

F1-7

自律飛行型 UAV-LiDER による森林内部と上空からの点群計測の比較 Comparison of Point Cloud Measurements Using Autonomous Flight UAV-LiDAR from Within Forests and Above Forests

○山田薫¹, 室井弘和², 岩佐優一², 岩上弘明³, 佐田達典⁴, 李勇鶴⁴

*Kaoru Yamada¹, Hirokazu Muroi², Yuuichi iwasa², Hiroaki Iwakami³, Tatsunori Sada⁴, Yonghe Li⁴

Abstract: This study evaluated the practical accuracy of an autonomous UAV LiDAR incorporating system with SLAM technology in a forest environment. We conducted a 3D survey using the UAV in a forest and compared the point cloud data with ground verification points measured by GNSS-VRS. The coordinate comparison showed that the Root Mean Square Error (RMSE) of the measurement was 5.0 cm horizontally and 6.6 cm vertically. These results demonstrate that the autonomous UAV laser scanning is a viable method for acquiring high-precision 3D data in GNSS-denied forest areas.

1. はじめに

近年, SLAM 技術を搭載した UAV-LiDAR は, 非 GNSS 環境下の 3 次元計測において有効な手法として注目されるが, その精度については課題も指摘されている. Luke ら^[1]は, GNSS が完全に遮蔽されている密な林内では SLAM 自己位置推定に蓄積誤差が発生しやすく, 精度が低下する可能性があることを報告している.

本研究で用いるシステムは, SLAM と GNSS を統合し, 相互の弱点を補完することで自己位置を最適化するという特徴を持つ. そのため, SLAM が有利となる「森林内部」と GNSS が有利となる「森林上空」という対照的な条件下で, 精度を比較することは, 有効性を評価する上で極めて重要であるが, このような視点での比較検証は, これまで十分に行われていない.

そこで本研究では, 同一の森林エリアで 2 種の飛行による計測を行い, 検証点の座標と比較して計測精度と取得点群の特性を定量的に評価する. 森林計測における有効性, 頑強さを明らかにすることを目的とする.

2. 使用機器

本研究には, DJI 社製 Matrice 350 RTK を飛行プラットフォームとし, 自律飛行を担う Exyn Technologies 社の SLAM 技術を搭載した LiDAR スキャナ Nexys Pro^[2] (Figure 1) を使用した.



Figure 1. Measurement equipment used in this study (Left: DJI M350 Right: Nexys Pro)

本システムは SLAM 技術により, 周囲の 3 次元地図をリアルタイムで作成しながら障害物を自律的に回避し, 効率的な飛行経路を生成する. Nexys Pro の基本性能を Table 1 に示す.

Table 1. Measurement performance of Nexys Pro^[2]

計測範囲	最大 300m (反射率 80%時)
計測レート	最大 2,000,000 点/秒
計測精度	±1cm (標準)
視野角	360° (水平)
最大リターン数	最大 3 点 (反射強度データ付)
レーザークラス	クラス 1

3. 実験概要

2025 年 8 月 29 日に茨城県高萩市にある高萩ユーフィールドの森林にて自律飛行型 UAV レーザによる計測を実施した. 精度検証を目的とし, 検証点 (Figure 2) の 3 次元座標を, Trimble 社製の R780 を用いた VRS (ネットワーク型 RTK-GNSS) により取得した.

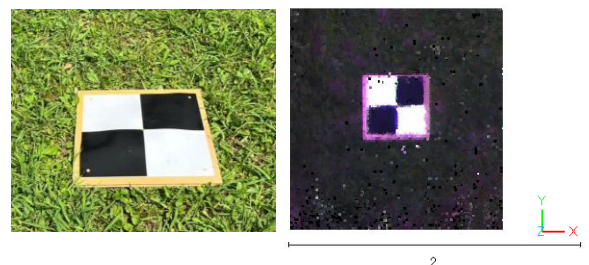


Figure 2. Example of a verification point (measured verification point on the right)

計測は, 「森林内部飛行」と「森林上空飛行」の 2 種で行った (Figure 3). 取得した点群データは 4 点の

標定点を用いて平面直角座標系（第9系）へ位置合わせし、国土地理院のジオイド2024を用いて標高変換を施した。精度評価のため、4箇所の検証点（395mm×395mm）部分の点群を抽出し、平均座標を中心値として算出後にVRS（ネットワーク型RTK-GNSS）で得た参照値との較差から計測精度を評価する。

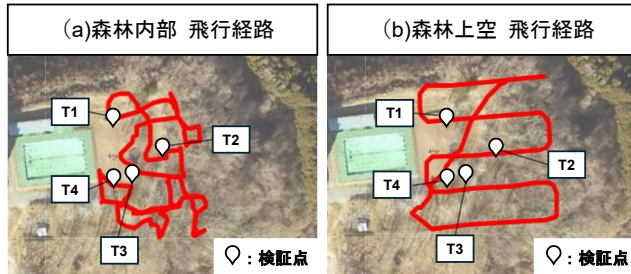


Figure 3. UAV flight path
(Source: Geospatial Information Authority of Japan tiles, modified by the authors)

4. 解析結果

Figure 4に UAV レーザにて2種類の3次元点群データの可視化例を示す。(a)は森林内部飛行、(b)は森林上空飛行で取得した点群である。この2つのデータを比較すると、点群の取得特性に明確な違いが見られる。(a)では、UAVが樹木の間を飛行するためレーザが側面からも照射され、樹木の根元や幹、枝葉といった林内の詳細な構造まで密に取得できている。一方、(b)では、主に真上からのレーザ照射となるため樹冠上部の形状は明瞭だが、その下層ではレーザの遮蔽により地面に近い部分の点群が比較的粗くなっている。

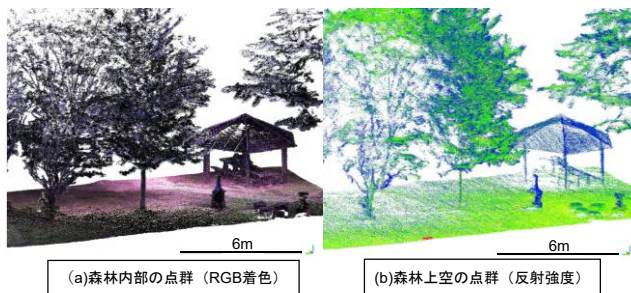


Figure 4. 3D Point Cloud Comparison of Forests

Figure 5に、両飛行で得られた検証点の3次元座標較差をそれぞれ示す。なお、VRS測位が不安定であった検証点[T2]は、解析対象から除外した。

解析の結果、森林内部飛行（水平RMSE：5.0cm、標高RMSE：6.6cm）と上空飛行（水平RMSE：4.7cm、標高RMSE：6.8cm）の精度に統計的な有意差は見られなかった。この結果は、システムの根幹技術であるSLAMとGNSSの相補性が有効に機能し、GNSSが不

安定な森林内部ではSLAMがその弱点を補い、一方でSLAMの特徴量が乏しい森林上空ではGNSSが補完することで、飛行環境の差異を吸収し、安定した自己位置推定を実現していることを実証するものである。

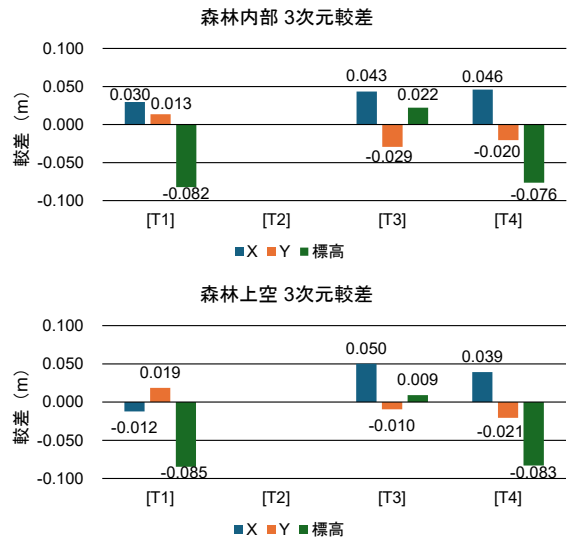


Figure 5. 3D contrast within the forest and above

5. まとめ

SLAM技術を搭載した自律飛行型UAV-LiDARは、GNSSが届かない森林内での計測に有効な一方、密な環境下では蓄積誤差による精度低下が課題とされてきた。本研究で用いたシステムは、この課題に対し、SLAMとGNSSを統合し、相互の弱点を補完することで自己位置を最適化するものである。

本検証では、森林内部と上空という対照的な環境で飛行させた結果、いずれの条件下でも水平RMSE約5cm、標高RMSE約7cmという実用上十分な精度が維持されることを実証した。これは、両技術の相補性が森林環境において有効に機能していることを示す。また、内部飛行は林床や幹の詳細な把握に、上空飛行は樹冠形状の把握にそれぞれ適しており、計測目的に応じたデータ取得の使い分けが可能であることも明らかになった。今後の展望として、多様な環境での検証を重ね、本システムの汎用性を評価することで、3次元測量手法としての信頼性をさらに高めることを目指す。

6. 参考文献

[1] Wallace, L. et al. (2012). Development of a UAV-LiDAR System with Application to Forest Inventory. Remote Sensing, 4(6), 1519-1543.(入手：2025.9.29)
 [2] nexys_pro.pdf, <https://www.nikon-trimble.co.jp/pdf/field/0301_building/exyn_nexys/nexys_pro.pdf>, (入手：2025.9.17).