UAV-LiDARによる地形計測と適用性検証

Topographical surveying and the verification of applicability, using UAV-LiDAR

木本 啓介*,**・西村 正三**・藏重 裕俊**・家村 享明**・松田 浩*** By Keisuke Kimoto^{*,**}, Shozo Nishimura^{**}, Hirotoshi Kurashige^{**}

e Kinoto , Shozo Wisininura , Tinotosin Kurasinge

Takaaki Iemura**and Hiroshi Matsuda***

Abstract: It is well known that TS (Total Station) surveying and Terrestrial laser scanning in common area and Airborne scanning LiDAR (Light Detection and Ranging) and MMS (Mobile Mapping System) in a wide scale range have been used for the topographical surveying. Since the recent technology innovation, UAV (Unmanned Aerial Vehicle) and SfM (Structure from Motion) analysis which is different from photogrammetry, have become popular, authors have been carrying out topographical surveying. However, since SfM analysis uses the method of 3D data gathering by photo images, the measurement data is DSM (Digital Surface Model) which makes difficulty to obtain measuring of DEM (Digital Elevation Model) under the environment of forests where trees grow abundantly. Therefore, we adopt a minimized laser scanner for aviation laser on to UAV, then we measured high-density DEM from low altitude in narrow range using UAV-LiDAR and verified the measurement accuracy.

Keywords: UAV-LiDAR, Terrestrial Laser Scanning, Structure from Motion, Digital Elevation Model **キーワード**: レーザ搭載型UAV、地上型レーザスキャナ、SfM解析、数値標高モデル

1. はじめに

これまで、限られた範囲の地形計測では、TS(トータルステーション)による測量や地上型レーザスキャ ナによる計測などが実施され、広範囲の計測には、固定翼機やヘリコプターによる航空LiDAR(Light Detection and Ranging)やMMS(Mobile Mapping System)が用いられてきた。また、地形図作成には、 従来から、航空写真測量が用いられてきたが、近年では、急速に普及してきたUAV(Unmanned Aerial Vehicle:無人飛行体)を用いたSfM(Structure from Motion)解析による計測も展開されている。SfM解析 とは、写真測量の一種で、UAVなどにより多視点から撮影した画像のみで対象構造物の3Dモデルを構築する 技術であり、被写体の表面上にある特徴点を異なる方向から撮影した画像の組み合わせから順々に、ステレ オ法によりその点とカメラの位置、すなわち3D座標(X,Y,Z)を自動特定していく。こうして得られる点群 を節点とするTIN(Triangulated Irregular Network)を作成し、3Dモデルを構築する技術である。生成す る3Dモデルには、高精度な色情報が貼付されるため、地形情報の3D化だけでなく、著者らは、橋梁・ダム・ トンネル等インフラ構造物の点検に活用してきた¹⁾。しかし、SfM解析による樹木の繁茂した環境下での地表 面取得では、手前の樹木が阻害要因となり、樹木下の形状を正確に捕捉できないこと²⁾や写真測量のような精 度管理を行えないことが多く、精度を要求される計測時には、注意が必要などの課題がある。

一方、航空LiDARでは、樹木の繁茂した環境下でも枝葉の間を通過することで、樹木下の地形データ取得 が可能だが、対地高度500m以上からの計測では、地上での点密度が低く、対象物の詳細形状把握は難し いことや費用が高い等の課題がある。

近年航空機用のレーザ機器は軽量化が進み、UAVに搭載可能なモデルが市販されてきている。そこで、 UAV-LiDARを用いて、河畔林及び人工林の樹木下の地表面形状の取得状況・地上レーザスキャナのデータ と相対的な比較を行い、その実用性の検証を行った。

*	長崎大学大学院 工学研究科博士課程	Doctoral Program, Graduate School of Engineering, Nagasaki University
**	㈱計測リサーチコンサルタント クリエイティブ事業部	Keisoku Research Consultant Co., Ltd. Creative design group
***	長崎大学大学院 工学研究科 教授	Prof., Dr. Eng, Graduate School of Engineering, Nagasaki University

2. 上空からの計測手法比較

表1は、地形形状を上空より取得可能な主要技術一①航空LiDAR、②UAV-SfM解析、③UAV-LiDARの3手法の特徴や課題を比較したものである。

航空LiDARは、航空機から地上に向けてレーザを照射し、地表面等で反射した地点の3Dデータを取得する 測量技術である。航空LiDARシステムは、GNSS/IMU装置、レーザスキャナの3つのセンサで構成される。 GNSS/IMUは、航空機位置、加速度、角速度を航空LiDAR計測時にリアルタイムで記録している³⁾。データ 取得後、地上GPS基地局で観測したGPSデータと、航空機上で観測したGPSデータの位相差から算出した航 空機位置座標とIMUで計測した航空機の角度・角速度を統合し、位置精度±30cm、高さ精度±15cmで航空 機の移動軌跡・姿勢を求め、それらとレーザスキャナのデータを統合し、高精度な地形データを再現する。

特徴としては、対地高度が2kmまで可能なため、短時間で広範囲の計測が可能で、植生が繁茂した環境下では、樹木の樹冠部だけでなく、樹木下部(地表面)の形状も波形記録方式により取得できる。波形記録方式とは、ひとつのレーザ発射パルスから得られる反射光の強弱を波形として記録する方式で、植生が著しく 繁茂する箇所の地盤面からの微弱な反射も記録でき、DSM (Digital Surface Model:数値表層モデル)・DEM

(Digital Elevation Model:数値標高モデル)どちらの形状も再現可能である。しかし、計測位置が比較的 高高度なため地表部分での点密度が低いことや対象面積が小さい場合、費用が高額となる等の課題もある。

一方、UAVによる計測では、対地高度が150m以下であり、低空から短時間で極小範囲の高密度情報の取

得が可能である。UAVにカメラを搭載したSfM解析による手法 では、現地状況をリアルに再現した3Dデータを構築できるが、 植生が繁茂した状況では、元データが画像のため、手前の下草・ 樹木が阻害要因となり、地形形状までは正確に取得できず、再 現されたデータは、DSMとなる。

UAV-LiDARでも、使用するセンサ・機器の構成は、航空 LiDARと基本的には、同等であるが、近年レーザスキャナが小 型化・軽量化されたことにより、UAVへの搭載が可能となった。 UAV-LiDARでは、航空LiDARより、1度のフライトで観測でき る範囲が狭いが、低空で飛行可能なため、高密度な点群を取得 できる。加えて、上下前後左右への飛行および空中静止が可能 となるため、観測対象物が複雑な形状をしていてもその表面に 沿って飛行することで、航空LiDARでは、不可能であった垂直 面やオーバーハング部の形状取得が可能となった。



図1 UAVと航空機の高度の差

払 一 地形形状状内区的の比较级				
	航空機(LiDAR)	UAV (SfM)	UAV (LiDAR)	
計測面積 (日あたり)	1∼50km	0.5km	0.5km	
対地高度	150m~2km	10 ~ 150m	10 ~ 150m	
飛行速度	0~200km/h	40km/h以下	40km/h以下	
航続時間	2~3時間	20~30分	20~30分	
点密度	10~30点/m [*]	—	100~300点/m [*]	
特徴	樹木下の形状が計測可能 広範囲で計測可能	低空から高精細に撮影 SfMで高精細な画像を取得 3Dモデル化可能	樹木下の形状が計測可能 極小範囲を高密度計測可能	
課題	小地域が対象の場合フライト 費用が高い 計測基地が現場近くに必要	樹木下の形状が計測不可 飛行できる場所が限られる 飛行時間が短い	飛行できる場所が限られる 飛行時間が短い 広範囲計測では高額となる	

表1 地形形状取得技術の比較表

3. UAV-LiDARシステムの概要

(1) LiDARシステム

本検証で使用したUAV及びLiDARシステムを、下記に示す。UAVは、6本のアームを持つDJI社製の MATRICE600であり、公表値としてペイロードが6kg、そして最大積載時の飛行時間が16分であることから 選定した。プロペラを広げた状態での寸法は、1668mm×1518mm×759mmである。また、LiDARシステム としては、小型で軽量化されたVelodyne社の2Dレーザスキャナ(VLP-16)とIMU/GNSSユニットで構成さ れたYellowScanを上記UAVに搭載した。VLP-16は、16方向にレーザを照射するため、枝葉・下草の間をレ ーザが通過しやすく、地表面形状を取得することに有利である。また、同時にカメラも搭載することで、取 得した点群に色情報を付加することも可能である。UAVを高度60m、速度5m/sで飛行させ、レーザスキャナ を10回転/sの設定とした場合、地上部分でのレーザ点間隔は、進行方向約31mm、横方向約201mmとなり、 点密度はおおよそ150点/㎡となる。



(2) 仕組み

以下にUAV-LiDARのデータ取得の仕組みを示す。UAV-LiDARシステムでは、UAV(センサ類)の位置 情報を正確に取得するため、近傍にGPSの基地局、もしくは仮想基準点を設置する必要がある。それら基地 局もしくは、仮想基準点の位置情報とGNSS/IMUによりUAV飛行中に取得したUAVの自己位置・姿勢情報、

それと基準局から提供される仮想基準点の観測データ、もし くはGPS基地局の補正情報の3つの情報から、GPS基線解析 及びコース間調整によりUAVの正確な位置情報を復元し、精 度が約±5cmのレーザデータを構築する。その後、任意範囲 に属する点群の中からZ値の最下点のみを抽出する最下点検 出により、グラウンドデータ(地表面以外の地物データを除 去した点群データ)へのクラス分け、グリッドデータ(グラ ウンドデータの内挿補間によって作成される格子状の標高 データ)の生成等を行い、最終的にコンター図の作成等の3D データ処理へと繋がっていく。



図6 UAV-LiDARの処理の流れ

コンター図等3Dデータ処理



オリジナル点群(調整済)



図7 データ処理のイメージ画像

4. 河畔林における検証

本章では、これまで記してきたYellowScanを搭載したUAV(MATRICE600)を、長野県梓川の河畔林に て飛行させ、取得したデータの比較検証を行った結果を示す。対象とした河畔林は、単層林であり、実施時 期は、10月で、まだ落葉前の樹木が繁茂した状態であった。

4

(1) 対象敷地

対象敷地は、図8に示す河畔林であり、SfMによる地表面形状の取得は困難な箇所と判断し、選定した。 当敷地の近傍には、鉄塔と送電線があり、UAV-LiDARにより、送電線形状取得の可否についても検証した。 また、当敷地は、航空法がUAVの飛行禁止区域として定めているDID地区(人口密集地区)には、該当しな いが、熟練のオペレータの下、安全に十分配慮し、UAVを飛行させた。



赤枠の約100m四方が対象



図8 対象とした河川敷の状況



対象範囲に沿って、堤防道路があり、こ の堤防の断面形状の再現性も検証した。

(2)検証内容

同一の対象敷地にて、UAV-LiDARと地上型レーザスキャ ナによる計測を実施し、地上型レーザスキャナによる計測結 果を実証値として、樹木下のデータを相対的に比較検証し た。実証値の計測に使用した地上型レーザスキャナには、表 4に示すFARO社製のFocus3Dを採用した。当機器は、小型・ 軽量で、機動性に優れているため、対象範囲を網羅し、樹木 下のデータも取得できるよう複数位置から計測した。設置高 は、地上から約1.5mである。地上型レーザスキャナの結果 も、データ取得・合成処理の段階で誤差は含むものと考えら れるが、高密度に地表面データを取得する手法の中では、最 も一般的で精度が期待できる4ことから、本検証では使用し た。これらの地上型レーザスキャナのデータは、図9に示す ような、現地に設置したターゲット(別途TSによる測量で公 共座標値を取得)を元に合成することで、UAV-LiDARのデ ータと同位置となるよう整合を図った。このとき、設置した ターゲットは2種類あり、一方は地上型レーザスキャナ用の 標識、もう一方は対空標識に半球上の模型を接合したUAV-

表4 レーザスキャナのスペック



LiDAR用のものである。通常、地上型レーザスキャナの場合、点群の反射強度を利用してターゲットの中心 位置を抽出するが、十分な点密度が必要となるため、UAV-LiDARの場合、点群形状からでもターゲットの 中心が推測可能なように、半球の中心と標識の中心が合致するターゲットを用いた。

また、レーザ光は、距離と共に広がる特性を持ち、計測距離が長くなるほど、ビーム幅であるスポット径 は大きくなり、照射面積に依存して誤差が生じる。更に地上高1.5m程度では、遠方になるほど地表面での入 射角は、浅くなるため、同様にスポット径が大きくなる。そこで、本検証では、スキャナ位置より30m以上 のデータは削除した状態で、合成処理を行った。

5







設置した2種類のターゲット

UAV-LiDARの飛行準備状況 図9 検証用データ取得の状況

地上型レーザスキャンの状況

高度75m

高度50m-

約60m

約100m

図10 飛行軌跡と取得点群

(3)データの取得

(I)UAV-LiDAR

YellowScanは、最大レンジが100mあり、十分なサイドラップを確 保するよう高度50m及び75m、飛行測線の間隔を20m、進行速度は 3m/sに設定し、敷地上空を横断・縦断方向に格子状に飛行させた。図 10は、UAVの飛行軌跡と各補正が完了したUAV-LiDARによる点群 を示したものである。10分間のフライトで約3500万点の点群を取得 し、飛行範囲よりやや広範囲のデータを取得できており、最も軌跡が 錯綜したA点では、約3000点/mの点密度があった。A点を含む横断面 (図11)を確認すると、河川堤防等、上空に阻害要因がない部分に 加え、樹冠、樹木の下部も高密度な点群を取得している。ただ、地表

面を拡大すると、データにばらつきがある。これは、地表面付近の下

草の繁茂が影響していると考えられる。これらは、最下点検出やグラウンドデータへのフィルタリングにより、改善される。図12にオリジナルデータ、グラウンドデータ、グリッドデータの抽出結果を示す。オリ ジナルデータでは、一部送電線の形状も取得していることが確認できる。



図11 取得データのA点を含む横断表現



図12 取得データのフィルタリング処理

②地上型レーザスキャナ

Focus3Dを用いて、対象範囲内で南北方向に連続的に10箇所より計測を行い、約4000万点の点群を取得し、 ターゲットを元に合成処理を行った。図13に合成結果を示す。UAV-LiDARのデータと比較し、地表面付 近や樹木の幹等を主に捉えている。

③画像によるSfM解析

UAV-LiDARによるレーザ計測と同時に、搭載したカメラでインターバル撮影も実施しており、試行的に それらの画像からSfM解析により3Dモデルを構築した。図14に示すよう樹冠や上空に阻害物のない部分は、 3Dモデルが構築されているが、樹木下は、欠測が生じている。



図13 地上型レーザスキャナによる取得データ

図14 SfM解析結果

(4)比較検証

まず、UAV-LiDARのデータと同様に、地上レーザス キャナのデータからノイズ等を除去した後、1mグリッド の最下点検出により、グラウンドデータを抽出した。両 データの点群からTINモデルを生成し、地上型レーザス キャナのTINをベースオブジェクトとし、UAV-LiDAR のTINの鉛直誤差を色により表現した差分マップとB-B' 測線において、断面図を作成し、比較した。

図15に差分マップを示す。地上型レーザスキャナの 計測地点付近では、水色~黄色、つまり±5cm程度の誤 差内でデータが取得できているが、スキャナ計測位置か ら離れるにつれ、部分的に±10cm以上の鉛直誤差が生じ ている。この範囲は、単層林ではあるが、下草の繁茂が 顕著で、地上高約1.5mに設置したスキャナから照射され たレーザ光は、スキャナ周辺では地表面に垂直に近い角 度で入射するため、地表面まで高確率で到達するが、ス キャナから距離が離れるにつれ、入射角が浅くなり、下



図15 差分マップ

草の中部~頂部の座標値を取得したことに起因するものと考えられる。よってレーザスキャナから離れた位 置では、青、つまりUAV-LiDARのデータが、地上型レーザスキャナのデータより、下部にある傾向が現れて いると推測する。しかし、部分的に赤、つまりUAV-LiDARのデータが10cm程度上部にある部分も見受けら れる。これらの箇所では、上部の樹木間を通過したUAV-LiDARのレーザ光はあるものの、地表面まで到達 せず、下草の上部を計測し、最下点検出でも地表面を抽出できず、地上型レーザスキャナのデータより上部 に計測点が残存したものと推測する。

図16は鉛直方向を5倍表示したB-B'断面図を示している。堤防の形状や地表面の凹凸から判断すると、断面方向では、データのずれは数cm程度に収まっており、鉛直方向については、差分マップでも示した通り、 レーザスキャナ設置位置付近では、高精度に地表面を捉えた結果となっているが、レーザスキャナから離れ た位置では、UAV-LiDARのデータが、地上型レーザスキャナのデータより下方にある傾向がある。

これらのことから、高精度なDEMの取得には、樹木の繁茂状況だけでなく、下草の状況も重要な要因のひ とつと考えられる。入射角の観点では、地上型レーザスキャナより、UAV-LiDAR等上空からの計測が有効

7



(5) 考察

本検証で、地上型レーザスキャナのデータを実証値として、UAV-LiDARによる樹木下のデータ取得状況 を比較したところ、平面方向・鉛直方向で平均して±5~10cm程度の誤差に収まっていることが確認できた。 しかし、地上型レーザスキャナの場合、下草の影響により正確な地表面のデータを捉えていない可能性があ るため、信頼度にやや欠けると言える。今後も、UAV-LiDARの実績を増やしつつ、継続的に検証を行い、そ れぞれの手法の特性をより詳細に把握していく必要である。

5. 自然災害後の峡谷におけるデータ取得と検証

(1)概要

自然災害により落石・地すべり等が発生し、応急対策のた め、現状地形の早急な把握が求められた。当該箇所は、数十メ ートルの高さの垂直に近い断崖が続く峡谷で、オーバーハン グ箇所が随所に見られ、上部では単層林の人工林があり、全範 囲の詳細な地形情報を取得するには、UAV-LiDARが最適と考 え、点群の取得~グラウンドデータ抽出、そしてコンター図・ 縦横断図の作成を行った。

使用したUAV-LiDARは、本論既述のYellowScanを搭載したDJI社製Matrice600である。通常、地形測量であれば、上空から平面的にUAVを飛行させ、データを取得するが、当該箇所は、オーバーハング箇所が多々あるため、図17に示すように、垂直面及びオーバーハング箇所の形状を効率的に取得できるよう高度を変え、峡谷の上空と峡谷内を飛行させた。



(2) データ取得

異なる高度で飛行させたUAVで取得したオリジナル点群と、TerraScanによる自動フィルタリング及び手動フィルタリングにより抽出したグラウンドデータを図18に示す。峡谷上部の人工林(単層林)は、TerraScanによる自動フィルタリングにより、地表面の抽出が可能であったが、垂直に近い急崖やオーバーハングした範囲では、TerraScanによる自動フィルタリングやMaptek社製の点群処理ソフト(I-Site Studio)の最下点検出では、任意の平面範囲における鉛直方向の点群が輻湊しており、コンター表現する上で重要と

なる点まで削除されるため、不要点を人の目で選別し、手動除去する必要があった。手動除去した急崖やオ ーバーハング部では、約200~300点/mと高密度な点群を抽出できていた。これらのデータより、対象範囲の 地表面のコンター図を作成した。



オリジナルデータ

グラウンドデータ

コンターの抽出

図18 取得データの処理の流れ

(3)比較検証

「4.河畔林における検証」と同様、当該範囲でも一部地上型レ ーザスキャナにより3Dデータを取得したため、そのデータを実証 値とし、コンター図・断面図における比較検証を行った。計測に使 用した地上型レーザスキャナは、TOPCON社製のGLS・2000で、そ のデータから作成したコンターとUAV-LiDARデータから作成し たコンターを重畳表示したものが、図19である。地上型レーザス キャナのデータがUAV-LiDARのコンター線より、前方に張り出し ている箇所が多く見受けられ、全体的には±10cm程度に収まって いるものの、大きな箇所で1m程度の誤差が生じている。これは、 地上型レーザが対岸の約200m遠方からしか計測できず、UAV-LiDARの点密度より低いため、抽出したコンター線が直線的な表



現となっていることが原因と考えられる。つまり、UAV-LiDARの方が、より高密度に詳細な形状を捉えていると言える。

図20は、斜面の任意箇所で両データの断面を抽出したものである。1グリッドが10mのため、約100mの 高さの斜面で、10cm程度のばらつきはあるが、両断面ともほぼ重なり、同等の結果を示していると言える。





(4) 考察

当該範囲においては、限られた位置からのみ地上型レー ザスキャナによる計測を実施したため、点密度に差が生じ てしまったが、UAV-LiDARにより地形コンター図を表現す る上では、十分な情報が得られた。特に従来の航空LiDARで は、困難であった垂直面やオーバーハングした部分も高密 度な点群を取得できた。しかし、オーバーハング部の自動処 理によるグラウンドデータ抽出は、鉛直方向に点群が重な り合うため、単純な最下点検出では、その中でも上部にある 必要なデータまで削除されてしまうため、現状では手作業 が必要となる。また、オーバーハング部を平面図化した場 合、コンター線が交差してしまうため、隠線処理等も必要と



図21 オーバーハング部のコンター表現

なる。UAV-LiDARは、このようなオーバーハング部の計測には非常に有効なことから、今後も同様の課題 が頻出してくると思われるため、処理ソフトウェア開発も不可欠と考える。

6. まとめ

UAV-LiDARにより取得したデータは、飛行計画にも起因するが、航空LiDARより高密度に樹木下のデー タを取得可能である。その上、地上型レーザスキャナとも同レベルのデータを取得でき、グラウンドデータ の計測のみであれば、地上型レーザスキャナよりも効果的な計測手法である。ただし、樹木・下草の繁茂状 況によっては、地表面までレーザ光が到達しない可能性もあるため、要求精度によっては、事前踏査も必要 と考える。また、航空LiDARでは、困難であった垂直面やオーバーハング部もUAV-LiDARの場合、360度の 計測が可能なため、同じ高さで飛行させることで、十分にデータが取得できる。しかし、既存ソフトウェア では、既述の通りオーバーハング部の自動抽出は困難で、手動処理に頼らざるを得ないため、今後は、処理 ソフトウェアの開発も必要となってくる。

また、現状では、ペイロードの都合上、大型のUAVにレーザスキャナ・IMUを搭載しているため、飛行時 間の制約により飛行可能範囲が狭いうえ、UAVの操縦に高スキルが要求されるため、経済性・運用性の点で、 課題は多々存在する。しかし、近年のUAV関連の急速な技術革新により、レーザスキャナの小型化・高精度 化等が予想されるため、市販の小型UAVにも搭載可能なモデルが普及し、長時間の飛行により、より広範囲 のデータ取得が可能となることが期待される。更には、処理解析のリアルタイム化により、上空で計測を行 いながら、その結果を手元のPCで即時に取得でき、取得データの良否の即時確認、およびクラウド経由での データ送信による業務の迅速化を図るとともに、顧客に対してタイムリーに情報を提供する仕組みを構築す ることも可能となる。今後もUAV-LiDARの実績を増加させていき、課題の抽出・解決策の模索等、継続的に 検証を行っていきたい。

参考文献

- 1) 西村正三, 木本啓介, 松岡のどか, 大谷仁志, 緒方宇大, 松田浩:橋梁維持管理における遠隔測定法の開発と評価, (社)日本測量協会, 応用測量論文集, Vol.24, 2013.1
- 2) 寸田亘, 菊本健太, 春田健作, 木本啓介, 坂口博紀: 無人航空機(ドローン)の道路施設管理への展開(京都府: 八雲橋・大 津南郷宇治線), 土木学会第71回年次学術講演会, 2016.9
- 3)横尾泰広:航空レーザ測量の概説と最新動向,フォレストコンサル137号,林業土木部門技術士会,2014.9
- 4)小花和宏之、早川裕弌、齋藤仁、ゴメスクリストファー: UAV-SfM手法と地上レーザ測量により得られたDSMの比較、写真 測量とリモートセンシング、VOL.53, NO.2、日本写真測量学会、2014