

# 測量における i-Construction の取り組み -複数のレーザスキャナを用いた3D測量-

パシフィック  
コンサルタンツ株式会社  
中部交通基盤事業部長  
金子雅明

前田建設工業株式会社  
愛知道路 CM r 作業所  
統括所長  
今坂成史

株式会社計測リサーチコンサルタント  
クリエイティブ事業部  
取締役事業部長  
西村正三

愛知県道路公社  
事業部事業課  
主任専門員兼主査  
脇本勝通

## はじめに

測量における i-Construction の取り組みを紹介する。設計 CIM が推進される中で正確な 3D 地形データが待望される。しかし、山林等における従来のトータルステーション測量 (TS 測量) では、経験豊富な測量技術者が地形変曲点毎に測量し、TS の盛替えに労力がかかる、供用中の道路を面的に測量するには通行規制が必要など課題が多い。

本報告では、自動車専用道路に隣接する山林を造成して IC を新設する設計に用いる測量として各種のレーザ等により実施した 3D 測量について報告する。山林部分では参考文献 1) に準拠して UAV に搭載したレーザによる測量 (UAV レーザ測量) を実施し、供用道路部分では MMS (Mobile Mapping System: 高精度 GPS 移動計測装置) を実施した。UAV レーザ測量では、上空から短時間で広範囲を計測し、自動フィルタリングにより樹木下の地形データを高密度に取得した。また既設構造物の端面などを地上レーザ測量により 3D 化することで、従来の TS 測量に比べ有効な測量データになることが実証できた。

事業名: 愛知県有料道路運営事業武豊北インターチェンジ(仮称) 新設工事

事業主体: 愛知県道路公社

業務名: 武豊北インターチェンジ(仮称) における 3次元地形データ 計測業務

業務目的: 3次元計測により 3次元地形データを取得し、3次元データの計測精度の確認を行い、実用性を検証。従来手法 (TS 測量) と効率性について比較

業務実施者: パシフィックコンサルタンツ株式会社

前田建設工業株式会社

計測作業実施者: 株式会社計測リサーチコンサルタント



図-1 武豊北インターチェンジ(仮称)の位置

## UAV レーザ等による地形測量の概要

供用中の自動車専用道路と新設 IC 建設予定地を対象に、UAV レーザ測量と MMS 測量および地上レーザ測量を実施した。

### (1) UAV レーザ測量

3D 地形測量の手法として、「UAV レーザによるリアルタイム空間情報取得システム」を用いた。本システムは、UAV に搭載されたメインシステム (PC) で GNSS/IMU とレーザスキャナの完全自動統合を行い、自動統合された色付き点群を無線 LAN により地上の PC へ伝送するシステムである。このシステムは、GNSS/IMU 解析処理後の正確な点群データの取得状況をリアルタイムに確認することができるため、状況に応じた柔軟かつ迅速な飛行ルート変更を可能とするほか、欠測に伴う再測の解消により作業時間の短縮等が図られる。

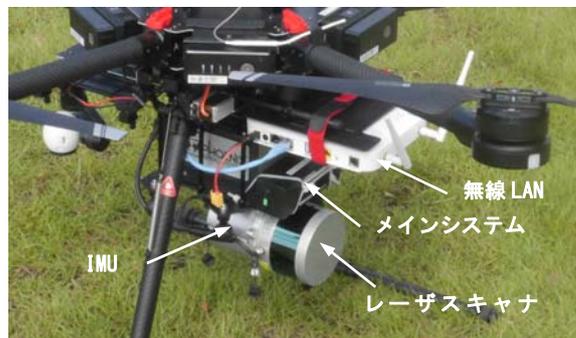


写真-1 UAV レーザ (リアルタイム空間情報取得システム)

### (2) MMS 測量

UAV は、墜落リスクの観点から供用中の道路の直上を飛行させることはできず、道路から 45° 離れたルートを飛行させる必要がある (図-5 参照)。また今回用いた UAV レーザは、上空斜めからの反射強度が低いアスファルト面のデータ捕捉には弱点があった。そこで平面・縦横断面を面的に走行しながら測量することが可能な MMS で計測することとした。

MMS には、パシフィックコンサルタンツ保有のトンネル計測にも対応できる MIMM 車両を用いた。走行ルートは、上下 4 車線をそれぞれ走行して測量した。



写真-3 MMS 測量(MIMM 車両)

(3) 地上レーザ測量(据置・モバイル)

地上レーザ測量は、UAV 飛行ルート外の裸地や UAV レーザでの欠測が懸念される垂直に構築されたボックスカルバートの翼壁等、上空から測量が困難な箇所での補助とした。UAV レーザと重複する部分では精度を優先して地上レーザ測量(据置)により 3D 合成した。モバイルは、見通しが悪く、GNSS データを捕捉できない箇所で使用した。

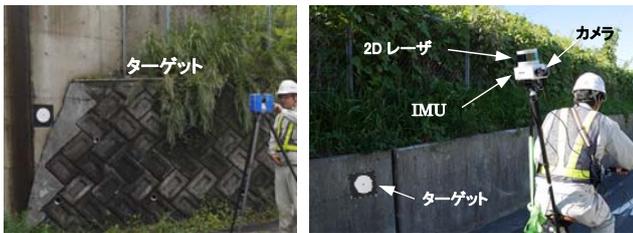


写真-2 据置(左)とモバイル

今回用いた 4 種類のレーザスキャナの性能を表-1 に一覧にして示す。

表-1 使用レーザスキャナの性能表

種類	機器名称	計測精度	放射点数
UAV	Phoenix:AL3-16	±3cm	30 万点/秒
MMS	SICK:LMS511-20100PRO	±7mm	2.7 万点/秒
据置	FARO:FOCUS 3D	±2mm	12 万点/秒
モバイル	KAARTA:Stencil2	±3cm	30 万点/秒

(4)各レーザの使用区分を図-2 に示す。

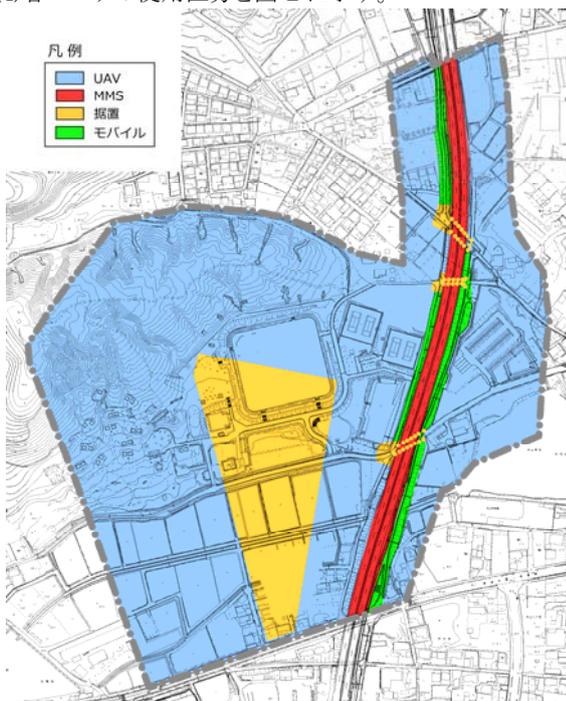


図-2 レーザ使用区分

## UAVレーザ測量等の設定方針

UAVレーザ測量等の作業は、図-3 のプロセスにしたがって実施した。以下では特に留意した点について述べる。

- ①UAV 飛行に課題となる電波塔などの有無を確認した結果、範囲内の 2 基の携帯基地局があり、30m の離隔を取る飛行ルートとした。
- ②UAVレーザで樹木下の 3D 地形を作成するには、均等な点間隔が望ましいため 16 方向のレーザを照射する Phoenix:AL3-16 を用いることとした。また進行・横断方向の点間隔が同程度となるように飛行高度・速度を設定した。
- ③飛行コース間隔は、データのノイズ低減を考え、各飛行毎に 45° 迄のデータを用い、オーバーラップを取るように設定した(図-5 参照)。
- ④また景観検討への活用を考え画像も同時に取得し SFM 解析が行える計画とした。

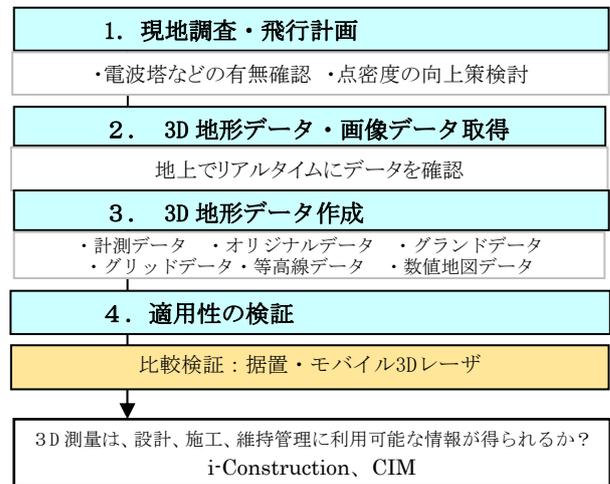


図-3 UAVレーザ測量等の作業実施フロー

上記で検討した結果を基に、計画したUAVレーザ飛行計画及び調整用基準点の配置計画を図-4 に示す。

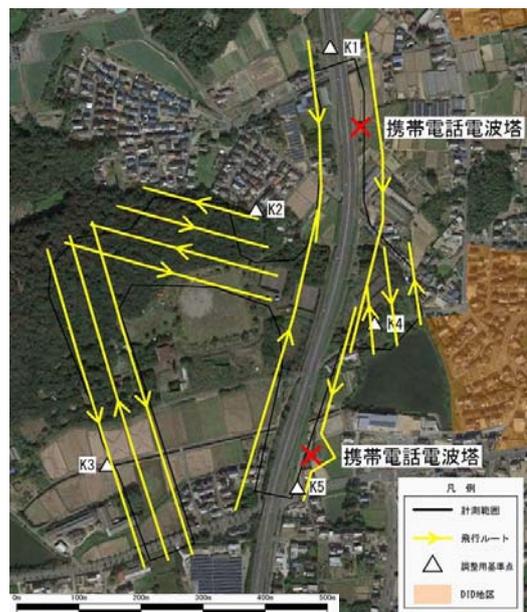


図-4 UAVレーザの飛行計画及び調整用基準点配置

UAVの飛行ルートなど測量諸元(高度、速度、計測点密度)の設定方針を表-2、図-5にまとめて示す。

- ・高度:対地 40m。ただし、山林部計測においては、地表データ収集のため一部で 30m 程度としている。
- ・飛行計測速度:4m/sec。
- ・点密度:フィルタリング処理前のオリジナルデータの点密度は、100 点以上/m<sup>2</sup>とした。

表-2 各飛行ルートの設定の方針

飛行対地高度	30~40m (As 反射:30~40m)
飛行速度	4m/sec
LS 拡散角	3mrad
スキャン・レーザ発光回数	10 回転/sec 300,000 回数
有効計測角 計測幅	45 度 60~80m
コース間隔	30~40m
計測密度(進行、横断方向)	10cm×10cm

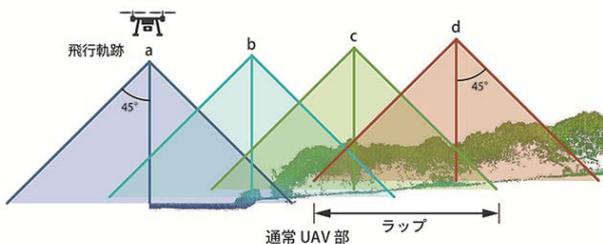
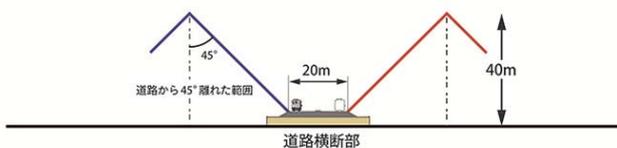


図-5 各飛行ルートの設定方針のイメージ

## UAVレーザ測量の計測結果

UAVレーザで計 14 フライト計測した。以下では風環境における飛行の安全性確保、リスク回避のための安全対策、取得データの点密度について述べる。

### (1) 風の影響等飛行上の問題の有無と対策

風の影響は大きく、10m/sec 以上の風がある場合は原則飛行させない。風速計を使い、風がないタイミングを図る。上空では、機体の挙動に常に留意する必要がある。

### (2) 安全対策

本計測前にルート、速度、高度等の確認のため、小型 UAV (Phantom4Pro) を用いて同ルートにて確認飛行を行い、本計測の際の微調整ができるようにした。

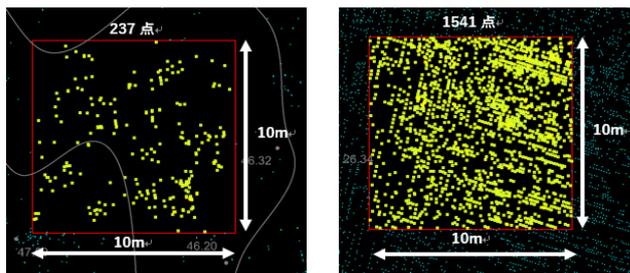
### (3) 取得データの点密度

フィルタリング処理後のグラウンドデータの点密度は、場所により粗密はあるが、概ね平地部で 15 点/m<sup>2</sup>、山林部で 2 点/m<sup>2</sup>程度の点群を取得した。



グラウンドデータの点密度計測箇所

図-6 UAVレーザ測量における点密度サンプリング箇所



(a)山地部

(b)平地部

図-7 測量した点密度

## UAVレーザ測量他の精度検証

### (1) UAVレーザ測量の精度検証

現行の公共測量作業規程には、UAVレーザに関する規定はないが、17 条に「(機器等及び作業方法に関する特例)」があり、本業務では、3D 点群を生成するまでのアプローチを航空レーザと同様の GNSS/IMU、レーザとした。また調整用基準点の設置数、IMU の安定化にも十分熟知して計測を実施した結果、地図情報レベル 500 を満足するものである。調整用基準点は、反射強度を得るため白色に塗装した木製標識(90cm×90cm)を 5 点設置。調整用基準点の計測(座標付与)は、既設 4 級基準点から TS 測量により行った。



図-8 調整用基準点標識の実物写真と点群取得状況

調整用基準点における点検は、UAVレーザの標識天端上で得られた点群データのうち標高データの平均値を、水平位置は標識天端中心あるいは天端角の座標値を、TS 測量で得た値と比較することにより行った。コース間較差、調整用基準点における較差は、いずれも許容値(コース間較差 3cm、調整用基準点の較差 5cm)内に収まっている。また、TS 測量との誤差は、計測断面によってずれはあるが概ね

3cm～6cm程度である。TS 測量と MMS 測量との誤差は大きいところで 3cm 程度であった。今回の測量では、UAV レーザ、MMS は、国土地理院が管理している電子基準点を基準にした公共座標系に変換された点群データである。またモバイル 3D レーザは、写真-2 に示すように GNSS を必要とせず、レーザ点群・IMU・カメラのデータを統合処理し、自己位置推定を行い自動合成する SLAM 技術による相対測位の後、ターゲット基準を用いて公共座標に変換した。その後それぞれの誤差分を補正して 3D 合成させている。

(2) 樹木部分の UAV レーザ測量成果

樹木部分の UAV 測量成果については、図-9 に示すように地表面と草木の先端の両方のデータが密な点群データとして捕捉されており、従来の TS 測量では作図できない部分を表現できていることが評価できる。

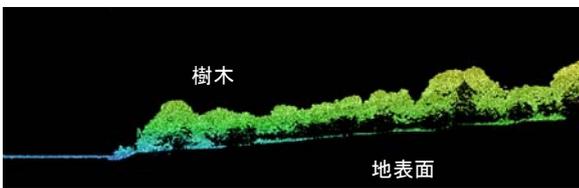


図-9 UAV レーザ取得の点群(樹木部分)

(3) 地上レーザ測量(据置とモバイル)

据置とモバイルの計測精度の違いの評価は、ボックスカルバートの計測結果を用いた。据置による取得点群を基準とし、モバイルの取得点群を BOX 両端部4箇所に設置した標定点を用いて合成し、両者の差を比べた。モバイル(KAARTA Stencil2)の測定精度は±3cm であり、取得点群はある程度の厚み(ばらつき)を持つが、BOX の形状自体は据置による取得点群と概ね合致している。切り出した縦横断面における据置による取得点群との差は、20mm 程度であった。

表-3 据置とモバイルの比較

	据置	モバイル
測定精度(公称)	±2mm	±3cm
現場計測時間	30min	5min
データ処理時間	2hour (合成・座標付与)	20min (座標付与)

なお、モバイル 3D レーザ(KAARTA Stencil2)については、今回の計測では比較的良い結果が得られ、地形測量には十分な精度を有しているものと考えられるが、特徴変化の少ない構造物が連続した場合、自己位置推定に誤差が生じ、データにズレが生じることがあるので注意が必要である。

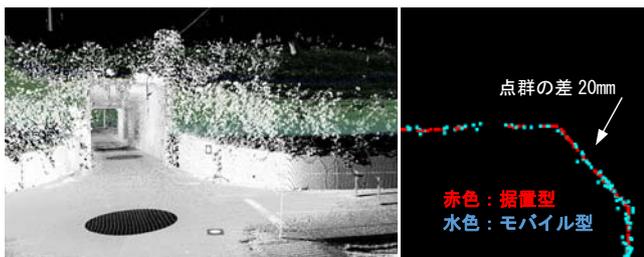


図-10 据置点群(左)とボックスカルバート隅角の点群比較

## 従来の TS 測量との比較について

従来の TS 測量と UAV レーザ測量等との比較を表-4 に示す。前者の工数・直接費は測量業務積算基準における現地測量(S=1/500)の標準歩掛を用いて算出し、後者は実工数及び実費用から算出した。実際の現地作業で言えば、TS 測量が約 1.5 ヶ月要したのに比較して UAV レーザ測量等は 4 日程度であり、現場負担ははるかに軽減できるが、トータルコストは同程度となった。

表-4 工数等の比較(0.1km<sup>2</sup>当り)

	TS 測量	UAV レーザ測量等
外業工数	23.7	4.0
内業工数	11.4	12.0
工数計	35.1	16.0
直接費	1,145,000 円※1	1,048,000 円※2

※1 機械経費、通信運搬費、材料費、精度管理費を含む。

※2 機器損料、ソフトウェア使用料を含む。

※3 TS 測量の地域区分は平地/耕地とし、変化率は 0 としている。

## おわりに

UAV レーザ測量は、強風制限や墜落リスクを抱える一方で今回のような樹木の多い場所での点群取得に非常に有効であること、一方地上レーザ測量(据置、モバイル)が、UAV の苦手な垂直面計測や見通しの効かない狭小部分に便利なることが実証できた。また、UAV 墜落のリスクや上空制限のある道路面での高精度なデータ取得が必要な箇所については MMS が有効であることが分かった。すべての地形情報を従来の TS 等による実測手法で行えば、設計上の要求精度は満たすことになるが、しかしコスト面の課題があるため、例えば今回紹介したモバイル 3D レーザなど高精度でなくてもよい地形測量手法の棲み分けが今後必要になると考える。

### 《参考文献》

- 1) 公共測量 作業規程の準則 第 3 編 第 8 章 航空レーザ測量(国土交通省、平成 28 年 3 月 31 日改正)
- 2) 移動計測車両による測量システムを用いる数値地形図データ作成マニュアル(案)、国土交通省国土地理院、平成 24 年 5 月
- 3) 地上レーザスキャナを用いた公共測量マニュアル(案)、国土交通省国土地理院、平成 29 年 3 月
- 4) 無人航空機搭載型レーザスキャナを用いた出来形管理要領(土工編)(案)、国土交通省、平成 29 年 3 月
- 5) UAV を用いた公共測量マニュアル(案) 国土交通省国土地理院、平成 29 年 3 月
- 6) 公共測量における UAV の使用に関する安全基準(案) 国土交通省国土地理院、平成 28 年 3 月