

3 立木の位置情報等から任意に設定した区域の再現手法の検討・検証

(ア) 区域の再現方法の検討

UAV レーザで計測した個々の立木の形状や位置情報、相対的な位置関係、微地形等のデジタル化された森林情報を基準として GIS 上で任意の区域を設定し、設定した区域を現地で再現するには、GIS に現地の基準座標と方位を与える必要がある。

基準座標を与える方法として以下の手法を比較検討した。
結果を表 3-1 に示す。

表 3-1.各手法の比較

方法	メリット	デメリット
ハンディ GNSS 受信機による方法	機材が安価、軽量	森林内では GNSS の電波が届きにくい
近傍の基準点からのコンパス測量	機材が安価、軽量	計測に技術が必要 近傍に基準点があることが前提となる
近傍の基準点からの SLAM 測量	点群データから正確な位置を把握できる	機材が高価 SLAM 処理時にずれを生じる可能性がある 近傍に基準点があることが前提となる
GNSS 受信機を搭載した UAV から写真撮影して座標を読み取る RTK_UAV 写真撮影方法	視覚的にデータを確認できる	UAV を離陸させる場所がない場合適用できない 写真から基準木を見つけるのが困難な場合がある
AR (拡張現実) 技術を用いて撮影した写真と解析データを重ねる方法	視覚的にデータを確認できる	絶対位置を決定するためには基準となる位置があることが前提となる AR 画像処理時にずれを生じる可能性がある

上記検討結果より、森林内での GNSS 受信状況が改善できれば、GNSS 受信機を用いた方法が簡便かつ高精度な位置情報を得ることができると考えられる。また UAV レーザ計測の計測結果から、立木の配置を確認できる。したがって、通常のハンディ GNSS 受信機より受信可能衛星を増加させた高性能 GNSS 受信機と、UAV レーザ計測によって得られた現地の立木の配置から区域を再現するハイブリッド手法を用いて検証を行った。

また、高性能 GNSS 受信機を用いても、林内では GNSS 受信状況が著しく悪くなることが想定される。したがって、AR 技術を用いて、UAV レーザ計測によって得られた立木の配置と現地の立木の配置状況をマッチングさせることにより、GNSS の受信状況が良好でない箇所においても、自己位置を推定して区域を再現する手法も併せて検証を行った。

(イ) 区域の再現可能性の検証

検証は下記の内容で実施した。

①検証場所: 静岡県浜松市天竜区龍山町大嶺(図 3-1)

* 積雪の影響で、当初実施予定の静岡県天竜瀬尻で実施できなかったため、代替地で検証

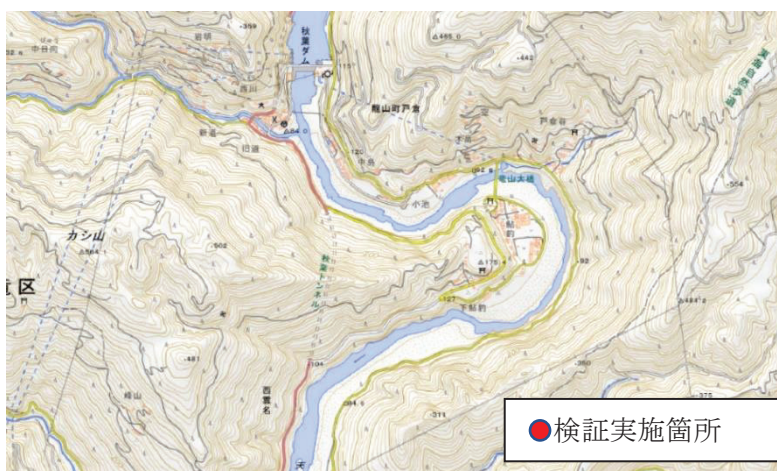


図 3-1. 再現可能性の検証場所

②検証実施日: 2022 年 2 月 16 日

③使用機材: 表 3-2 のとおり。

表 3-2. 高性能 GNSS 受信機及び高精度屋外 AR システム

種別	高性能 GNSS 受信機	
機器名	CHCNAV X900	
会社名	CHC	
主なスペック	捕捉衛星：GPS、GLONASS、Galileo、BeiDou 単独測位精度：1.5m	

種別	高精度屋外 AR システム	
機器名	SiteVison	
会社名	Trimble	
主なスペック	捕捉衛星：GPS、GLONASS、Galileo、QZSS、SBAS ・GNSS 位置精度スペック： 水平 1cm、鉛直 1cm (※高精度 GNSS 位置情報が取得できる場所の場合) ・高精度位置情報が取得しにくい場所の場合 測位精度：0.2~10m AR 位置精度：0.1~10m	
参考 URL	https://www.sitech-japan.com/stj/solution/detail/34.html	

メーカー HP より引用

※サイテックジャパン株式会社様より借用

④検証方法

- ・高性能 GNSS 受信機を用いた方法

- i .立木の位置情報及び設定した区域情報を端末上に表示
- ii .高性能 GNSS 受信機から生成される現在位置情報を端末上に表示
- iii .設定した区域の端点に端末上に表示される現在位置情報を利用して移動し、地形図・立木の配置状況から区域の端点に正しく移動できているかを確認

- ・AR システムを用いた方法

- i .立木の位置情報及び設定した区域情報を端末上に表示
- ii .GNSS 電波の良好な場所で衛星測位を行い、自己位置を決定
- iii .決定した自己位置から AR システムの画像による SLAM 処理により、自己位置推定しながら、検証位置まで移動
- iv .カメラ画像への樹木モデル投影で位置ずれを確認
- v .立木の配置状況から、位置ずれを修正し、正確な自己位置を決定
- vi .決定した自己位置から、区域を再現できるかを確認

⑤検証結果

- ・高性能 GNSS 受信機を用いた方法

本検証で使用した GNSS 受信機では、林内で位置情報を取得することができなかった。
理由として下記の内容が考察される。

- ・上空の開空度が不足しているため、測位に十分な GNSS 電波を受信できなかった。
- ・GNSS 受信機が高精度を担保するため、状態の悪い GNSS 電波を除外しており、測位に必要な衛星数を確保できず位置情報を取得できなかった

本検証で使用した GNSS 受信機は、測量用タイプの GNSS 受信機であった。しかし、GNSS 測量においては、高精度を担保するため、様々なフィルタ処理が行われているケースが多い。そのため、森林内など開空度の低い箇所では測位に必要な衛星数を確保できず、測位不能となったと考えられる。いわゆるハンディ型GNSS受信機(Garmin など)やスマートフォンなどは状態の悪い衛星からの情報も利用し測位を行う傾向にあるため、位置の誤差は大きくなるが測位できる可能性がある。

•AR システムを用いた方法

AR システムを用いて立木の配置状況をカメラ画像に投影させ、立木情報をもとに基準位置と方位を与えることができた。これに、区域データを同時に取り込むことにより、設定した区域に到達できる可能性を確認した。



図 3-2. 高精度屋外 AR システムの使用例

但し、本検証では、代替地に UAV レーザ由来の精緻な立木位置情報がなかったため、現地立木実体とシステム内に表示される AR モデルとの照合ができず、区域の再現に至らなかった。

⑥考察

GNSS 電波が届きにくい林内においては、測位できない可能性を想定して使用する必要がある。GNSS 測位で高精度を実現するためにはネットワーク型 RTK-GNSS 測位 (VRS 方式) を活用する方法が考えられる。しかし、この方法はインターネットに接続できる環境があることが使用の前提となるため、携帯電話の電波が届きにくい林内において利用が難しい。したがって、GNSS 単独ではなく SLAM 技術を用いた AR システムを併用することにより、簡便かつ高精度な基準位置と方位を決定することが可能になると考えられる。

4 UAV 計測により得られる情報等の活用

UAV を用いたレーザ計測結果のデータに加え、同時に撮影した画像データを活用することによって、従来の踏査では得られなかった情報を得ることが可能である。その情報と活用方法について以下にまとめた。

(ア)立木位置情報及び樹高の活用

- ・計測エリア全域の相対幹距比図作成による間伐目安指標の提供

UAV レーザ計測により、計測対象エリア内の立木について、立木本数、個々の立木の位置及び樹高を精度よく捕捉することができる。この計測結果データを用いることにより、従来は標準地調査（100 m²ないしは 200 m²）で行っていた相対幹距比の把握を、計測エリア全域について任意のメッシュサイズ（例えば 20m x 20m）で行うことが可能となる。この相対幹距比図により、広域な森林（主に針葉樹林）に対して間伐等の手入れが必要な箇所を抽出することが容易となるとともに、標準地調査の候補場所選定を客観的に行うための参考情報になり得る。（図 4-1）

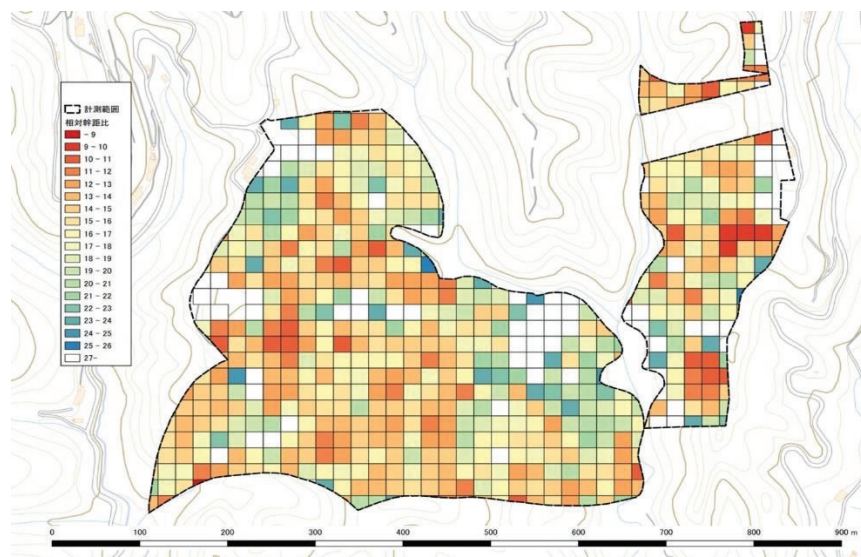


図 4-1. 相対幹距比（サンプル）

- ・計測エリア全域の立木材積の推計

広域な森林の立木総材積の推計は、標準地調査の結果を用いて行うことが一般的だが、選択する標準地調査場所の妥当性によって推計精度は大きく左右される。一方、UAV レーザ計測では計測対象エリア内の立木（被圧木を含む）の本数及び樹高を精度よく把握でき、また、適正な細り表を用いることにより胸高直径を推計把握できるため、踏査に比べてより高い精度での立木総材積推計が可能となる。

- ・立地級区分調査への参考情報の提供

立地級区分調査要領（昭和 39 年 10 月 1 日 39 林野計第 537 号、最終改正：平成 25 年 3 月 5 日）では、『国有林における林地の森林生産力を的確に把握し、立地条件に応じた施業方法を採用することにより、森林施業の適正化を図るための国有林の地域別の森林計画の対象森林に対して、立地級の調査が行われる。計画対象森林について、小班ごとに地位及び地利の調査を行い、地位級と地利級を組合せることによって立地級区分を行うものとする。地位の等級区分は、当該林分の主林木の平均樹高を求め、これを収穫表の同一林齢の主林木の平均樹高の範囲を比較することによって

行うものとし、これによりがたい場合には、土地調査により総合的に地位指数を判定して行うことができる。』と規定されている。また、農林水産省資料においては、『地位指数については、当該樹種の基準林齢（カラマツにあつては 35 年、その他の樹種にあつては 40 年）における主林木の平均樹高』と整理されている。

UAV レーザによって得られた計測対象エリア内の立木位置情報や樹高情報をもとに、同エリア内の平均樹高分布図を作成、提供することが可能となる。平均樹高分布図の表示は、

①計測対象エリア内の小班毎の平均樹高

②計測対象エリア内の任意サイズ（例えば 20m メッシュ）毎の平均樹高

等が考えられる。更に、計測対象エリア内の林齢情報を得ることができれば、平均樹高を基準林齢相当に調整することによって地位指数図として扱うことも可能になる。

計測対象エリア全体の地位指数が分かれば、今後の施業、育林の計画を立てる際の参考とすることができるため、有用な情報となる。

参考文献：

・「立地級区分調査要領（昭和 39 年 10 月 1 日 39 林野計第 537 号、最終改正：平成 25 年 3 月 5 日）」

・「スマート林業推進に向けた成長予測モデルの整備」：

https://www.maff.go.jp/j/budget/yosan_kansi/sikkou/tokutei_keihi/R1itaku/R1ippan/attach/pdf/index-77.pdf

(イ) 地形情報の活用

- ・崩壊危険地推定に役立つデータの提供

表層崩壊危険地には3つの特徴がある（静岡県立農林環境専門職大学：逢坂教授）。

- 1) 急斜面である
- 2) 集水地形である
- 3) 表層土層が厚い

1, 2) は、UAV レーザ計測により、直接的にデータを入手する事ができる。3) の土層厚は、そこに根ざしている立木の生育状態から推定できる可能性がある。例えば、尾根部と比較して谷部で生育状況が良好な要因は、水も豊富で養分を多く含む事によると考えられているが、根を広げやすい厚い土層となっている可能性がある。

従って、崩壊危険地の推定に役立つ情報として、計測対象エリア内の精細な地表面の情報（微地形データ）や立木の成長に関する情報を取得し、提供することができるため、将来的にはこれらを生かして危険地の推定に役立てられると考える。

微地形表現例：

CS 立体図 (0.25m メッシュ/0.5m メッシュ/1m メッシュ)：CS 立体図は長野県林業総合センターが考案した微地形表現図。航空レーザ測量結果をもとに、森林総合研究所大丸氏が作成した「CS Map Maker」を使用して作製。複数の解像度の CS 立体図を併用することにより、集水地形や0次谷（凹地形）など、表層崩壊の発生源になり得る箇所の発見が容易になる可能性がある（図 4-2、図 4-3、図 4-4）。

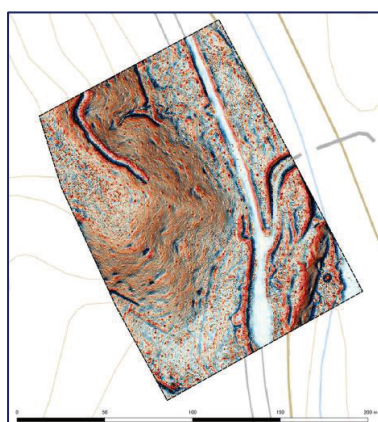


図 4-2. CS 立体図
0.25m メッシュ

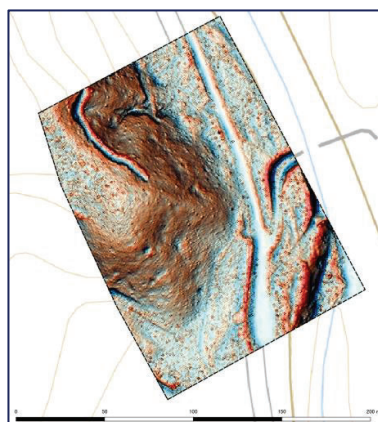


図 4-3. CS 立体図
0.5m メッシュ

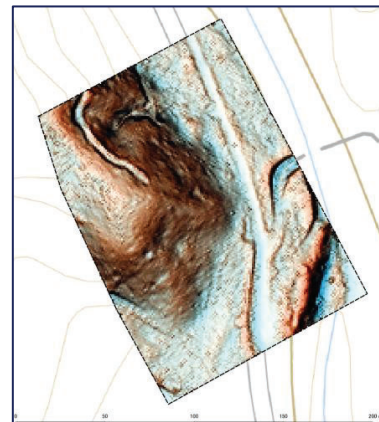


図 4-4. CS 立体図
1m メッシュ

なお、今回の検証では、三次元計測データの再現性が最も高いと想定される TIN (Triangulated Irregular Network：不正三角形網) を用いて地形モデルを構築し、森林総合研究所 大丸氏が作成した「CS Map Maker」を使用して CS 立体図を作成している。

- ・路網設計に役立つ精緻な地形データの提供

林業専用道や森林作業道などの路網整備の計画に際しては、対象地の精緻な地形データ・地質・土質などの情報収集が必要とされる。土質に関しては前述の崩壊危険地推定と同様の情報を活用できる可能性があるが、地形データについては以下の情報の提供が可能である。

① 傾斜分布図（0.25m メッシュ）：

地形傾斜によって想定される作業システムが異なるため、路網整備の候補エリアの微細な地形傾斜（緩傾斜地、中傾斜地、急傾斜地、急峻地）区分が地図上に可視化されることにより、整備計画の候補地選定に役立つ可能性がある。

（図 4-5）

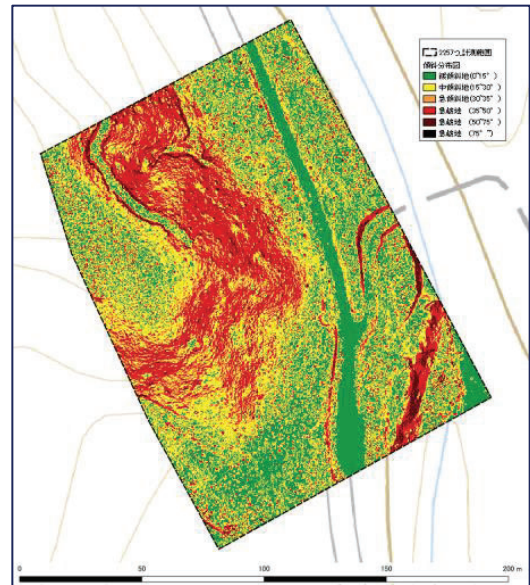


図 4-5. 傾斜分布図

② 精緻な数値標高モデル（0.25m メッシュ）：

計測によって得られた 3 次元点群データのうち、地表面を捉えたデータ（数値標高モデル（DEM）：図 4-6）を路網作成支援ソフト（FRD/Forest Road Designer：住友林業株式会社製）に取込むことにより、良好な路網設計ができることが確認された（本ページ下部記載の参考文献参照）。FRD は航空レーザ計測によって得られた地形情報（数点/㎡）を用いることを前提としているが、航空機よりも低空かつ低速での飛行が可能な UAV で計測された高密度な微地形情報（数千点/㎡）を用いることにより、従来にも増して実際の地形に即した路網設計が可能になる。

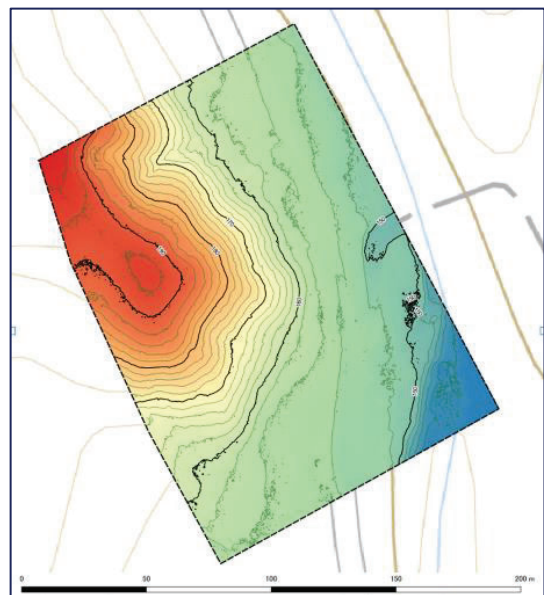


図 4-6. 数値標高モデル（DEM）

- ・林業 ICT 建機に役立つ精緻な地形データの提供

UAV レーザ計測によって得られた精緻な地形データを ICT 建機に取り入れることにより、予め設計された路網（作業道など）の開設作業を安全に自動施工することが可能になる。また、施工前に排出土量のシミュレーションが可能になり、工期見積・経費算定の精度向上が期待できる（コマツ製作所 ICT 建機）。

参考文献：

- ・「令和 3 年度静岡県森林・林業技術研究発表会 小型無人ヘリレーザー計測成果を活用した木材生産適地の把握について」：<http://www.pref.shizuoka.jp/sangyou/sa-610/documents/r3seikasyu2.pdf#page=13>

(ウ) オルソ画像

・オルソ画像の提供

UAV レーザ計測と同時に計測対象エリアの上空から撮影した写真（2 秒毎に 1 枚撮影）を正射変換し、繋ぎ合わせることで、真上から見たような傾きのない、正しい大きさと位置に表示される画像（オルソ画像）を作成、提供することができる。この画像により、計測時点での計測対象エリアの全体像を高精細な写真で俯瞰確認することが可能になる。

・樹種判定への活用

オルソ画像を拡大表示し、樹冠の輪郭、樹冠部の葉の形状、枝の張り方などの特徴を確認することで、目視による林相境界の判定が可能になる。本手法については、計測対象エリアの森林簿等の情報と照合することにより、判定の精度を上げることができるとされる。ただし、画像データを用いるため、UAV 計測実施日の天候や日照度合いによる明度・彩度の違い、影、季節による紅葉・落葉の影響を受ける。

以下に樹種判定の実例を示す。

①取得した写真を用いて、SfM または写真測量によるオルソ画像を作成する。（図 4-7）

②目視で林相の境界を判別し範囲を指定。指定した範囲ごとに樹種を特定し、その範囲の単木に樹種情報を付与する。（図 4-8、図 4-9）

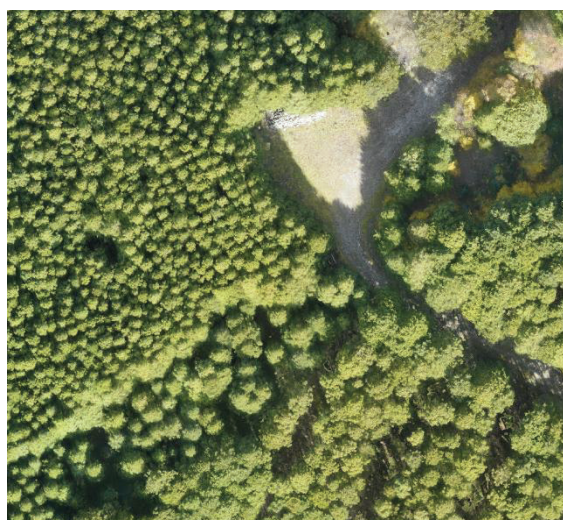


図 4-7.オルソ画像の例

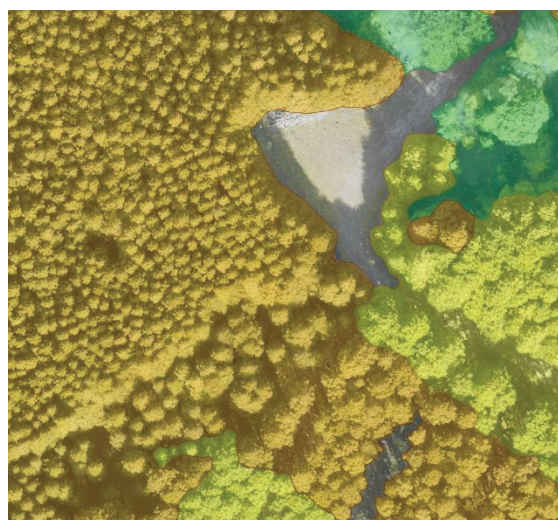


図 4-8.林相界の例

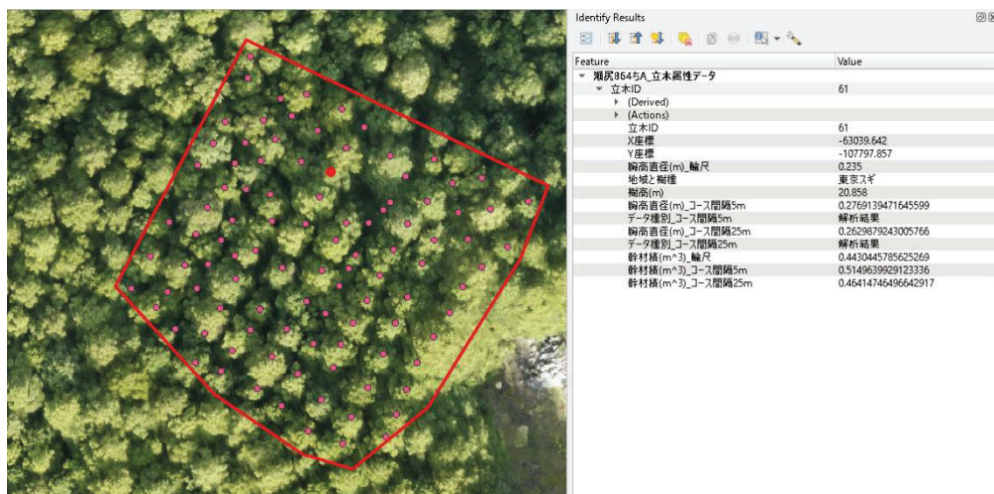


図 4-9.単木への情報付与例

- ・その他の画像の応用

今回は、一般的なデジタルカメラを用いた画像であるが、マルチスペクトルカメラなどのセンサを用いた計測により、病害検出などに応用することも可能となる。

(エ) GIS による管理

- ・計測及び解析結果はすべてデジタルデータであり、容易に地理情報システム（GIS）上で表示、閲覧することができる。

5 検討委員会の設置・運営

本事業の実施に当たっては、「令和3年度 UAV レーザを活用した人工林の林分内容解析手法等検討委員会」（以下「検討委員会」という。）を以下のとおり設置し、技術的指導及び助言を受け、検証方法、検証結果の分析評価を行った。

委員は UAV レーザによる森林計測に関する学識経験者が含まれるよう構成した。

（ア）委員会の構成

委員）

信州大学農学部農学生命科学科 加藤 正人 教授（委員長）

近畿大学農学部環境管理学科 井上 昭夫 教授

国立研究開発法人森林研究・整備機構森林総合研究所 鹿又 秀聡 主任研究員

三重大学工学研究科 松岡 真如 准教授

オブザーバー）

林野庁森林整備部研究指導課 細田 和男 首席研究企画官

静岡県立農林環境専門職大学 短期大学部 星川 健史 講師（第2回のみ）

・第1回委員会

開催日：令和3年9月1日

議題：

既存の手法や技術・知見の収集と分析について

UAV レーザ計測及び林分内容解析について

区域の再現手法の検討・検証について

・第2回委員会

開催日：令和4年1月20日

議題：

UAV レーザ計測及び林分内容解析結果

区域の再現手法の検討・検証方法及び地形情報の活用検討

UAV レーザ計測データの活用について

6 まとめ

国有林野事業における収穫調査の効率化を図るため、現在、収穫調査の方法として採用されている毎木調査や標準地調査の代替手法として想定される UAV レーザ計測による調査手法の検証を行った。

その結果、UAV レーザによる上空からのレーザ計測により、被圧木を含めほぼすべての立木を検出できることを確認した。

さらに、幹の直径についても平均数%程度の精度で計測ができることを証明した。

一方、幹回りに枯れ枝や下層植生が存在する林分の計測においては、直径検出率及び精度が低下してしまうという課題も明らかになった。これは、発射したレーザが幹に届く前の障害物で減衰、または、検出可能なパルス数を超えてしまうことが要因と考えられるため、使用した UAV レーザの検出パルス数を上げるか、ウェーブフォームを用いることで、改善できる可能性がある。

なお、これらの計測結果を用いて材積も算定したところ、開空度が低く直径検出率が低下した箇所を含めても約 20%程度の精度で算出が可能であることが確認できた。

これは、レーザ計測の特徴として、直径が大きめに出る系統誤差が影響しているものと考えられ、今後検証を重ねることで補正による精度向上が期待される。

また、針広混交林では、単木樹種判定技術の導入により、精度向上の可能性はある。

以上から、従来の毎木調査や標準地調査など現場へ赴き実施していた調査の代表的な目的に応じた代替手法の仕様案を作成した。

なお、様々な計測の目的に応じて、コース間隔や飛行速度を調整することで、ニーズに合った計測条件を定めていくことも可能になる。

さらに、この手法により、従来の踏査では実現することができなかった位置情報を含む個々の立木情報及び微地形情報のデジタル記録により、今後のスマート林業を強く推進することができることも大きなメリットとなる。

以上