

UAV 搭載レーザ計測の適用性に関する実証検討*1

渡辺 豊*2・加治佐剛*3・寺岡行雄*3

渡辺 豊・加治佐剛・寺岡行雄：UAV 搭載レーザ計測の適用性に関する実証検討 九州森林研究 70：153－156, 2017 当社が新たに開発した「SPIDER-eX」は、自律航行可能な UAV 機体に 3 次元レーザスキャナと位置姿勢計測装置 (GNSS/IMU) を搭載した UAV である。このシステムの特徴は、写真測量での調査が難しい樹木下の地表データを迅速に高密度・高精度にて取得することである。写真測量と異なり、本計測システムは GNSS/IMU を搭載しているため、レーザスキャナで取得した観測点を UAV の絶対位置と姿勢を利用して座標変換することで、地形の絶対座標を得ることが出来る。さらに、本計測システムは波形デジタル処理によりマルチエコーが取得できるため、樹木計測において、表層の葉だけでなく樹冠や地表からの反射波も受けることが可能となる。「SPIDER-eX」は土砂崩落災害現場調査の他、山林や急傾斜地の測量、森林管理に利用でき、さらに今後は i-Construction の本格導入で 3 次元データ化・CIM の手法として一層の利用が見込まれる社会インフラ用ロボット技術である。

キーワード：航空レーザ、UAV、レーザスキャナ、点群密度

I. はじめに

近年、航空レーザ測量が実業務として広範囲に行われるようになってきている。航空レーザ測量は、航空機に搭載したレーザスキャナから地上にレーザ光を照射し、地上から反射するレーザ光との時間差より得られる地上までの距離と、GNSS 測量機、IMU (慣性計測装置) から得られる航空機の位置情報を基に地上の標高や地形形状を測量するもので、現地測量が困難な山地丘陵地域など広範囲を短時間で測量できる技術である (3)。しかし、航空機レーザ測量には、航空機を利用するため天候に左右されること、計測一回あたりの最小コストが高いことといった運用面での課題や、最低飛行高度の制限や飛行速度の制約によって計測点密度が低下し、それに伴う測量誤差の増加、植生繁茂状況での地盤高の精度低下といった計測精度の問題、さらには、岩盤傾斜がひさし状に覆い被さっている箇所での測定が困難であるなどの課題がある。

この課題を解決する技術として小型化した軽量で高性能なレーザ測距装置 (Riegl 製 LMS VUX-1) を UAV に搭載すれば 100～150 m を対地高度とする低空・至近距離からの計測により、得られる点群は 1 m²あたり 200～400 点と高密度の計測が可能となる。そこで今回はレーザスキャナを搭載・運用するために搭載機体組立・計測システム構築・データ取得・解析の試行を実施したので、これまでの活用事例を含め、報告する。

II. 計測システムの構成

「SPIDER-eX」は、三次元レーザスキャナと高性能慣性計測装置を搭載した自律航行可能な小型無人マルチコプターである (図-1)。このシステムの特徴は、写真測量での調査が難しい樹木下の地盤面データを迅速に高密度・高精度にて取得することである。



図-1. SPIDER-eX

2.1 搭載 UAV 機体

機体の特徴は、撮影場所までの機動性を重視し、乗用車に積載できるよう 4 本のアームと上下反転型の 8 枚のロータで構成されている点、そして、機体制御に利用する通常の GNSS とレーザ計測に利用する GNSS の 2 つの測位システムを搭載している点である。

機体制御には、GNSS・IMU・気圧高度計・電子コンパス等のセンサを搭載しており、パソコンで事前設定したルートを自動的に飛行することができる。飛行中の機体情報 (GNSS・バッテリー残量) は機体とパソコン間でデータリンクするため、機体情報やルートトレース状況など確認しながら安全に飛行することが可能である。

機体の仕様は表-1のとおりである。

また、機動性、可搬性およびメンテナンスの容易さに配慮し、機体と計測システムを分離できるように設計している (図-2, 3)。実務では、プロペラを装着した状態の UAV 機体をワゴン車に搭載することができ、車が進入できない離着陸地点では、機体

*1 Watanabe, Y., Kajisa, T. and Teraoka, Y.: Application of Laser scanning on UAV.

*2 ルーチェサーチ株式会社, LUCE SEARCH CO., LTD., Bishamondai, Minami-ku, Hiroshima 731-0152, Japan.

*3 鹿児島大学 Kagoshima Univ., Korimoto, Kagoshima 890-0065, Japan.

を分割することができ、その他機材とともに人力運搬による移動も可能である。

表-1. 搭載機体の仕様

項目	細別	仕様
機体諸元	機体総重量	24.5kg (レーザ・ジンバル・バッテリーを含む)
	機体寸法	110cm(W)×110cm(W)×70cm(H)
	最大搭載重量	59.0kg
	動力	8個モータ バッテリー (リチウムポリマー電池)
	最大飛行時間	15分 /1フライト
撮影条件	気象条件	地上風速10m/s 以下
	撮影範囲	半径1,000m 以内 (機影の視認必要)
	撮影高度	150m 未満 (航空法最低高度非市街地)
	離着陸場所	必要ヤード目安5.0m×5.0m
撮影機能	撮影位置	パソコン地図上での撮影ポイント, 撮影ルートの設定可能
	撮影操作	手動飛行および自立飛行にて撮影可能
	画像伝送装置	地上のモニターリアルタイムに撮影画像を確認
	安全機能	緊急時自動帰還機能付き



図-2. UAV 本体部



図-3. レーザ測定器部

2.2 レーザシステム構成

2.2.1 レーザ計測システム

レーザ計測システムは、レーザスキャナおよび位置姿勢計測装置 (GNSS/IMU) で構成される。Riegl 社製レーザスキャナ VUX-1 (図-4) は軽量小型 (3.6 kg) ながら、波形計測機能、発射回数は 50 万発 / 秒、測定最大距離は 920 m、アイセーフクラスは健康に害のない Class 1、スキャニング機構は回転ミラー方式と航空レーザ計測にも劣らないスペックが確保されている。また、視野角が 330° と広角のデータが取得できるのも特徴の一つである (表-2)。



図-4. レーザスキャナ

表-2. レーザスキャナの仕様

項目	仕様
照射数	50万発 /Sec
視野角 (FOV)	330°
最大測定距離	920m
最短測定距離	3m
精度	10mm
アイセーフクラス	Class 1
角度測定分解能	0.001°
スキャニング機構	回転ミラー

2.2.2 位置姿勢計測装置 (GNSS/IMU)

GNSS/IMU とは、GNSS (Global Navigation Satellite System) と慣性計測装置を系統的に組合せたもので、これにより機体計測時の位置とスピード、加速度と角速度が同時に計測できセンサ等の位置と姿勢情報をリアルタイムで計測・記録できるものである。

Applanix 製 AP 20 (図-5) は GNSS/IMU により高性能な位置精度を確保しており、小型軽量である。また、AP 20 の取得衛

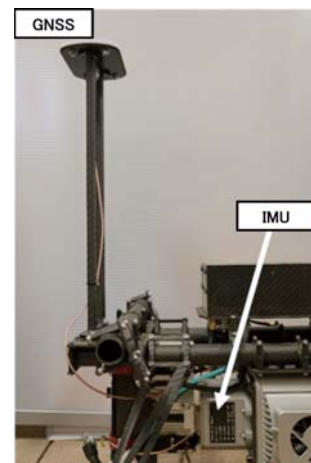


図-5. GNSS および IMU

表-3. GNSS および IMU の仕様

項目	仕様
ロール・ピッチ精度	0.015°
ヘディング精度	0.035°
IMU サンプリングレート	200Hz
位置精度	0.05-0.3m

星はGPSのほか、GLONASS、GALILEO、QZSS等広い衛星データの取得が可能である。

Ⅲ. 計測システムの特徴

3.1 航空レーザ計測に対する優位点

従来の航空レーザ計測は飛行時間が長く広域の計測に向いているのに比べ、UAV搭載レーザ計測はフライト時間に制限があるものの、狭い範囲に適しており、低高度で高精度に計測できる点が航空レーザ計測と本計測システムとの違いである。下記にUAV搭載レーザ計測の優位点をまとめた。

- ① イニシャルコストの大幅な低下
- ② 低高度、低速度による点群密度の増加
(航空レーザ4点/m² ⇒ UAV搭載レーザ200点~400点/m²)
- ③ 約330°計測可能なため、地物・構造物の側面・急斜面の計測およびデータ精度の向上
- ④ 植生の繁茂状況での地盤でのデータ取得可能
- ⑤ 車載可能な機体による可搬性、離着陸範囲3m×3mの機動性が可能
- ⑥ 現地計測後に点群データを現地で確認可能
- ⑦ 降雨・降雪以外の天候に左右されず、早朝や夕方・夜間においても計測が可能
- ⑧ 取得高密度データによる樹冠高、樹冠径、樹冠階層等の樹冠構造の把握が可能

3.2 写真測量に対する優位点

写真測量では樹木が茂っている場所では地盤のデータが把握できないことが多いが、レーザであれば木々の間においても照射、計測が出来るので、樹木下の地盤高計測が可能となる。下記にレーザ計測の優位点をまとめた。

- ① 樹林下のデータを取得することが可能
- ② 対空標識の設置が少ない個数での計測が可能
- ③ 計測(撮影)時間の大幅な短縮
- ④ 解析時間の大幅な短縮
- ⑤ 早朝や夕方・夜間においても計測が可能
- ⑥ 電線やロープといった線状構造物が計測可能
- ⑦ 水面や動物物付近でも計測精度が低下しない
- ⑧ 樹冠構造の把握が可能

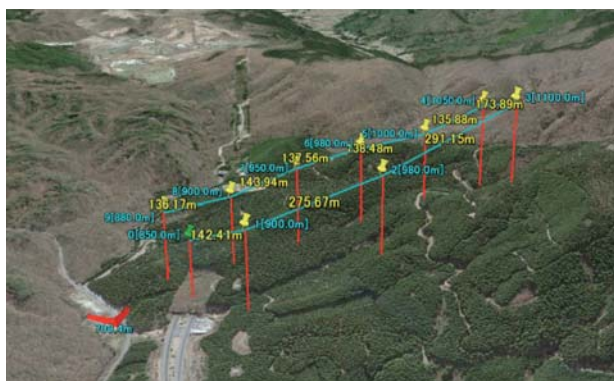


図-6. 計測飛行ルート

Ⅳ. UAV搭載レーザ計測活用事例

広島県廿日市市吉和の民有林(700m×700m, 約5ha)でUAV搭載レーザ計測を実施した。飛行では、有視界飛行を原則とするため現地踏査により離着陸地点を確認し実施した。

(1) 計測条件

計測は対地高度100m, 1フライト(15分間)で計測を実施した。計測時のルートと計測諸元を示す(図-6, 表-4)。

表-4. 計測諸元一覧

項目	計測諸元
対地高度	100m
対地速度	5m/sec
視野角	330deg
パルスレート	550KHz
スキャンレート	61Hz
スキャン幅	300m
飛行進行方向 最大取得点間隔	0.0817m
飛行直行方向 最大取得点間隔	0.0817m

(2) 解析結果

計測データを基線解析したオリジナルデータを基に樹冠状況を確認するため、図-7に抽出断面図を示した。

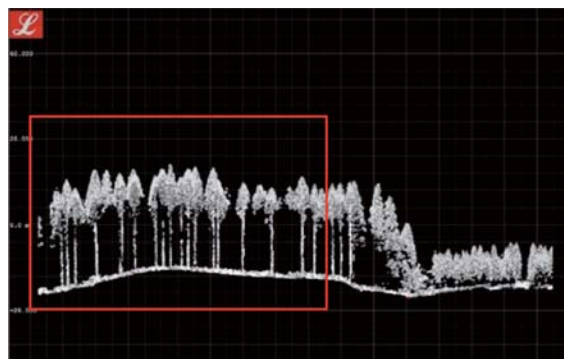


図-7. 抽出断面図

抽出した断面図から地表面、樹木階層、樹高など明確に確認できるが、計測結果の空間分解能が8cm程度であるため、樹径の形状によっては胸高直径の誤差が大きくなる(図-8)。

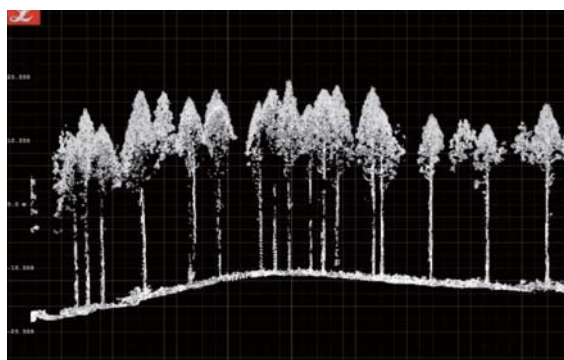


図-8. 拡大抽出断面図

オリジナルデータから地表面以外のデータを取り除くフィルタリングの作業により作成したグラウンドデータから、点群データの地表到達点数は125個/m²であることを確認した。このように点密度が多ければフィルタリング後の地形再生時に地形の変化を忠実に再現できる。

V. 今後の展望と課題

5.1 森林調査への利活用

低高度、高密度の計測データを取得可能なこのシステムの用途としては多岐にわたり、緊急性、機動性が最も要求される地震・津波・火山噴火・洪水氾濫等の自然災害に対する防災対策である(2)。特に、近年全国各地で自然災害が多発しており、急傾斜地に位置する森林域での高密度の計測データによる地形・地物の高精度計測への社会的ニーズが高まっている。

UAV搭載レーザ計測は天候に左右されず、機動性に優れ、低高度による高密度の情報を取得できるため、航空レーザの広域調査に比べ局所的な詳細な調査に適している。さらに、計測対象範囲上空を移動しながら多方向へレーザを照射することが可能なため、森林内においても比較的死角の少ないデータを取得でき、単木データの抽出、胸高直径の計測など森林調査への利活用が期待される。

5.2 課題・展望

(1) 飛行時の問題

森林調査を対象としたUAV搭載レーザ計測は、実用に向けて現場検証計測が始まったばかりである。計測システムの特徴である可搬性により森林部からの離着陸が可能であるが、安全な飛行の確保に計測ルートは有視界飛行を原則とするため、離着陸地点の選定、ルート・計測高度設定等の事前計画を詳細に立案する必要がある。

(2) 取得データの精度検証

平坦な河川流域の物理環境データ(河床高、植生等)取得の計測事例(対地高度100m)であるが(4)、ノイズ等のエラーを削除した3次元計測データの精度を公共作業規定の準則(1)に従って検証した。実測で求めた調整用基準点に対して、調整用基準点を中心とする1mの半径内にあるレーザ計測データを対象として較差点検(較差の平均値、標準偏差、RMS誤差)を行った。その結果、平坦な地域では10cm以下の精度が確保できていた(表-3)。

しかし、UAVを搭載したレーザ計測での森林分野での事例は殆どなく、今後の普及を進めるためにもその精度評価が不可欠かつ急務と考えられる。そのため、取得した森林傾斜部での実測データによる重複コース間の段差の検証、標高データのバラツキの検証、航空レーザ計測および地上レーザ計測等の既存データとの比較等によりどの程度精度が確保されているか等の検証が必要である。

表-5. 基準点較差の一覧

基準点	点群数(個)	平均値(m)	標準偏差(m)	RMS誤差(m)
No.1	143	0.063	0.015	0.056
No.2	118	0.065	0.012	0.066
No.3	107	0.084	0.027	0.097

(3) 植生域の再現性

取得できる高密度点群データからDSM(数値表層モデル)およびDTM(数値地形モデル)による樹高、樹種、下草状況および地表状況、樹木階層構造、胸高直径等のデータを検討し、UAV搭載レーザ計測が取得可能な森林管理に関する情報等の再現性等の検証が必要である。

5.3 安全運行について

UAV搭載レーザ計測は、データの精度、運用の利便性の面から効率的で有益な測量手法の一つである一方、安全で効率的な実運用には、墜落による第三者被害に直結する機体整備等のメンテナンスが必要不可欠であり、機体の整備、部材交換などの点検記録、UAV機体の開発など継続的な整備および開発による基礎資料の蓄積が必要である。

現在、機体耐久性・メンテナンス性の向上と飛行時間の確保を目的に、一体成形のカーボンファイバー製新機体の開発を行い、部品点数と機体重量の減少、剛性の向上が図れた(図-9)。今後も安全かつ利便性の高い機体の開発に努めていく。



図-9. 新機体「SPIDER-LX 8」

謝 辞

本投稿のUAV搭載レーザ計測の適用性に関する実証では、国家戦略特別区域(広島県・今治市)でのドローンを活用した管理実証での現場検証に参加し、森林管理に関する技術指導検討を受ける機会を得た。無人航空機(UAV/ドローン)実証事業連絡協議会および関係自治体には、多様な助言と指導を頂きここに感謝の意を表す。また、「革新的技術開発・緊急展開事業」(うち地域戦略プロジェクト)「ICTを活用した木材SCMシステムの構築」(研究代表者:仁多見俊夫(東京大学))の一部として実施した。ここに厚く御礼申し上げる。

引用文献

- (1) 国土交通省(2016) 測量法作業規程の準則。
- (2) 空中計測・マッピング部会レーザワーキング(編)(2013): 航空レーザ測量による災害対策事例集, 195pp, 日本測量調査技術協会, 東京。
- (3) 斎藤和也(編)(2008) 図解航空レーザ計測-基礎から応用まで, 208pp, 日本測量調査技術協会, 東京。
- (4) 内田龍彦ら(2007) 河川技術論文集13: 243-248。
(2017年1月13日受付; 2017年2月3日受理)