を行い，標定点残差及び検証点較差の X，Y，Z 各成分について最大値と標準偏差を求め，0.05m 以内であるかを目安として評価した．

・標定点：10 点，検証点：5 点

・検証条件　　①GNSS 定位解析：標定点なし（RTK 測位座標値を使用）

②内側標定解析：内側標定点 1 点を固定（RTK 測位座標値を使用）
③外側標定解析：外側標定点 4 点を固定（RTK 測位座標値を使用）
④全標定解析：内側，外側標定点のすべてを固定（RTK 測位座標値を使用せず）

2.3.2 令和元年度 RTK-UAV 写真測量に関する検証により得られた知見と課題

・標定点を使用しない「GNSS 定位」解析で最大較差が±0.05m 程度となり，良好な結果を得ることができた．
・精度は良好な方から，「全標定→GNSS 定位→外側標定→内側標定」の順となり，GNSS 定位は外側標定（4 点）とほぼ同等（検証点では外側標定以上）の精度が得られた．
・4 種類の解析における最大較差を 2 度の計測で比較した場合, VDOP 値が低かった計測のほうが，比較的良好な精度を得られた．
・GNSS 定位による解析における検証点との最大較差は, 高さ方向で 0.05m を超過した点もあった．
・標定点を使用する場合，標定点数が多いほど検証点較差は小さくなる．

上記から，RTK-UAV 写真測量を一般化するためには様々な環境下での検証が必要であり，令和 2 年度も検証することとした．

2.3.3 令和 2 年度 RTK-UAV 写真測量に関する検証

(1) UAV 写真測量 空中三角測量関連：標定点数の違いによる影響評価

・2 つのフィールド（高萩ユーフィールド：高萩市，とちぎ UAV フィールド：佐野市）において，隣接空中写真間の重複度 60%以上，コース間の空中写真の重複度 30%以上で直下のブロック撮影を行い，各標定点における残差の X，Y，Z 各成分の最大値，標準偏差を求めた．精度が準則第 237 条第 5 項（調整計算による標定点残差の制限）に規定される数値以内であるかを目安として評価した．

(2) UAV 写真点群測量 三次元形状復元に関する検証：標定点数の違いによる影響評価

・2 つのフィールドにおいて，10 パターンの撮影（直下写真に斜め写真を加えた撮影）と 5 つの条件（GNSS 定位解析，全標定解析等）による処理を 2 種類の三次元形状復元ソフトで解析を実施し，各標定点における残差の X，Y，Z 各成分の最大値，標準偏差を求め，0.05m 以内であるかを目安として評価した．さらに得られた結果から，各検証点における較差の最大値及び標準偏差を求め，0.05m 以内であるかを目安として評価した．

2.3.4 令和 2 年度 RTK-UAV 写真測量に関する検証により得られた知見

(1) UAV 写真測量 空中三角測量関連：標定点数の違いによる影響評価

・現地の条件や調整計算の条件等によっては，範囲の四隅と中央付近の 5 点の標定点で，制限を満たす結果が得られた．
・2 フィールド共通の傾向として，標定点数を減らすと系統的に検証点の較差が大きくなることから，精度を満たした標定点数より，標定点を減らすことはできない．
・実際の業務においては検証点を設置して精度の確認をする必要性も認められたことから，RTK による測位座標を利用した撮影によって，ただちに作業の効率化が図れるものではなかった．

(2) UAV 写真点群測量 三次元形状復元に関する検証：標定点数の違いによる影響評価

・高萩フィールド（高低差が大きい.）では，標定点を削減できる場合があった．

・とちぎフィールド（高低差が小さい.）では，標定点を削減できなかった.
・UAV の RTK 測位座標値及び斜め写真を使用して標定点を削減した場合，高低差が小さい地表での効果はあるが，高低差が大きい場合は精度内に収束しない.
・三次元形状復元に使用する解析ソフトによる精度の違いもみられた.

2.3.5 令和元年度及び令和 2 年度 RTK-UAV 写真測量に関する検証のまとめ

上記 2.3.2 及び 2.3.4 から，UAV 写真測量及び UAV 写真点群測量については，準則における測量方法を基準としつつ，RTK-UAV への新型センサー（GNSS/IMU）の実装や，等高度撮影だけではなく等対地高度撮影等の撮影方法の技術動向を注視するという結論に至った.

2.4 手持ちレーザスキャナによる測量

手持ちレーザスキャナは，小型のレーザスキャナに SLAM（Simultaneous Localization and Mapping）技術を組み込んだ機器であり，手持ち又は背負う等して歩きながら周辺の地形や地物の特徴点を見つけ出し，それらの測定距離の変化を把握しながら，自己位置を推定して同時に周囲の点群データを生成することができる技術である.この技術は,作業マニュアルや準則に定められていないものであり，手持ちレーザスキャナを使った測量について実用の可能性を探るため，令和元年度から 3 年度にかけて，以下の業務を実施した.

2.4.1 令和元年度 手持ちレーザスキャナによる測量

令和元年度は，手持ちレーザスキャナに関する市場調査を行うとともに，手持ちレーザスキャナを使用して測量を行う場合の作業手順を整理し，作業手順書案を作成した．この手順書の作成にあたっては，①計測環境の確認，②標定点・検証点の設置，③レーザスキャナの起動，④レーザスキャナのキャリブレーション，⑤計測方法等について検討を行った.

2.4.2 令和 2 年度 手持ちレーザスキャナによる測量

令和 2 年度は，前年度に作成した作業手順書案をもとに，現場での精度検証を行うとともに，最適な測定方法及び利用上の課題を整理した．検証は，市街地，河川敷，公園が近接した地区を選定し，手持ちレーザスキャナ 1 機種（GeoSLAM 社製 Zeb-Horizon）を使用して，歩行速度，地上高，機器の向き等を変更しながら，検証点及び地形・地物の特徴点の座標と比較して精度検証を実施した（市街地 6 コース・河川敷 5 コース・公園 3 コース設定，各コースの観測時間 10 分以内・観測距離 400m 以内）．また，3 次元点群データを取得する手法としての有効性を考察し，測量作業で利用するための作業工程案を作成した.

2.4.3 令和 3 年度 手持ちレーザスキャナによる測量

令和 2 年度の精度検証では,①位置精度を確保するためには,始終点を一致させる閉ルートにする，地物の特徴点の状況把握をするなどの事前の経路計画が重要である，②計測対象となる地形・地物が歩行経路から左右 15m～20m 以上となる場合は，未計測となる場合がある，③標定点は等密度の分布となるように配点し，精度を向上させるために 4 点以上の設置が望ましい，④観測条件が良好であれば，概ね 0.05m 程度（標準偏差）の精度が期待されるなどの知見を得られたものの，複数の機種での精度比較や長時間計測した場合の安定性の評価が必要であるなどの課題が判明した.

上記の課題を踏まえて，令和 3 年度の検証作業を実施した．検証は，都市モデルのための計測を想

定した市街地（3 コース），ICT を活用した工事の出来形管理を想定した河川敷（4 コース），公園内の樹木管理や山地での工事等を想定した樹林地（3 コース）を選定し，前年度に作成した作業工程案に従い，①3 機種（GeoSLAM 社製 Zeb-Horizon，GreenValley International 社製 LiBackPackD50，GeoSLAM 社製 Zeb-Locate）による点群データの差異の確認，②長時間の連続観測（20 分程度）を行った場合の影響の確認，③計測中の移動体（車両，通行人等）による影響の確認等を行った．また，検証作業により課題を抽出し，令和 2 年度に作成した作業工程案を改良して，手持ちレーザスキャナの作業マニュアル（案）を作成した．

2.4.4 手持ちレーザスキャナによる測量により得られた知見と成果

・手持ちレーザスキャナは，計測時間が長くなると位置精度が低下する傾向がある．また，機器により，計測時間が長くなると位置精度の差異が広がる．
・計測時間が 10 分程度になると，条件が良くても位置精度は 0.1m 程度となる．
・周囲に低速の移動体があると，計測精度に悪影響を与えることがある．
・標定点残差の確認により，標定点で囲まれた範囲の内側における点群の精度は概ね把握することができる(標定点は計測範囲四隅の 4 点以上,標定処理は標定点の座標を用いた相似変換に限定,検証点で精度を確認)．

令和 2 年度及び 3 年度の検証より,機器の性能要件を規定するのは難しい(機種による差異がある,新機器への都度対応が困難）ため,「要求仕様を満たすことができるシステム」であることを確認して使用することとした．

手持ちレーザスキャナの自己位置推定及び地図の作成におけるアルゴリズムは各メーカーによって異なり，得られる精度や適用環境等に違いがあることから，手持ちレーザスキャナの作業マニュアル（案）では，①手持ちレーザスキャナの機器は要求仕様を満たす計測精度を有することが確認できるものでなければならない，②要求精度を満たす適切な移動取得速度を確認する，③適切な移動取得時間を確認するなどの精度試験を規定した．

2.5 UAV レーザ測深機による測量

UAV レーザ測深機は，UAV にグリーンレーザという緑色の可視光を使用したレーザスキャナを搭載して，河川や港湾などにおける，水底部の 3 次元点群データを取得する測量技術である．この技術は，作業マニュアルや準則に定められていないものであり，UAV レーザ測深機を使った測量について実用の可能性を探った．

2.5.1 令和 3 年度 UAV レーザ測深機による測量

令和 3 年度は，利用状況調査，試験観測による精度検証を実施し，機材精度試験に関する検討を行った．試験観測は，UAV 搭載型レーザ測深機（TDOT3GREEN：レーザ拡散角 90°，測距精度±5mm，照射数 30,000 点/秒）を使用して，水面の違いによる影響を検証するために，那珂川の頭首工（川をせき止めて農業用水を川から取水するための施設）付近を選定し，頭首工上流で安定した水面，頭首工周辺・下流で白波など多様な水面を検証することとした．また，異なる水質で検証を行うため 2 時期（12 月，1 月）での計測と，フットプリントの違いによる再現精度の影響を確認するため，異なる対地高度で，水域，植生域，河川構造物を計測した．検証は，確からしい値（横断測量による実測値等）を取得し，レーザ計測点との比較を行った．

2.5.2 令和 3 年度 UAV レーザ測深機による測量により得られた知見と課題

令和 3 年度の那珂川での検証は，極めて条件の良い河川（水質良好，緩流）での検証となり，以下はその結果である．

・水部における計測点密度は，対地高度が高くなるにつれて，点密度が不足する格子率が高くなる（水部の点密度には，水底部だけでなく水面や水中の濁り等からの反射が多く含まれる）．

・水部の標高のバラツキ具合は，12 月より 1 月の計測が若干良い結果で，これは 12 月より 1 月の水質が良かったことが要因と考えられる．

・横断測量との比較による水底部の高さ精度検証では，12 月・1 月の計測とも概ね 0.3m 以下の較差であった．

・試験観測で使用した UAV レーザ測深機の測深能力は，概ね 2m であった．

・UAV レーザ測深機は，対地高度が高くなるにつれて，測深能力が低下する．

上記から，UAV レーザ測深機は，その計測精度・測深能力が測量の目的に応じたものであるかを確認して使用することが重要である．また，極めて良い河川条件だけでなく，目的に応じた条件（流れの速い河川や水質が良好でない河川など）で精度を確認することも必要である．

3. まとめ

i-Construction の推進に必要な測量分野における新技術の精度検証を PRISM でアドオン施策と位置づけ、PRISM 予算を活用することにより，作業マニュアルの改正及び整備を加速化することができた．また，作業マニュアルや準則に準拠した測量機器，ソフトウェアなど，民間の技術開発を促進することができたと考えられる．

令和 4 年度以降は，元施策により，作業マニュアルの現場実証や新技術の進展等を踏まえ，作業マニュアルの改正，新技術に対応した準則の改正を進めていく予定である．