

UAV 搭載型レーザスキャナの精度に関する基礎的な考察

朝日航洋 (株) 正会員 ○中野一也 非会員 鈴木 英夫 非会員 田中芳薫
(株) 安藤・間 正会員 早川健太郎 正会員 黒台昌弘

1. はじめに

i-Construction の推進から UAV(Unmanned Aerial Vehicle)により取得される点群の活用が一般的になった。画像から取得される点群は三次元形状復元 (SfM/MVS) による地表の点群であり、写真測量を踏まえた作業マニュアルにより精度が管理されている。一方、進歩の著しい UAV 搭載型レーザスキャナ (以降、UAV レーザ) の点群は、UAV から照射したレーザ光が地表や植生部の中間層・地盤などから反射して離散的に取得される。2018年3月国土院公開の『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)』では、GNSS/IMU とレーザスキャナなどの機材の柔軟な組み合わせが考慮されて製品仕様の流れにおいて標準的な工程や点検項目などで精度管理が示された。筆者らは、これまで市場の状況に合わせて UAV レーザの精度検証を行い、まず自動運転などに用いられる軽量な汎用型レーザスキャナを評価¹⁾し、次に測量用の高精度・長距離計測可能な高規格レーザスキャナを評価²⁾した。ここでは、それらの性能評価結果に対して機材に応じた理論誤差を算出して UAV レーザの精度に関する基礎的な考察を行った。

2. 使用機材と実験概要

汎用型と高規格の UAV レーザの精度検証実験は、それぞれ地域や時期、調整点や検証点の数も異なるが、機材とその実験概要を表-1 と表-2 に示す。表-1 より、汎用型と高規格の機材の違いが、GNSS/IMU の姿勢角 (ロール、ピッチ、ヘディング) やレーザスキャナの測距距離・精度に認められる。GNSS/IMU の位置精度は、電子基準点を用いた後解析の結果であり、電子基準点との距離や衛星の受信環境などに影響される。

表-1 UAV レーザの仕様

| GNSS/IMU | 汎用型 | 高規格 | レーザスキャナ | 汎用型 | 高規格 |
|----------|---------------------|---------------|---------|----------------------|---------------|
| 機材名称 | Applanix APX-15 UAV | Applanix AP40 | 機材名称 | Velodyne VLP-16 Puck | RIEGL VUX-1HA |
| 位置精度 | 0.02~0.05m | 0.02~0.05m | 照射レート | 300kHz | 300 ~ 1000kHz |
| ロール, ピッチ | 0.025° | 0.015° | 測距範囲 | 100m | 235 ~ 420m |
| ヘディング | 0.080° | 0.020° | 測距精度 | ±0.030m | ±0.005m |

表-2 UAV レーザ実験概要

| | 汎用型 | 高規格 |
|---------|-----------|------------|
| 実験時期 | 2017年1月 | 2018年5月 |
| 対地高度 | 40m | 100m, 75m |
| 飛行速度 | 3m/s | 5m/s, 3m/s |
| 照射レート | 300kHz | 500kHz |
| 調整点/検証点 | 9点/39点 | 5点/20点 |
| 平均二乗誤差 | ±0.04m 程度 | ±0.02m 未満 |

表-2 より、UAV レーザの実験時期が汎用型では国土院のマニュアル公開以前の作業であり、高規格ではマニュアル公開後であることが確認できる。そのため、高規格の実験ではマニュアルを参考に作業した。それぞれの異なる実験ヤードは、造成中の建設現場の一部の約 200m×100m の範囲を使用した。

高規格 UAV レーザに記載した 2 つの対地高度と飛行速度は、計測仕様に対する検証、さらに同一仕様による複数回の計測に対する安定性の検証も合わせて実施した。実験の精度評価では、検証点となる対空標識の参照座標の半径 10cm に内包される点群を IDW (Inverse Distance Weighted) 法によって内挿した高さの最確値として平均二乗誤差など統計情報を算出した。それぞれの平均二乗誤差は、汎用型で±0.04m 程度、高規格では対地高度 100m と 75m の違いがほぼ認められず±0.02m 未満であった。

キーワード i-Construction, UAV 搭載型レーザスキャナ, 精度評価, 理論誤差

連絡先 〒350-1165 埼玉県川越市南台 3-14-4 Tel.049-244-4032 e-mail:kazuya-nakano@aeroasahi.co.jp

3. 理論誤差の導出

UAV レーザの観測方程式は、Skaloud らが航空レーザ測量のボアサイトセルフキャリブレーションの有用性を検討した論文³⁾を基に、現在の機材の状況を考慮して測距の補正項を除き、変数を振り替えた式(1)とした。

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} + R \left[(I + \Omega) T \begin{pmatrix} \rho \sin \theta \\ 0 \\ \rho \cos \theta \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} \right] \quad (1)$$

ここで、 $[x \ y \ z]^T$: 計測地点の三次元座標、 $[X \ Y \ Z]^T$: IMU の中心位置、 $R = f(\omega, \phi, \kappa)$: IMU の観測値 (ω, ϕ, κ) から対象座標系への変換行列、 $\Omega = g(\alpha, \beta, \gamma)$: ボアサイト値 (α, β, γ) による回転行列、 T : IMU 本体に対するレーザスキャナの回転行列、 ρ : レーザの測定距離、 θ : レーザスキャナのスキャン角、 $[a_x \ a_y \ a_z]^T$: レーザスキャナから IMU へのレバーアームとする。なお、式(1)を概説すると UAV の位置からのレーザ測定距離とスキャン角、さらに UAV の姿勢や機器相互の位置関係や設置のずれを考慮した計測地点の三次元座標を算出する。

式(1)の観測方程式に誤差伝播を適用して各変数の偏微分係数と分散(標準偏差)から計測地点の分散、すなわち理論誤差 $(\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z)$ を求めた。各変数の分散は、表-1 に示した機材に応じた値などを用いたが、位置精度では実験ヤードの上空視界が良好だったことから 0.02m を採用した。また、スキャン角は代表値として直下の 0° と 35° とした。

スキャン角 35° は、スキャン有効角 45 度で隣接コースとの重複度が 30% の場合の重複部の中央に位置する。なお、ボアサイト値は $\pm 0.001^\circ$ 、レバーアームに $\pm 0.005\text{m}$ と概略の

値を設定した。これらの計測仕様に対して算出した理論誤差を図-1 に示す。図-1 から機材と対地高度の違いがあるものの高さの理論誤差 σ_z は汎用型で 0.04m 未満、高規格で 0.02m 程度であることが確認できる。

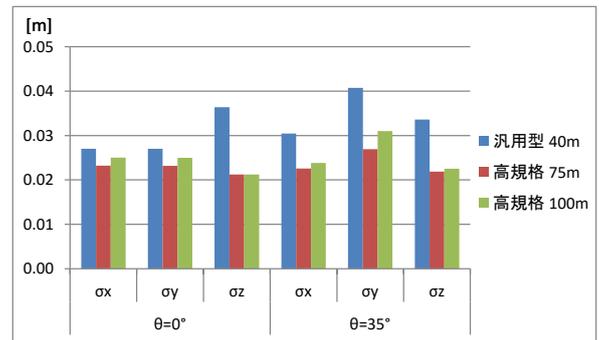


図-1 理論誤差

4. 実験結果と理論誤差に対する考察

実験結果の高さの平均二乗誤差(汎用型 $\pm 0.04\text{m}$ 程度、高規格 $\pm 0.02\text{m}$ 未満)と高さの理論誤差(汎用型 0.04m 未満、高規格 0.02m 程度)は、ほぼ同等の結果であった。一方で、図-1 から水平誤差 (σ_x, σ_y) にはスキャン角の有無による誤差の変化が認められた。また、高規格 UAV レーザにおいて対地高度の上昇に応じた理論誤差の増加が微小ではあるが確認できた。

5. おわりに

本稿では、UAV レーザの計測地点に対する観測方程式から理論誤差を導出し、実験によって得られた平均二乗誤差を用いて精度評価に関する考察を行った。その結果、平均二乗誤差は理論誤差とほぼ符合することが認められ、スキャン角や対地高度が理論誤差に影響を与えることが確認できた。今後も空間情報の活用・発展のため、UAV レーザの特徴を生かせるように課題や疑問について研究・開発を継続する。

参考文献

- 1) 武石学, 澤正樹, 黒台昌弘, 早川健太郎, 中野一也, 鈴木英夫: 土工出来形計測を対象とした UAV 搭載型レーザスキャナの基礎的な性能評価実験, 土木学会第 72 回年次学術講演会, VI-733, pp.1465-1466, 2017
- 2) 中野一也, 田中芳薫, 鈴木英夫, 早川健太郎, 黒台昌弘: UAV 搭載型高規格レーザスキャナの精度に関する評価, 日本写真測量学会平成 30 年度年秋季学術講演会発表論文集, pp.27-30, 2018
- 3) Jan Skaloud, Derek Lichti: Rigorous approach to bore-sight self-calibration in airborne laser scanning, ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 61, pp.47-59, 2006