UAV を用いた公共測量マニュアル（案）の改正と、 地上レーザスキャナを用いた公共測量マニュアル（案）の作成 —i-Construction の推進を目指して—

Revision of operating manual for UAV survey on the public survey, and development of operating manual for TLS (Terrestrial Laser Scanner) survey on the public survey —Pursuing for promotion of “i-Construction”—

国土地理院 i-Construction 推進本部事務局
*Secretariat of i-Construction promotion headquarters
in Geospatial Information Authority of Japan*

Abstract : Geospatial Information Authority of Japan (GSI) has revised operating manual for UAV survey on the public survey, and developed operating manual for TLS (Terrestrial Laser Scanner) survey on the public survey at March, 2017. Procedures and methods for UAV survey and TLS survey are established in these operating manuals. We hope that 3D survey by using UAV and TLS becomes widespread in the field of public construction works.

Keywords : UAV, 無人航空機, 地上レーザスキャナ, TLS, 公共測量, 三次元点群

1. 国土交通省における i-Construction の取組

人口減少や少子高齢化が進む我が国において、さまざまなインフラの整備や維持管理等を効率的に実施することは重要な課題である。こうしたインフラの整備や維持管理等は、測量業者をはじめとする土木・建設業界が担っているが、今後もこうした役割を適切に担うことができるようにするためには、土木・建設現場における生産性を向上させ、働く人々の賃金水準の向上や休日の拡大などに取り組むことが不可欠である。

こうしたことから、国土交通省では現在、「i-Construction」（アイ・コンストラクション）の取組を推進している。土木・建設現場で行われている、調査・測量から設計、施工、検査、維持管理までの全ての建設生産プロセスにおいて生産性の向上を図ることで、2025年度までに建設現場の生産性を2割向上させることを目標としている。

i-Construction はさまざまな取組の集合体であるが、そのトップランナー施策の一つとして、ICT（情報通信技術）を活用し、三次元で整備した情報を共有・活用することで土木工事の効率化を図る取組、いわゆる

ICT 土工が進められている。国直轄事業を中心に導入が進められており、昨年度（2016年度）は500件以上の工事において実際に実施された。i-Construction が導入された工事現場では、UAV（ドローン）等を用いて三次元で地形データの取得（起工測量）が行われ、これと三次元化された設計データを用いた情報化施工が行われている。また施工後の出来形管理においても、三次元データが活用されている。

実際に導入した現場からは、UAV を用いることで比較的広範囲の場所を効率的に測量することが可能となり、工期を削減することができたという意見が聞かれた。また、UAV で取得した三次元データの処理には時間を要するが、こうした作業は内業であるため、天候による影響を減らすことができるという利点も聞かれた。

施工に関しても、ICT 土工が行われることで、施工に当たっての丁張りが不要になったり、施工管理が簡略化できたりするため、現場内の作業員を減らすことができ、安全性の確保にもつながるといった意見や、ベテランの作業員が不足する中で、ベテランでなくても、MC/MG（マシンコントロール/マシンガイダンス）等を活用することで、効率的で確実な施工が可能と

なっているという意見があった。

このように、i-Constructionを導入することが建設現場における生産性向上につながることから、導入を促進するための取組を国土交通省では今後も継続して実施することとしている。例えば、ICT 土工を実施することができる技術者を増やすため、国土交通省では昨年度、全国486箇所で施工業者や自治体等の発注者に向けた講習会等を開催し、延べ36,000人以上が参加している。また、i-Constructionによる工事を導入する上で必要なさまざまな基準類の整備、改正を行っている。2017年3月には、新たに12の基準類を整備・公表するとともに、2015年度に整備した15の基準類のうち、7つについて内容の改正を行っている。

国土地理院では、i-Construction 推進の取組の一環として、測量分野における新たな技術を用いた三次元データ作成のための技術マニュアル等の整備を進めている。2016年3月には、「UAVを用いた公共測量マニュアル(案)」を整備・公表した(国土地理院 i-Construction 推進本部事務局, 2016)が、その後1年間の運用実績等を踏まえ、2017年3月にその内容の改正を行った。また、2017年3月には新たに、「地上レーザスキャナを用いた公共測量マニュアル(案)」を整備し公表した。これらは、上記の国土交通省が整備・改正した基準類の一部である。

本稿では、「UAVを用いた公共測量マニュアル(案)」の改正の背景と内容について紹介する。また、新たに整備した「地上レーザスキャナを用いた公共測量マニュアル(案)」の概要についても解説する。

2. 「UAVを用いた公共測量マニュアル(案)」の改正

2.1 UAVの導入が進む測量業界

UAVを測量分野でも活用しようという動きは加速している。国土地理院では2015年10月と2016年10月に、一般社団法人全国測量設計業協会連合会(全測連)にご協力をいただき、全測連に加盟する各都道府県の測量設計業協会を通じて、会員の測量業者(全国で約2,500社)に対してアンケート調査を実施した。その中で、各測量業者でUAVを保有しているかどうか、また今後保有する予定があるかどうかを調査した。2015年10月時点では、UAVを保有している測量業者の割合は約29%(回答のあった539社中155社)であったが、2016年10月時点では、約45%(回答のあった624社中279社)と、1年間で16ポイントも増加した。2016年10月

時点では、約77%もの測量業者がUAVを既に保有している又は今後保有を検討していると回答しており、UAVの導入が急速に進んでいることが分かる。

2.2 2016年3月に公表したマニュアル(案)とこれに対する意見・問い合わせ

UAVを測量で用いる機会が増える中で、適切に測量作業を実施するためには、その作業方法や精度確保を行う上での一定のルールを明確化することが必要である。このため国土地理院では、有識者による検討委員会等を開催し、その結果も踏まえて、「UAVを用いた公共測量マニュアル(案)」を2016年3月に整備・公表した。

このマニュアル(案)では、大きく二つの測量方法を規定している。一つ目は「第2編 UAVを用いた地形測量及び写真測量」に記載している、UAVで撮影した空中写真を用いて従来と同様の写真測量を行い、数値地形図を作成する方法である。二つ目は、「第3編 UAVを用いた応用測量」に記載している、UAVで撮影した空中写真からコンピュータ処理(SfM/MVS)により三次元点群を作成する方法である。前者は、各種インフラの管理台帳図面など、大縮尺の数値地形図の作成や修正を行うことをイメージして規定したものである。一方後者は、起工測量や出来形管理測量など、ICT土工で用いる三次元点群を整備することをイメージして規定したものである。それぞれの測量について、作業工程や、作業方法、使用できる機器の条件などをマニュアル(案)に規定している。

マニュアル(案)公表以降、国土地理院には多くの意見、問い合わせが寄せられた。特に、マニュアル(案)に記載されている内容や用語が分かりにくいといった意見や、第2編と第3編の規定の内容や使用している用語に違いがあるという意見が多く聞かれた。問い合わせの多くは、第2編の作業(数値地形図の作成)と第3編の作業(三次元点群の作成)を混同しているケースであり、そのほとんどが、写真測量の経験がないと思われる方々からの問い合わせであった。

技術的な意見や問い合わせの中で最も多かったものとしては、第3編の作業(三次元点群の作成)における、撮影する空中写真の重複度(ラップ率)を緩和することができないかというものである。マニュアル(案)第3編の作業(三次元点群の作成)では、同一コース内の隣接する空中写真との重複度(オーバーラップ

率：OL)を90%，隣接コースの空中写真との重複度(サイドラップ率：SL)を60%と規定していた。特にOLを90%と規定していることに対しては，多くの利用者から緩和の要望をいただいた。一方で，実際に作業を行った方からは，精度確保には一定程度の写真が必要であるという意見もあった。また，UAVの飛行は風による影響を強く受けることから，重複度を考慮して飛行計画を立てたととしても，例えば追い風の条件下でUAVを飛行させた場合には，撮影する主点の間隔が広がって重複度が極端に低下することもあり，注意が必要であるという意見もいただいた。

この他，設置する標定点や検証点に関する意見や問い合わせも多くあった。その配置方法や配置点数，また測量方法など，より分かりやすく，また可能な限り効率化して欲しいという意見を多くいただいた。さらに，測量を行う上で重要となる精度管理表についても，その作成方法や記載内容について具体的な質問が多く寄せられた。UAVを用いた測量が広がる中で，精度確保を確実に実施するためには，適切な精度管理表の作成が必要であり，そうした認識が関係者の中で広まっているものと考えられる。

2.3 マニュアル(案)の改正と公表

こうした意見や問い合わせ，また1年間の運用実績などを踏まえて，国土地理院では「UAVを用いた公共測量マニュアル(案)」の改正を行った。規定の見直しに当たっては，実証実験も行い，写真の重複度や標定点等の配置方法等について検討を行った。

なお，UAVを用いた測量については，国土地理院が整備したマニュアル(案)以外にも，国土技術政策総合研究所(国総研)がi-Construction推進に関連して定めた「空中写真測量(無人航空機)を用いた出来形管理要領(土工編)(案)」等がある。こうした他の基準類における規定との調整も必要になることから，マニュアル(案)の改正に当たっては関係機関と連携し，規定の内容や表現等で十分な調整を行った。また，関係機関においても実証実験を実施したことから，そこで得られた結果や知見等も踏まえて改正を行った。

改正したマニュアル(案)は，2017年3月より，国土地理院のウェブページで公表しており，自由にダウンロードすることが可能である。

2.4 マニュアル(案)の改正のポイント

マニュアル(案)は，全体的な用語や表現の調整も行なったため，多くの部分を改正しているが，ここでは，特に今回大きく改正した第3編の作業(三次元点群の作成)を中心に，改正のポイントについて紹介する。

2.4.1 撮影する写真の重複度

第3編の作業(三次元点群の作成)における空中写真の撮影は，改正前のマニュアル(案)では，OLを90%以上，SLを60%以上とすることが規定されていた。実証実験等を踏まえ，これを緩和することとした。具体的には，OLを80%まで緩和している。これにより，実質的に写真の枚数を約半分にすることが可能となる。作業で用いる写真が半分になることは，撮影時間が短縮できるだけでなく，その後の三次元形状復元計算などに要する時間も大幅に短縮できるという点で効果大きい。

UAVによる写真の撮影は，写真の重複度を確保できるようにあらかじめ飛行計画を立案した上で，これに基づいてUAVを自律飛行させ，一定間隔で撮影を行うことが一般的である。しかしながらUAVの飛行は風の影響を受けやすく，飛行計画上一定の間隔で撮影を行うこととなっているものの，実際には均一には撮影できず，結果として，十分な写真の重複度を得ることができないことも想定される。写真の重複度が十分ではない場合には，測量精度に影響を生じさせる可能性が高いことから，マニュアル(案)では，OLの80%への緩和については，撮影後に実際のOLを確認できる場合に限定している。つまり，撮影後に確実にOLが80%以上であることを確認できる場合であれば，そのような撮影を行うことを認めたものであり，撮影後の確認が困難であるのであれば，従来どおり90%のOLとするように飛行計画を立てて撮影を行うことを求めている。

なお，第2編の作業(数値地形図の作成)における空中写真撮影の重複度(OL60%以上，SL30%以上)に関する規定に変更はない。

2.4.2 作成する三次元点群の精度に応じた規定

第3編の作業は，主にi-Constructionで使用する三次元点群を作成することをイメージしている。i-Constructionで使用する三次元点群は，その利用場面によって点群の位置精度が異なる。例えば，施工後に行

われる出来形管理で用いる三次元点群は、5 cm (0.05 m) の位置精度が必要とされている。一方、施工前に行われる起工測量では10cm (0.10m)、部分払い出来高計測には20cm (0.20m) の位置精度の三次元点群で良いとされている。このように、利用場面によって三次元点群の精度が異なることから、それぞれの位置精度に応じた三次元点群を作成する上での制限値等を明確に示すように改正を行っている。例えば5 cm の精度の三次元点群を作成するためには、空中写真の地上画素寸法を1 cm (0.01m) 以内とすることを標準としているが、10cm の精度の三次元点群の作成であれば、地上画素寸法2 cm (0.02m) 以内としている。

2.4.3 標定点や検証点の配置

標定点や検証点の配置方法や配置点数、またその用語についても改正を行っている。例えば検証点については、改正前のマニュアル（案）では、「外部検証点」と「内部検証点」をそれぞれ一定のルールで設置することとしていたが、その違いや効果、配置方法等が分かりにくいという意見が多かったため、これらの検証点を統合化し、より明確になるように改正を行っている。具体的には、検証点は、標定点の数の半分以上を、対象範囲内に均一に設置するというルールへと変更している。これにより、より精度確保が必要であると作業者が判断する箇所（例えば盛土してある場所の天端部分や法肩など）に、検証点を配置することが可能となり、かつ、全体としてこれまでよりも検証点を減らすことが可能となった。

また、検証点をマニュアル（案）の規定よりも追加して配置して精度確認を行うことで、点検測量に代えることができることも示している。

2.4.4 撮影に用いるカメラの条件等

空中写真を撮影する際に用いるデジタルカメラ（一眼レフ等）について、改正前のマニュアル（案）では、一般的なデジタル航空カメラに沿った条件を規定していた。しかしながら、これらの条件を全て確認することは、厳密には不可能であった。このため、規定を見直し、一般的なデジタルカメラ（民生用カメラ）であれば条件を満たすことができるよう、カメラの条件を緩和している。

また、カメラキャリブレーションについて、第3編の作業（三次元点群の作成）においては、三次元形状

復元計算においてセルフキャリブレーションを行うことを標準とした。これにより、独立したキャリブレーションは行う必要がなくなり、作業の効率性が向上した。

なお、第2編の作業（数値地形図の作成）では、従来どおり独立したキャリブレーションを行うことを標準としている。

2.4.5 標定点等の測量方法

UAV を用いた測量を行う際には、標定点や検証点を現地に配置し、対空標識を設置するとともに、その位置情報を、別途行う測量で得ることが必要である。その作業方法について、今回の改正では明確化している。特に第3編の作業（三次元点群の作成）では、作成する三次元点群の精度に応じて、測量方法に関する規定を変えている。例えば5 cm の位置精度が必要な三次元点群を作成する場合には、これに用いる標定点等は、TS（トータルステーション）による放射法等を用いて測量することを規定している。これは、5 cm の位置精度の三次元点群を得るためには、作業範囲内にある標定点等の相対的な位置関係の確保が重要となるためである。一方で、10cm 又は20cm の位置精度の三次元点群作成であれば、ネットワーク型 RTK による単点観測法も可能であり、いわゆる GNSS ローバーも使用することができる規定としている。

2.4.6 その他、用語の統一や表現の見直し等

改正前のマニュアル（案）では、例えば第2編と第3編では UAV の飛行高度(対地高度)の計算式が異なるなど、同じ内容であるものの表現等に違いがあり、利用者の混乱を生じさせる原因の一つとなっていた。いただいたご意見などを踏まえ、マニュアルで使用している用語や表現などについて全体的に見直しを行い、マニュアル（案）の改正に反映させている。また、第2編や第3編のタイトルについても、それぞれの成果品が明確になるように、例えば第2編は、「UAV を用いた地形測量及び写真測量」(改正前)から「UAV を用いた地形測量及び写真測量」(改正後)に、第3編は、「UAV を用いた応用測量」(改正前)から「UAV による空中写真を用いた三次元点群作成」(改正後)へと、それぞれ変更している。

さらに、精度管理表についても見直しを行い、より利用実態に近い形へと様式等を修正している。

2.5 UAVを用いた公共測量マニュアルの手引き

2016年3月にマニュアル(案)を公表した後、いただいた多くのご意見は、写真測量の経験がないと思われる方々からであった。その多くは、マニュアル(案)がそもそも適用範囲として想定していない作業や利用方法についてであり、マニュアル(案)の意図や基本的な考え方を理解していない場合が多くみられた。こうしたことから、マニュアル(案)を利用する前に確認していただきたい、基本的事項や留意点を取りまとめた「UAVを用いた公共測量マニュアルの手引き」を、マニュアル(案)とは別に作成し、マニュアル(案)の改正と同時に公表した。

この中では、例えばUAVによる空中写真を用いた測量は、植生の多い場所など写真に写らない箇所があるような場所の測量には不向きであることや、測量により得られる成果としては地図(数値地形図)と三次元点群があり、それぞれ別の作業であることなどを解説している。また、使用する機器や条件、それらの組合せを変えることで、得られる成果の品質が大きく異なるため、マニュアル(案)はあくまでも標準的な作業を示したものであり、最終成果が精度を満たしていることを点検測量等で確認することができれば、マニュアル(案)の内容を全て遵守することは求めていることや、公共測量を行う場合には、測量法に定められた届出や測量士等の関与が必要であること等も説明している。

3. 地上レーザスキャナを用いた公共測量マニュアル(案)の概要

3.1 地上レーザスキャナを用いた測量

近年、レーザを用いる測量機器や測量技術がさまざまな形で広まっている。例えば航空機に搭載する形として航空レーザ測量は以前から行われているし、車両に搭載して測量を行う車載写真レーザ測量(いわゆるMMS)は、2016年3月に改正された作業規程の準則に記載され、一般的な公共測量での利用が進んでいる。また以前から測距にはレーザが用いられており、TSは測量には必須のアイテムの一つである。

レーザは、非常に優れた直進性・指向性・干渉性・収束性を持つという特徴があり、反射されるレーザ光の往復時間や位相を測定することで、短時間で正確に距離を測定することが可能である。今回、地上にある三脚上に設置するレーザスキャナを用いて、地形の測

定を行う機器である地上レーザスキャナ(TLS, Terrestrial Laser Scanner)について、標準的な測量作業方法等を定めた技術マニュアル「地上レーザスキャナを用いた公共測量マニュアル(案)」を国土地理院で整備し、2017年3月に公表した。整備に当たっては、金沢工業大学工学部の鹿田正昭教授を委員長とする有識者による検討委員会を開催し、検討を行っている。

2016年10月に全測連の協力を得て国土地理院が実施した、測量業者に対するアンケート調査では、約23%(回答のあった624社中142社)の測量業者が、地上レーザスキャナを保有しており、今後もその保有率や利用機会が増加することが想定される。

3.2 マニュアル(案)の概要

マニュアル(案)では、地上レーザスキャナを用いて測量を実施する場合の標準的な作業方法を規定している。特に、狭い範囲における精密な地形図作成や地形の三次元点群の取得を目的としている。このため、UAVを用いた公共測量マニュアル(案)と同様に、第2編に地上レーザスキャナを用いて大縮尺の数値地形図を作成する手法を、また第3編に地上レーザスキャナを用いて三次元点群を作成する手法を規定している。

3.2.1 地上レーザスキャナによる測量の特徴、留意事項

マニュアル(案)では、地上レーザスキャナを用いて地形を測量する場合を想定して規定を整備している。このため、建物形状の取得など構造物の測量とは若干異なる部分があることに留意が必要である。

通常の場合、地上にある三脚の上にレーザスキャナを設置し、そこから観測(スキャン)を行う。現在市販されている多くのレーザスキャナは、機器から一定の間隔(毎秒数万回以上)でレーザ光を発射し、地形等に当たって反射してきたレーザ光を観測している。多くの機器は、縦方向(天地方向)に回転するレーザ光の発射装置(又は縦方向に回転するミラーを用いてレーザ光を順に発射する装置)と、さらにレーザスキャナ本体が横方向(水平方向)に回転する機能を組み合わせることで、全方向を三次元的に高精度・高密度に観測している。

基本的にはレーザスキャナから発射するレーザ光が対象となる地形等に当たり、反射して戻ってくるレー

ザ光を観測することができる範囲全域が観測範囲である。なお、機器の真下周辺部は、機器本体や設置している三脚等の影響があるため観測することができない。

また、機器から離れた場所については、高精度での観測はできない。レーザスキャナによる観測では、機器から発射されたレーザ光が、対象地物に反射して戻ってくるまでの時間等を測定して距離を得ている。レーザ光は直進性が非常に強いという特長はあるものの、ある程度は広がりを持つ。このため、機器より離れた地点になるほど、1回の観測のレーザ光が照射される範囲（これを「スポット」という）が大きくなり、測定の誤差を大きくする要因となる。

地形を測定する場合は特に、遠い地点になるほど、機器から発射されたレーザ光が観測対象の地形等に当たる角度（入射角）が小さくなる。例えば、地上レーザスキャナを地上1.5mの地点に設置した時、水平な地面を観測すると、50m離れた地点における入射角は2度未満となる。入射角が小さくなると、反射されるレーザ光が弱くなるだけでなく、スポットの大きさが大きくなる（正確には、スポットの長径が長くなる）。これもまた、測定の誤差を大きくする要因となる。

このため、一定の精度を確保するためには、観測する地点（スポットの場所）の間隔に加え、観測対象物までの距離や、レーザ光の入射角度、またスポットの大きさなどに留意することが必要となる。マニュアル(案)では、測量精度に応じて、これらの値の制限値を定めている。なお、こうした制限値を踏まえ、どの程度の範囲であれば観測が可能であるかは、あらかじめ

計算等を行った上で、計画をすることが必要になる。これには、測量を行う地形条件に加え、使用するレーザスキャナの機器特性を把握することが重要になる。

また、当然ながら、地形や構造物、植生などがあるためにレーザスキャナ装置から直接観測ができない箇所（建物の裏側等）については、測量を行うことはできない。このような場合は、レーザスキャナ機器を移動させて、複数箇所から観測を行い、その結果を合成することが必要になる。

地上レーザスキャナを用いた測量を行う場合は、こうした点をあらかじめ踏まえ、事前の現地調査を行った上で、機器の特性等を踏まえて十分な計画を立案して測量作業を行うことが必要になる。

3.2.2 作業工程

地上レーザスキャナを用いる場合の測量作業工程は、基本的には、作業規程の準則で定められている現地測量等を踏襲している。数値地形図作成の場合は図1のとおりである。標定点をあらかじめ設置した上でレーザ観測を行い、その結果を元に数値図化を行う。さらに、レーザ観測ができなかった範囲などを対象に補備測量を行い、数値地形図データファイルを作成するという流れになる。

三次元点群作成の場合は図2のとおりである。数値地形図の作成と同様に標定点を設置した上でレーザ観測を行う。点群作成の場合は、その後データの編集作業を行い、異常点や地形以外の点を除去し、必要に応じて構造化等のデータ変換を行う。

図1 地上レーザスキャナを用いた数値地形図作成における工程別作業区分及び順序

図2 地上レーザスキャナを用いた三次元点群作成における工程別作業区分及び順序

3.2.3 標定点の設置

地上レーザスキャナによる観測で直接得られるデータは、局所的な（任意座標による）三次元座標データである。これを、測地座標系をもつデータへと変換するために、標定点が必要となる。

標定点の設置点数や配置の方法は、レーザ観測の方法や座標変換の方法、用いる機器によって違ってくる。例えば、レーザスキャナを観測範囲の任意の場所に設置し、標定点には標識（ターゲット）を設置して観測を行うことができる。この場合、地上レーザスキャナで得た三次元観測データを、標定点の座標を用いて測地座標系に変換することになる。これを行うには、1回のスキャン範囲内に、最低3点（コンペンセータ（本体を自動的に水平に補正する装置）が装備されていないレーザスキャナの場合は、最低4点）の標定点が必要になる。

別の観測方法として、標定点の上にレーザスキャナを設置し、観測を行うことも考えられる。この場合には、レーザスキャナを設置する点（器械点）に加え、もう1点、方向角を得るための点（後視点）として標定点が必要になる。

なお、標定点の設置方法は、TS点の設置方法に準じて行うこととしているが、標定点間の相対的な位置関係を確保するため、標定点間の距離の許容範囲を別に定めており、これを満たした設置が必要になる。

4. おわりに

今回整備・公表した「UAVを用いた公共測量マニュアル（案）」及び「地上レーザスキャナを用いた公共測量マニュアル（案）」は、i-Constructionに係る測量作業を含む今後の測量作業においてぜひ参考としていただきたい。これらのマニュアル（案）については、今後も多くの問い合わせやご意見をいただくことが考えられることから、そうしたものも踏まえ、より良いものになるように改正を続けていきたい。なお、実際にこれらのマニュアル（案）を用いて測量を行った方々には、ぜひその結果や改善提案など、国土地理院にフィードバックをお願いしたい。

i-Constructionなど、今後も三次元データを整備する取組は、さまざまな場面で加速すると思われる。例えばUAVに搭載されるレーザスキャナについても、今後、利用が本格化することが考えられ、こうした新たな測量機器や測量方法についても、国土地理院として今後も検討を進めていきたい。

（受付日2017.6.20，受理日2017.6.27）

参考文献

国土地理院 i-Construction 推進本部事務局，2016，公共測量における UAV 測量マニュアルと安全基準の概要，写真測量とリモートセンシング，VOL. 55，No. 3，pp.210-216.