

ドローンを活用した新たな航空レーザー測量の開発と展開

Development and deployment of a new aviation laser survey system utilizing Drone

田村 博*、漆畑 充**、大高 悦裕***、藤井 靖弘****、白井 康裕*****

Hiroshi TAMURA, Mitsuru URUSHIBATA, Yoshihiro OHTAKA,

Yasuhiro FUJII and Yasuhiro SHIRAI

Abstract : With productivity expected to be improved through the use of ICT, in the construction field, the Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism is standardizing the practice of using drones to conduct topographic surveys. In this paper, we report on the development of a novel method of using drones for topographic surveys and consider its potential.

1. はじめに

国土交通省では建設現場の生産性向上を目的として、ICT 技術を活用する取組み¹⁾「i-Construction」を推進している。すでに土工、舗装工、浚渫（しゅんせつ）工においては ICT 技術の導入が進み、全国各地で取組みが進んでいる。2017 年 12 月に閣議決定された「新しい経済政策パッケージ」においても、i-Construction については、2019 年度までに橋梁・トンネル・ダム工事や維持管理、建築分野を含む全てのプロセスを対象を拡大するとともに、中小事業者や自治体への適用拡大を目指して 3 次元データの活用や ICT 導入を強力に支援している。

また、「i-Construction」では下記項目を目標としている。

- (1) 一人一人の生産性を向上させ、企業の経営環境を改善する。
- (2) 建設現場に携わる人の賃金の水準の向上を図るなど、魅力ある建設現場へ変革する。
- (3) 建設現場での死亡事故ゼロにする。
- (4) 「きつい、危険、きたない」から「給与、休暇、希望」を目指していく。

国土交通省が推進する「i-Construction」の中で、注目されているのが無人航空機（ドローン）による 3 次元測量であり、静岡県でも地方行政の先頭を切って同様の取組みがされるなど、新技術による新しい建設生産システムが構築されようとしている状況である。

なお、「i-Construction」は国土技術政策総合研究所の登録商標である。

2. 共同研究の内容

2.1 共同研究の目的

このように業界が変化する中、ドローンを利用した新たな計測方法の開発を目的として、SLAM(スラム:Simulation

Localization And Mapping / 同時に自己位置推定と地図構築を行う技術) という技術に着目し、静岡市産学交流センターの助言を得ながら、平井工業株式会社（総合建設業）を中心として、株式会社シーズプロジェクト（無人航空機による空撮事業）、株式会社未来システム工房（3 次元設計・解析ソフトベンダ）、合同会社ベストプラクティス・マネジメント（事業運営コンサルティング）と本学（機械工学科 田村研）にて産学共同研究を行う事となった。

なお、SLAM については 2.4 項で説明する。

2.2 共同研究の業務分担

業務の計画、運営、及び計測結果の評価と総括を平井工業が、ドローンとレーザースキャナ（以下 LS と表示）の調達、それらのマッチング、ドローンの操縦、及び点群データの採取をシーズプロジェクトが、点群データのフィルタリング処理と解析を未来システム工房が、実証実験用地の提供とドローンオペレーションについての総合的支援を本学で担当した。計測にあたり、使用する LS とドローンの仕様・規格、基準点や地上の対空標識の色調や設定方法、及びフィルタリングの仕様などを決定し、SLAM 計測の基準や最適な仕様を構築していく。特に SLAM 計測によって得られた点群には、あとから基準となる座標 (X, Y, Z) を与えることになることから、その手順を明確にしていく。

2.3 現状での課題

現状においてドローンを利用した地形測量方法は、航空写真測量と航空レーザー測量の 2 種類に分類される。これらは 3 次元測量と言われるものであり、それにより得られるデータは点群と言われる。点群は地形や物体を 3 次元座標の点で覆うことで、その形状を捉えたものであり、1 点は X, Y, Z の座標値のほかに、色の三原色である R, G, B とその濃淡などの情報で構成されている。図-1 はドローンに

2019 年 6 月 11 日受理

* 理工学部 機械工学科

** 平井工業株式会社

*** 株式会社シーズプロジェクト

**** 株式会社未来システム工房

***** 合同会社ベストプラクティス・マネジメント

よる航空レーザー測量の点群で地形の写真ではなく、LS等で得られた点の集合体をビューアーで表現したものである。

これらの計測は、上空のドローンや図-2 に示す地上の計測機器が GPS 衛星等からの正確な位置情報を取得することで成立している。図-3 に示すように近年、我が国でも測位システム用の衛星の打ち上げが進展していることで、GPS の精度は飛躍的に向上しているが、その一方で空の见えない場所や位置情報取得に十分な数の衛星を捕捉できない場所では、正確に地形を計測することができない状況である。

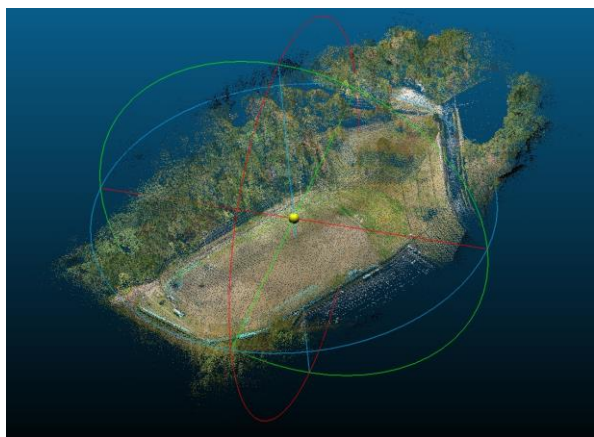


図-1 点群データ例（基準座標と RGB 処理を追加）



図-2 定地型レーザー測量器

また運用上、GPS を利用する際も、計測時の条件設定や事前の計画検討を行うが、地上に設置する対空標識の配置や、図-4 に示す飛行経路のプログラムと飛行計画、ラップ率の整合など、建設分野以外の専門的な知識を必要とする内容も多いのが現状である。



図-3 準天頂衛星の活用例²⁾

建設業界が長年に渡り培ってきた測量技術は、基準点を

もとに測量機器の位置情報（基準高・座標値）を確定し、そこからの差異を計測することで目的物を捉えることである。測量の精度は、誤差のない計測機器が正確な位置情報を得ることで担保されている。こうした事により精度管理に煩雑な手続きが求められている状況では工数が掛かってしまい生産性の向上も不十分な実情もあり、このような状況を改善する事も「i-Construction」の目標となっている。

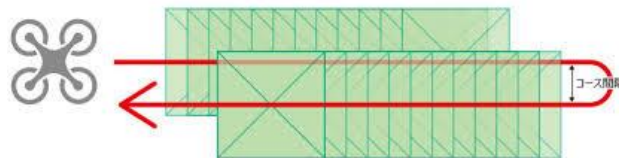


図-4 ドローンの飛行経路と撮影オーバーラップ率

2.4 共同研究での解決策

上記の課題に対して、GPS を使用しない SLAM を利用して、ドローンによる航空 LS 測量を行う事で課題解決を図っていく。SLAM では、ロボットが移動しながらセンサで周囲を計測し、移動軌跡に沿って地図を作成していく。

SLAM の入力にはセンサデータであり、出力はロボットの移動軌跡と地図となる。家電製品のロボット掃除機が SLAM 技術の応用例として知られている。（図-5）



図-5 障害物を避けて掃除をするロボット

SLAM は機器ではなくソフトウェアであり、ロボットに搭載された LS やステレオカメラなどを用いて、地形のサンプリングからだいたいの地図を作製する。サンプリングの軌跡と地図との尤度（ゆうど）計算によって、確率の高そうなサンプリングデータを抽出し、それを繰り返しながら、もっともらしい地図を作成して自己位置を推定する技術である。「もっともらしさ」を抽出する関連演算を高頻度で繰り返すことで、「もっともらしい地図」を「正確な地図」に仕上げるのがこの技術である。

ようするに SLAM は、ロボット位置と地図の推定を同時に行うことで、地図の精度を向上させる技術ということである。

図-6 に示すように、SLAM によって効率的に作成された地図は、移動するロボットが壁や障害物にぶつからないために活用されているが、SLAM を搭載した LS ドローンが作成する 3 次元地図は、3 次元点群による地形データであることから、この地図を取り出す事は新たな航空測量になりうると考えた。

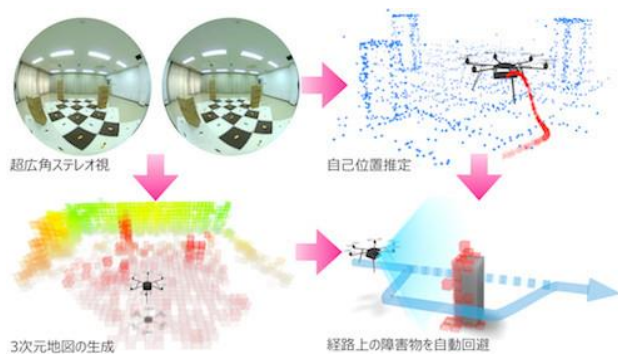


図-6 SLAM 技術によりドローンが飛行経路を予測³⁾

SLAM 技術が、GPS 用の衛星から位置情報を取得することなく、3 次元点群データを作成することは確かではあるものの、そのデータの精度は確認できていない。しかしながら「ドローンが衝突しないためのシステム」を「ドローンから障害物を正確に捉えるためのシステム」として代用することの妥当性は高いと考えられる。

ドローンの飛行高度、速度、及び目的物に対する飛行方法などによって精度にバラつきが生じる可能性は否めないものの、有用性の高い技術であることへの期待度は大きい。一方 GPS を利用した航空計測にも、潜在的な誤差は存在し、それは飛行中のドローンの微動に起因するものである。飛行中のドローンは、プロペラの回転数を制御して、GPS の位置情報を得ながら、決められたコースを忠実に飛行しようとするが、風や気流の影響で絶えず姿勢が変化している。この姿勢変動を補正するセンサ技術の進歩は目覚ましいものの、機体の微動に起因する 10~20 mm 程度の誤差は無くならないと言われている。

原因は、ドローン直下とその周辺は機体からのレーザー照射距離に依存するが、ドローンの横方向に照射されて得られたデータは、ドローンの姿勢誤差が大きく影響してしまう。ドローンには衛星を利用した測位システムが搭載されていて、それぞれの機器によって計測された位置座標と加速度及び角速度を複合的に解析することにより、レーザー照射時の位置と姿勢情報を得ている。

この時、ドローンの姿勢の算出に例えば僅か 0.01° の誤差があったとすると、100m 先のレーザー照射位置では 20 mm 程度の誤差が含まれてしまう。またドローンに搭載されている姿勢制御装置 (IMU) も内部の電子機器が持つ「性能的な誤差」を集積すると姿勢角で 0.04° の誤差が発生する⁴⁾と言われているため、100m の高度から測量した場合には、80 mm 以下の誤差でデータを取得することは困難となる。

対策として、高度 30~50m 程度で飛行し経路幅を調整することで、計測精度を向上させ「i-Construction」の基準が確保できることが実証されている。

SLAM 技術は、前述した測量の基本とは異なり、動かないもの (目的物: ランドマーク) を基準に計測することから、その精度についての期待は大きい。SLAM 技術の有用性が確認されれば、トンネルや建物内のような空の見えない場

所や、GPS から十分な情報を得られない場所においても正確な計測が可能となる。

また、基準点からスタートする計測と違い、取得した点群データに後から基準となる座標値を与えることが可能であることから、精度管理のために求められる煩雑な手続きなどの大幅な工数削減が期待できる。

2.5 共同研究の目標

「SLAM 技術の計測成果が公共事業の要求精度を満たすことの証明、及びその技術の有用性の検証」とした。

現在、国土交通省が認可している 3 次元計測方法と、SLAM 技術による計測方法を比較する。同じ目的物をそれぞれの方法で計測し、得られた点群データのバラつきを評価する。

国土交通省の ICT 土木における平場の出来形管理の規格値は ± 50 mm であるが、SLAM 技術による点群データと、認定計測方法のそれとの差異が、規格値以内であれば、公共工事の要求精度を満たすと判断する。規格値を超える差異が確認された場合は、PDCA サイクルを展開して改善を図る。飛行方法は、精度に与える影響を考える上での重要なファクタであることから、適切なフライトプランの立案についても検討課題とする。

SLAM 技術による計測では、基準となる座標値をどこで与えるかがポイントとなる。理論的には、点群データの中の最低 2 点に、基準となる座標値を与えれば良いのだが、事前に基準点を設け、その座標値を与えてから計測すると精度が向上する可能性もある。精度が確保できる手順を明確にした上で、認定計測方法との工数、所要時間、及びコストの違いを明確に評価することで、SLAM 技術による計測の有用性を検証する。

研究を通じて SLAM 技術の特性を理解して、その計測手法が建設分野に適合することを証明し、どの程度の生産性向上に寄与するのかを捉えることが今回の目標である。

2.6 共同研究の結果

産学共同研究の Kick-off ミーティングは、2018 年 7 月 20 日に静岡市の産学交流センターで行い、研究内容および日程の確認を行った。

次に SLAM のドローン搭載機器ホバーマップの納入時期に合わせて、実証実験日の計画と学内候補地の下見を兼ねて、本学にて 2018 年 8 月 25 日に打ち合わせを行った。

今回の実証実験では、0.5~1.0ha 程度の敷地標本が必要ということで、第一候補地として、本学のグラウンドとした。(本学は人口密集地区外であり、私有地のため高度 150m 未満であれば、国土交通省の飛行許可申請が不要で、学内申請のみで対応が可能という利点がある。) また、実験日を 2018 年 9 月 2~3 週目と仮計画を立てた。

打合せでの内容を元に、図-7 に示すように、航空 LS や写真測量で認識できる標定点基準マークを 300 mm × 300 mm サイズで 4 種類の試作を行った。



図-7 標定点基準マーク (サイズ 300 mm×300 mm)

なお、航空LS測量に用いた機材を表-1に、地上測量および航空写真測量に用いた機器類を表-2に示す。

表-1 使用機材の仕様

	機材社名	機種名
機 体	DJI	Matrice 600
航空LS機器	Yellow Scan	Surveyor
LiDAR 本体	Velodyne	VLP-16
SLAM 機器	emesent	Hovermap

表-2 地上測量および航空写真測量機材

	機材社名	機種名
地上計測(TS)	TOPCON	DS-205i
〃	Leica	MS 60
航空写真測量	DJI	Phantom 4

ドローンによる航空LS測量の飛行経路プログラムを図-8に示す。

グラウンド平地および法面は対地高度 35m、飛行速度は 5m/s で設定した。

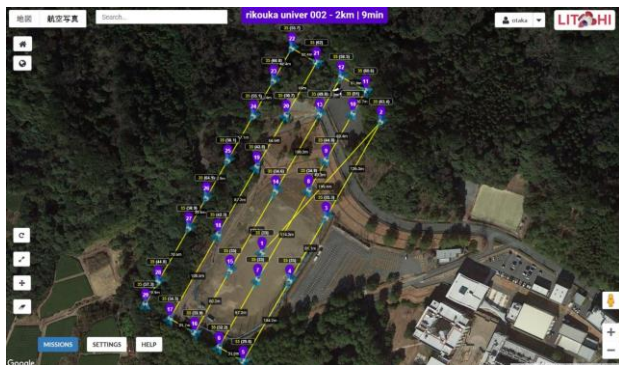


図-8 ドローンによる LS 測量の飛行経路プログラム
(提供：株式会社シーズプロジェクト)

飛行コース幅は、航空LS測量において対地の照射角 90° (有効分) と飛行高度から逆算して、一部は経験則ではあるが、図-9のようにLSのオーバーラップ率より設定されている。

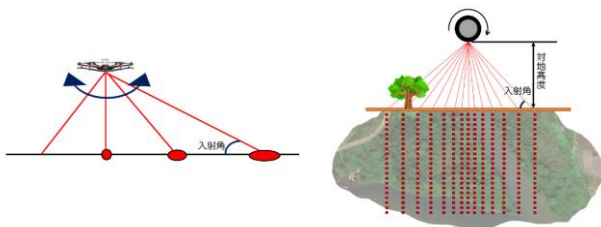


図-9 航空LS測量の入射角⁵⁾

表-3に示す内容の①～④の計測を実施し、それぞれの画像や点群データを採取した。

表-3 実証実験の計測方法の比較

No	計測方法 仕 様	公共認定	概要	実験の様子
①	定置式LS測量 地上レーザースキャナー	○	地上にレーザースキャナーを設置して地表をスキャンする。後方交会法で基準点を視準し、機器位置を確定して計測を行う。広範囲を計測するのに数回の設置が必要。	
②	航空写真測量 ドローン+カメラ	○	GPSを利用して飛行するドローンに搭載したカメラで地上を撮影する。ラップ率を設定した膨大な写真から点群データを作成する。最も一般的な方法である。	
③	航空LS測量 ドローン + レーザースキャナー	○	GPSを利用して飛行するドローンに搭載したレーザースキャナーで地上をスキャンする。専用機器の台数が少なく高価であることから調達に難しい。	
④	航空SLAM測量 ドローン + レーザースキャナー		飛行するドローンに搭載したSLAM/レーザースキャナーで地上をスキャンする。GPSを利用しないので独自のフライトプランが必要。本件の研究対象技術である。	

標本となる本学グラウンドに試作した標定点基準マークを図-10のように3次元設計面を設定し、それぞれの計測によって点群データとその面との離隔をヒートマップなどで表現することで、図-11に示すようにそれぞれの点群データのバラつきを比較した。なお表-3にある後方交会法とは、3つ以上の座標が既知の点を用い、自分自身の座標を求める手法である。

表-3①～③の結果と④の結果とが近似値ならば、SLAM技術による計測が公共の認定技術と同等の精度を有することの証明となる。また④のバラつきが大きい場合には、それを低減させる対策を検討し、仕様や手順を変更して再計測を行い、改善度合を確認した。



図-10 3次元設計面の設置

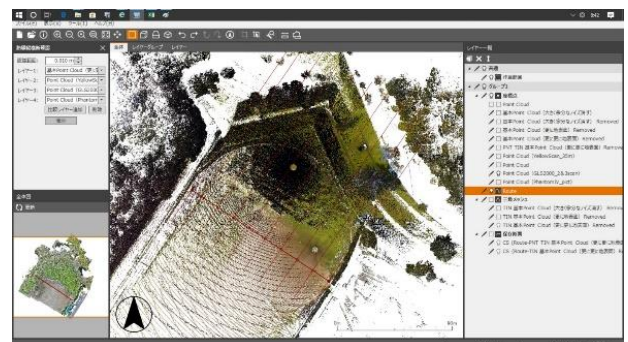


図-11 各計測結果を比較
(提供：株式会社未来システム工房)

標本となる本学グラウンドは、複雑な地形ではなく、広くて平らなグラウンド面と階段状に整備された法面があり、計測①～④の差を比較しやすいロケーションとなっている。前述した通り、公共の認定技術であったとしても、航空測量には潜在的な誤差が存在する。定置型の LS には、レーザーの水平到達距離に限界があり、遠く離れるほど精度が低下する。標本となる地形が複雑であると、それぞれの計測方法のバラつきが拡大する恐れがあることから、「単純で大きなもの」を標本の選定としている。

航空 LS 測量によって得られた点群データに RGB 処理を行いビジュアル化した画像を図-12 に示す。グラウンド、法面、林ならびにフェンスや駐車場の一部も綺麗に再現されている。



図-12 ドローンによる LS 測量に RGB 処理を行った画像

SLAM 技術は、複雑な地形や構築物のスキャンも優れた性能を発揮すると考えられているため、本学のエアープレーンショップ、駐輪場、また造形的に特徴のある「建築棟」の屋外と内部をスキャンする実験も行った。

なお、図-13 に示す、エアープレーンショップ周辺はドローンによる SLAM 測量ではなく、地上を歩いて計測したデータである。

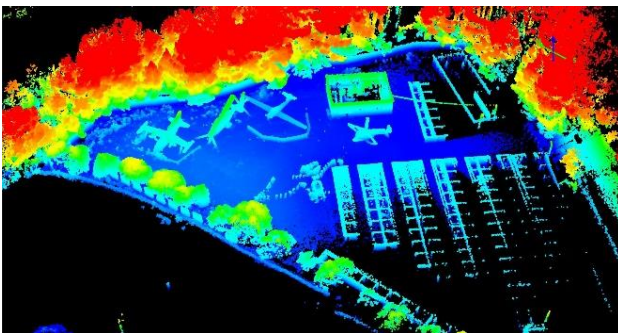


図-13 本学 Airplane shop の SLAM 計測のデータ

今回使用した SLAM 機器は、ドローンから取り外してハンディ機器としても利用できるため、建築棟外周をドローンで計測し、SLAM 機器を持ち歩いて建築棟内部も計測した。内側と外側のデータを専門のソフトウェアにて合わせることで、図-14 に示すように、水平または垂直方向に任意の位置で「断面図作成」が可能となる。

なお、測量を行った建築棟の SLAM の生データ (LAS ファイル) は、建築学科へ提供した。

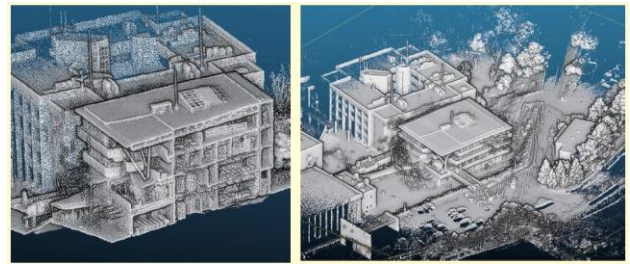


図-14 建築棟を縦方向に輪切した画像

(株)シーズプロジェクト カタログより)

学内グラウンドでの計測実験における、所要時間とコスト試算を表-4 に示す。さらに、それぞれの特徴を表-5 に示す。航空写真測量では標定点を事前に設置する必要があり、その時間は 3 時間程度必要となる。

また、ドローンによる各種航空測量の飛行経路プログラムや現場の下見時間等は含んでいない。

表-4 各種計測の時間とコスト試算

No.	①	②	③	④
計測方法	航空写真測量	航空 LS 測量	定置式 LS 測量	航空 SLAM 測量
公共認定	○	○	○	未
仕様	ドローン+カメラ	ドローン+LS	地上 LS	ドローン+LS
工数 計測	1 人工	0.1 人工	0.8 人工	0.1 人工
解析	1 人工	1 人工	1 人工	1 人工
計測時間	5 分	5 分	3 時間	5 分
解析	1 日	1 日	1 日	1 日
コスト	30～50 万	50～80 万	50～80 万	50～80 万

ドローンを活用した航空測量 (表-4 の①, ②, ④) は飛行場所の許可申請や専門の知識と技術を必要とするが、定置式 LS 測量と比較するとコストや作業時間において有効であることがわかる。

表-5 各計測方法の特徴

No.	特 徴
①	オーバーラップ率 80～90%、サイドラップ率 60% で撮影するため、大量の写真データが発生する。上から見える景色を処理するため、壁や法面に弱い。
②	サイドラップ率 50% 以上で計測する。マルチまたはシングルのレーザーを一定の迎角で照射する。鉛直に照射されるレーザーは地表深部にも到達する。
③	定置式 LS は地上高 1.5m 程度から斜めにレーザーを照射するので、広大な水平面や死角ができる場所では、複数回の移動が必要となる。設置と計測に時間が掛かる。
④	扇状に照射する LS をさらに回転させることから、半球状にレーザーを照射する。砂漠や海上など、変化の無い単調無限平面などでは自己位置を特定できなくなる。

図-15、16 に今回計測した「写真測量」「地上型 LS」「航空 LS」「航空 SLAM」の点群データ (色分けして表記) のばらつき具合を示す。

画像はどちらも Z 軸方向のもので、図-15 より平地面をみると地上型 LS の値よりも航空 LS、SLAM の値の方が全般的に下側にでているのが分かる。

これは、計測区域はグラウンド平地部北側の草地であり、地上型 LS では横から照射されるため、草の表面を拾うのに対して、航空 LS、SLAM では、ほぼ鉛直方向から照射されるため、地表付近も計測できていることによる。

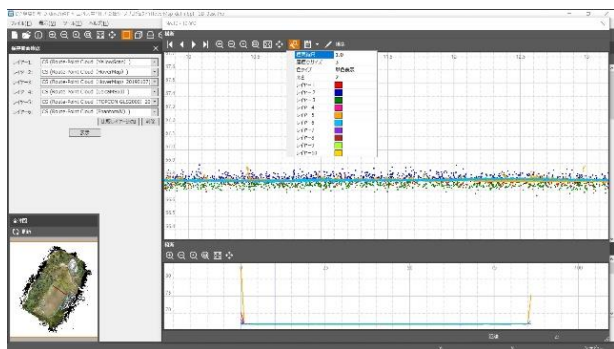


図-15 グラウンド平地面の計測点群
(提供：株式会社未来システム工房)

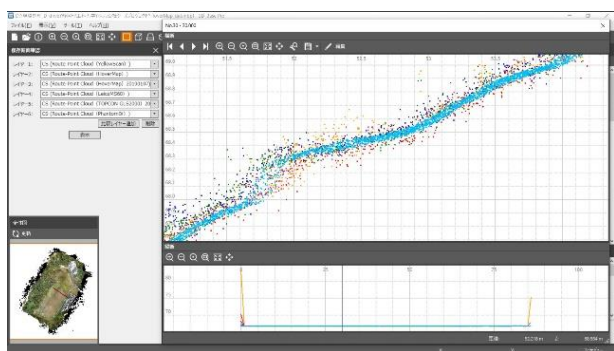


図-16 グラウンド法面の計測点群
(提供：株式会社未来システム工房)

また、図-16の法面では、「写真測量」「地上型LS」「航空LS」は2018年9月28日に行い、「航空SLAM」は機器の調整遅れで同年12月4日に行ったことにより、法面雑草の高さも影響し平地よりもばらつき具合が大きく、20 cm以上の差が出ている場所もあった。

2.7 今後の課題

測量とSLAM技術は、どちらも「環境を計測して地図をつくる」という点は似ているが、現状での土木測量では「精度の良さ」あるいは「誤差の少なさ」を追求しているのに対してSLAM技術では、「ロバスト性」に重点を置いている点の違いとなっている。⁶⁾ ロバスト性とは、外的要因による変化を内部で阻止する仕組みや性質である。

土木測量ではmm単位の精度が要求されるが、ロボットの自動走行では数cmの誤差があっても、障害物を回避できる、あるいは衝突せずに移動ができれば良いことになる。また逆にロボットでは、外乱やノイズなどで動作が停止してしまうようでは問題となるが、人的な測量では外乱やノイズは人間が対処することで解決ができる。

計測工学上では、誤差は大きく分類して3つに分けることができ、偶然誤差、系統誤差、間違い誤差となっている。

このうち、偶然誤差は統計的に対処する理論が整備されているので、測量でもSLAM技術でも対処が可能となる。現状、SLAM技術で難しいとされているのは、系統誤差と間違い誤差と言われている。特に間違い誤差は、データ対応付けにおいて頻繁に発生して外れ値を生じさせるので、その対処が非常に重要とされている。また系統誤差に対処するには校正(calibration)が必要となる。

ドローンを活用したSLAM技術の測量では、飛行時間が比較的小さいので、通常長時間稼働するロボットと比較すると系統誤差は少ないと考えられる。

測量では、間違い誤差は人間が起こすことが多い反面、人間がチェックして取り除くことができる。系統誤差も人間があらかじめ校正作業を行なう、あるいは測量の手順に「チェック項目」を組み込むことで対処することが可能である。今後、各種技術の進展により、測量とSLAMの「差」や「違い」はますます小さくなって行くと推測できる。

比較検討項目として、今回ドローンによる飛行コースは、南北に縦断する方向で計測を行ったが、法面のように高さが変化する場所では、地形の高さ変化に対して東西に横断する方向で飛行して、コース幅に対しては、法面傾斜に合わせて段階的に高度を維持して計測する方法を再実験し比較検討を計画している。

また、現状ではSLAM計測の出力はR.G.B化されていないため、色による識別が行えない弱点もあるので、データ上にて図-7で示した標定点基準マークの識別ができなかった。今後の技術開発に期待したい。

3. 研究成果の発表

今回の産学共同研究は、2019年3月15日(金)に、静岡市産学交流センターの主催による「平成30年度産学共同研究成果発表会」にて発表を行った。



図-17 研究発表の様子



図-18 会場内での展示

4. まとめ

SLAM技術は、まだまだ発展中であるが、総合的に見て近い将来には同技術を測量に応用する事は可能と思われる。

現状、土木の公共事業に準拠できる精度ではなかったが、例えば古い橋や建物ほど図面が残っていない場合があるので、航空LSを活用することで簡易的な図面作成に対応することができ、3D-立体図を残すことが可能となり、構造物のメンテナンスや施工の履歴管理にも役立つ手法となる。また、SLAM技術はドローンの飛行において、障害物を避けて飛行することが可能であり、GPSが拾えない場所での測量・地図作成(例：橋梁の下、トンネル内、洞窟など)、さらにGPSと連動ができるため、GPS環境下から非環境下へと連続する場所のスキャニングにおいても有効な技術であり、今後はさらに建設業界での利活用が広がると推測できる。

謝辞

今回の「産学共同研究」は、全般的には土木測量という専門外のテーマであり「初めて知る世界」の中で、各社の連携を上手にリードしていただいた平井工業株式会社の漆畑 充課長、各種計測で得たデータの解析に関して分析

し丁寧に解説をしていただいた株式会社 未来システム工
房の藤井 靖弘所長, 地上測量ならびにドローンによる航
空写真測量でご協力をいただいた株式会社 内田建設の内
田 翔専務, 株式会社 豊富の松浦 真悟主任, ドローンによ
る新たな航空測量の SLAM 技術を先行投資した株式会社
シーズプロジェクトの大高 悦裕社長, 業務運営のアドバ
イスをいただいた合同会社ベストプラクティス・マネジメ
ント静岡オフィスの白井 康裕代表, 静岡市産学交流セン
ターの松本 豊氏, 加藤 俊文氏, 菅沼 綾子氏, 各人のご
支援に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 国土交通省ホームページ ICT の全面的な活用
http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/constplan/sosei_constplan_tk_000031.html
- 2) 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合研究機構
ニュースリリース
2014 年 6 月 26 日
- 3) 株式会社 リコー ニュースリリース
2017 年 3 月 15 日
- 4) 野波 健蔵 編著, “ドローン産業 応用のすべて”
株式会社 オーム社, 2018 年
129, 130, 131, 132 頁
- 5) 株式会社テクノシステム ホームページ
http://www.techno-web.co.jp/?rc=uav_laserscanner
- 6) 友納 正裕 著, “SLAM入門”
株式会社 オーム社, 2018 年
60 頁

