ＵＡＶ搭載型レーザによる高精度地形測量について

㈱テイコク・テクノ

UAV 搭載型レーザによる地形計測は、これまでの空中写真画像による３次元地形モデルの作成では困難であった樹木が繁茂する場合の地表面の測量を可能とする。当社では、2018 年度の「ものづくり・商業・サービス経営力向上支援補助金」制度を活用して UAV 搭載型レーザを導入し、３次元計測を行っている。山地部の地形計測では、樹木の繁茂の程度により地表面に到達する計測点の密度は異なるが、実測に比べて高密度の計測が可能であり、地表に点在する岩塊等の分布も把握することができる。また、得られた３次元データからは任意の方向に対して樹木を含めた地形横断図を作成することが可能で、急峻な地形や災害時など現地への立ち入りが難しい状況下で威力を発揮することが期待される。

§１．はじめに

測量分野への UAV（ドローン）の活用は、これまで空中写真を用いたオルソ画像への変換や３次元データの取得として行われてきた。しかし、写真画像を利用したこれらの方法では、地表部にある樹木や既設建物などの影響により、地形状況を正しく表現することが困難であることが課題である。建設分野におけるｉコンストラクションへの対応や、防災調査、災害時の復旧対応など、今後 UAV が測量分野に参入する場面は飛躍的に増大するとともに、より高精度の成果が求められるものと予想される。

当社では、2018 年度に中小企業庁が所管する「ものづくり・商業・サービス経営力向上支援補助金」制度を活用して、UAV 搭載型のレーザを導入した。現在、様々な地形条件に対して運用を開始するとともに、多分野への応用を視野に入れた試行している。異常気象に伴う大規模災害の頻発や測量技術者の確保が徐々に難しくなる現状において、導入した UAV 搭載型レーザの需要はますます増えるとともに、グリーンレーザやマルチビームなど他の手法との連携によるトータル的な地形測量への展開も始まろうとしている。

§２．ＵＡＶレーザシステム

２－１　レーザ搭載用ＵＡＶ

レーザを搭載する UAV（DJI MATRICE 600）は 5.5kg 以上吊り上げる強力なペイロードだけではなく飛行のコントロールモジュールに三重の冗長性を採用し、回路の故障の回避を行う飛行の安全性を重視した機体となっている。

また、機体の位置を決める測位衛星を利用した GNSS 機能とは別にＤ－RTK　GNSS 装置を

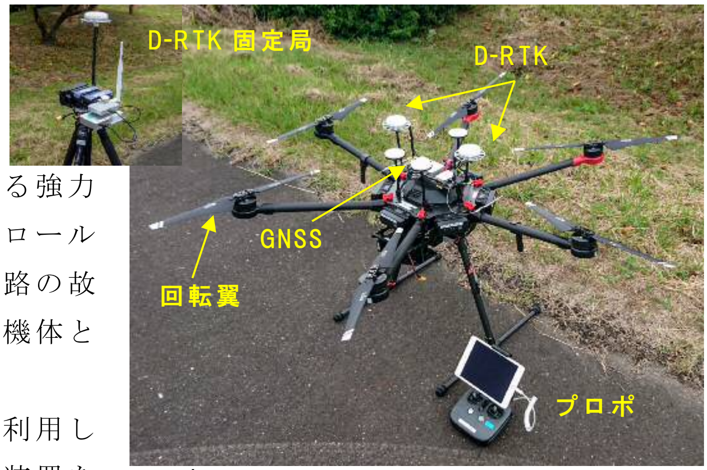


写真 1. UAV(DJI MATRICE 600)

備え、センチ単位のホバリング精度と外部からの磁気干渉により機体の方向が不安定になるのを軽減し､自律航行の安全性を高めている。写真 1.、表 1.に形状および仕様を示す。

表 1. UAVの仕様

項　目	仕　　様
寸　法	1668ｍｍ ×1518ｍｍ ×727ｍｍ
重　量	10 kg
回転翼	6枚
最大離陸重量	15.5 kg
最大風圧抵抗	8m /s
最大速度	40m /h、65km /h（無風時）
飛行時間	２０分（レーザ搭載時）
バッテリー	６個（4500mAh・22.2ｖ）

２－２　搭載レーザシステム

UAV 搭載型レーザシステムはレーザ本体と IMU・GNSS 装置および光学カメラからなり、各装置間の取付け精度を保つために一体構造となっている。写真 2.、表 2.にレーザシステムの写真と仕様を示す。

レーザシステムは 1996 年頃から国内で行われていた有人飛行機による航空レーザ（対地高度 300m以上）の計測技術を小型軽量化し、UAV に搭載できるように開発された装置である。搭載レーザは、60%の反射率で、最大 250m の計測が可能でビームの広がりは距離 100m で長径 16cm・短径 5cm の楕円形をしている。レーザ装置内部より発射されたレーザ光は発射位置より同心円状に毎秒１０万回発射される。

写真 2. レーザシステム

表 2. レーザシステム仕様

項　目	仕　様
システム製造会社	PHOENIX
レーザ型式	RIEGLmini-UAV
測距範囲	250m@60%　150m@20%
回転数(スキャン)	10～100scans/sec
レーザパルス	100kHz(100,000回/sec)
測定精度	15mm@150m
マルチパルス	5回
推奨スキャン高	100m
IMU型式	IMU-KVH-1750
データレート	200HZ
IMU精度	ﾋﾟｯﾁ/ﾛｰﾙ0.005°ﾍﾃﾞｨｸﾞ0.017°（後処理ｷﾈﾏﾃｨｯｸｽ）
計測総合精度	25 / 35mm RMSE @ 100m Range
カメラ型式	SONY　α7Rii
レンズ	f=14mm
地上解像度	2.3cm@70m

IMU・GNSS は機体の姿勢の観測と測位衛星の信号を受信し、計測点の算出に利用する。カメラの画像はレーザで得られた点群データに地上の色を付けたり、オルソ画像の作成に利用される。

＜導入したシステムの特徴＞

①対地高度 100m での計測が推奨高さであり、高い対地高度で計測飛行が可能あることから安全航行に大きく寄与することができる。

②レーザ光１回の照射で５計測データを得るマルチパルス方式により地上に対し高密度計測ができる。

③飛行方向に対し直角に 360°計測できるため、急斜面（岩壁）などを横方向から計測が可能である。

④計測時はリアルタイムに PC 画面で計測点群（３D）の表示ができ、計測もれなどの確認ができる。

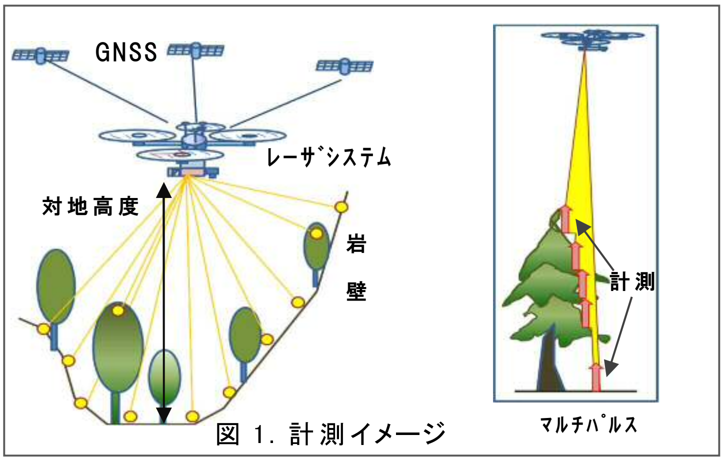
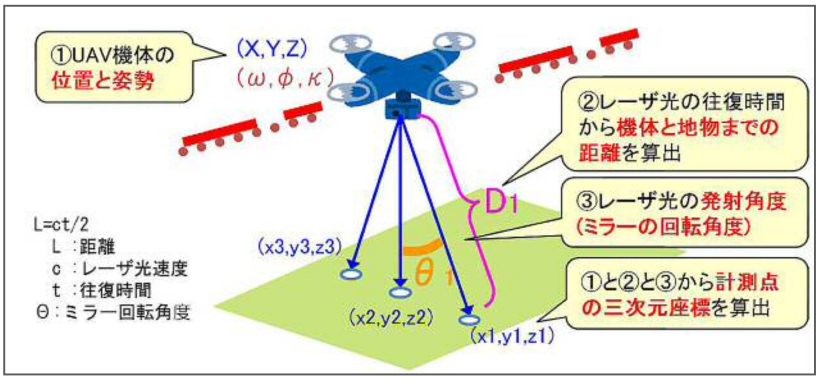


図 1. 計測イメージ

２－３　３次元座標の算出

計測時のレーザシステムのIMU・GNSSの値より、飛行の最適軌道解析を行い飛行時の位置と機体の姿勢（X,Y,Z,ω，φ，κ）を求める。また、レーザ装置から地上までの計測距離（L）およびレーザ装置から出るレーザ光のミラー回転角度（θ）により各地上点の座標を求める。



（UAV 搭載型レーザスキャナーを用いた公共測量(案)より）

図 2. 3次元座標の算出

尚、ミラー回転角度とはレーザ光の発射口で光線の方向を変えるために、ミラーを高速に回転させたときのレーザ照射角度をいう。

１）オリジナルデータ

求められた点群座標をコース間の高さ確認・調整や検証点での精度確認を行った後、オリジナルデータを作成する。

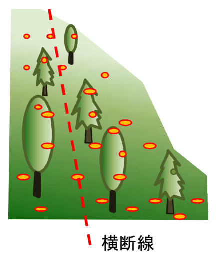
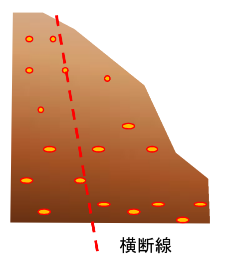
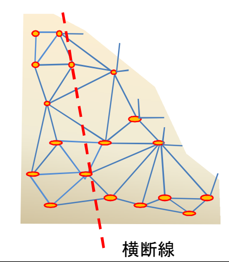
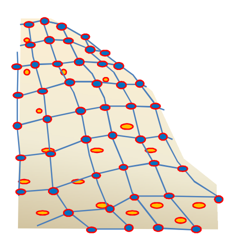
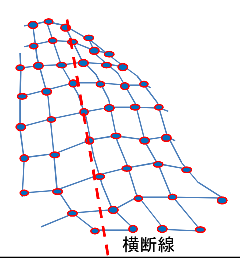
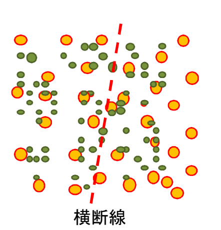
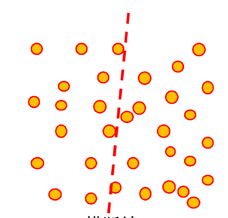
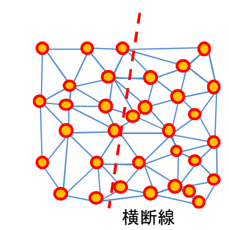
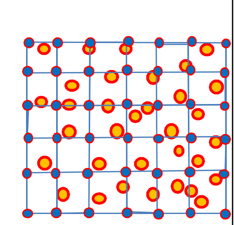
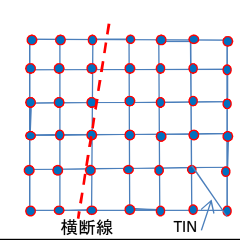
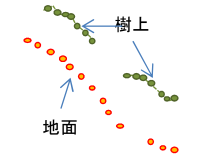
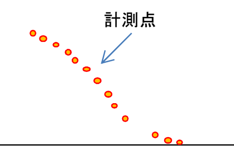
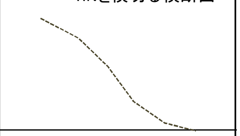
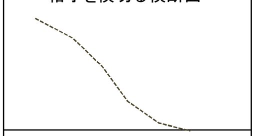
２）グラウンドデータ

オリジナルデータから地面以外の樹木、建物、橋等を除去（フィルタリング）し、地面だけの点群にしたデータ。

３）TINデータおよびグリッドデータ

グラウンドデータの各点から三角形（TIN）の面の地形モデルを作成し、横断作成等に利用する。グラウンドデータより格子状に内挿補間法などによりグリッドの標高を求め、３次元CADなどで利用される。

表 3. 作成データの種類

	オリジナルデータ	グラウンドデータ	TINデータ	グリッドへ挿入	グリッドデータ
鳥瞰表示					
平面表示					
横断表示				グラウンドデータ(●)から内挿補間により格子状の(●)の標高を求める。 利用目的により格子(グリッド)の間隔を決める （例） 1/1000レベル　1ｍ	
備考	樹上点も含む計測点すべての点群	フィルタリングによる地面だけの点群	計測点間をつなぐ三角形面(TIN)で地形を表現(モデル)	格子間隔の取り方により詳細な地形表現やデータ量の軽量化ができる	グリッドによる地形解析を行う場合、格子の4点から2個の三角形面(TIN)を発生させ利用する

§３．レーザ計測実施手順

３－１　机上計画

実施計画をするにあたり、業務の目的、計測の場所、計測の範囲および作業仕様を熟知し、航空法（空港周辺外、対地高度 150m以内、人口集中地区（DID）以外等）の適用範囲の有無を机上で確認する。また、飛行の方法で日中の飛行、目視範囲内、第三者との離隔30m以外等の飛行条件を適応できているか確認する。適応できてない場合、航空局に安全の確保を条件に飛行申請の手続きを行う。図面等が有れば UAV 離発着場の仮設定、調整用基準点および検証点の設置位置の検討を行う。

３－２　現地踏査

机上計画等の資料を基に飛行障害物（送電線、鉄道、高速道路、公園、その他立入禁止区域等）および、第三者（人、建物等）の有無の現地確認、設定離発着場の確認を行う。特に離発着場から UAV オペレータが目視内飛行で飛行できることが重要である。また、調整用基準点の設置場所および計測範囲の樹木等植生状況についても確認する必要がある。

３－３　計測飛行計画

計測計画は、現地踏査の結果を基に計測飛行のコース計画を行う。コースは要求点密度、要求精度および現地の植生状況によりコース間の重複度、コース方向を図上で計画する。特に現地の地形の高さが重要で既存資料、地理院の 10m メッシュなどを参考にコースの対地高度を設定する。図上計画されたコースは飛行をコントロールするソフト（図 4.）に入力する。

３－４　調整点設置

計測点群座標の調整用の基準点および検証用の点を現地に設置する。設置点はレーザデータ解析で目印になるように反射材を貼った材料を使用し直径 90cm の星印（写真 3.）に作成する。

３－５　テスト飛行

本飛行前に飛行計画で設定したコースが現地に適応しているか小型 UAV（Phantom４）でテスト飛行を実施し、障害物、設定対地高度、目視内飛行等について問題ないか確認する。

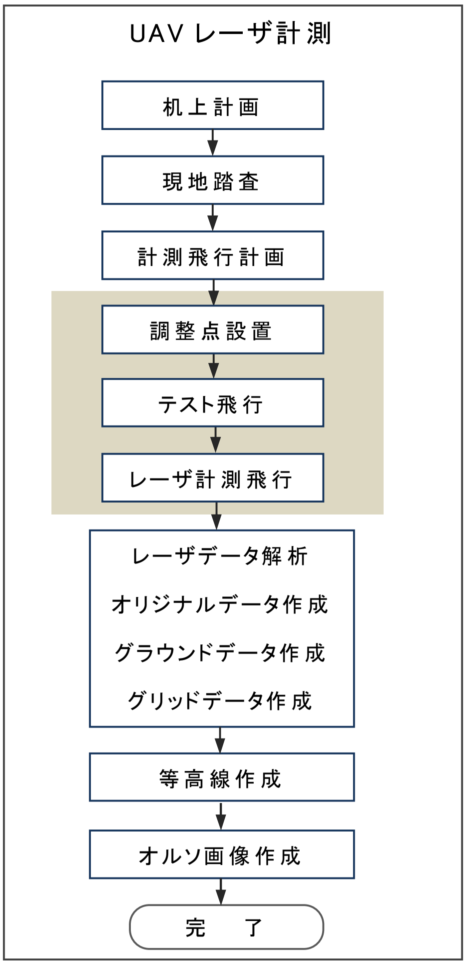


図 3.　作業フローチャート

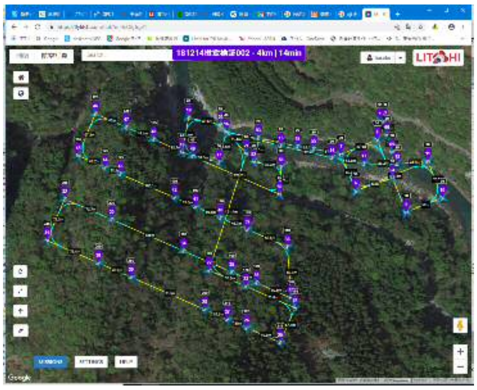


図 4. 飛行コントロールソフト画面

写真 3. 調整点およびテスト飛行

３－６　レーザ計測飛行

計測飛行開始前に UAV 本体の各センサーの初期化とレーザシステムの GNSS の初期化、および IMU の初期化飛行を実施する。

UAV の離発着以外は飛行プログラムによる自律航行を行い、飛行中はレーザシステムからの計測点データや各種センサーの情報をモニターでチェックし、異常および作業範囲の漏れがないことを確認しながら作業する。

写真 4. レーザ計測飛行

３－７　レーザデータ解析処理

飛行終了後、レーザシステムから計測データを取り出し、GNSS と IMU のデータより飛行軌跡の最適計算を行い、レーザのデータより点群の座標計算を行い計測元データとする。

計測元データはコース単位の点群データに分割し、コース間調整と現地で作成した調整用基準点とを比較確認し、位置座標がずれている場合は調整を実施する。

精度検証の手法には①レーザ再計測との比較、②実測横断との比較、③検証点による比較方法があり、当社では調整点とは別に検証点を現地に設置し、計測点群との検証を行っている。

§４．レーザ計測事例

４－１　丘陵地

尾根の高さ約 50m の丘陵地、作業面積約 6.5ha、計測点密度 100 点/㎡を条件に飛行回数：1 フライト、６コース、調整点　４点、作業時間：現地４時間、データ解析 1.5 日　、土地状況は針葉樹と広葉樹の混合林、樹高 3m～10m であった。図 5. に写真からの色情報を付加した点群データの鳥瞰図を示す。図 6.、図 7. はグラウンドデータ陰影および１m 主曲の等高線の鳥瞰表現したものを示す。

図 5. 点群データによる鳥瞰図

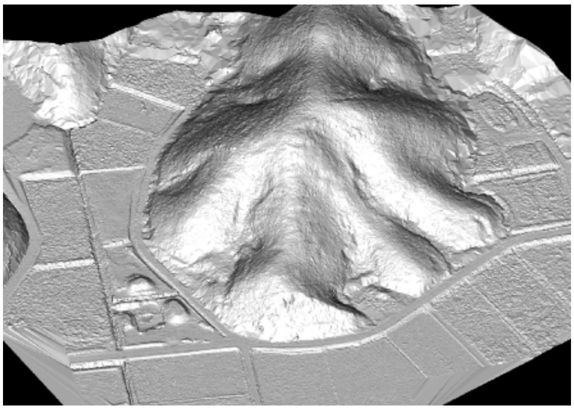


図 6. グラウンドデータ陰影鳥瞰図

図 7. 等高線の鳥瞰図

４－２　谷渓流地形

比高差 190m、奥行約 450m、幅 250m 渓流で計測面積が約 13ha、計測点密度 100 点/㎡、飛行回数 2 フライト、16 コース、調整点・検証点：7 点、現地作業 1 日、データ解析 5 日、計測地は樹高 7m～10m の広葉樹・針葉樹（写真 5.）であった。精度は検証点について行い標準偏差で X,Y:0.035m、H:0.033m であった。フィルタリングにより樹木を排除したグラウンドデータの陰影図と等高線図を図 8.、図 9. に示す。この陰影図から等高線図だけでは確認が難しい崩壊地の跡が複数確認できた。今後、このような資料を渓流調査の現地踏査で利用することにより、土石流発生源箇所の確認調査などが容易になると考えられる。

写真 5. 渓流全景写真

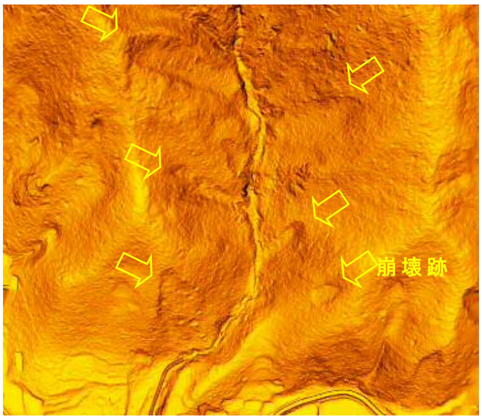


図 8. グラウンドデータ陰影図

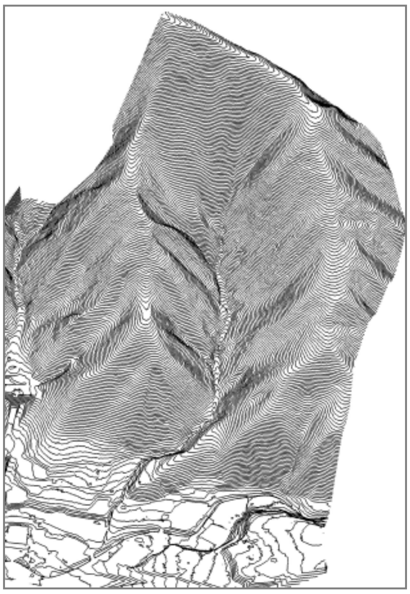


図 9. 等高線の鳥観図

４－３　急傾斜のり面

比高差 310m、幅 250m、奥行 300m、作業面積 10ha、点密度 100 点/㎡、飛行回数 3 フライト、16 コース（図 10.）、現地作業 2.5 日（気象および GNNS の FIX 解が取れなく待機）、対象地形は非常に急峻なため現地でのテスト飛行を幾度か繰り返し、コースの設定を行い飛行の安全を図った。

樹木をフィルタリングしたグラウンドデータの陰影鳥瞰図（図 13.）には、実測では危険な箇所の岩壁や小さな崩壊跡の確認ができた。また、横方向の計測データを利用することにより、道路防護ネットやその背後の地形（図 12.）を計測することができた。図 11. に 1ｍ主曲の等高線図を示す。

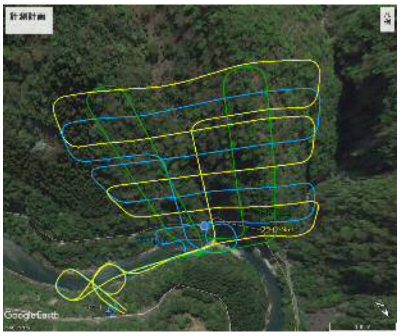


図 10. 計測軌跡図

図 11. 等高線図

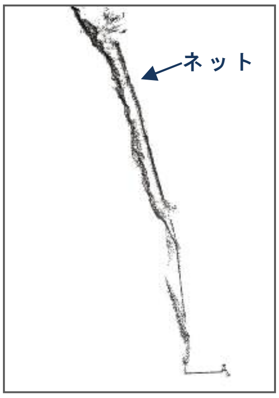


図 12. 断面図

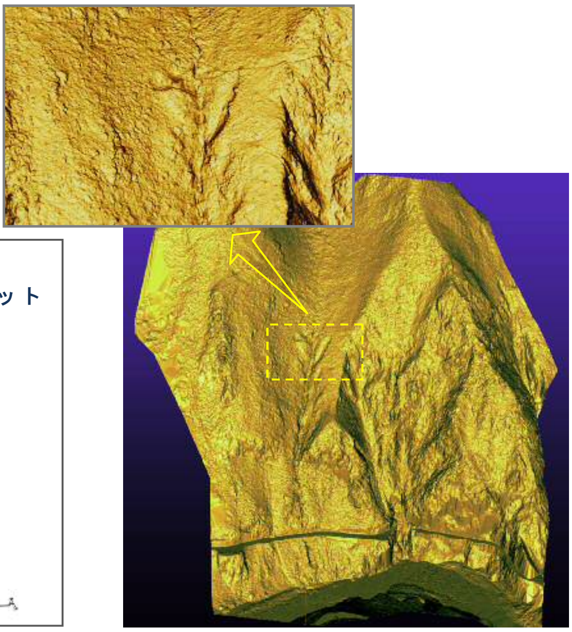


図 13. グラウンドデータ陰影鳥瞰図

§５．ＵＡＶ搭載型レーザの今後の活用

UAV を利用した空からのレーザ計測は、樹木が密集した丘陵地や急斜面など地表部の地形条件が悪い場合には、測量時間の大幅な短縮が期待できる。また、その機動力の良さは災害時にも大きな威力を発揮するとともに、UAV の自律航行技術を活用した点検作業への応用が期待できるなど、レーザ計測が活躍する分野は今後ますます広がるものと考えられる。

５－１ 道路防災点検調査への活用

人手による目視点検が基本とされる道路防災点検では、費用面や安全面の点から岩石崩壊部や高標高部（図 14. に示す道路からの標高差が大きい箇所）を対象とした調査が遅れているのが現状である。UAV を用いたレーザ計測では、得られた点群データから高標高部の樹木中に点在する大径の岩塊を識別することも可能であり、点検調査におけるスクリーニングとして活用することができる。

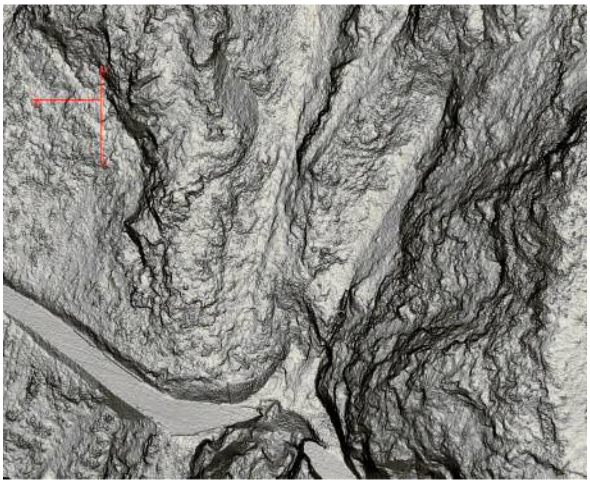


図 14. 高標高部の陰影鳥瞰図

５－２ 砂防基礎調査への活用

砂防基礎調査では、急傾斜地の崩壊や土石流、地すべりの土砂災害が発生する恐れのある箇所を対象に「土砂災害防止法」で定められる「土砂災害警戒区域」や「土砂災害特別警戒区域」の設定が行われる。この場合に実施される土砂流出のシミュレーション解析では、地形図や現地測定結果を基にした地形モデルが作成されるが、最新の地形状況をより詳細に把握する上でレーザ計測の活用は有効であり、被災地域における警戒区域の見直し検討にも活用できる。

５－３ 積雪調査への活用

当社が保有するレーザは氷雪面での計測が可能であるため、豪雪地域等においてあらかじめ原地形情報を得ておくことにより、冬期の積雪状況を精度良く（数センチ程度）計測することができる。このため、雪崩対策（写真 6.）や除雪計画の検討などに際して実施される積雪調査への活用が可能であり、地形による積雪量の相違や日射による融雪状況の変化など詳細な情報収集ができる可能性もある。

写真 6. 雪崩発生状況

５－４ 森林管理への活用

我が国の過疎化や高齢化、就業人口の減少などにより、森林管理に携わる従事者の確保が難しくなりつつある。国土の保全や水源の涵養、地球温暖化の防止など、森林は多面的機能を有しており、適切な森林管理が将来的にも求められる。レーザで計測されるものには、地面以外にも樹高、樹幹、樹木の密度など、定量的な樹木の状態も計測されており、森林管理に必要な情報を得ることができる。さらに、マルチスペクトル画像等の併用により樹種の分類ができれば、材積量の推定などの木材管理にも応用できる。

§６．ＵＡＶ搭載型レーザの活用に向けた課題と対応

今後、多方面への活用が期待される UAV 搭載型レーザであるが、その運用に際しては以下に列記するような課題への検討と対応が求められる。

６－１　ＵＡＶの目視内飛行に対する限界

航空法における無人航空機の飛行ルールでは、「目視（直接肉眼による）範囲内で無人航空機とその周囲を常時監視して飛行させること」となっている。目視が可能な距離としては、支障となる周辺建物の分布状況のほか、天候や飛行時間帯によっても異なるが、一般的には 400m～500m 程度が限界である。このため、事前計画で実施する現地踏査時には、目視内飛行が可能となるコース設定やフライト基地の選定を確実に行うことが重要である。

６－２　機材搬入路の確保

UAV 搭載型レーザを使用した現地計測作業を実施するためには、UAV の発着地となるフライト基地まで機材一式（写真 7.）を搬入する必要があるが、地形条件などによっては、前述した目視内飛行が可能な場所までの車による搬入が難しい場合もあり、事前確認が重要となる。

写真 7. UAV レーザ機材

６－３　天候障害

UAV の飛行に際して問題となる天候条件としては、雨の有無と風速があげられる。UAV の中には雨天時でも飛行可能な機種が市販されているが、一般的には雨天時の飛行は困難であるため、雨雲の移動状況に関する情報収集が重要となる。一方、UAV の最大耐風速は 8m/s とされるが、実際の飛行に際しては安全な飛行を確保するために 5 m/s 程度を目安に作業を実施している。

６－４　植生の繁茂状態に応じた点密度の確保

レーザによる計測点は、地表面 $1m^2$ 当たり（計測仕様により異なる）約 100 点、1ha では 100 万点にもなる。これらの点群データには樹木の上などの計測点も含んでいるため、地表面からの点群データの密度は、樹木の繁茂状態（写真 8.）によって異なることになる。従って、地形計測を目的とする場合には、必要な点密度を確保するための飛行時期の選定や、飛行高度およびコースの重複設定などについての充分な検討が必要である。

写真 8. 樹木の繁茂状態

§７．おわりに

各種調査や計測への UAV の活用は、搭載可能なセンサーの低価格化と精度向上に伴って、今後飛躍的に増大するものと考えられる。本論文で紹介したレーザ計測についても、グリーンレーザのような水面下の河床や海底まで計測可能なものが取得出来るようになり、活躍の場はさらに広がりそうである。このような優れた機材と技術をより有効に活用するためにも利用技術の研鑽を行うと同時に、UAV の運用に際しては、航空法等に定められる規則の遵守はもちろんとして第三者への配慮等、飛行の安全を第一に無理のない飛行計画と計測作業を行っていきたい。