

## (32) 土工の施工管理における UAV搭載型レーザスキャナによる 計測誤差に関する調査研究

田中 成典<sup>1</sup>・窪田 諭<sup>2</sup>・今井 龍一<sup>3</sup>・中村 健二<sup>4</sup>・山本 雄平<sup>5</sup>  
塚田 義典<sup>6</sup>・谷口 寿俊<sup>7</sup>・中原 匡哉<sup>8</sup>

<sup>1</sup>正会員 関西大学教授 総合情報学部 (〒569-1095 大阪府高槻市霊仙寺町2丁目1番1号)

E-mail: tanaka@res.kutc.kansai-u.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 関西大学准教授 環境都市工学部 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町3丁目3番35号)

E-mail: skubota@kansai-u.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 東京都市大学准教授 工学部 (〒158-8557 東京都世田谷区玉堤1丁目28番1号)

E-mail: imair@tcu.ac.jp

<sup>4</sup>正会員 大阪経済大学教授 情報社会学部 (〒533-8533 大阪府大阪市東淀川区大隅2丁目2番8号)

E-mail: k-nakamu@osaka-ue.ac.jp

<sup>5</sup>非会員 関西大学特命准教授 先端科学技術推進機構 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町3丁目3番35号)

E-mail: y.yamamo@kansai-u.ac.jp

<sup>6</sup>正会員 岩手県立大学講師 ソフトウェア情報学部 (〒020-0693 岩手県滝沢市菓子152番地52)

E-mail: tsukaday@iwate-pu.ac.jp

<sup>7</sup>正会員 九州大学助教 工学研究院 (〒819-0395 福岡市西区元岡744番地)

E-mail: taniguchi@doc.kyushu-u.ac.jp

<sup>8</sup>非会員 関西大学大学院 総合情報学研究科 (〒569-1095 大阪府高槻市霊仙寺町2丁目1番1号) /

国土交通省国土技術政策総合研究所 社会資本マネジメント研究センター 社会資本情報基盤研究室

E-mail: k732803@kansai-u.ac.jp

UAV写真測量により生成された点群データを施工管理や災害時などの様々な利用シーンで活用することが期待されている。しかし、UAV写真測量の場合、点群データの生成に膨大な時間がかかる課題や日中の明るい時間帯以外では計測できない課題がある。これらの課題に対応するため、UAV写真測量よりも短い時間でかつ、夜間での計測が可能で点群データを生成可能なUAV搭載型レーザスキャナが開発されており、i-Constructionに係る規程の中でも、施工管理に必要な要求精度が示されている。しかし、UAV搭載型レーザスキャナによる点群データの生成精度は現場の条件によって変わるため、様々な現場の条件下で同様の精度を実現する必要がある。そこで本研究では、施工管理時のUAV搭載型レーザスキャナの計測誤差の要因を調査し、各誤差要因の生成精度への影響の有無を明らかにする。

**Key Words :** UAV, laser scanner, point cloud data, construction site, i-construction

### 1. はじめに

UAV (Unmanned Aerial Vehicle) は、施工の現場や土砂災害などの災害時における状況把握など様々な利用シーンにおいて活用されている。特に、道路や河川の施工管理では、i-Constructionの中でUAV写真測量を用いた出来形管理要領<sup>1)</sup>が規定され、建設生産性の向上が期待されている。ただし、UAV写真測量では、写真からの3次元点群データ (以下、点群データ) の生成に膨大な時

間がかかるため、日々の成果をその日中に確認することが困難な課題や日中の明るい時間帯以外では計測できない課題がある。

これらの課題に対応するため、夜間でも3次元情報を直接計測可能なレーザスキャナをUAVに搭載することで、昼夜に依らない点群データの生成が可能となった。2017年3月には、出来高や出来形管理などの施工管理における無人航空機搭載型レーザスキャナ (以下、UAV搭載型レーザスキャナ) の要求精度が決定<sup>2)</sup>された。こ

の要求精度を満たすため、高精度なセンサ機器を搭載したUAV搭載型レーザスキャナ<sup>3)</sup>や安価なセンサ機器を搭載し、高精度に補正するアルゴリズムを組み込んだUAV搭載型レーザスキャナ<sup>4)</sup>の開発が進められている。前者のUAV搭載型レーザスキャナは施工管理の要求精度を満たすが、搭載する機器が非常に高価である。そのため、中小規模の現場を担当する建設業者は、後者の安価な機器を搭載したUAV搭載型レーザスキャナの導入を主に検討している。ただし、常に要求精度を満たす高精度な点群データを生成するためには、精度に影響を与える搭載機器の特性、現場の状況を考慮した最適な生成方法や計測条件の設定等が必要となる。

そこで本研究では、施工管理に適したUAV搭載型レーザスキャナによる点群データの生成手法を調査し、高精度に生成するために考慮すべき項目を明らかにする。

## 2. UAV搭載型レーザスキャナを用いた点群データ生成手法

### (1) 点群データ生成の既研究

UAV搭載型レーザスキャナは、計測対象上空を飛行すると同時に真下に向けてレーザを照射して、計測対象全体の点群データを計測できる。この際、UAV搭載型レーザスキャナに搭載するレーザスキャナの計測データは、ローカル座標系である。そのため、UAV搭載型レーザスキャナではこれらの点群データの位置と傾きを補正し、重畳して計測対象全体の点群データを生成する。既存のUAV搭載型レーザスキャナを用いた点群データ生成手法は、GNSS (Global Navigation Satellite System)、IMU (Inertial Measurement Unit) を用いる手法<sup>3)</sup>とSLAM (Simultaneous Localization and Mapping) を用いる手法<sup>4)</sup>が一般的である。

GNSS、IMUを用いる手法<sup>3)</sup>は、点群データを計測したときの飛行位置と機体の傾きをGNSSとIMUにより計測して補正する。この手法は、レーザスキャナ、GNSSとIMUの計測時刻を高精度に同期することで、計測対象全体の点群データを生成できる。

SLAMを用いる手法<sup>4)</sup>は、点群データ内の特徴点を用いて、異なる時間に計測された点群データ同士の相対的な位置や傾きのズレを推定し、補正する。この手法は、特徴点となる地物が計測範囲内に多く存在する場合には高精度に計測対象全体の点群データを生成できる。

### (2) 施工管理に適した点群データ生成手法の選定

道路や河川土工の現場は、道路や河川堤防の長手方向に対して一様な形状をしており、特徴物が少ない特性がある。SLAMを用いる手法を適用した場合、道路や河川

土工の現場には特徴物が少ないため、点群データ同士の相対的な位置や傾きのズレを誤推定すると考えられる。一方で、GNSS、IMUを用いる手法を適用した場合、特徴物の有無に係わらず、UAV搭載型レーザスキャナの位置と姿勢を計測して補正できる。そのため、施工現場で用いる場合は、SLAMを用いる手法よりもGNSS、IMUを用いる手法の方が計測対象全体の点群データを高精度に生成できると考えられる。

これらのことから、本研究では、GNSS、IMUを用いる手法と点群データの生成に必要な機器構成を用いて、施工の現場に適用した場合に生成精度に影響を与えると予想される誤差要因を調査する。

## 3. UAV搭載型レーザスキャナの機器構成と誤差要因の整理

### (1) UAV搭載型レーザスキャナの機器構成と点群データ生成方法

GNSS、IMUを用いる手法では、UAVに搭載したGNSS、IMUによる計測データを用いて、レーザスキャナにより計測した点群データの傾きや位置を補正し、計測現場全体の点群データを生成する。一般的に、IMUによるRoll角とPitch角の計測精度は加速度センサの計測精度に依存するが、Yaw角の計測精度は地磁気センサの計測精度に依存する。この地磁気センサは、機器の周辺環境によって計測誤差が増加する。そのため、重力加速度方向の計測精度に依存するRoll角、Pitch角と比較して、Yaw角の計測精度は低くなる。これらのことから、GNSSはGNSSコンパスを構成するように複数設置する。そして、このGNSSコンパスにより計測したYaw角を用いて点群データのYaw角の傾きを補正する。

そこで本研究で調査するUAV搭載型レーザスキャナでは、IMUよりもGNSS間の距離に応じて高精度にYaw角を計測可能なGNSSコンパスを搭載し、GNSSコンパスによるYaw角とIMUによるRoll角とPitch角を用いてレーザスキャナによる点群データを補正するものとする。また、UAVの位置とYaw角を高精度に計測するため、GNSSを3機搭載し、各GNSSではRTK (Real Time Kinematic) 測位により補正された位置を計測データとする。

### (2) UAV搭載型レーザスキャナに係る誤差要因の整理

GNSSとIMUを用いる手法により点群データを補正する場合にUAV搭載型レーザスキャナによる点群データの生成精度に影響を与える可能性のある誤差要因を表-1に示す。表-1に示す誤差要因は、関西大学カイザー・プロジェクトS「高度空間計測技術開発コンソーシアム」(以下、コンソーシアム)にて航測会社2社、地図調製

表-1 生成精度に影響を与えると予想される誤差要因

分類	誤差要因
計測方法に依存すると予想される誤差要因	飛行速度, 飛行状態, 飛行ルート, 飛行高度, 取得衛星数
点群データ生成方法に依存すると予想される誤差要因	照射角度, 同期の時刻幅, 計測距離 (位置), Fix/Float, 反射強度

会社1社, 建設, 測量に関わるソフトウェア・ハードウェア開発会社3社による議論で決定した。「同期の時刻幅」では, 計測時間が最も近いレーザスキャナ, IMU, GNSSの計測データ同士を同期し, 計測時間の差が「同期の時刻幅」よりも小さい場合のみ, 点群データの生成に利用する。そのため, 「同期の時刻幅」を小さくするほど, 同期した計測データの計測時間のずれが少なくなるため, 点群データの生成精度は高くなると予想される。

#### 4. UAV搭載型レーザスキャナを用いた点群データの計測精度の評価実験

##### (1) 実験概要

本実験では, UAV搭載型レーザスキャナにより生成した点群データの生成精度に影響を与える可能性のある誤差要因のパラメトリック解析を行い, 点群データの生成精度への影響の有無を検証する。

##### (2) 実験機器

本実験では, UAVとしてDJI社のSpreading Wings 1000, GNSSとしてiシステムリサーチ社のu-blox M8P with SOI, IMUとしてシリコンセンシング社のAMU-3002B Lite, レーザスキャナとしてVelodyne社のVLP-16 Liteを用いる。GNSS, IMU, レーザスキャナの仕様を表-2, 表-3, 表-4に示す。これらの機器はコンソーシアムの参画企業との議論により選定した。これらの機器を組み合わせると図-1に示すUAV搭載型レーザスキャナを構成し, 計測した。

##### (3) 実験場所と評価方法

本実験は, 関西大学構内の階段状の構造物を対象に実施した。本実験では, 図-2に示す①~③の横断線上の点群データを対象に, 誤差要因の計測条件や点群データの生成条件ごとに生成した構造物全体の点群データと正解データとの標高差により生成精度を評価する。正解データは, 図-2に示す地上設置型レーザスキャナで計測した構造物の点群データを用いる。また, 本実験で調査する誤差要因とその計測条件や点群データの生成条件, パラメトリック解析時の規定値を表-5に示す。表-5の調査する計測, 生成条件とその規定値はコンソーシアムの参画

表-2 GNSSの仕様

名称	u-blox M8P with SOI
製造会社	iシステムリサーチ社
計測間隔	5Hz
測位方法	RTK 測位
GNSS	GPS, GLONASS, Beidou
計測精度	水平精度: 2cm, 垂直精度: 15~20cm

表-3 IMUの仕様

名称	AMU-3002BLite
製造会社	シリコンセンシング社
計測間隔	約 50Hz
計測精度	静的精度: roll < 1° / cos(pitch), pitch < 1° 動的精度: roll, pitch < 2°

表-4 レーザスキャナの仕様

名称	Velodyne VLP-16 Lite
製造会社	Velodyne 社
計測間隔	5~20Hz (360° 計測)
計測精度	標準偏差 3cm

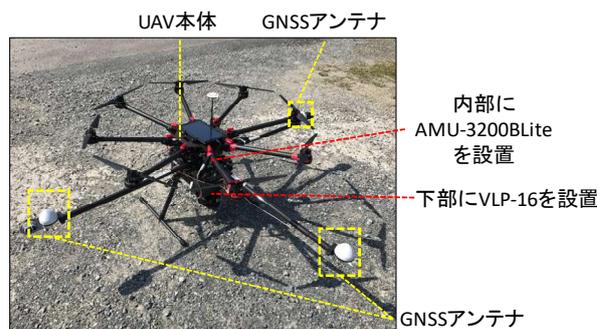


図-1 UAV搭載型レーザスキャナの構成

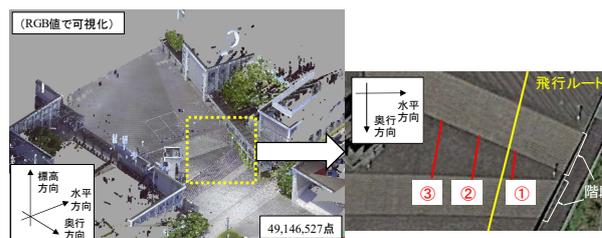


図-2 正解データと評価対象

企業との議論により設定した。

##### (4) 結果と考察

本実験による調査結果と誤差要因の分類結果を表-6に示す。本実験結果から, 反射強度以外の誤差要因による生成精度への影響を確認できたが, 反射強度による生成精度への影響を確認できなかった。これは, 反射強度がレーザスキャナの特長や計測対象の素材によって変動する値であり, 生成精度へ直接影響を与える値ではないことが原因と考えられる。ただし, 反射強度以外の誤差要

表-5 誤差要因ごとに調査する項目と解析時の規定値

分類	誤差要因	調査する計測, 生成条件	規定値
計測方法に依存すると予想される誤差要因	飛行速度	3m/s, 4m/s, 5m/sで飛行した場合に計測されたデータで点群データを生成	4m/s
	飛行状態, 飛行ルート	減速中, 等速飛行中に計測されたデータで点群データを生成	等速飛行中の計測データで点群データを生成
	飛行高度	30, 40, 50mを飛行した場合に計測されたデータで点群データを生成	30m
	取得衛星数	取得衛星数が8, 12個の場合に計測されたデータで点群データを生成	GPS, Beidouのみ使用
点群データ生成方法に依存すると予想される誤差要因	照射角度	2°, 6°, 14°, 30°で計測されたデータで点群データを生成	30°
	同期の時刻幅	Hz数が最も低いGNSSの計測時刻を中心に0.025, 0.040, 0.050, 0.075, 0.100秒間の計測データのみ同期して点群データを生成	0.050秒
	計測距離(位置)	飛行ルートの真下, 隣り合う直線の飛行軌跡の中間地点, 真下の地点	全地点で生成精度を調査
	Fix/Float	Fix解が得られた測位結果のみを用いた場合, Fix解とFloat解が得られた測位結果を用いた場合で得られた計測されたデータで点群データを生成	Fix解の測位結果である場合のみ同期
	反射強度	計測対象に反射強度の高い白線を引いた場合と引かなかった場合	白線無し

表-6 誤差要因ごとの調査結果と分類結果

分類	誤差要因	調査結果の傾向
計測方法に依存する誤差要因	飛行速度	飛行速度が低いほど, UAV搭載型レーザスキャナの姿勢が不安定となり計測精度は低下 飛行速度が速いほど, 同期したGNSSの計測位置とレーザスキャナの位置の間にズレが生じるため, 計測精度は低下
	飛行ルート, 飛行状態	減速飛行中よりも等速飛行中の方が飛行姿勢が安定しているため, 計測精度は向上
	飛行高度	高度が高いほど, 点密度と共に計測精度は低下し, 低いほど, 点密度と共に計測精度は向上
	取得衛星数	取得衛星数が多いほど, 計測精度は向上
点群データ生成方法に依存する誤差要因	照射角度	入射角度が低い計測点ほど, 計測精度は低下
	同期の時刻幅	同期の時刻幅に小さな値を設定するほど点密度は低下するが, 計測精度は向上
	計測距離(位置)	計測対象から離れた位置から計測された点群データよりも計測対象に近い位置から計測された点群データの方が計測精度は高い
非誤差要因	Fix/Float	Fix解が得られた測位結果のみを用いた場合の方がFix解とFloat解が得られた測位結果を用いた場合よりも計測精度が向上
	反射強度	計測精度に大きな影響を与えない

因による生成精度への影響が見られた。そのため、表-6にて分類した計測方法に依存する誤差要因を最適化する計測条件を調査し、最適な計測方法で計測した結果を用いて施工現場の要求精度に即した評価を行う必要がある。

## 5. おわりに

本研究では、既存手法による点群データの計測精度に影響を与えると予想される誤差要因を明らかにし、最適な計測方法を考慮する上で必要な誤差要因を整理した。今後は、計測方法に依存する要因を最適化する計測方法で計測したUAV搭載型レーザスキャナの点群データに対して、施工現場の要求精度に即した評価を実施し、点群データ生成方法に依存する要因を最適化する新たな点群データ生成手法を開発する予定である。

謝辞：本研究の一部は、関西大学カイザー・プロジェクトS「高度空間計測技術開発コンソーシアム」、国土交

通省建設技術研究開発助成「河川土工の施工管理のためのレーザスキャナ搭載UAVを用いた計測データの利活用技術に関する研究開発」により実施した。ここに記して感謝の意を表す。

## 参考文献

- 1) 国土交通省：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），2018.
- 2) 国土交通省：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），2018.
- 3) ルーチェサーチ株式会社：UAVと最新技術・利活用とレーザの利用事例，<<http://www.sparj.com/SparJ/Spar2017J/speakcr/futatsuya.pdf>>，（入手2018.6.8）.
- 4) 北陸航測株式会社：LLP UAVレーザ共同体，<<http://www.geoservice.jp/document/UAV.pdf>>，（入手2018.6.14）.
- 5) SPAR Japan：Hovermap：ドローン自動マッピングに強力SLAM適用，<[http://www.sparj.com/SVJabst/SVabst\(15\)/SparViewVol15\(28\)EdgeComputing.pdf](http://www.sparj.com/SVJabst/SVabst(15)/SparViewVol15(28)EdgeComputing.pdf)>，（入手2018.6.8）.