

平成29年度

「国有林材の販売に係る収穫調査
等の効率化手法検討委託事業」

報告書

平成30年3月

林野庁

目 次

1	事業の概要	1
1.1	事業名	1
1.2	背景及び目的	1
1.2.1	事業の背景	1
1.2.2	事業目的	1
1.3	実施体制	1
1.3.1	事業の構成	1
1.3.2	実施者	2
1.3.3	委員会の構成	2
1.4	事業の実施方針	3
1.4.1	収穫調査等の将来展望と技術的課題	3
1.4.2	効率的で実用可能な収穫調査の検証	3
1.4.3	効率的で実用可能な素材検知の検証	4
2	収穫調査等の将来展望と技術的課題	5
2.1	背景	5
2.1.1	収穫調査の位置付け	5
2.1.2	収穫調査の効率化	5
2.1.3	委託調査の位置付け	5
2.2	収穫調査等の将来展望	6
2.2.1	検討の考え方	6
2.2.2	収穫調査等の将来展望	6
2.2.3	将来の収穫調査の例（UAV活用型）	9
2.3	技術的課題と当面の対応	12
3	効率的で実用可能な収穫調査の検証	16
3.1	UAVによる区域標示	16
3.1.1	検証手順について	17
	手順1 準備	17
	手順2 撮影飛行	22
	手順3 データ処理	23
3.1.2	検証結果について	24
	3.1.2.1 区域刺針について	24
3.1.3	分析	26
	3.1.3.1 再現性の検証	26
	3.1.3.2 区域標示に係る諸課題	28
3.2	UAVによる立木調査	30
3.2.1	調査概要	31
3.2.2	解析手順について	31
	3.2.2.1 解析用データの作成	31
	3.2.2.2 現地調査	32
	3.2.2.3 樹頂点解析	33
	3.2.2.4 胸高直径推定	35

3.2.2.5	材積推定	38
3.2.3	検証結果について	39
3.2.3.1	立木本数	39
3.2.3.2	樹高	40
3.2.3.3	胸高直径	41
3.2.3.4	材積	43
3.2.4	評価	45
3.2.4.1	航空機・UAVによる立木調査の評価及び今後の課題	45
3.3	UAVによる跡地検査	48
3.3.1	検証手順について	48
3.3.2	検証結果について	49
3.3.3	分析	50
3.3.4	UAVを活用した極印等確認検査	51
3.3.4.1	検証手順について	51
3.3.4.2	検証結果について	51
3.3.4.3	分析	52
3.4	デジタル計測機器による検知	53
3.4.1	検証する検知方法について	53
3.4.2	地上レーザスキャニングによる検知	54
3.4.2.1	検証手順について	54
3.4.2.2	検証結果について	54
3.4.3	画像解析による検知	55
3.4.3.1	FOVEA（フォベア）による検知の手順	56
3.4.3.2	3Dカメラによる検知の手順	57
3.4.4	検証結果について	59
3.4.4.1	検知結果について	59
3.4.4.2	検知工期について	61
3.4.5	分析	62
3.4.5.1	精度について	62
3.4.5.2	検知環境について	62
3.4.5.3	工期について	63
3.4.6	評価	64
3.5	全体評価	67
3.5.1	デジタル位置情報インフラとGNSS環境の有効性について	67
3.5.1.1	デジタル位置情報インフラの有効性	67
3.5.1.2	GNSS環境の有効性	68
3.5.2	国有林材の販売に係るデジタルデータの活用イメージ	69
3.5.3	UAVを活用した収穫調査の今後の方向性について	70
4	まとめ	71

1 事業の概要

1.1 事業名

「国有林材の販売に係る収穫調査等の効率化手法検討委託事業」

1.2 背景及び目的

1.2.1 事業の背景

(1) 国有林材の販売に係る情勢

国有林野事業においては、利用期に達した人工林を伐採し、将来的に均衡のとれた齢級構成に誘導するとともに、国産材の安定的・効率的な供給体制の構築に貢献するため、立木販売を中心に収穫量を増加させることとしている。このような中、立木価格の低迷や限られたマンパワーに対応しつつ、収穫調査を効率的かつ適切に実施していくことが重要な課題となっている。

(2) デジタル技術を活用した効率的で実用可能な収穫調査方法等の進展

国有林における収穫量が増大していく中で、収穫調査等国有林材の販売関連業務分野においてICT技術を積極的に活用し、業務の効率化を推進することが求められている。また、国有林におけるICT技術の開発・利用推進は、広く民有林も含め、スマート林業の構築にも大きく貢献できるものと考えられ、国有林において、これら技術を開発し、汎用化させることが、今後のわが国の林業成長産業化においても極めて重要な先導的役割を果たすこととなる。

このため、収穫調査業務を実施する国有林の現場職員や指定調査機関の実態や調査結果の活用方法、素材・立木買受業者の実情及び収穫調査等の技術の将来展望並びに今後のICT技術を活用した有効かつ実用的な収穫調査技術等の進展状況を十分に踏まえつつ、現場に適用可能なものから順次導入していくことが必要である。

1.2.2 事業目的

本事業は、収穫調査等の将来展望等を整理するほか、デジタル技術を活用した効率的で実用可能な収穫調査等の方法を検証し併せてコストや工期を調査するものである。

1.3 実施体制

1.3.1 事業の構成

(1) 収穫調査等の将来展望と技術的課題

デジタル技術の進歩により、将来的に実現可能となる効率的な収穫調査等の姿を幅広く整理するとともに、現時点において実用可能と考えられる技術及びそれらの導入における課題のとりまとめを行う。

(2) 効率的で実用可能な収穫調査の検証

次の作業種毎に検証を行うとともに、コスト、工期を明らかにする。検証は均質な人工林2箇所で行う。

① 区域標示

無人航空機による効率的な区域標示方法について、従来の手法と比較しその有効性を検証する。区域測量はGIS上で行い、無人航空機の飛行に必要な座標値を得る。

② 立木調査

航空写真の立体視利用及び無人航空機の空中写真利用等による効率的な収穫調査方法について、従来の手法と比較しその適合度を検証する。検証は標準地調査法と毎木調査法で行う。

③ 跡地検査

無人航空機による効率的な跡地検査方法について、従来の手法と比較しその有効性を検証する。

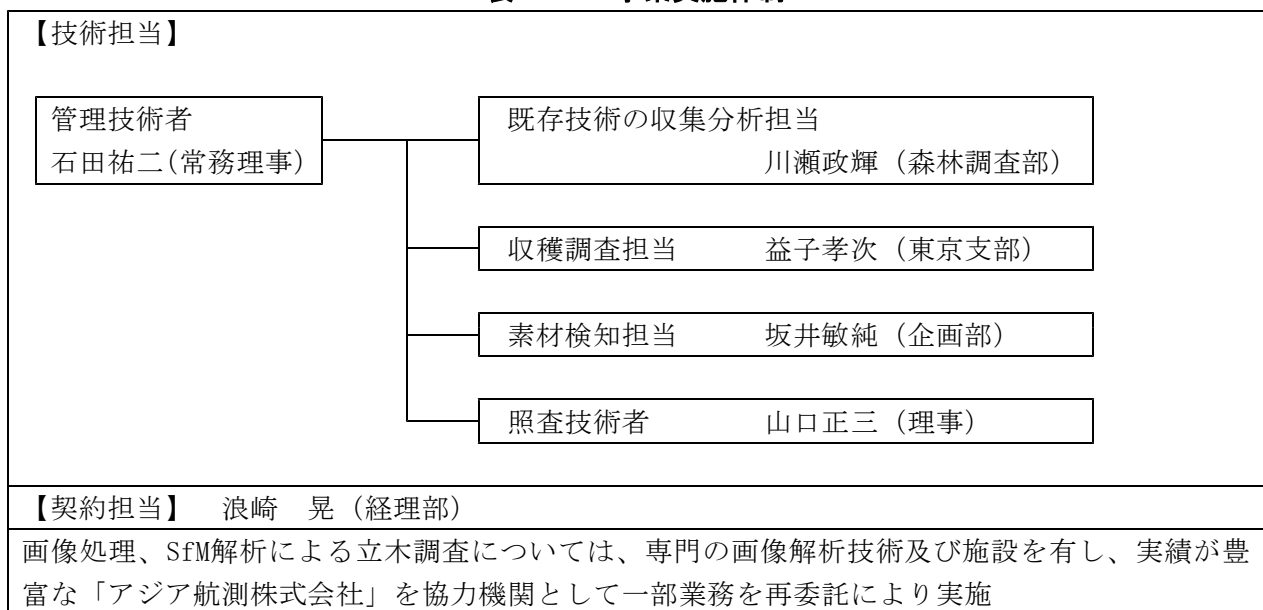
(3) 効率的で実用可能な素材検知の検証

山元土場デジタル計測機器による効率的な検知方法について、従来の手法と比較しその適合度を検証するとともに、コスト、工期を明らかにする。検証は山元土場2箇所で行う。

1.3.2 実施者

一般財団法人日本森林林業振興会に委託し、一部業務はアジア航測株式会社に再委託された。委託先における事業実施体制は表1.3.1の通りである。

表1.3.1 事業実施体制



1.3.3 委員会の構成

本事業の実施に当たっては「収穫調査等の効率化手法検討委員会」(以下「検討委員会」と言う。)を設置し、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、収穫調査、素材生産、ICT技術等に関する学識経験者等が含まれるよう、林野庁担当職員と調整の上構成した。

検討委員会は平成29年12月5日、平成30年2月14日の2回開催した。

検討委員会構成員及び検討委員会での検討事項はそれぞれ表1.3.2、表1.3.3の通りである。

表1.3.2 検討委員会名簿

加藤 正人	信州大学 先鋭領域融合研究群山岳科学研究所教授
細田 和男	国立研究開発法人森林研究・整備機構 森林総合研究所資源解析研究室長
鹿又 秀聡	国立研究開発法人森林研究・整備機構 森林総合研究所林業システム研究室
松岡 真如	高知大学 教育研究部自然科学系農学部門准教授
中村 裕幸	株式会社woodinfo 代表取締役
平川 素行	一般財団法人経済調査会 監事

表1.3.3 検討委員会検討事項

第1回検討委員会	調査対象技術の選定 調査実施計画の検討	平成29年12月5日
第2回検討委員会	調査結果の分析と評価 報告書のとりまとめ方針の検討	平成30年2月14日

1.4 事業の実施方針

事業の実施方針については、事業の目的並びに効率的で実用可能な収穫調査方法検証の有効性を確保することを基本に、林野庁担当官と調整の上、第1回検討委員会において以下の通り取り組むこととした。

1.4.1 収穫調査等の将来展望と技術的課題

文献調査を主体とし、実用化の可能性のある収穫調査等の姿を幅広く整理するとともに、現時点において実用可能と考えられる技術及びそれらの導入における課題のとりまとめを行う。

1.4.2 効率的で実用可能な収穫調査の検証

効率的で実用可能な収穫調査の検証は、表1.4.1に示す箇所で行うこととした。

表1.4.1 収穫調査検証箇所

検証項目	検証箇所
区域標示	茨城県石岡市
立木調査	茨城森林管理署管内219は3・220れ林小班
跡地検査	茨城県日立市 茨城森林管理署管内94ち・97ろ林小班

1.4.3 効率的で実用可能な素材検知の検証

山元土場でのデジタル計測機器による効率的な検知方法について、従来の手法と比較しその適合度を検証するとともに、コスト、工期を明らかにする。

効率的で実用可能な効率的で実用可能な検知の検証は、表1.4.2に示す箇所で実施することとした。

表1.4.2 検知検証箇所

検証項目	検証箇所	実施方法
検知	岩手県雫石町 盛岡森林管理署管内673林班 土場	画像検知 (FOVEA、3Dカメラ)
	愛媛県西予市宇和町 (株)宇和原木市場 土場	地上レーザ検知 (シミュレーション)

2 収穫調査等の将来展望と技術的課題

2.1 背景

2.1.1 収穫調査の位置付け

国有林材の販売に当たっては、財政法で国の財産は適正な対価なくして譲渡、貸付けてはならないとされており、「会計法」及び「予算決算及び会計令」により、適正に予定価格を定め販売額の下限とし、かつ、競争(市売り等)に付す場合は最も高い価格で提示した者に販売することとされている。

売り払う産物の予定価格は、あらかじめ調査(収穫調査)を行って市場価逆算方式で算定している。

収穫調査については、国の職員が自ら行うか、または、法律で指定される調査機関に委託して行うこととしている。(注：指定調査機関の指定条件として、「調査業務を適正かつ確実に実施するに足る技術的能力及び経理的基礎を有するものであること」等と法律で定められている。)

収穫調査については、立木の樹種、樹高、胸高直径(地上部1.2mまたは1.3mの平均直径)、品質、採材歩止り等を調査することとし、調査の方法は、全林分の毎木調査または標準地の毎木調査によること等とされており、これらを定めた規程に基づいて実施している。

2.1.2 収穫調査の効率化

収穫調査に従事できるマンパワーが限られること、立木販売価格に占める立木調査経費の削減が必要であること等から、収穫調査が効率的に実施できるよう、労力軽減と低コスト化を図ることが不可欠となっている。

前述した通り、国有財産処分の適切性を確保するため、一定の調査精度を確保する必要があり、その範疇で、より効率的な調査手法により調査を行うことになる。従来手法は長年間実施されてきているが、手法等は固定されたものではなく、技術進歩や社会経済条件に応じて改善していく余地があり、その必要性が大きくなっている。

今般は、ICTの急速な進歩を踏まえ、レーザ計測、UAV、位置情報等の技術の積極的な活用・導入について検討した。これらは、収穫調査の省力化のみではなく、立木に係る詳細情報をいかにして効率的に把握し、利用するかという点で、業務全体の改善にもつながるものである。

2.1.3 委託調査の位置付け

今回の委託事業は、収穫調査に係る技術的情報を整理するものであり、委託事業で得られた知見を参考としつつ、今後、収穫調査に係る規程の改正等に役立てることとしている。

このため、収穫調査の効率化についてどのような将来展望や技術的な課題や実現可能な方法があるかを幅広く検討した上で、実用可能な技術の一部についての検証を行うこととした。

本事業の成果をどのように適用するか等については、別途、国で検討することとしている。

2.2 収穫調査等の将来展望

2.2.1 検討の考え方

人口減少、労働力不足の中で、全産業において生産性の向上、省力化が必要とされており、林業分野もその例外ではない。人的資源は、より高度な判断等が必要な分野に投入し、機械やコンピュータが実施できる分野は自動化される方向にある。例えば、農業は、UAVで田畑の生育ムラを診断し、必要な箇所に追肥する等の技術が開発されている。正確な位置情報により株単位で作物の管理をすることが検討されている。また、特定波長の光で作物のクロロフィル内のショ糖を検知し、光合成の状態を分析するといった分析能の向上も図られている。これらの実用化には、UAVのリモートセンシング技術が用いられている。また、物流の改革も重要視され、空、海、陸の輸送全般について、自動化、無人化の検討(無人航空機、無人輸送船、無人輸送車等)が進められている。

このような中、国有林における収穫調査においても将来を見据えた効率化が必要である。従来から人力による地上調査を実施してきたが、広大な森林エリアでの調査であり、労力も相当かかる(例えばha当たり7人等/毎木調査)ことから、労力を軽減し、かつ、精度の高い調査手法を検討し、採用していくことが急務となっている。

本章では、収穫調査に将来展望と技術的課題等についてとりまとめる。また、次章において、実用可能な技術について検証を行う。

2.2.2 収穫調査等の将来展望

(1) 上空からの計測・撮影データの活用

従来型の地上調査は労力がかかること、また、地上調査では林分全体の情報が把握しづらいことから、上空からの調査と地上調査を組み合わせるのが有効であり、そのメリットは大きい。

上空からの調査は、航空レーザ計測、UAV撮影(SfM)、UAVレーザ計測の3種が考えられる。地上調査は、従来型の人力調査と地上レーザ計測となる。

図2.2.1「収穫調査の現状及び将来」に示した通り、セット①～③の組合せである。地上調査を最小限とするためUAV林内飛行を想定したものはセット④である(2.2.3で説明)。

これらの組合せにおいて、調査手順等の基本的な原理は同じであり、上空からの調査は毎木、地上調査は標本木の直径調査が基本となる。

調査手順については、以下の通りである。

- ・ 上空から、林分全体の調査を行う。
- ・ 表層データを分析し、立木の位置情報と樹冠径を計測する。
- ・ 地表データがある場合は、毎木の樹高を算定できる。
(公共測量データ等を活用。レーザ搭載型UAVであれば、同時に地表データが得られる。)
- ・ 胸高直径は、地上調査(当面は人力または地上レーザ)により標本木を実測し、推定式(胸高直径 = f(樹冠径))を作成する。(注: 推定式は、一次式(胸高直径 = k・樹冠径)など簡明なものが望ましい。)
- ・ 推定式により、毎木の胸高直径を算定する。

得られる調査データは、次表の通りである。ここでは、従来の調査とセット②を比較した。

この方式により得られる収穫調査データの精度は、従来の毎木調査と同程度以上となると考えられる。また、立木の位置情報、地表データなどが得られ、情報量は格段に多くなる。

表2.2.1 調査データの性格

○ 調査データの性格

従来の立木調査(地上調査／林内)	上空からの撮影 + 地上調査 ※セット②の場合
【毎木調査】 直 径 ; ○ (実測) 樹 高 ; △ (推定) 本 数 ; ○ (実測)	【上空からの調査】 (上層木のみ) 注※ 樹冠径 ; ○ (実測) 樹 高 ; ○ (算定) (地表データ必要) 本 数 ; ○ (実測) 立木の位置情報 ; ○ (実測)
【標準地調査】 直 径 ; △ (推定) 樹 高 ; △ (推定) 本 数 ; △ (推定)	
	【林内の調査】 標本木調査 直 径 ; △ (推定) ※直径の推定式 ; 胸高直径 = f (樹冠径)

注※) 被圧木は上空からは捕捉し難いが、その割合は小さいので補正式で対応することが考えられる。

収穫調査の現状及び将来

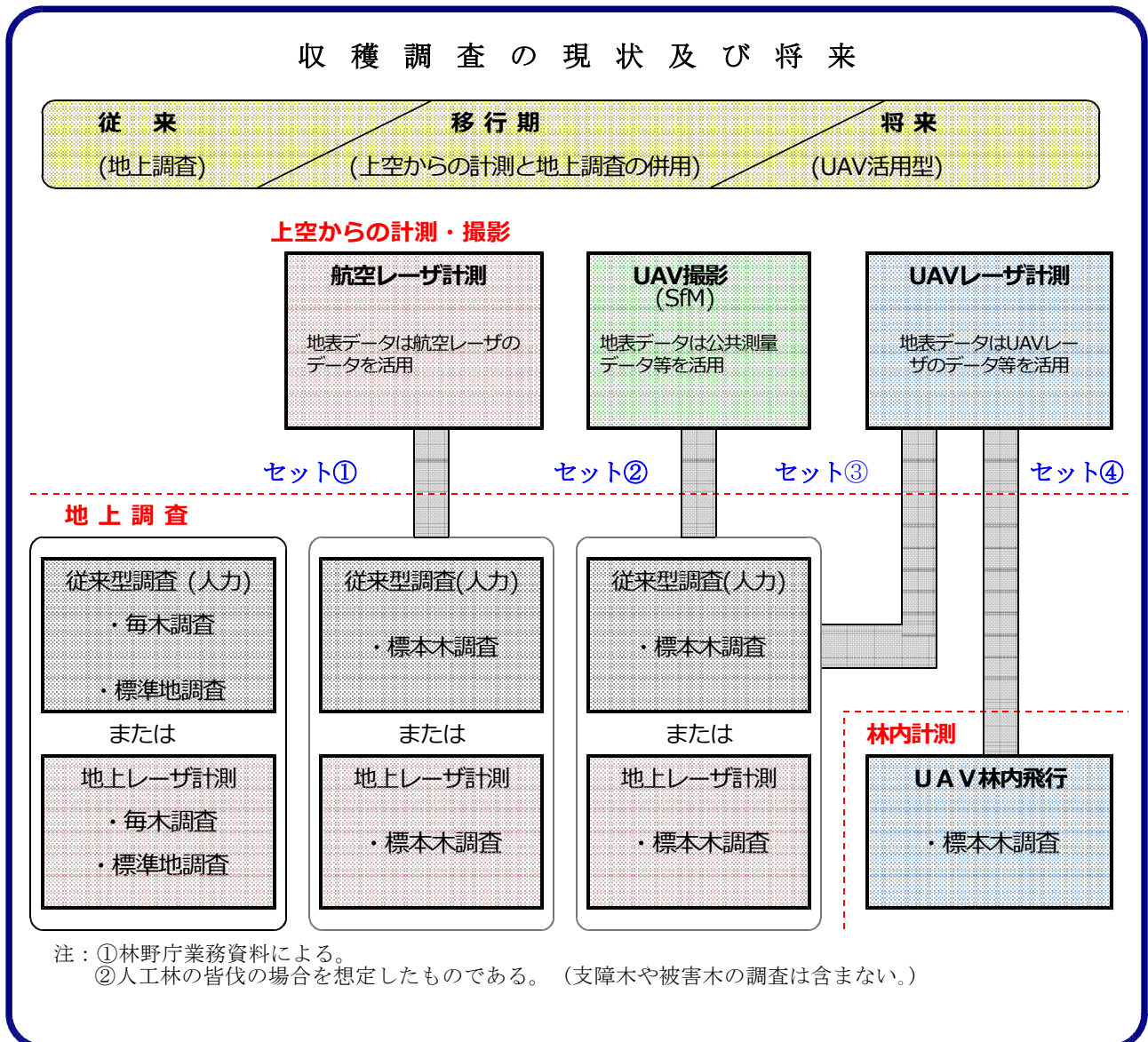


図2.2.1 収穫調査の現状及び将来

(補足) 材積の査定について

① 立木幹材積表と材積式

立木幹材積表について調査した報告例(注②)によると、針葉樹の材積表のうち、最も多いのが、常用対数を用いた下式である。

$$\log V = a + b \cdot \log D + c \cdot \log H \quad (V; \text{幹材積、} D; \text{胸高直径、} H; \text{樹高}) \quad (i)$$

本式は変換すると、 $V = 10^a \cdot D^b H^c$ となり、個々の立木の材積を胸高直径と樹高のべき乗式で算定するものがわかる。本式の外、オーストラリア式、その簡略式が使用されている。

$$V = a \cdot H + b \cdot D^2 H + c \cdot D^2 H + d \quad (ii)$$

$$V = c \cdot D^2 H + d \quad (iii)$$

このように、本来、個々の立木の材積は、胸高直径と樹高を用いて材積式で直接算定できるものであるが、これまでは、材積式で算定した幹材積表を作成し、材積を得ている。(注：①立木

幹材積表のほとんどは、胸高直径と樹高を独立変数とする2変数材積表であり、胸高直径2cm括約、樹高1m括約で編成されている。(②同報告では、材積式で直接材積を算定することを推奨している。)

② レーザ計測データの使用

従来の収穫調査(毎木)では、胸高直径の計測は容易で、樹高の計測は困難であったことから、胸高直径を全て実測し、樹高を推定(樹高 = f (胸高直径))する方向で実施されてきた。

レーザ計測等では、逆に、樹高は毎木を自動的に算定できる。胸高直径については林内で実測し、樹冠径との関係を調査し、胸高直径 = f (樹冠径)という推定式を確定する必要がある。

この場合、胸高直径の計測作業は容易であることから、適切な推定式を得るための標本木の選定方法(個体、個体群、標準地等)が重要となる。幹材積式も、上記①の(iii)のようなシンプルなものとし、直接算出することができる。これらを含め、材積の算定方式自体の全般的な検討が必要となる。

注1：林野庁業務資料

2：「現行立木幹材積表と材積式による計算値との相違及びその修正方法」(細田等 森林計画誌44 No. 2 '10)を参考に検討した。

2.2.3 将来の収穫調査の例(UAV活用型)

図2.2.2に「高性能レーザを搭載したUAVによる収穫調査の例(UAV活用型)」を示した。

この例では、省力化、自動化を徹底した形、つまり、調査員が林内に入らず、完全なリモートセンシングにより収穫調査を実施する方式をイメージしたものである。これは、高性能のレーザ計測、機動力の高いUAV、精度の高いGNSS技術等といった条件が整うことで、実現可能となる。

(1) UAVによる上空からの計測・撮影

上空からの計測・撮影により、迅速に大量の情報を収集できる。

- ① GIS上で飛行ルートを設定し、ドローンに自動で計測・撮影を行わせる。
- ② ドローンに高性能レーザが搭載されることで、樹冠から比較的近距离でレーザ計測ができ、高度の高い航空レーザよりも精緻なデータが得られる。同時に写真撮影も可能である。
- ③ このデータは、SfMにより立体図、また、平面的にはオルソ化されることにより、正確な区域図、立木の正確な位置データを得ることができる。
- ④ レーザ計測による地表データ(DEM)も同時に得ることができるので、樹冠データ(DSM)との差分により、毎木の樹高(DCHM)を算出することができる。
- ⑤ 胸高直径は計測できないことから、樹冠径を自動解析し、その毎木データを得る。
- ⑥ AI等を活用した解析技術の進歩により、樹種を自動的に判別する。

(2) UAVによる林内計測

上空からの計測等により入手できないデータは、胸高直径である。

このため、直径調査については実測する必要がある、標本木を選定する。

この調査は、胸高直径 = f (樹冠径)の推定式を得るためのものである。

- ① 調査する標本木を選定する。(樹冠径の幅がでるように選定する。条件に応じて標本木の選定方法を選択する(個体に限らず、個体群や標準地でも可。毎木もあり得る)
- ② 林内飛行時の撮影データにより、立木の形状や下層植生等の情報を得ることができる。
- ③ 胸高直径と樹冠径の関係式(胸高直径の推定式)により、胸高直径の毎木データを得る。
- ④ 以上により、必要な立木データが一式揃うことになる。

(3) 林内作業の省力化

上記のように、基本的にUAVリモートセンシングとデータ処理作業が主体となり、従来の収穫調査のように、林内歩行作業からは解放される。

調査員は、必要最小限の現地確認を行うだけでよく、分析等の時間を充実させることができる。

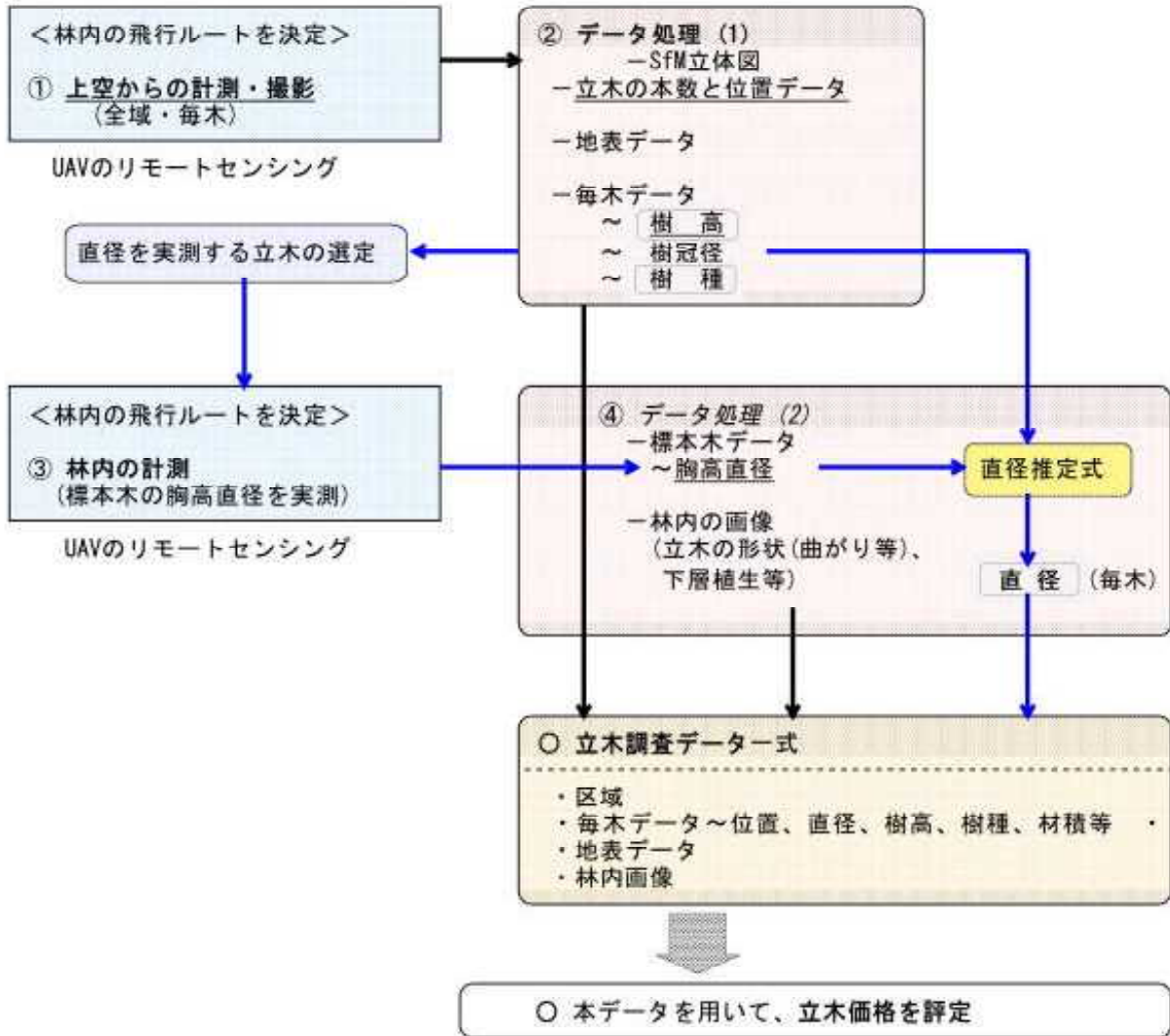
UAV計測によるデータは豊富であることから、生産コストの算出等に活用でき、立木予定価格の評定がしやすいこと、また、公売に当たって詳細な立木情報を提供することも可能となる。このような利点は、前記2.2も同様である。

高性能レーザを搭載したUAVによる収穫調査の例（UAV活用型）

◇ 本例でUAV計測に求められる機能

- ① GNSSデータで自動飛行
- ② レーザと写真の同時撮影
- ③ 高度な制御技術で林内飛行

◇ 計測及びデータ処理の手順は以下のとおり。



注：①林野庁業務資料による。

②人工林の皆伐の場合を想定したものである。（支障木や被害木の調査は含まない。）

図2.2.2 高性能レーザを搭載したUAVによる収穫調査の例（UAV活用型）

2.3 技術的課題

2.2で示し将来展望に係る技術的課題を整理したものが、表2.3.1の「立木調査におけるICT活用の課題等」である。ここでは、概要について補足説明する(以下の①～⑥)。

① 航空レーザ計測

航空機を使用して上空から計測するため、大面積の調査に向いている。例えば、1万haを超えるような大面積では極めてコストパフォーマンスが高い。

撮影高度が高くなるため、解析能がやや劣るが、地表データを同時に計測できるなど、豊富なデータを一度に取得でき、大量の基礎データの整備が可能である。

上空からの計測に共通することとし、胸高直径は計測できないことから、林内での計測(人力等)を併用しつつ、精度の高い推定式(胸高直径 = f (樹冠径))を得る必要がある。

② 地上レーザ

林内に携行して計測する地上レーザも実用化されている。

従来的人力調査に比べて、豊富で正確な情報が得られることから、収穫調査はもとより、生態系の調査等に広く活用できる。小面積の調査でもコストパフォーマンスが良い。

レーザ計測(動画)と同時に写真撮影(静止画像)を行う機種では、可視光色へ補正ができることから、リアルな林内画像を再現できる。

航空レーザ、UAVレーザとも共通するが、今後のレーザ技術の進歩やAIの活用等により、性能や利便性等の向上が期待できる。

③ UAVレーザ

現状では、UAVに搭載できるレーザが高価であるなど、コスト削減の途上にある。しかし、軽量・安価なレーザの普及により、活用の条件は良くなってくると思われる。

また、急速に進歩する自動運転技術の活用により、UAV飛行技術も向上し、リモートセンシングによる林内調査も可能となることが期待される。

UAVレーザにはカメラも同時に搭載できることから、将来は、④のUAV空中写真を包摂する汎用タイプとなるものと思われる。

④ UAV空中写真(SfM)

樹冠を近距離で撮影することから、飛行ルートを適切にとれば、比較的正確な情報が集まり、また、可視光で撮影するためリアルなSfMを作成できる。

ただし、レーザ計測のように地表データを得ることはできないため、樹高を算定するには、既存の地表データ(公共測量データの活用等)が必要である。

カメラは安価であることから、SfMを作成する条件等を整えることにより、当面のタイプとして実用可能と思われる。(将来的には③に移行)

⑤ UAV飛行技術

UAVにおける制御技術の高度化、動力の高性能化等により、上空からの計測はもとより、林内での飛行も可能となること等が期待される。

⑥ 位置情報利用

準天頂衛星の活用等により、精度の高い位置情報を取得できるようになることが期待できる。

また、GISデータが精緻化されることにより座標系による管理が可能となるが、現状では、データ精度が十分ではないことから、実測による補正等を進める必要がある。

表2.3.1 立木調査におけるICT活用の課題等

関連技術	特徴(メリット等)	課題	改善方向
1 レーザ計測	①航空レーザ ・上空から大面積を計測 ・情報量が豊富で正確 -立木、森林の3D情報 -本数、位置 -樹冠サイズ -表層高(DSM) -地表データ(DEM) -樹高(DCHM) -直径(樹冠から推定)	・小面積ではコスト高 ・直径は実測できない。 ・樹種判別能の向上 ・被圧木の計測は困難 ・レーザ照射量	・対象区域の選定 ・林内計測(刈除)と併用 ・推定精度の向上 ・AI等 ・補正手法の開発 ・レーザの高密度化
	②地上レーザ ・林内での計測 ・情報量が豊富で正確 -立木、林内の3D情報 -本数、位置 -樹高 -地表データ(DEM) -直径(実測)	・樹種判別能の向上 ・レーザが樹冠等で遮ぎられ、樹高の計測精度が下がる場合がある。 ・下層植生が計測の邪魔	・AI等 ・レーザの高密度化 ・対象区域の選定 ・必要に応じて刈払い
	③UAVレーザ ・①と④の特徴を兼ねる。 ・樹冠に比較的近距离で計測	・軽量・安価なレーザが必要	・レーザの普及
2 UAV技術	④UAV空中写真(SfM) ・上空からカメラ撮影 ・比較的正確な情報が集まる。 -本数、位置 -表層高(DSM) -樹高(DCHM) ※地表データ(DEM)がある場合 -直径(樹冠から推定) -樹種(目視による判定)	・画像処理に時間を要す。 ・直径は実測できない。 ・地表データがない場合、樹高を算出できない。	・高性能PCによる処理速度の向上 ・林内計測(刈除)と併用 ・推定精度の向上 ・公共測量による地表データ等の整備
	⑤UAV飛行技術 ・上空からの調査 ・迅速(林内歩行に比べ) ・手頃な価格	・林内飛行は苦手 ・飛行時間の制約 ・搭載重量の制約	・制御技術の高度化(障害物回避等) ・動力の高性能化 ・長時間駆動(燃料電池)
3 位置情報利用	⑥GNSS技術 ・座標による位置情報 ・現地での位置確認 ・デジタル測量が可能	・測位精度(ハンディ機の場合センチ単位の測位は困難) ・GISデータの精緻化	・準天頂衛星(QZS:みちびき)はH29年度から4機、6年後は7機 ・実測データによる補正
4 ICT一般 ・AI ・クラウド ・高性能端末等	⑦ICT活用 ・大量データを高速処理 ・詳細情報 ・ユビキタス等	・データの精度向上 ・学習・分析力の向上 ・見える化 ・低価格化等	・技術は急速に進歩 ・新開発の商品を利用(ハード、ソフト)

注：①林野庁業務資料による。

②一般的に整理したものであり、製品等によっては、課題を解決し、改善しているものもある。

③人工林の皆伐の場合を想定したものである。

(参考)

○ 本章で用いている用語について

用語	補足説明
UAV (無人航空機)	英語：Unmanned Air Vehicle ※人が乗らず、コンピュータによる自動操縦、または、遠隔操作により飛行する航空機。ドローンとも呼ばれる。H7. 12. 10改正の改正航空法で「無人航空機」を定義している。 (注：①ドローンは、drone (雄蜂、蜂の羽音)から由来。プロペラのある無人航空機に対して使用されることが多く、プロペラのない航空機をUAVと区分して使用することもある。②航空法では、無人航空機は、飛行機、回転翼航空機、滑空機、飛行船としている。)
SfM ※連続写真立体化(仮訳)	英語：Structure (Shape) from Motion ※移動するカメラから撮影した画像により、3次元的形状を自動的に復元する手法
DSM (数値表層モデル)	英語：Digital Surface Model ※航空レーザで <u>地表データ</u> を計測する手法。地盤の高さに建物や樹木の高さを加えた地表の情報(オリジナルデータ)を得る。
DEM (数値標高モデル)	英語：Digital Elevation Model ※航空レーザにより <u>地形データ(グラウンドデータ)</u> を得る手法。地表データから建物等の高さを取り除いて地面の高さ(標高)を示す。(注：DEMは本来は高さデータのセット(標高以外のデータを含む)であり広義だが、数値地形モデルDTM(Digital Terrain Model)と同義で使用されることが多い。)
DCHM (樹冠高)	英語：Digital Crown(Canopy) Height Model ※表層データ(表層高)から地形データ(標高)を差し引くことで、表層物の高さを計測する手法。以下の関係式で樹高を得ることができる。 樹冠高 (DCHM) = 地表データ (DSM) - 地形データ (DEM)

(GNSS関係)

GNSS (全球測位衛星システム、衛星測位システム)	英語：Global Navigation Satellite System ※元々は航空機・船舶等の航法支援用に開発されたシステムでGPS衛星、地上管制局、利用者の受信機で構成される。利用者は4機以上のGPS衛星からの距離を同時に知ることにより位置等を得ることができる(注：6軌道面に衛星を30個配置すると地球の全域をカバー可)。
GPS (全地球測位システム、衛星測位システム)	英語：Global Positioning System ※米国国防総省が開発した人工衛星を利用した位置測定システム。GNSSの一つ。航空機・船舶、地上の車両等の受信者に三次元位置を与えるために使用される。

	(注：日本では初期からGPSを利用していたため、衛星測位システム全般を指してよぶことが多い。)
QZS (準天頂衛星)	英語：Quasi-zenith Satelite ※地域航法衛星システムであり、地上から高仰角で観測できる準天頂衛星を常に1機は見通せることができるようにするもの。日本は、H22年に実証のための初号機みちびき（QZS-1）を打ち上げ、H29年に3機を追加し、H30年から4機体制でシステム運用を開始する（注：2023年は7機体制となる予定）。 QZSはGNSSと併用して用いられる。
GIS (地理情報システム)	英語：Geographic Information System ※地理空間情報(地点や区域の位置情報等)を管理・利用するシステム

注：林野庁業務資料による（国土地理院等の公表資料をもとに作成）。

3 効率的で実用可能な収穫調査の検証

3.1 UAVによる区域標示

従来、区域標示は、標柱、極印、ペンキ等の地物や刈り払い等を目印として、立木買受者、素材生産事業請負者等に、売り払い区域、事業区域を明示する目的で収穫調査の一環として行われてきた。

この標示行為は、その維持管理も含め多大な労力を要するものである。UAVによる区域標示とは、現在活用可能と思われるデジタルデータとUAVを活用した区域標示について、その手順を明らかにし、実用可能かどうかを検証するものである。

区域標示されたエリアについては、区域標示行為に引き続き区域内の立木の数量等を明らかにする立木調査が行われることとなることから、一連の収穫調査として茨城森林管理署管内219は3・220れ林小班において茨城森林管理署の協力を得て検証を行った。

無人航空機による効率的な区域標示方法について、従来の手法と比較しその有効性を検証する。区域測量はGIS上で行い、無人航空機の飛行に必要な座標値を得る。

区域標示に係る検証の実施フローは表3.1.1の通り。

表3.1.1 区域標示実施フロー

<u>区域標示実施フロー</u>				
(茨城森林管理署管内)				
	UAVによる標示	UAVによる標示(将来)	従来型区域標示 (コンパス)	従来型区域標示 (GNSS)
手順1	国有林GISデータの確認	国有林GISデータの確認	国有林GISデータの確認	国有林GISデータの確認
手順2	位置情報のUAV取り込み		区域確認(GNSSハン ディーレシーバー活用)	区域確認(GNSSハン ディーレシーバー活用)
手順3	UAVオルソ画像撮影飛行		コンパス測量	GNSS計測
手順4	区域確定(※1)、図面調 整、面積確定		区域標示(テープ巻き)	区域標示(テープ巻き)
手順5	UAVからの表示材(ペンキ 等)投下等による区域標示	ARIによる区域標示	図面調整、面積確定	図面調整、面積確定

3.1.1 検証手順について

UAVによる区域標示について、図3.1.1の手順で実証を行った。

(1) 手順1 準備

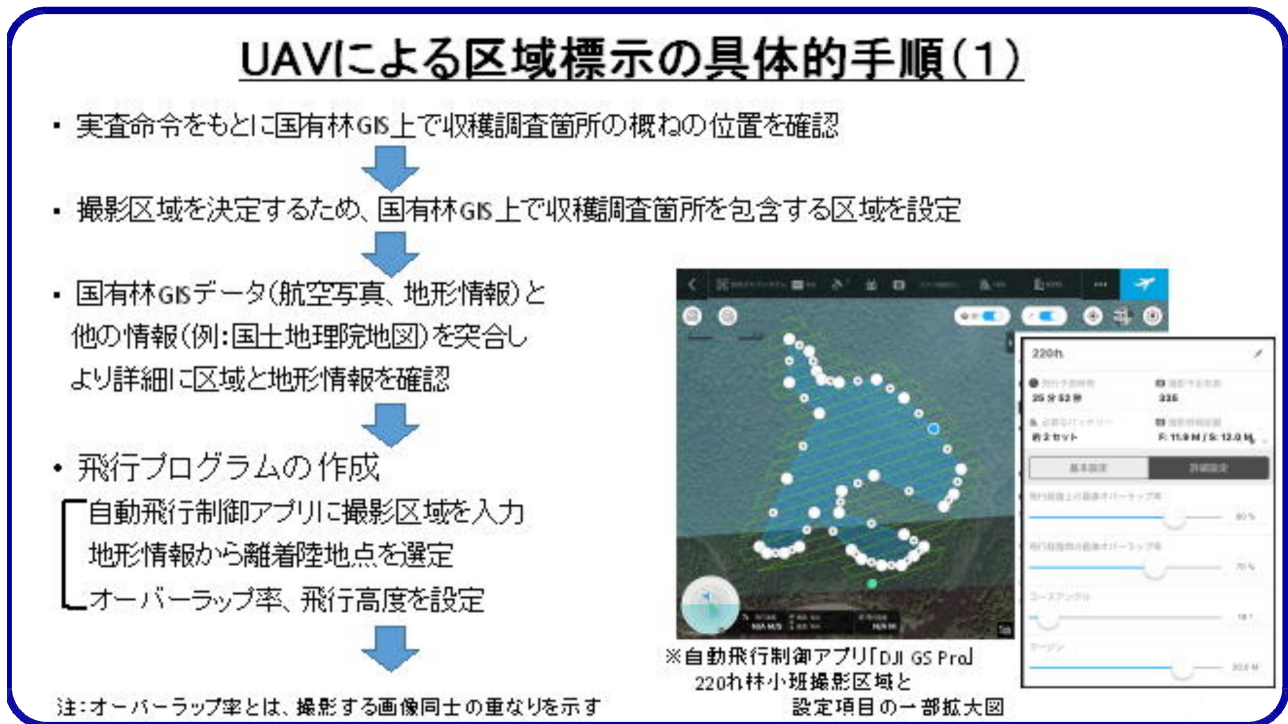


図3.1.1 UAVによる区域標示の具体的手順(1)

(説明)

- ① 収穫調査実査命令に記載されている林小班を確認する。このとき、調査対象地が林小班の一部なのか全体なのか、隣接林小班についても収穫調査対象箇所とされていないかを確認する。また、国有林GISから、衛星写真、地形、植栽区分等、調査対象地に係る基本的情報を確認する。なお、隣接地、近傍箇所について収穫調査が予定されている場合は、全体の調査が効率的となるよう調査計画を検討することが望ましい。

区域標示検証内容

茨城森林管理署管内219林班は3小班、220林班れ小班において、指定した区域内のうちスギ林分を抽出し立木調査のための区域標示を行う

・対象区域位置図(森林基本図 1:5000)

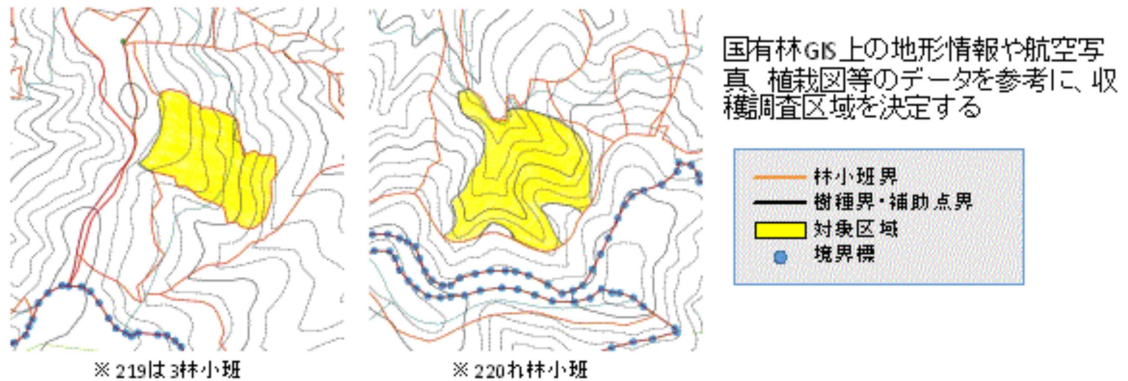


図3.1.2 区域標示検証内容

② 収穫調査区域を包含するおおよその撮影区域を設定する。区域標示は、撮影した画像をオルソ化し実行していくが、収穫区域境界部分も正確にオルソ化するためには、オーバーラップを見込んである程度収穫調査区域の外側からも撮影する必要がある。また、その画像を跡地検査でも活用することを想定すると、後に残存する収穫対象とならない外縁林分の情報も必要となる。このため、撮影区域は収穫調査区域に対して数十mのマージンをとるのが最適である。(今回の検証では、マージンとして20mを設定した)

③ 設定した撮影区域に沿って飛行プログラム(自動操縦)の作成を行う。この際、必要な事項は次の通りである。

ア. 撮影区域の境界の緯度経度情報

今回使用したアプリケーション『DJI GS Pro』は、GISから入手した収穫区域境界の緯度経度情報を用いて撮影区域を設定する。このとき、マージンを数値で指定する機能があり、これにより収穫区域外側の撮影範囲を指定できる。

イ. 離着陸地点と撮影区域全体の地形情報

今回使用したアプリケーション『DJI GS Pro』における飛行高度とは、離着陸地点を0mとする相対高度であり実際の対地高度とは異なる(図3.1.3)。このため、離着陸地点を机上で選定し周囲の地形情報と比較することで、計画した飛行プログラムでは実際の対地高度がどのように変化するかを把握しておく必要がある。

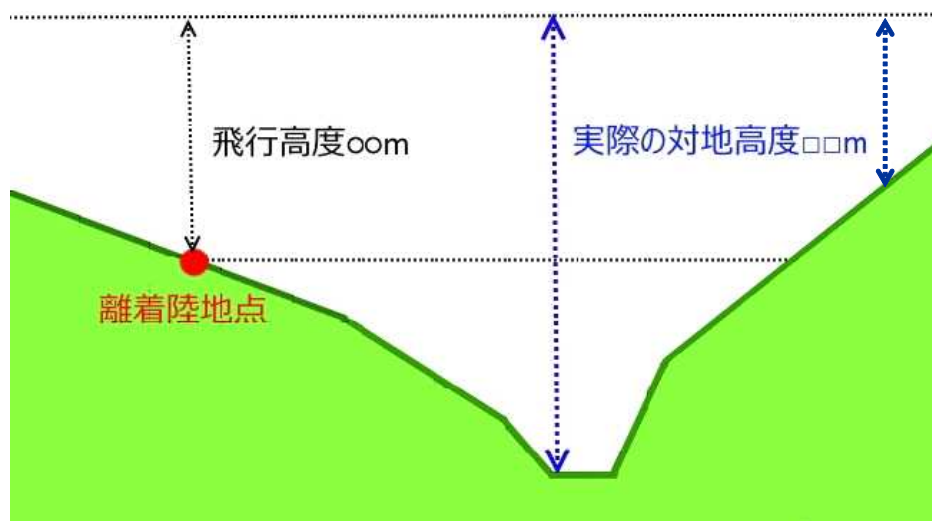


図3.1.3 『DJI GS Pro』における飛行高度と対地高度

ウ. UAVに搭載されたカメラの性能情報

撮影画像をオルソ化するためには、ラップ率を適切に設定する必要がある。具体的には「何m間隔で撮影すれば良いか」を明らかにすることとなるが、これは撮影対象との距離とカメラの性能(対象との距離に対してどれだけの範囲を撮影可能か)によって変化する。「イ」で得た想定される実際の対地高度と組み合わせることで、最適な飛行高度と撮影間隔を計算することが可能になる。なお、今回使用したアプリケーション『DJI GS Pro』は、DJI製のUAVとの連携を前提としたソフトであり、機種を指定することでこれらの計算が自動化できる。

(参考)

① オルソ化(正射変換)とは、写真上の像の位置ずれをなくし、空中写真を地図と同じく真上から見たような傾きのない正しい大きさや位置に標示される画像に変換することを言う。

② ラップ率とは、画像同士をどれだけ重ねて撮影していくかの数値のこと。撮影していく経路に対して、進行方向の重なり具合をオーバーラップ率(OL)、平行に並ぶ隣の経路との重なり具合をサイドラップ率(SL)と言う。OL、SLの値は、高い方がオルソ化及び後のSfM解析の高い精度につながる反面、データ処理にかかる時間も増加する。

「UAVを用いた公共測量マニュアル(案)」において、「UAVを用いた空中写真による三次元点群測量」では、オーバーラップ率60%、サイドラップ率30%が標準とされている。ただし、「UAVを用いた公共測量マニュアル(案)」では、『土工現場における裸地のような、対象物の認識が可能な地区』を想定しているのに対して、森林を対象とする場合は樹冠による凹凸が激しく、また設定した撮影距離(=対地高度)に対して、樹頂点は樹高分カメラに近い等の留意点がある。このため今回の検証では、森林を対象とした経験則から「オーバーラップ率80%、サイドラップ率60%」以上を基準として飛行プログラムの作成を行った。

③ オルソ画像やSfM解析によって作成した3Dモデルを利用するには、それらに位置情報を付与する必要がある。今回の検証では、工程の簡素化のため撮影画像自体に保存された位置情報(UAV搭載GNSSによる)を利用した。

しかし、より正確に高い精度でデータ処理・解析を行うには、基準点(グランドコントロールポイント: GCP, Ground Control Point)を設置するべきである。GCPとは、位置情報を測量によって高い精度に明らかにした測点のことであり、対空標識を設置しUAVからの撮影画像に写り込ませる

ことで位置情報を付与するものである。「UAVを用いた公共測量マニュアル(案)」にも『標定点』との名前で、設置に関する規定がある。ただし、事前に測量が必要になる等工程が複雑化する上、森林内においては対空標識を設置できる場所は限定的である等の課題もある。

④ 森林を対象にUAVを飛行させる場合、「航空法」の規定により国土交通大臣の承認が必要とされる目視外飛行となるケースが多く発生するので、あらかじめ必要な手続きをとっておくことが望ましい。また、飛行高度についても、区域内の標高差の大きくなる山岳地において広範なエリアをUAV飛行するときは、国土交通大臣の許可が必要とされる「対地高度150m」を超えないよう留意する必要がある。

⑤ 今回使用したアプリケーションの『DJI GS Pro』による飛行プログラム作成法式には、設定した区域に対して飛行高度を一定とする方式と、煩雑ではあるが経路を個別指定し地形に沿って飛行高度を変化させる方式とがある。

前者は、区域の緯度経度情報さえ用意すれば、様々な要素が自動で計算されアプリケーション側では数値の微調整のみで済む簡易さがあり、今回の検証ではこちらを採用した。この場合、撮影間隔は一定であることから、ラップ率は対地高度によって変化し、対地高度が小さいほどラップ率が小さくなる。従って、最も対地高度の小さな地点を基準に設定することとなる。撮影区域の標高差が大きい場合は、ラップ率の変化が大きくなるため、「対地高度150m」の制約から飛行高度を低めに設定したり、飛行プログラムを分割せざるを得ない場合が生じ、結果として1回の飛行での撮影可能範囲が狭くなる問題もある。例えば、今回の検証では1回の飛行(20分程度)で2 ha程度の撮影が限界となったが、飛行高度を上げることができれば、解像度は低下するが1枚で広範囲を撮影可能になり、この結果飛行時間が短縮し同じ時間で撮影可能な面積も増加する(図3.1.4)。



図3.1.4 飛行高度による飛行ルートの変化

一方、地形に沿って飛行高度を変化させる飛行プログラムでは、概ねラップ率が一定となり解像度も概ね一定となるという効果もある。しかし、飛行経路や最適な経路間距離、撮影間隔等を、地形情報に合わせて計算し、緯度経度毎の飛行高度情報を個別入力しなければならず、作業が複雑である。

⑥ 対地高度をはじめとしたUAVの飛行ルールは航空法等で定められており、その概要は次の通りである。

無人航空機に係る改正航空法等の概要

無人航空機の定義

飛行機、回転翼航空機等であって人が乗ることができないもの（ドローン、ラジコン機等）のうち、遠隔操作又は自動操縦により飛行させることができるもの（200g未満のものを除く）

無人航空機の飛行ルール

(1) 無人航空機の飛行にあたり許可を必要とする空域

以下の空域においては、国土交通大臣の許可*を受けなければ、無人航空機を飛行させてはならない。

※安全確保措置をとる場合、飛行を許可

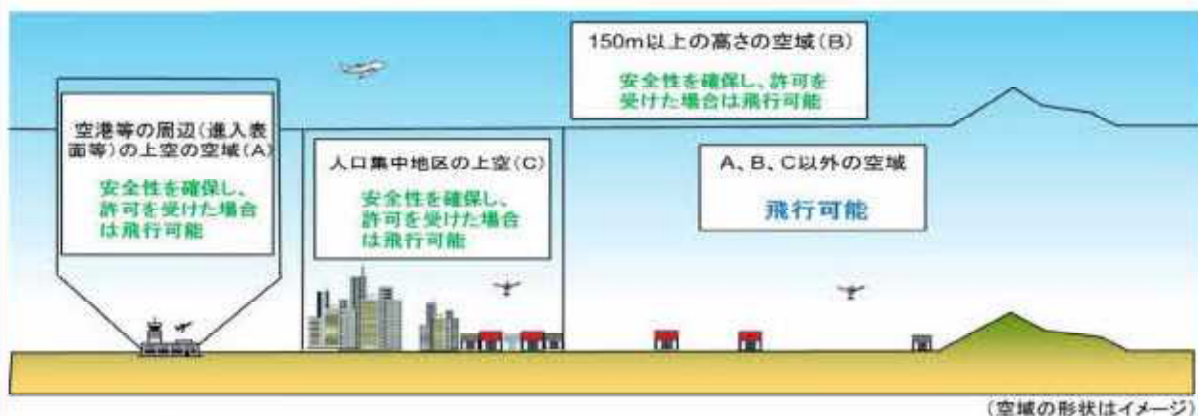
- ① 航空機の航行の安全に影響を及ぼすおそれのある空域
 - 空港等周辺に設定された進入表面等の上空の空域【下図A】
 - 地表又は水面から150m以上の高さの空域【下図B】
- ② 人又は家屋の密集している地域の上空
 - 国勢調査の結果を受け設定されている人口集中地区（国土交通大臣が告示で定める区域を除く。）の上空【下図C】

(2) 無人航空機の飛行の方法

無人航空機を飛行させる際は、国土交通大臣の承認を受けた場合*を除いて、以下の方法により飛行させなければならない。

※安全確保措置をとる場合、より柔軟な飛行を承認

- 日中において飛行させること
- 無人航空機及びその周囲を目視により常時監視すること
- 人又は物件との間に30mの距離を保って飛行させること
- 多数の者の集合する催しが行われている場所の上空で飛行させないこと
- 火薬類、高圧ガス、引火性液体、凶器などの危険物を輸送しないこと
- 機体から物件を投下しないこと



(3) その他

- 事故や災害時の国・地方公共団体等による捜索・救助のための飛行の場合は、(1)(2)を適用除外とする。
- (1)(2)に違反した場合には、50万円以下の罰金を科す。

出典：国土交通省航空局ウェブサイトより

図3.1.5 無人航空機に係る改正航空法等の概要

(2) 手順2 撮影飛行



図3.1.6 UAVによる区域標示の具体的手順 (2)

(説明)

① 設定した飛行プログラムによる撮影飛行を実行する前に確認すべき主な事項は次の通りである。

ア. 現地実態に合わせた離着陸地点の確定

UAVを離着陸させるためには、ある程度の樹冠の隙間が必要である。机上で事前に設定していた離着陸地点が現地では使えないことも林内では往々にしてある。広範囲を撮影する場合は撮影途中でバッテリーを交換することも想定されるため、安全かつ余裕をもって離着陸可能な場所を現地にて探す必要がある。

イ. 風速計測・支障物の有無等の安全確認

UAVは風による影響を受けやすいため、飛行前に風速を確認する必要がある。また、電波や飛行自体を妨害するものがないか、第三者への影響がないか等を十分に確認した上で飛行を開始しなければならない。

ウ. 飛行プログラムの再確認・調整 (再検討)

現地実態把握、安全確認の結果、離発着地点の変更等が発生した場合は、設定した飛行プログラムの調整が必要となる。このとき標高差を伴う離着陸地点の大幅な変更は、撮影・航空法それぞれの観点から最適な飛行高度を変化させ、飛行プログラムへの影響が大きいものである。状況に応じて飛行を中止し、飛行プログラムの作り直しも含めた再検討が必要である。

(参考)

- ① 森林でUAVを飛行させる際は、安全上の観点から離着陸自体は手動で行うのが望ましい。UAVには衝突回避機能が搭載されているものもあるが、それらには死角が存在する上、樹冠の隙間等を抜ける際、搭載されているGNSSが数mずれるだけで致命的なミスにつながるためである。(離着陸地点は地表面であり、樹冠によってGNSSが十分に機能していない場合が多い。)

(3) 手順3 データ処理～面等作成

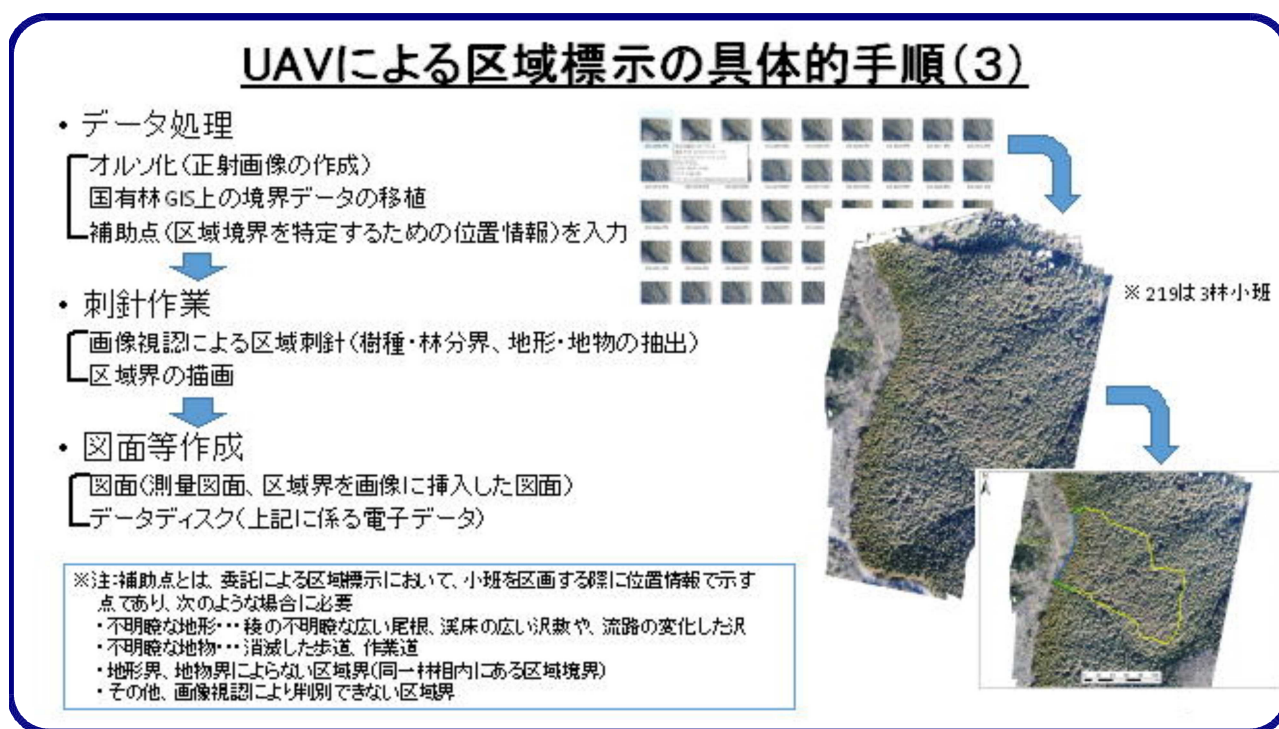


図3.1.7 UAVによる区域標示の具体的手順(3)

(説明)

- ① UAVにより取得した高精細画像への区域界刺針作業は次の3つに大別される。

- ア. 林小班界を区域界とする区間：国有林GIS上の境界データをオルソ画像へ移植して区域界とする。
ただし、国有林GIS上の位置情報が実際と異なる場合は国有林GIS上の位置情報の修正が必要となる。
- イ. 樹種界を区域界とする区間：樹種界(広葉樹-スギ、ヒノキ-スギ等)をオルソ画像から判読して区域界とする。
- ウ. 地形、地物を区域界とする区間：地形(尾根、谷等)、地物(標柱、林道、歩道等)をオルソ画像やDEMデータから判読して区域界とする。
- エ. 同一林相内に区域界を設定する区間、その他画像判読困難な区間：伐採指定面積、収穫の合理性等を勘案し画像上で区域界を決定する。ただし、収穫調査を委託する場合は、区域界を決定するために必要な補助点となる位置情報を提供する必要がある。(従来型区域標示における区域界を示すためのテープ標示に対応する情報。)

(参考)

- ① 樹高の異なる違齢林や尾根等の地形界を区域界とする場合、オルソ化画像では判読し難い場合がある。このような場合は、森林立体視ソフトウェア「もりったい」などを使用すると判読しやすい。
- ② 国有林GIS上の位置情報が実際と異なる場合は、国有林GIS上の位置情報を修正する必要がある。この場合は、正確な位置情報を有するGCPを活用することが望ましい。なお、対空標識、GCPの設定については、国土交通省国土地理院の「UAVを用いた公共測量マニュアル(案) (平成29年3月改正)」に詳しい。
- ③ 区域標示について従来型とUAVによる方法を整理すると表3.1.2の通りとなる。

表3.1.2 UAVによる区域標示の説明

従来型(極印等の地物による区域管理)

国有林GIS上の区域境界に関する情報等をもとに、踏査により標柱、地物、地形、樹種界を確認しながら、内縁の境界木に極印を打刻するとともに、必要に応じて刈り払いを行うものであり、主に人力により林内で行う。なお、この作業と併せて、コンパス等により測量を行い、区域の形状、面積を整理する。立木買受者等第三者は、極印、刈り払い等の地物情報及び補足情報としての測量成果物により齟齬なく区域を共有しようとするものである。

UAVによる区域標示(写真及び位置情報等の非地物による区域管理)

入力による林内での極印の打刻や刈り払い、測量を行わず、国有林GIS上の区域境界に関する情報等をもとに、UAVによって得た画像に刺針を行うことで区域を標示するとともに、当該刺針箇所的位置情報(経緯度情報)を明示し、立木買受者等第三者においてもこれらの情報(区域標示された高精細画像、経緯度情報)により齟齬なく区域を再現、共有しようとするものである。

3.1.2 検証結果について

3.1.2.1 区域刺針について

- ① 区域刺針は、次により行った。

ア. 林小班界を区域界とする区間

林小班界を区域界とする区間については、今回の検証に当たり、国有林GIS上の位置情報と(地形情報)と現地の実地の位置情報とのかい離の有無について確認した。確認は、公共測量用GNSSによりGCPを設定し、トータルステーションにより区域界の位置情報を取得し、国有林GIS上の位置情報と突合する方法によった。

この結果、図3.1.8に示すかい離が認められた。

このため、検証箇所の収穫調査区域界のうち、林小班界を区域界とする区間について、国有林GIS上の位置情報データを修正し、UAVによって得られた画像上の位置情報に修正した国有林GIS上の位置データを当てはめ、区域境を画像上に標示した。

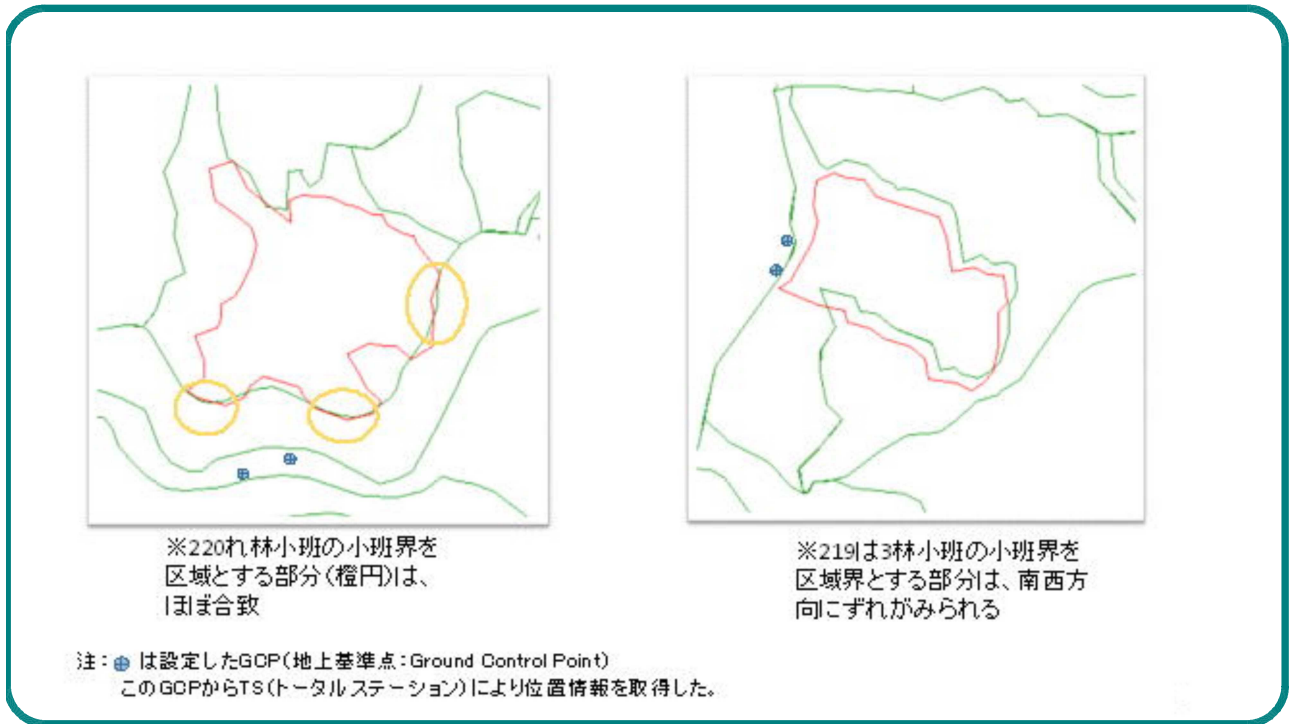


図3.1.8 国有林GIS上の位置情報と実際の位置情報

イ. 樹種界を区域界とする区間

スギー広葉樹、スギーヒノキを区域界とする区間については、オルソ化した高精細画像から樹種の違い(枝の形状などの樹形、色調等)を判読し、区域界を刺針した。なお、今回の検証箇所ではスギーヒノキの判読に際し、色調に大きな差がない箇所があったことから、画像を拡大し枝張り等の樹形も参考に樹種界を判読した。

ウ. 補助点を区域界とする区間

今回の検証箇所には、同一林相内を分断する区域界やオルソ化した高精細画像による視認が困難な標柱、歩道等が存在したことから、地上における区域界を標示するための標柱やテープに代わり、標柱、テープが設置される箇所についてGCPからトータルステーションにより測量を行い位置情報を取得し、補助点に係る位置情報とした。なお、対照として実施した従来型の区域標示においては、補助点情報として与えた位置情報箇所にテープ標示を行った。

以上のア～ウの手法により区域界を全て明らかにし、オルソ化した高精細画像に区域を標示した成果として図3.1.9に示す画像を作成することができた。また、当該画像から取得した位置情報をシェイプファイルとして保存し、GISやGNSSレシーバーで活用できることを確認した。

区域標示結果

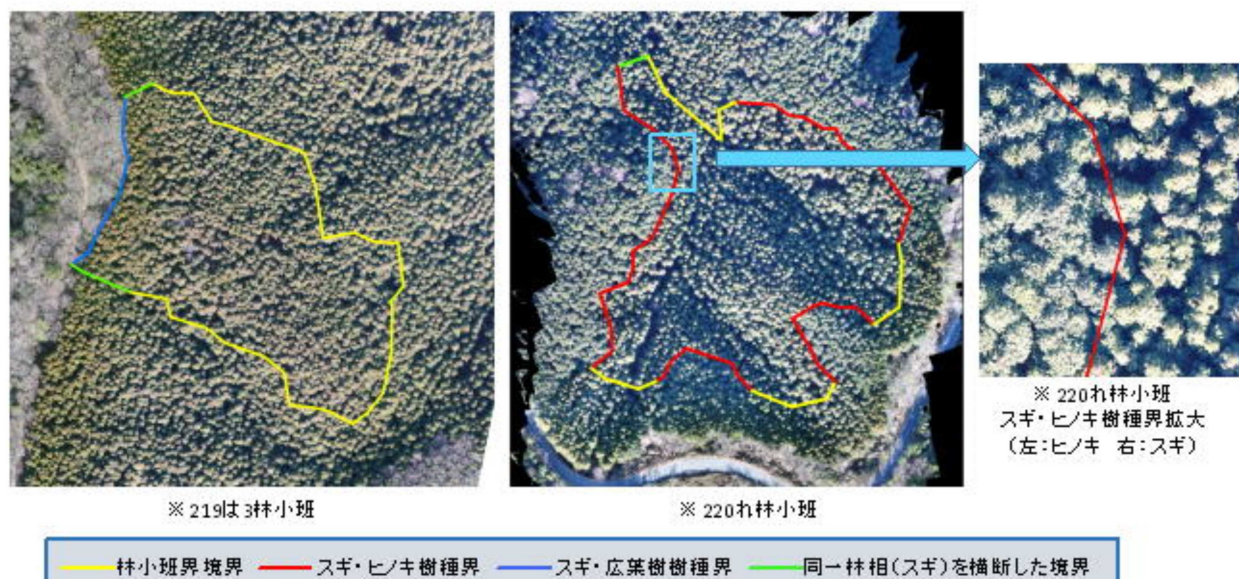


図3.1.9 区域標示結果

3.1.3 分析

3.1.3.1 再現性の検証

- ① 区域標示は、立木買受者や素材生産請負者等に対し、立木の処分範囲や素材生産委託範囲を明確にし、誤伐等を未然に防ぐための明認行為である。このため、国以外の第三者にあっても認識しやすい極印、ペンキによる標示、刈り払いによる標示など、明解な方法によって区域標示が行われてきた。今回のUAVによる区域標示方法が、齟齬なく再現可能かを検証するとともに、問題点、ICT技術の進展を見据えた将来像についても検討した。
- ② 区域標示の再現性の検証に当たっては、区域境界の位置情報を入れたGNSSハンディレシーバーを参考としながら、区域標示された高精細画像から区域境界が再現可能かどうかを確認した。
- ③ 再現性の検証手順は表3.1.3の通りとした。

表3.1.3 再現性の検証手順

- ・GNSSハンディレシーバーのナビ機能により所与の位置情報ポイントを探索
- ↓
- ・探索されたポイントにおいて、区域標示された高精細画像に示された樹冠形状、立木配置と現地を照合し、所与の位置を特定
- ↓
- ・連続する次のポイントを同様に探索し、ポイント間を目視により区域境界を特定

(説明)

- ① GNSSハンディレシーバーには誤差があり、受信衛星数、計測時間等により誤差半径が変化する。一般的なGPS、GLONASS、みちびきが受信できる汎用機では、数mの誤差半径(今回検証に使用したガーミン社製GPSMAP64scjでは、1分計測で約4mの誤差半径)が認識される。誤差半径が小さくなるほど樹冠形状や立木配置からの位置特定が容易になる。

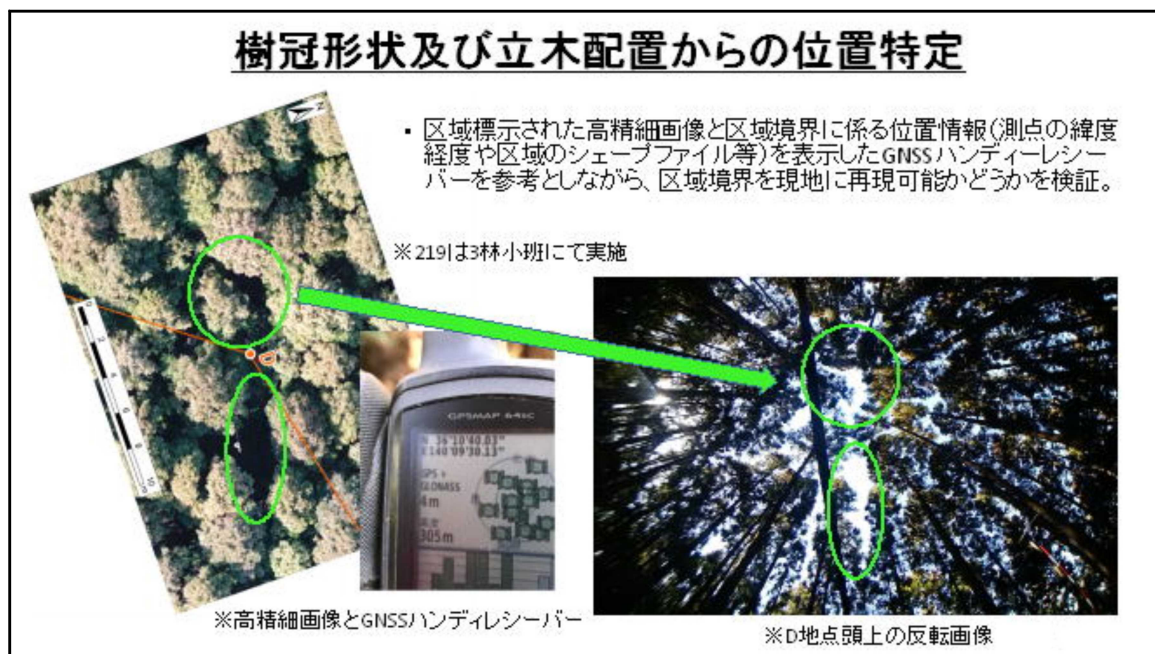


図3.1.10 樹冠形状及び立木配置からの位置特定

(参考)

- ① GNSSハンディレシーバーによる位置情報には誤差があり、区域標示を再現する場合、誤差半径が小さいほど容易になる。

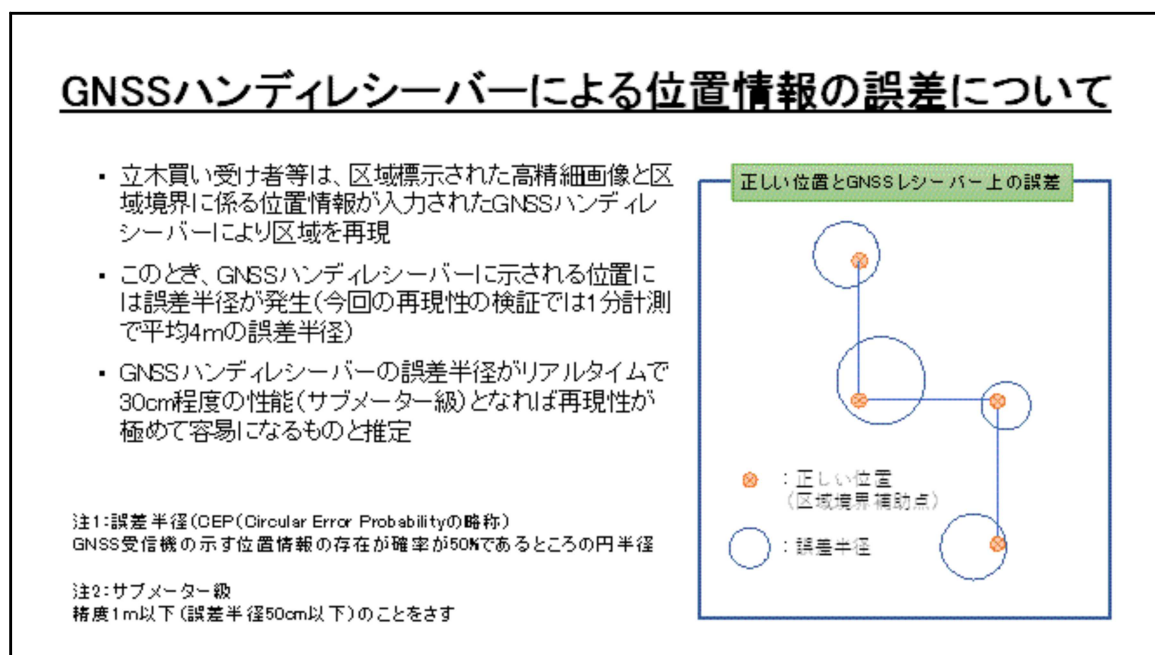


図3.1.11 GNSSハンディレシーバーによる位置情報の誤差

② 再現性検証の結果

- ・ GNSSハンディーレーザーのナビ機能を用い、所与の位置情報ポイント付近へ到達は可能。ただし、誤差半径が存在することから、到達地点から誤差半径内を重点的に探索。(誤差半径内に存在する確率は一般に50%程度と言われている。)
- ・ 樹冠形状や立木配置から正しいポイントを特定可能。特徴的な樹冠形状があればこれを手掛かりに探索する。今回の検証では位置情報ポイント付近へ到達後10～15分程度で特定された。
- ・ ポイント間をつながぐ区域境界については、記憶しておくことが困難であり、必要の都度、同様の方法で区域境界を特定する必要がある。

3.1.3.2 区域標示に係る諸課題

今回の再現性の検証では、UAVにより取得した高精細画像に区域界を標示し、参考としてデジタル位置情報を提供する区域標示方法については、再現することが可能であったが、以下の課題が示唆された。

- ① 現在のGNSSハンディーレーザー汎用機では、メートル級の誤差半径が生じることから、誤差半径内での区域界探索に時間を要する。更に、再度区域確認を行う場合も、初回と同様の手順で境界探索が必要となる。一方、従来型の図面と極印やペンキ等による地物標示にあつては、極めて視認性が良く、ほぼ瞬時に境界を認識できる。このため、現状においては効率性に欠けると考えられる。
- しかしながら、みちびきの補強信号によるサブメートル級の測位情報サービスが活用できるGNSSハンディーレーザーが汎用化され、リアルタイムでサブメートル級の位置情報を取得できようになれば、区域確認は極めて容易となり、区域界を標示した高精細画像を用いることなく、図3.1.12に示すような区域標示方法の実現も示唆される。



図3.1.12 GNSSレーザーによる区域標示の将来

② 現在の国有林における区域標示は、これまで整備されてきた標柱や極印等による地物標示を基本とし、国有林GIS上にこれらの位置情報を移植し活用されている。一方、国有林GIS上の位置情報は、地物標示を補完するものとしては活用可能であるが、一部に十分な精度に至っていない箇所もある。今回実証を行った箇所においては、国有林GIS上の位置情報と現地の位置情報にかい離があったため、公共測量用のGPSにより基準点を設定し、国有林GIS上の位置情報を補正する必要がある。このように、国有林GIS上の位置情報と現地の位置情報との間にかい離が生じる場合があるため、画像から収穫区域の判断が難しい林分においては、本手法の適用の可否を検討する必要がある。

また、今後、みちびきによるサブメーター級の測位情報サービスが活用できるようになれば、巡検時や収穫調査時にサブメーター級の位置情報を取得し、デジタルデータによる国有林の位置情報インフラの整備に寄与できるものと思われる。

3.2 UAVによる立木調査

検討林分の上空から撮影した空中写真を用いることで、対象区域内の立木の本数、樹高、胸高直径、材積を算出した。解析に使用した空中写真は航空機で撮影したものとUAVで撮影したものの2種類である。本事業に使用した航空写真は、2008年に撮影されたカラー画像(CKT20081)であり、対地高度600m、オーバーラップ65%、サイドラップ35%で計測されたものである。また、UAVの計測諸元は前章で実施した区域標示における計測と同様である。

航空機画像を利用する場合、1961年以降日本全域の撮影が定期的に行われているため、過去に撮影したデータを利用することで、空中画像取得に要するコストを削減することが可能である。国交省が撮影した写真(都市部近郊)は一般財団法人日本地図センターへ、林野庁が撮影した写真(山林部)はグリーン航業株式会社に問い合わせることで、購入することができる。

対してUAV画像を利用する場合、既存の撮影データが基本的に存在しないため新規に計測を実施する必要がある。そのため、UAV画像の取得には外部の専門会社への委託、あるいは撮影体制の整備(機材の購入、機材のメンテナンス、オペレーターの育成)が必要となる。航空写真と比較するとデータの取得に手間を要するが、より解像度の高い空中写真を取得することができる。

航空写真の立体視利用及び無人航空機の空中写真利用等による効率的な収穫調査方法について、既存回帰式、補正回帰式、収穫予想表の3通りの胸高直径推定を行い、これらについて従来の手法と比較しその適合度を検証する。なお、従来方式の標準地調査法と毎木調査法を対照に評価する。

立木調査に係る検証の実施フローは表3.2.1の通り。

表3.2.1 立木調査実施フロー

立木調査実施フロー				
	航空機による立木調査	UAVによる立木調査	従来型立木調査 (毎木)	従来型立木調査 (標準地)
手順1	航空機ステレオ画像撮影飛行(既存写真活用)	UAVステレオ画像撮影飛行	樹高標準地設定	標準地設定
手順2	区域確定	区域確定 (※1活用)	樹高曲線作成	
手順3	SfM解析	SfM解析	毎木による胸高直径測定	標準地内毎木調査
手順3@	Case1 ①SfM解析により単木毎の樹冠径把握 ②既存の樹冠径/胸高直径曲線に当てはめることで胸高直径を求める ③幹材積表により単木毎の材積を計算 Case2 ①SfM解析により単木毎の樹冠径把握 ②樹冠径に対応した胸高直径の標準を把握するための標準地調査(地上調査による。) ③標準地調査から樹冠径/胸高直径曲線を算出し胸高直径を求める ④幹材積表により単木毎の材積を計算 Case3 ①SfM解析により単木毎の樹高を把握 ②収穫予想表から胸高直径を求める ③幹材積表により単木毎の材積を計算	同左		
手順4	立木調査データの整理	立木調査データの整理	立木調査データの整理	立木調査データの整理
手順5	復命書調整	復命書調整	復命書調整	復命書調整

3.2.1 調査概要

UAVによる立木調査について、図3.2.1の手順で検証を行った。

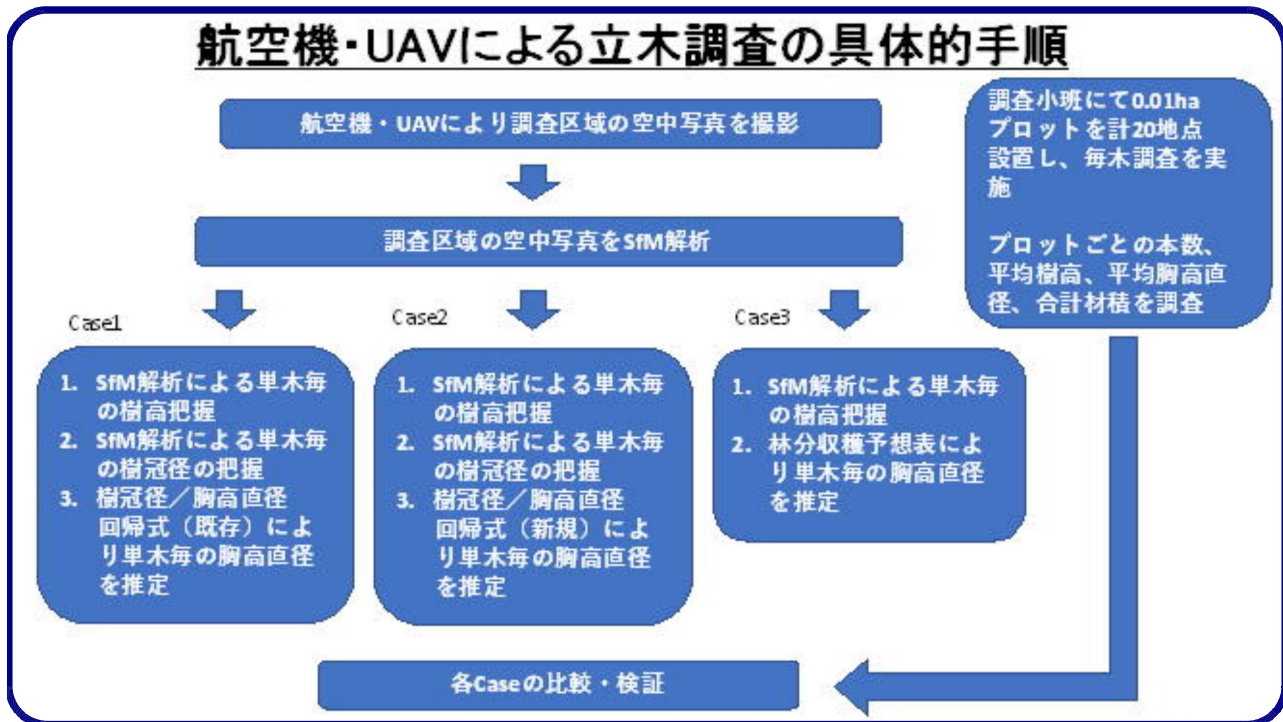


図3.2.1 航空機・UAVによる立木調査の具体的手順

3.2.2 解析手順について

3.2.2.1 解析用データの作成

対象区域を撮影した航空機画像とUAV画像それぞれに対し、SfM解析を実施することで0.5mメッシュの森林表層高データ(以下DCSMデータ)を取得した。SfM解析とは、多視点画像を解析し、三次元情報を復元することで、画像から三次元情報(色つき点群データ)を取得する手法である(図3.2.2)。本事業では、agisoft社の「PhotoScan」を用いてSfM解析を実施した。SfM解析は市販しているソフトウェアを購入するほか、フリーソフトによって実施できる。

また、国土地理院の基盤地図情報ダウンロードサービスより、航空レーザ計測をもととする5.0mメッシュの地盤高データ(以下DEMデータ)をダウンロードし、内挿補間を行うことで疑似的に0.5mメッシュのDEMデータを作成した。国土地理院の基盤地図情報ダウンロードサービスでは、日本全国の5.0mあるいは10.0mのDEMデータを無料でダウンロードすることができる。作成したDCSMデータとDEMデータの差分を取ることで、解析用データである樹冠高データ(以下DCHMデータ)を取得した(図3.2.3)。

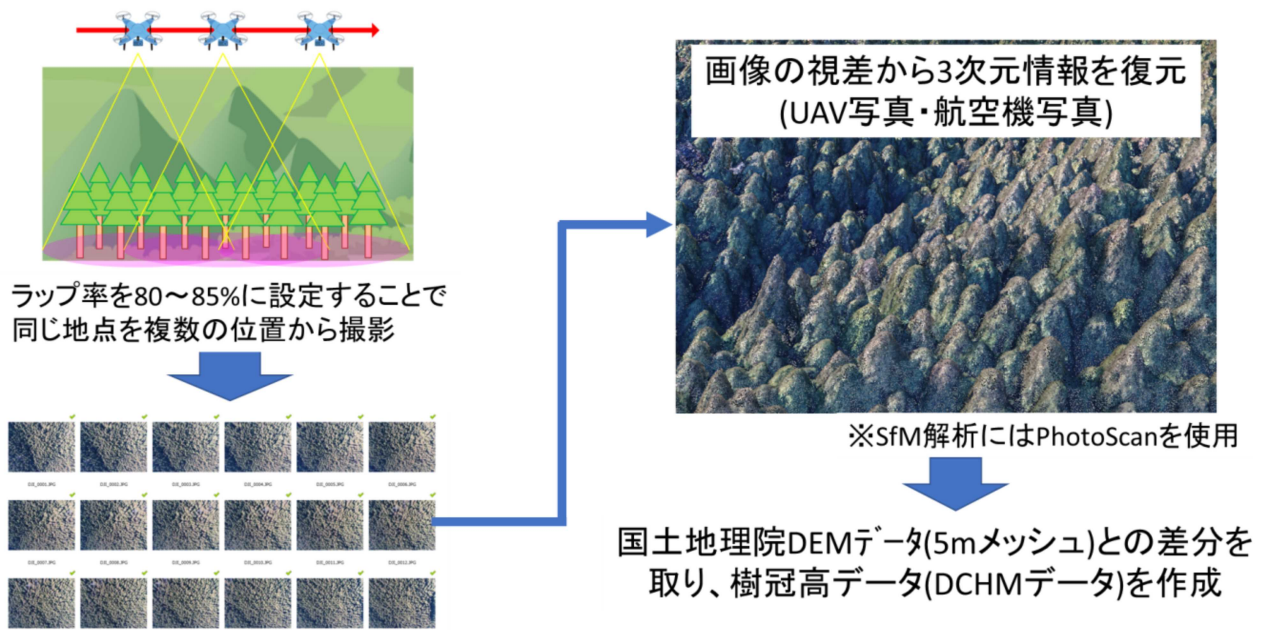


図3.2.2 SfM解析の概要

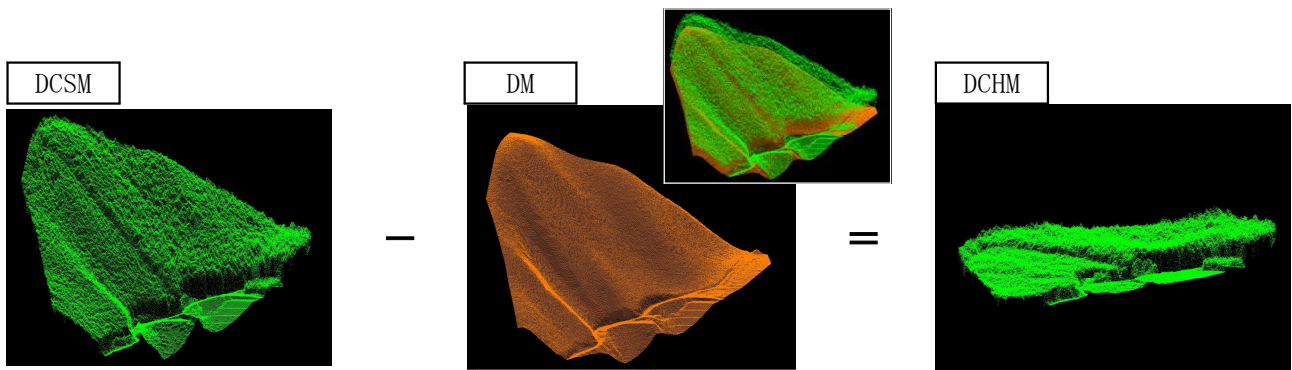


図3.2.3 DCHM作成イメージ

3.2.2.2 現地調査

現地調査は、現地調査準備で作成した候補地点において設置された円形の調査プロット(水平面積0.01ha)において、プロットの中心の位置座標をGNSSハンディーレーサーにより記録し、胸高直径6cm以上の樹木を対象として、樹種、樹木本数、樹高(0.1m単位)、胸高直径(1cm括約)、枝下高(0.1m単位)を計測し、立木位置図を記録した。現地調査箇所数はスギ林20地点であり、調査地点位置を以下の図3.2.4に示す。

現地調査結果は森林解析結果の精度検証のほか、胸高直径を推定する回帰式を作成するために使用した。

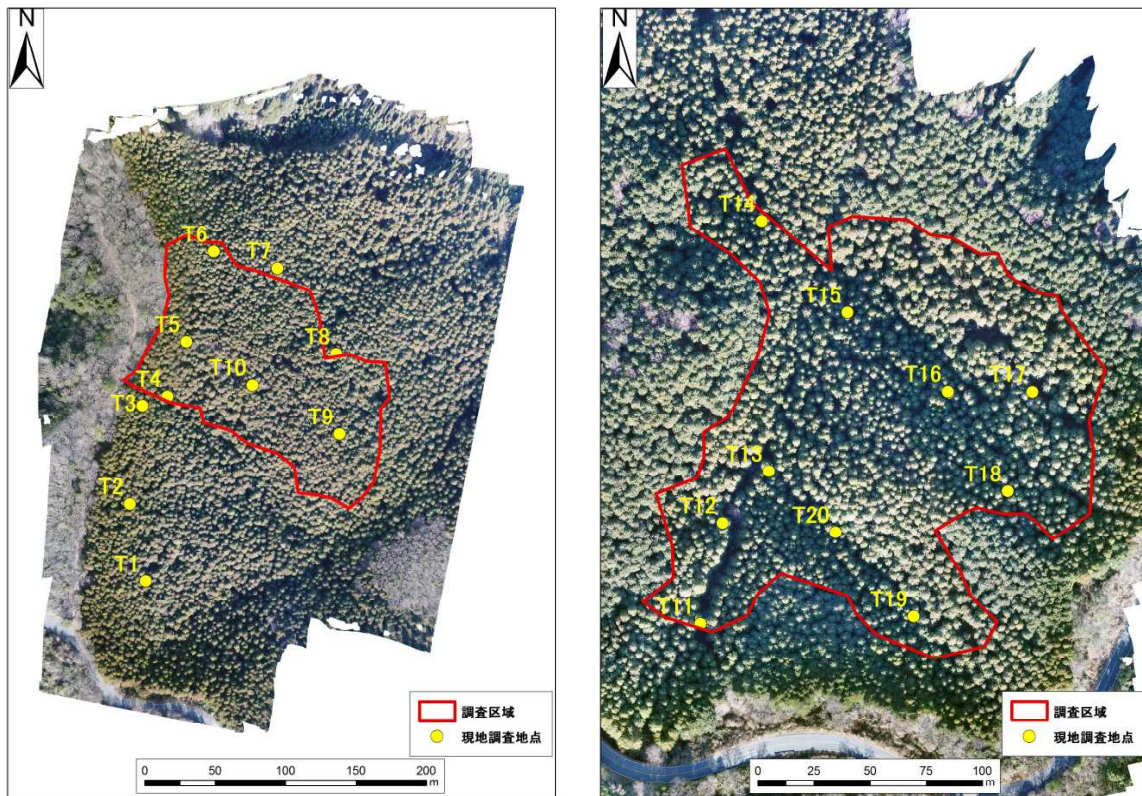


図3.2.4 現地調査位置図(左：219は3小班、右：220れ小班)

3.2.2.3 樹頂点解析

DCHMにより樹冠の凹凸を把握し、凸部の位置を抽出することで、樹頂点の位置を特定することができる。本事業では、アジア航測株式会社と東京電力株式会社が共同で開発した樹頂点抽出技術(特許第4279894号)を用いてスギの単木解析を行った。手順は以下の通りである。

- ① DCHM(図3.2.5)から樹冠形状指数(図3.2.6)を計算する。樹冠形状指数とは、樹頂部の凸凹を尾根谷度ベースに角度で表す指数であり、凸部ほど高い値になり凹部ほど低い値をとる。DCHMでは、林齢などによって樹高は異なるため、DCHMの大きさだけで正確に抽出するのは難しい。例えば、同じDCHMの値でも高齢林では樹冠部に達していないが、若齢林では樹冠部に該当することがあり、ある一定の高さのDCHMの値を閾値として樹頂点を抽出しようとする、高齢林では過大に、若齢林では過小に抽出することになってしまう。これに対して、樹冠形状指数は、樹高の大小に関わらず樹頂点は一定の値をとるため、樹頂点の抽出に適している。
- ② 樹冠形状指数を用いて、樹冠部(図3.2.7)を抽出する。動的に決められる閾値以上のまとまりが樹冠部として抽出される。
- ③ 最後に樹冠部の中のDCHMを調べ、最もDCHMが高いメッシュの位置を樹頂点(図3.2.8)として抽出する。

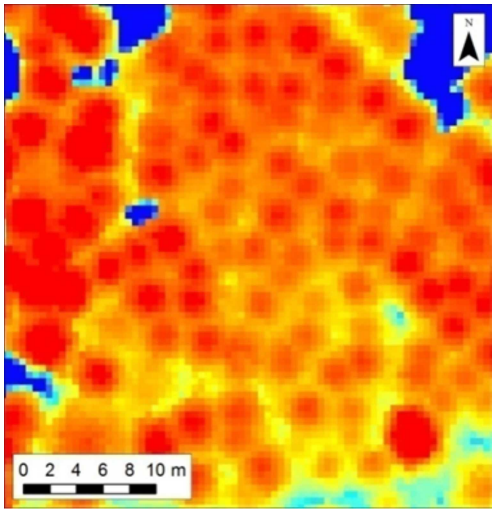


図3.2.5 DCHM

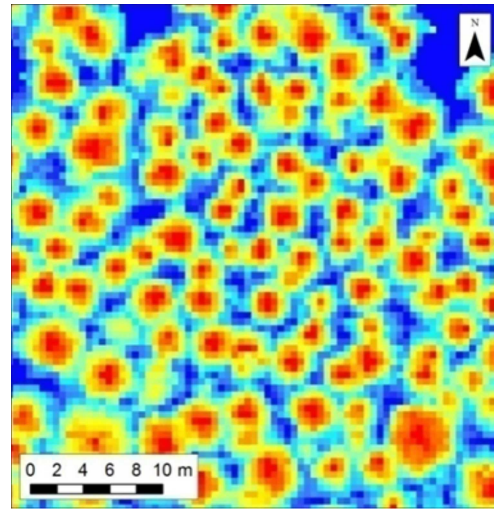


図3.2.6 樹冠形状指数

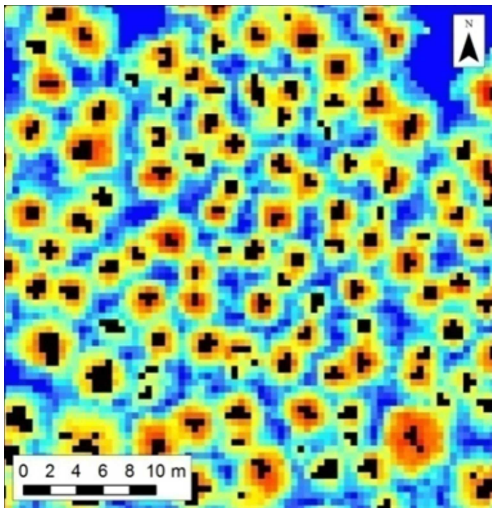


図3.2.7 樹冠部抽出

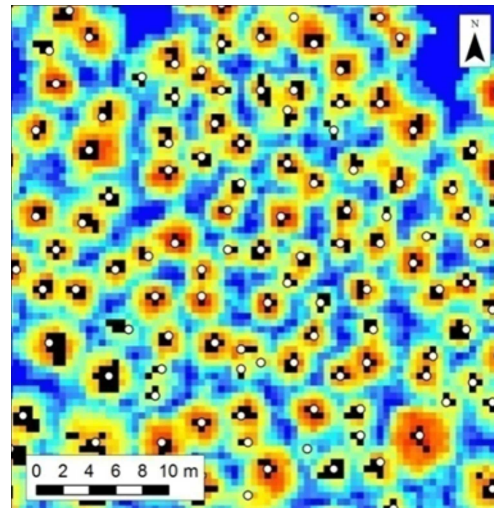


図3.2.8 樹頂点抽出

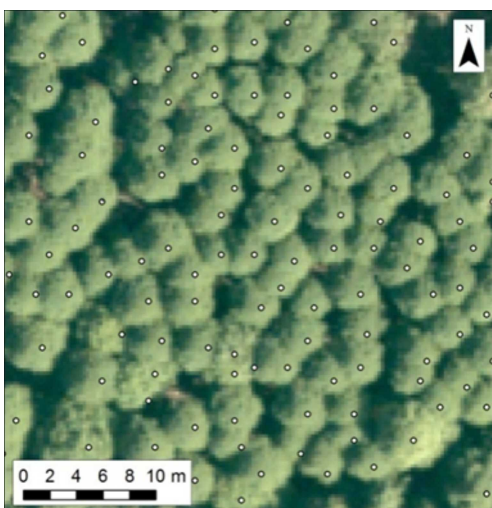


図3.2.9 オリジナル画像と樹頂点

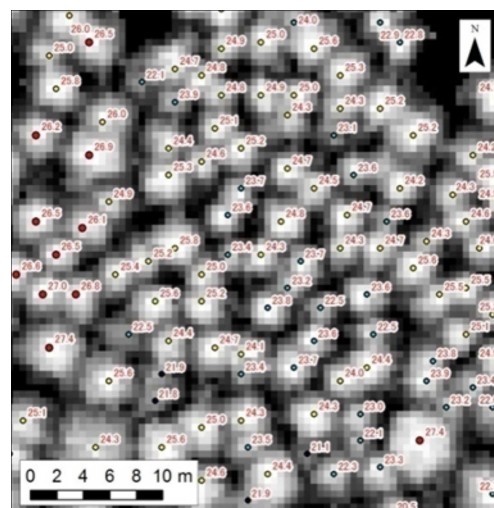


図3.2.10 樹頂点の樹高

樹頂点抽出の流れ

3.2.2.4 胸高直径推定

本事業では、胸高直径を推定するために三種類の方法で解析を行った。三手法の解析結果を比較することで、いずれの手法が解析による林分状況把握に適しているか検証した。

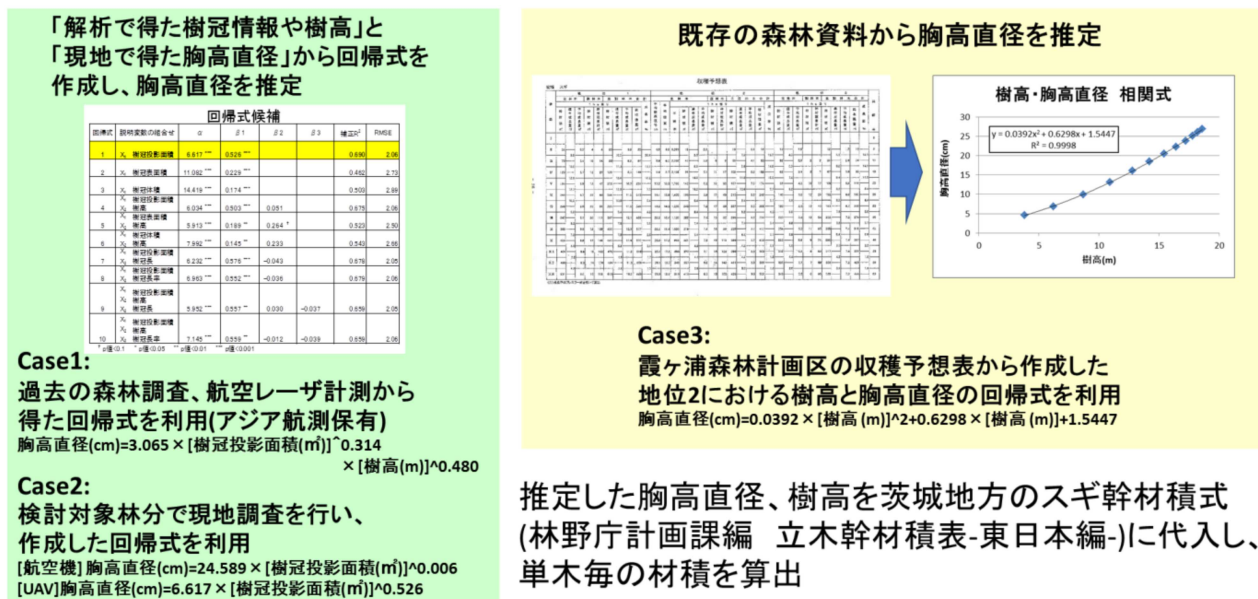


図3.2.11 胸高直径推定手法まとめ

(1) 樹冠情報から胸高直径を推定する手法

1) 回帰式の作成

現地調査で得た各プロットの計測結果から得た説明変数の組み合わせをもとに、胸高直径を推定する回帰式を作成し、樹冠高データ(DCHM)から得た樹冠サイズ等の対応するデータから、単木毎の胸高直径を推定する手法。胸高直径の推定のイメージを図3.2.12に示す。

通常は解析対象地で現地調査を実施し、胸高直径を推定する回帰式を作成するが、今後全ての解析対象地で現地調査を行うことは現実的ではない。そこで、本事業では現地調査を行わず、全国各地の航空レーザ解析を集約することで得た回帰式(ここでは一般式とする)を使った胸高直径推定を併せて行った。使用した一般式はアジア航測株式会社が保有する式である。

Case1 一般式(既存の森林解析を集約した回帰式)を利用した胸高直径推定
胸高直径(cm)=3.065 × [樹冠投影面積(m²)]^{0.314} × [樹高(m)]^{0.480}

Case2 現地調査を実施し、現地に最も適した新規の回帰式を作成する胸高直径推定
胸高直径(cm)=3.065 × [樹冠投影面積(m²)]^{0.314}

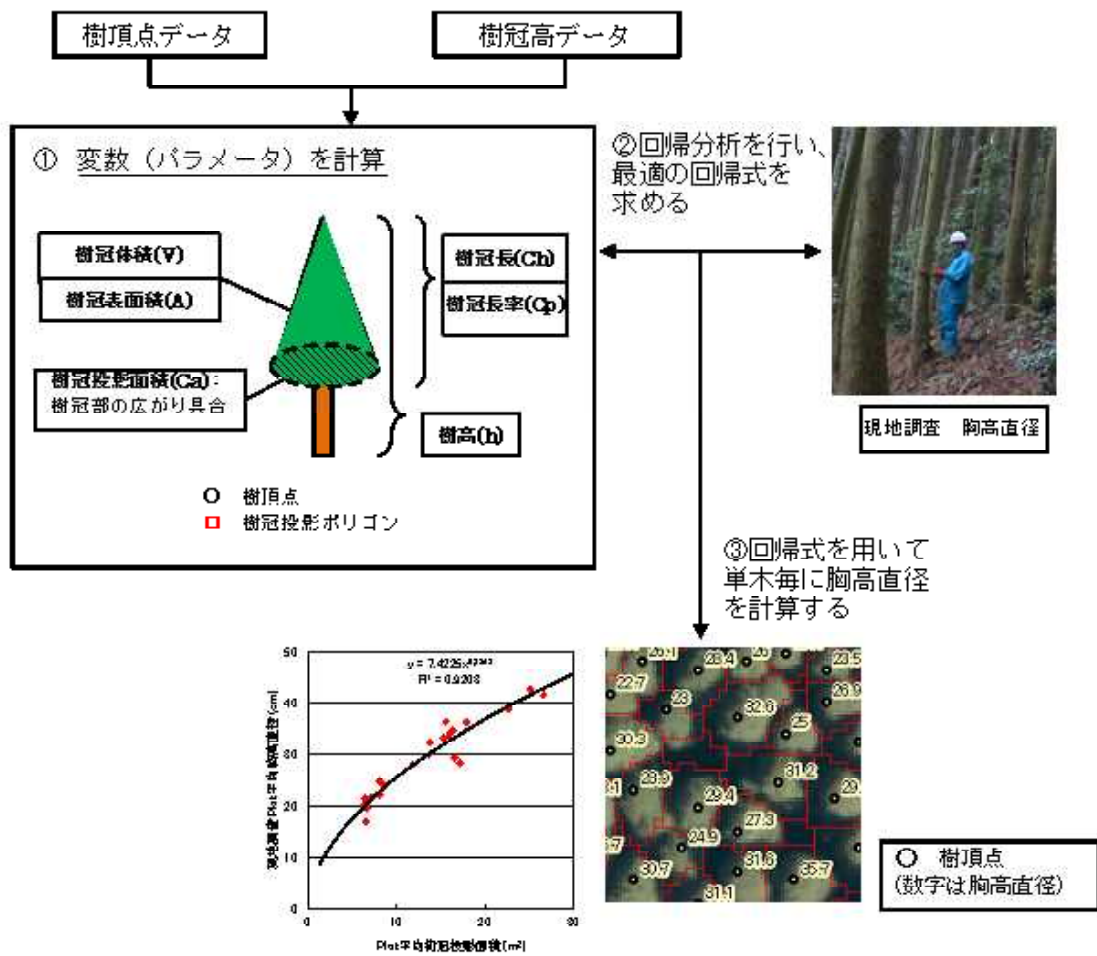


図3. 2. 12 胸高直径の推定のイメージ

2) 使用する変数

胸高直径の推定に使用する変数は、樹高・樹冠投影面積・樹冠長・樹冠長率・樹冠表面積・樹冠体積の6つである。樹高を除く変数の概要を以下に示す。

樹冠情報を抽出するために、樹頂点位置と樹冠形状指数画像をもとにWatershed(分水嶺)アルゴリズムを用いた処理で、単木レベルの樹冠投影ポリゴンを作成した。Watershed(分水嶺)アルゴリズムとは、数値の高低を山と谷に見立て、分割された分水界を領域とするものである。樹冠投影ポリゴンの作成イメージを図3. 2. 13に示す。

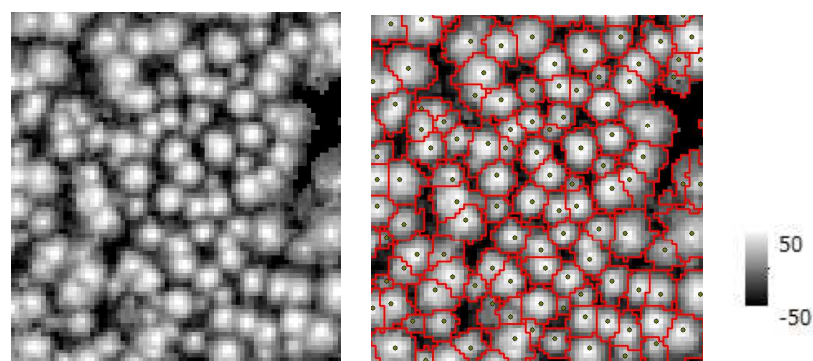


図3. 2. 13 樹冠投影ポリゴンの作成イメージ

推定された樹冠投影ポリゴンをもとに、樹冠部が円錐形であると仮定して樹冠投影面積、樹冠長、樹冠長率、樹冠表面積、樹冠体積を計算した。それぞれの計算方法は以下の通りである。

① 冠投影面積(Ca)

樹冠投影ポリゴンの面積(m²)。

② 樹冠長(Ch)

樹冠投影ポリゴン内で最も低いDCHMの値と樹高(h)との差(m)。イメージ図を図3.2.14に示す。

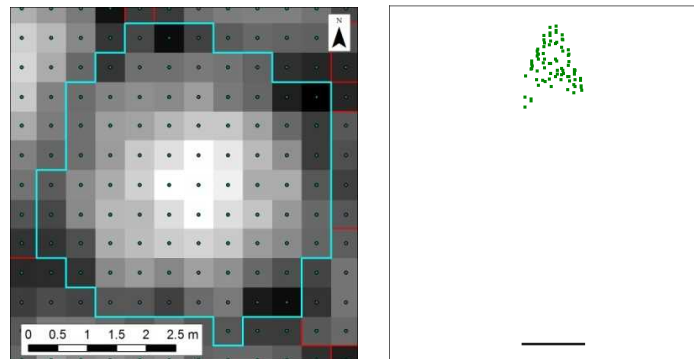


図3.2.14 樹冠長 イメージ図

③ 冠長率(Cp)

樹冠長(Ch)と樹高(h)の比(%) $Cp = \frac{Ch}{h}$

④ 樹冠表面積(A)

樹冠の形状を円錐と仮定した際(図3.2.15)の、円錐の扇形部分の表面積(m²)。

$$A = \frac{\theta}{360} \pi R^2$$

$$= \pi R$$

$$= \pi \sqrt{\frac{Ca}{\pi}} \sqrt{\frac{Ca + \pi Ch^2}{\pi}}$$

$$= \sqrt{Ca(Ca + \pi Ch^2)}$$

$$\begin{aligned} 2\pi R \frac{\theta}{360} &= 2\pi r \quad \text{よ} \ddot{r} \quad \frac{\theta}{360} = \frac{r}{R} \\ Ca = \pi r^2 \text{よ} \ddot{r} \quad r &= \sqrt{\frac{Ca}{\pi}} \\ r^2 + Ch^2 &= R^2 \text{よ} \ddot{r} \quad R = \sqrt{r^2 + Ch^2} = \sqrt{\frac{Ca}{\pi} + Ch^2} = \sqrt{\frac{Ca + \pi Ch^2}{\pi}} \end{aligned}$$

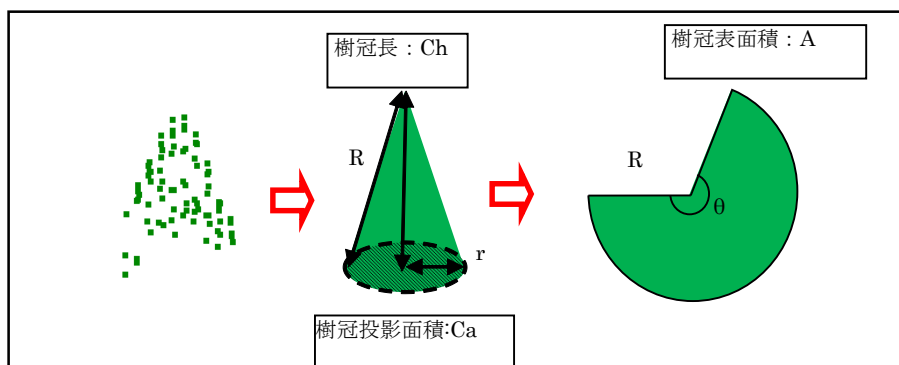


図3.2.15 樹冠表面積のイメージ図

⑤ 樹冠体積(V)

$$V = \frac{Ca \times Ch}{3}$$

樹冠の形状を円錐と仮定したときの、円錐の体積(m³)。

(2) 既存の森林資料を用いて樹高から胸高直径を求める手法

表3.2.2 収穫予想表(霞ヶ浦森林計画区)

収穫予想表

樹種 スギ

林 齢	地 位 1												地 位 2												地 位 3												林 齢
	主 林 木			副 林 木			主 副 林 木 合 計						主 林 木			副 林 木			主 副 林 木 合 計						主 林 木			副 林 木			主 副 林 木 合 計						
	幹 材 積	通 年 成 長 量	平 均 成 長 量	幹 材 積	通 年 成 長 量	平 均 成 長 量	幹 材 積 累 計	通 年 成 長 量	平 均 成 長 量	総 収 穫 量	成 長 率	平 均 胸 高 直 径	平 均 樹 高	本 数	幹 材 積	通 年 成 長 量	平 均 成 長 量	幹 材 積 累 計	通 年 成 長 量	平 均 成 長 量	総 収 穫 量	成 長 率	平 均 胸 高 直 径	平 均 樹 高	本 数	幹 材 積	通 年 成 長 量	平 均 成 長 量	幹 材 積 累 計	通 年 成 長 量	平 均 成 長 量	総 収 穫 量	成 長 率	平 均 胸 高 直 径	平 均 樹 高	本 数	
I																																					3
II	26		3.3	4	4	30		3.8	30		20.4	4.6	3.8	3,280	18		2.3				2.3	18													8		
III	70	8.8	5.4	10	14	80		10.0			8.8	6.2	2,650	47	5.6		7.0				4.1	53	19.7												13		
IV	120	10.0	6.7	15	29	135		11.0			8.8			8.8	9.8		14.6				6.0	108	14.6												18		
V	184	12.6	8.0	18	47	202		13.4			10.2			10.2	11.0		19.6				7.6	174	19.6												23		
VI	244	10.8	8.7	22	69	288		10.8			7.3			7.3	9.4		14.0				8.8	242	14.0												28		
VII	298	9.8	9.0	22	91	320		9.4			5.4			5.4	9.4		18.0				9.3	306	18.0												33		
VIII	347	9.2	9.1	20	111	367		7.8			4.2			4.2	9.4		22.0				8.2	364	22.0												38		
IX	388	7.2	9.0	18	129	406		7.0			3.1			3.1	7.4		25.4				7.4	417	25.4												43		
X	424	6.0	9.0	17	146	441		5.8			2.1			2.1	6.4		28.0				6.2	464	28.0												48		
XI	454	5.0	8.6	16	162	470		4.8			1.7			1.7	4.4		30.0				4.2	503	30.0												53		
XII	480	4.2	8.3	14	176	484		3.8			1.3			1.3	4.4		33.1				3.0	538	33.1												58		
XIII	501		8.0	12	188	513		10.8	689						3.0		34.8				1.4	568	34.8												63		

(注)成長率はブレスラー式を用いて算出

既存の資料として整備されている収穫予想表をもとに樹高と胸高直径の回帰式を作成することで、樹高から胸高直径を推定する方法。現地調査を必要とせず、樹冠情報を抽出する必要がないため、最も簡易な手法である。収穫予想表は、地域毎の森林特性を考慮したものが作成されており、本事業では平成29年に作成された「第5次地域管理経営計画書 第5次国有林野施業実施計画書(霞ヶ浦森林計画区)」に記載された収穫予想表を使用した。

Case3 一般式(既存の森林解析を集約した回帰式)を利用した胸高直径推定

$$\text{胸高直径 (cm)} = 0.0392 \times [\text{樹高 (m)}]^2 + 0.6298 \times [\text{樹高 (m)}] + 1.5447$$

3.2.2.5 材積推定

前項までに得た単木毎の樹高・胸高直径を茨城のスギ幹材積式(林野庁計画課編 立木幹材積表-東日本編-)に代入することで、単木単位の材積を算出した。使用した材積式は以下の通りである。なお、V=材積(m³)、d=胸高直径(cm)、h=樹高(m)である。

$$\begin{aligned} \log V &= 1.753904 \log d + 1.040853 \log h - 4.172632 & (d: 4 \sim 12\text{cm}) \\ \log V &= 1.849344 \log d + 1.008086 \log h - 4.219069 & (d: 12 \sim 32\text{cm}) \\ \log V &= 1.944187 \log d + 0.894801 \log h - 4.211821 & (d: 32 \sim 42\text{cm}) \\ \log V &= 1.600666 \log d + 1.075361 \log h - 3.921218 & (d: 42\text{cm以上}) \end{aligned}$$

3.2.3 検証結果について

現地調査を実施した0.01haの円形プロット20地点を利用し、航空機・UAVを用いた立木調査の精度を算出した。

3.2.3.1 立木本数

航空機解析では、ほぼ全ての調査地点で解析本数と現地調査本数にかい離が生じていた。この要因として、航空機により撮影した空中写真は解像度が25~30cm程度と低く、また、ラップ率も30~60%と低いことが挙げられる。上記の要因により、森林表層の微細な凹凸を表現することが難しく、樹頂点を抽出するために必要な樹冠部を認識することが困難であった。

対してUAV解析では、全体の平均誤差率が5.9%と非常に高い精度を得ることができた。未抽出木が生じる事例は立木密度1300本/haを超える林分において多く発生しており、立木間の距離が極端に狭い林分においては樹冠の凹凸を正確に表現しきれないことがわかった。そのため、UAV調査を実施する際には、高密度林分では立木本数が少なく算出される傾向にある点について留意する必要があると示唆された。

表3.2.3 航空機本数推定結果

Plot_ID	現地調査本数	航空機解析樹木本数	現地比	誤差率
T01	13	6	46%	54%
T02	14	6	43%	57%
T03	13	6	46%	54%
T04	12	8	67%	33%
T05	15	5	33%	67%
T06	12	7	58%	42%
T07	8	10	125%	25%
T08	17	9	53%	47%
T09	12	7	58%	42%
T10	11	3	27%	73%
T11	8	5	63%	38%
T12	13	5	38%	62%
T13	8	5	63%	38%
T14	8	2	25%	75%
T15	9	6	67%	33%
T16	8	2	25%	75%
T17	10	4	40%	60%
T18	8	1	13%	88%
T19	8	4	50%	50%
T20	13	4	31%	69%
平均	11.0	5.3		54.0%
		R		0.43
		RMSE		6.34

表3.2.4 UAV本数推定結果

Plot_ID	現地調査本数	UAV解析樹木本数	現地比	誤差率
T01	13	10	77%	23%
T02	14	14	100%	0%
T03	13	12	92%	8%
T04	12	11	92%	8%
T05	15	15	100%	0%
T06	12	12	100%	0%
T07	8	8	100%	0%
T08	17	12	71%	29%
T09	12	13	108%	8%
T10	11	11	100%	0%
T11	8	8	100%	0%
T12	13	10	77%	23%
T13	8	8	100%	0%
T14	8	8	100%	0%
T15	9	9	100%	0%
T16	8	8	100%	0%
T17	10	9	90%	10%
T18	8	8	100%	0%
T19	8	8	100%	0%
T20	13	12	92%	8%
平均	11.0	10.3		5.9%
		R		0.86
		RMSE		1.55

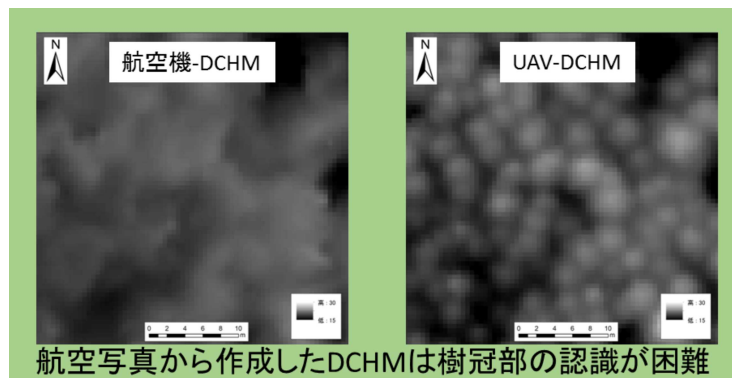


図3.2.16 航空機-DCHMとUAV-DCHMの比較

3.2.3.2 樹高

航空機解析・UAV解析ともに誤差率が低く、高い精度が得られた。今回の解析は、地盤データに国土地理院配布の解像度5.0mDEMデータを使用した。本解析の結果より、航空レーザにより取得した解像度1.0m未満の詳細なDEMデータが存在しない地域においても、実用に足る精度で樹高推定が実施可能であると考えられた。

表3.2.5 航空機樹高推定結果

Plot_ID	現地調査 樹高(m)	航空機解析 樹高(m)	現地比	誤差率
T01	19.5	21.2	109%	9%
T02	16.4	18.0	109%	9%
T03	18.0	19.2	106%	6%
T04	20.5	20.8	102%	2%
T05	14.9	15.1	101%	1%
T06	17.7	19.0	107%	7%
T07	19.4	19.2	99%	1%
T08	16.7	15.3	92%	8%
T09	15.8	15.4	97%	3%
T10	13.6	13.1	96%	4%
T11	21.6	22.9	106%	6%
T12	20.9	22.5	108%	8%
T13	23.1	20.5	89%	11%
T14	24.2	18.9	78%	22%
T15	18.6	16.1	86%	14%
T16	20.9	19.7	94%	6%
T17	20.5	22.7	111%	11%
T18	18.6	18.6	100%	0%
T19	22.0	23.7	108%	8%
T20	21.1	22.3	105%	5%
平均	19.2	19.2		7.0%
		R		0.79
		RMSE		1.82

表3.2.6 UAV樹高推定結果

Plot_ID	現地調査 樹高(m)	UAV解析 樹高(m)	現地比	誤差率
T01	19.5	22.2	114%	14%
T02	16.4	17.5	107%	7%
T03	18.0	18.9	105%	5%
T04	20.5	20.6	101%	1%
T05	14.9	13.1	88%	12%
T06	17.7	16.4	93%	7%
T07	19.4	18.7	97%	3%
T08	16.7	17.3	103%	3%
T09	15.8	17.6	111%	11%
T10	13.6	12.3	90%	10%
T11	21.6	21.5	100%	0%
T12	20.9	22.1	106%	6%
T13	23.1	22.5	97%	3%
T14	24.2	21.7	90%	10%
T15	18.6	17.0	92%	8%
T16	20.9	18.2	87%	13%
T17	20.5	20.7	101%	1%
T18	18.6	15.7	85%	15%
T19	22.0	22.7	103%	3%
T20	21.1	21.3	101%	1%
平均	19.2	18.9		6.7%
		R		0.87
		RMSE		1.52

3.2.3.3 胸高直径

航空機解析ではいずれの解析手法においても胸高直径の推定誤差率の平均が10%を超えており、非常に低い精度となった。この要因として、立木本数の抽出精度の低さが挙げられる。前述の通り、航空機解析においては立木本数の抽出率が50%を下回っている事例が多い。そのため、複数の樹冠が結合した巨大な樹冠が単木の樹冠として認識されている事例が多く見られた。

UAV解析ではCase1, Case2においては平均誤差率が10%に収まる非常に高い精度を得ることができた。現地情報を利用したCase2がより高い推定精度を得ることが可能であるが、現地情報を必要とせず既存の胸高直径回帰式を利用したCase1の手法においても、十分な推定精度を得ることができると見込まれる。Case3の推定精度が低かった要因としては、胸高直径を推定する変数として樹高のみを採用したことが挙げられる。胸高直径は、同樹高の林分であっても立木密度による影響を受けることが多いため、高精度の結果を得るためには樹冠情報を変数として利用する必要があると考えられる。

表3.2.7 航空機胸高直径推定結果

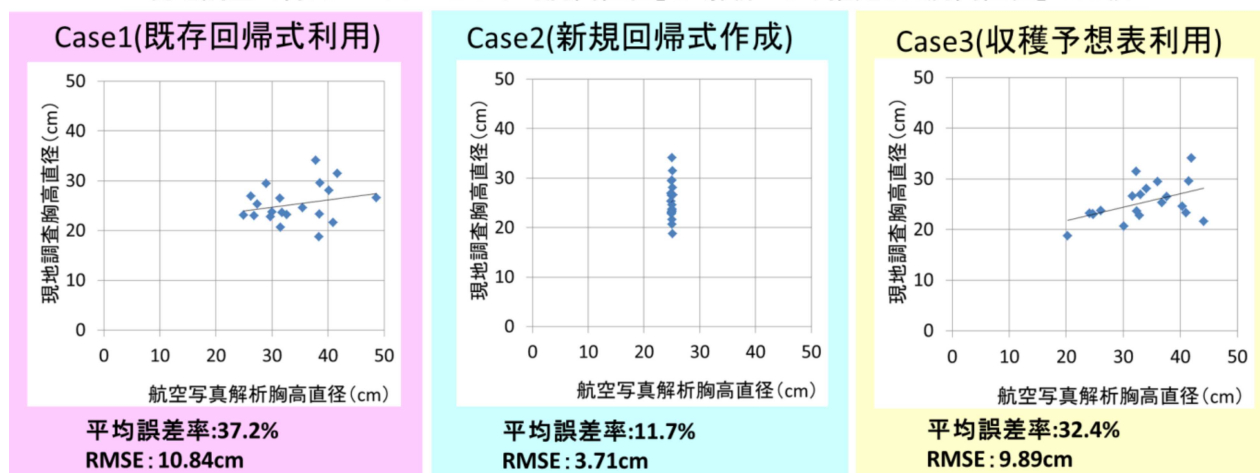
Plot_ID	現地調査 胸高直径 (cm)	case1解析 胸高直径 (cm)	case1 現地比	case1 誤差率	case2解析 胸高直径 (cm)	case2 現地比	case2 誤差率	case3解析 胸高直径 (cm)	case3 現地比	case3 誤差率
T01	26.5	31.5	119%	19%	25.0	94%	6%	37.7	142%	42%
T02	20.6	31.5	153%	53%	25.0	121%	21%	30.1	146%	46%
T03	22.8	29.7	130%	30%	24.9	109%	9%	32.9	144%	44%
T04	25.3	27.4	108%	8%	24.9	98%	2%	36.8	145%	45%
T05	23.2	32.6	141%	41%	25.1	108%	8%	24.1	104%	4%
T06	23.6	31.8	135%	35%	25.0	106%	6%	32.4	137%	37%
T07	26.9	26.3	98%	2%	24.9	93%	7%	33.0	123%	23%
T08	23.1	24.9	108%	8%	24.9	108%	8%	24.6	107%	7%
T09	23.0	26.9	117%	17%	25.0	109%	9%	24.7	107%	7%
T10	18.7	38.4	205%	105%	25.2	135%	35%	20.2	108%	8%
T11	34.1	37.9	111%	11%	25.0	73%	27%	42.0	123%	23%
T12	23.3	38.5	165%	65%	25.1	108%	8%	41.0	176%	76%
T13	29.4	29.0	99%	1%	24.9	85%	15%	36.1	123%	23%
T14	31.5	41.7	132%	32%	25.1	80%	20%	32.3	103%	3%
T15	23.7	30.0	127%	27%	25.0	105%	5%	26.1	110%	10%
T16	28.1	40.2	143%	43%	25.1	89%	11%	34.1	121%	21%
T17	29.5	38.6	131%	31%	25.1	85%	15%	41.5	141%	41%
T18	26.6	48.6	183%	83%	25.2	95%	5%	31.6	119%	19%
T19	21.6	40.9	189%	89%	25.1	116%	16%	44.1	204%	104%
T20	24.6	35.5	144%	44%	25.0	102%	2%	40.3	164%	64%
平均	25.3	34.1		37.2%	25.0		11.7%	33.3		32.4%
		R		0.24	R		0.03	R		0.48
		RMSE		10.84	RMSE		3.71	RMSE		9.89

表3.2.8 UAV胸高直径 推定結果

Plot_ID	現地調査胸高直径 (cm)	case1解析胸高直径 (cm)	case1 現地比	case1 誤差率	case2解析胸高直径 (cm)	case2 現地比	case2 誤差率	case3解析胸高直径 (cm)	case3 現地比	case3 誤差率
T01	26.5	30.1	114%	14%	25.3	95%	5%	35.0	132%	32%
T02	20.6	24.0	117%	17%	21.3	103%	3%	24.6	119%	19%
T03	22.8	25.8	113%	13%	22.2	98%	2%	27.6	121%	21%
T04	25.3	27.8	110%	10%	24.4	96%	4%	31.3	124%	24%
T05	23.2	20.5	88%	12%	20.2	87%	13%	16.6	72%	28%
T06	23.6	23.7	101%	1%	21.7	92%	8%	22.5	95%	5%
T07	26.9	27.1	101%	1%	24.3	90%	10%	27.1	101%	1%
T08	23.1	25.0	108%	8%	22.7	98%	2%	24.1	104%	4%
T09	23.0	24.8	108%	8%	22.1	96%	4%	24.8	108%	8%
T10	18.7	20.2	108%	8%	20.8	111%	11%	15.3	82%	18%
T11	34.1	32.7	96%	4%	30.0	88%	12%	33.4	98%	2%
T12	23.3	30.4	130%	30%	25.8	111%	11%	34.7	149%	49%
T13	29.4	33.7	115%	15%	30.4	103%	3%	35.6	121%	21%
T14	31.5	32.0	102%	2%	28.4	90%	10%	33.9	107%	7%
T15	23.7	26.4	112%	12%	25.2	106%	6%	23.7	100%	0%
T16	28.1	28.0	100%	0%	26.2	93%	7%	26.0	93%	7%
T17	29.5	29.8	101%	1%	26.6	90%	10%	31.3	106%	6%
T18	26.6	26.5	100%	0%	27.3	102%	2%	21.3	80%	20%
T19	21.6	29.0	134%	34%	23.3	108%	8%	36.1	167%	67%
T20	24.6	27.3	111%	11%	22.2	90%	10%	32.9	134%	34%
平均	25.3	27.2		10.0%	24.5		7.0%	27.9		18.7%
		R		0.77	R		0.86	R		0.51
		RMSE		3.14	RMSE		2.06	RMSE		5.90

胸高直径推定結果(航空機)

「現地調査で得たプロットごとの平均胸高直径」と「解析により推定した胸高直径」の比較



※RMSE:解析した数値と現地調査結果が平均してどの程度乖離しているか示す数値

図3.2.17 航空機胸高直径推定結果

胸高直径推定結果 (UAV)

「現地調査で得たプロットごとの平均胸高直径」と「解析により推定した胸高直径」の比較

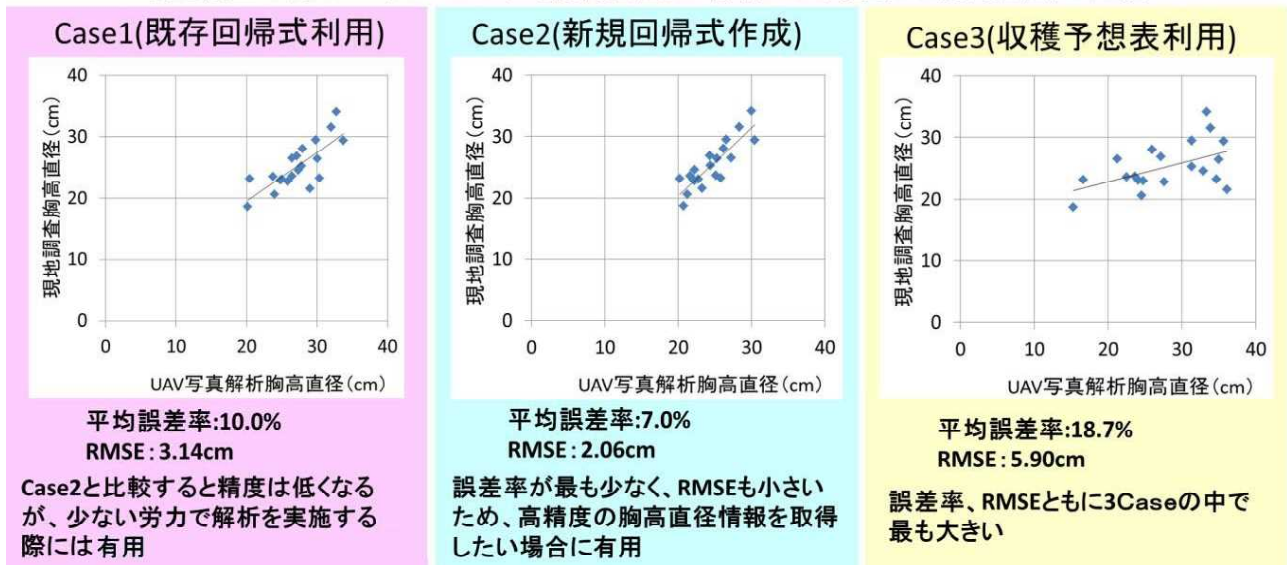


図3.2.18 UAV胸高直径推定結果

3.2.3.4 材積

航空機解析では、Case1、Case2、Case3いずれの解析方法においても、解析結果と現地調査結果に大きな乖離があった。この要因として、合計材積を算出するために利用した、立木本数・胸高直径の精度が低かったことが挙げられる。UAV解析では、Case1、Case2の手法において平均誤差率が20%に収まる精度で解析を行うことができた。しかし、Case3の手法では、平均誤差率30%を超過していた。Case3の推定精度が低かった要因は、材積算出に使用した胸高直径の推定精度が低かったためである。材積推定は他のパラメーターの推定精度に大きく影響を受けるため、立木本数・樹高・胸高直径解析の際に誤差を減らす手法をとるよう留意する必要がある。

表3.2.9 航空機合計材積 推定結果

Plot_ID	現地調査 合計材積 (m ³)	case1解析 合計材積 (m ³)	case1 現地比	case1 誤差率	case2解析 合計材積 (m ³)	case2 現地比	case2 誤差率	case3解析 合計材積 (m ³)	case3 現地比	case3 誤差率
T01	7.3	5.5	75%	25%	3.3	45%	55%	7.2	98%	2%
T02	4.0	4.5	112%	12%	2.9	71%	29%	4.1	101%	1%
T03	4.9	4.4	90%	10%	3.0	62%	38%	5.1	105%	5%
T04	6.9	5.6	82%	18%	4.3	63%	37%	9.1	131%	31%
T05	4.9	3.4	69%	31%	2.1	42%	58%	1.9	39%	61%
T06	4.7	5.7	120%	20%	3.5	74%	26%	5.7	120%	20%
T07	4.4	6.1	139%	39%	5.1	116%	16%	8.6	198%	98%
T08	6.3	4.0	63%	37%	3.7	59%	41%	3.7	58%	42%
T09	4.2	3.5	83%	17%	2.9	69%	31%	2.9	69%	31%
T10	2.2	2.4	111%	11%	1.1	50%	50%	0.7	34%	66%
T11	7.7	6.5	86%	14%	3.0	39%	61%	7.7	101%	1%
T12	6.0	6.6	111%	11%	3.0	50%	50%	7.3	123%	23%
T13	6.2	3.9	63%	37%	2.7	43%	57%	5.4	86%	14%
T14	7.2	2.5	35%	65%	1.0	14%	86%	1.6	23%	77%
T15	3.8	3.9	101%	1%	2.6	68%	32%	2.8	73%	27%
T16	5.1	2.4	48%	52%	1.1	20%	80%	1.9	36%	64%
T17	6.8	5.3	78%	22%	2.4	35%	65%	6.0	89%	11%
T18	4.2	1.6	37%	63%	0.5	12%	88%	0.8	18%	82%
T19	3.5	6.0	171%	71%	2.5	71%	29%	6.9	195%	95%
T20	6.7	4.6	68%	32%	2.3	35%	65%	5.7	84%	16%
平均	5.4	4.4		29.4%	2.6		49.6%	4.7		38.3%
		R		0.34	R		0.21	R		0.45
		RMSE		1.91	RMSE		3.16	RMSE		2.38

表3.2.10 UAV合計材積 推定結果

Plot_ID	現地調査 合計材積 (m ³)	case1解析 合計材積 (m ³)	case1 現地比	case1 誤差率	case2解析 合計材積 (m ³)	case2 現地比	case2 誤差率	case3解析 合計材積 (m ³)	case3 現地比	case3 誤差率
T01	7.3	7.8	106%	6%	5.8	79%	21%	10.0	136%	36%
T02	4.0	5.7	141%	41%	4.7	118%	18%	5.7	141%	41%
T03	4.9	5.9	120%	20%	4.5	92%	8%	6.6	136%	36%
T04	6.9	7.2	105%	5%	6.1	89%	11%	8.5	123%	23%
T05	4.9	3.3	67%	33%	3.3	67%	33%	2.2	46%	54%
T06	4.7	4.4	93%	7%	3.8	80%	20%	3.9	83%	17%
T07	4.4	4.3	97%	3%	3.5	81%	19%	4.2	96%	4%
T08	6.3	5.1	80%	20%	4.4	69%	31%	4.6	73%	27%
T09	4.2	5.5	130%	30%	4.5	107%	7%	5.4	128%	28%
T10	2.2	2.2	102%	2%	2.4	110%	10%	1.3	61%	39%
T11	7.7	7.0	91%	9%	6.1	80%	20%	7.2	93%	7%
T12	6.0	7.8	130%	30%	5.9	99%	1%	9.8	164%	64%
T13	6.2	7.7	124%	24%	6.6	106%	6%	8.4	135%	35%
T14	7.2	6.8	95%	5%	5.5	77%	23%	7.4	104%	4%
T15	3.8	4.1	107%	7%	3.8	99%	1%	3.3	87%	13%
T16	5.1	4.4	86%	14%	4.0	78%	22%	3.8	74%	26%
T17	6.8	6.4	95%	5%	5.4	79%	21%	6.9	101%	1%
T18	4.2	3.8	91%	9%	4.3	102%	2%	2.3	56%	44%
T19	3.5	5.8	166%	66%	3.9	113%	13%	8.7	249%	149%
T20	6.7	7.6	113%	13%	5.4	80%	20%	10.4	155%	55%
平均	5.4	5.6		17.5%	4.7		15.4%	6.0		35.1%
		R		0.78	R		0.83	R		0.65
		RMSE		1.07	RMSE		1.06	RMSE		2.17

3.2.4 評価

3.2.4.1 航空機・UAVによる立木調査の評価及び今後の課題

航空機・UAVによる立木調査で得た林分情報と現地の毎木調査で得た林分情報を比較することで、航空機・UAVによる立木調査の妥当性を評価した。219は3小班と220れ小班の対象区域内において、現地調査により取得した毎木調査結果、標準地調査結果と航空機解析、UAV解析を比較した(表3.2.11)。

毎木調査結果による本数と解析で得た本数を比較すると、航空機画像により解析した本数は毎木調査本数と大きくかい離していた。これは、航空機はかなり上空から撮影するため、画像が不鮮明で樹頂点を判別することはできないこと等による。航空機画像は、元々、単木レベルの調査には適しないことから、従来のエリアベース解析等への利用に限定するのが妥当である。(注：航空写真を用いた場合であり、航空レーザは事情が異なる。)

一方UAV解析では、Case1(既存回帰式)、Case2(新規回帰式)とも、本数・材積の誤差は1～2割程度であった。誤差が生じた要因は、毎木調査の対象となる被圧木を上空からは確認できなかったためである。(注：他機関の現地検証で、単木の検出率81%、材積選出率89%といった報告例あり。)

一般に、被圧木については、総材積は小さく、品質の劣るものが多いことから、綿密に調査する必要性は低いと考えられるが、林内調査に当たって、全体に占める被圧木の比率を算定し、簡易な方法により総材積等を補正することが望ましい。(注：林内調査は、樹幹の曲がりや幹の損傷を確認するためにも必要である。)

また、UAV解析における回帰式については適合度が高い場合と低い場合がある。そもそも、胸高直径を樹冠径から推定する方法は従来はなかったものであり、今後、従来型の回帰式にこだわらず、簡明な理論式として作成することが重要と考えられる。

毎木調査と比較して材積の差があったことについては、そのまま単純な評価をすべきではない。標準地調査は、あくまでも標本抽出による調査であり、統計学的にも標準偏差の一定範囲で誤差が生じること(毎木調査との差が生じること)は従来から許容されている。また、標準地調査とUAV解析を比べても毎木調査との材積差に大きな違いはないことが確認できる。

今回の結果のみから見れば、UAV解析は標準地調査と同程度の精度を確保できることから、立木販売に当たり標準地調査を行う林分、ほとんどの請負生産事業地においては実用上問題なく使用できると考えられる。

UAV調査の工期については、毎木調査の工期の半分程度になったが、十数haであれば本事業に要した工期とほぼ同等の工期で実施することが可能であり、毎木調査との工期数の差は調査面積が広がるほど拡大するためコスト削減効果が見込まれると示唆された。一方、標準地調査とは大きな差はなかった。これは、今回のUAV解析に不慣れな点があったこと、調査面積が小さく効率的ではなかったこと等が原因と考えられ、知識や技術の習得、効率的な調査面積の確保が課題である。

上記のような課題等はあるが、UAV解析は、工期(人日)の向上や、現地調査を削減できる可能性が示唆された。収穫調査に係る調査要員を確保しづらくなっている中で、労力を軽減する手法として有効と考えられる。

表3.2.11 219は3小班 立木調査結果の比較

区分		面積 (ha)	本数 (本)	立木密度 (本/ha)	平均樹高 (m)	平均 胸高直径 (cm)	合計材積 (m ³)	ha材積 (m ³ /ha)	工期(人日) (区域標示～成果品)
毎木調査		1.91	2,033	1,064.40	14.8	22.5	653.52	342.16	11.91
標準地調査			2,008	1,051.31	14.2	21.5	563.82	295.19	8.12
航空機	Case1(既存回帰式)	1.90	881	463.68	17.8	29.6	543.14	285.86	5.87
	Case2(新規回帰式)					25.0	373.56	196.61	7.37
	Case3(収穫予想表)					25.4	405.84	213.6	5.87
UAV	Case1(既存回帰式)	1.90	1,697	893.16	15.3	23.4	592.94	312.07	6.82
	Case2(新規回帰式)					22.6	561.56	295.56	8.32
	Case3(収穫予想表)					20.6	480.83	253.07	6.82

表3.2.12 220れ小班立木調査結果の比較

区分		面積 (ha)	本数 (本)	立木密度 (本/ha)	平均樹高 (m)	平均 胸高直径 (cm)	合計材積 (m ³)	ha材積 (m ³ /ha)	工期(人日) (区域標示～成果品)
毎木調査		2.68	2,213	825.75	19.1	26.3	1,241.13	463.11	15.35
標準地調査			2,084	777.61	18.3	25.1	1,024.08	382.12	10.12
航空機	Case1(既存回帰式)	2.64	1,074	406.82	21.9	34.1	1,048.63	397.21	5.87
	Case2(新規回帰式)					25.0	561.43	212.66	7.37
	Case3(収穫予想表)					34.5	1,085.34	411.11	5.87
UAV	Case1(既存回帰式)	2.64	1,828	692.42	19.0	28.2	1,122.07	425.03	6.82
	Case2(新規回帰式)					25.9	961.47	364.19	8.32
	Case3(収穫予想表)					28.2	1,169.21	442.88	6.82

表3.2.13 評価まとめ

		正確性(総体)	正確性(毎木)	労力
航空機による 立木調査	Case1	▲	▲	◎
	Case2	▲	▲	○
	Case3	▲	▲	◎
UAVによる 立木調査	Case1	○	△	◎
	Case2	○	○	○
	Case3	△	▲	◎
従来型立木調査(毎木)		◎	◎	△
従来型立木調査(標準地)		○	△	◎
備考		◎正確、○概ね正確、△正確さが不足、▲誤差が大		◎容易、○概ね容易、△労力を要する

(参考) 汎用的な樹頂点抽出方法の提案

樹頂点抽出～材積推定の工程を事業者が自ら行うには、ラスタデータ・ベクターデータを扱うことのできるソフトウェアを入手する必要がある。以下に考えられる樹頂点抽出の手法を2点提示する。

1) 目視判読

GIS上でオルソ画像を表示し、樹頂点を目視で判読する手法。判読した樹頂点座標のDCHM値を抽出することで樹高を把握することも可能である。高価なソフトウェアを必要とせず、フリーのソフトウェア(QGIS等)で実施することが可能だが、自動抽出と比較して判読に時間を要する。

2) 局所最大値フィルタ法(Local Maximum Filtering)・Watershed法

ArcGIS(要SpatialAnalyst)で実施可能な樹頂点・樹冠抽出手法である。局所的な最大値フィルタ法は対象内全ての画像に対してある大きさのフィルタ(3×3、5×5、7×7等)を走査し、フィルタ内で最も高い地点を樹頂点として抽出する手法である。適切なフィルタサイズを選定する必要があるものの、アルゴリズムが簡単のため効率的に樹頂点を抽出することができる。フィルタによる最大値の走査は、ArcGISの「ラスタ演算」機能、または「フォーカル統計」機能を利用して実施する。また、その後の樹頂点ピクセルの抽出にはArcGISの「ラスタ演算」機能を利用する

樹冠部の抽出では、Watershed法を用いて抽出した樹頂点と値を反転したDCHMデータから樹冠部を抽出する。Watershed法のアルゴリズムは前述(2.2.2.4)の通りである。DCHMデータの反転はArcGISの「ラスタ演算」機能を、Watershed法による解析にはArcGISの「集水域ラスタの作成」機能を利用する。

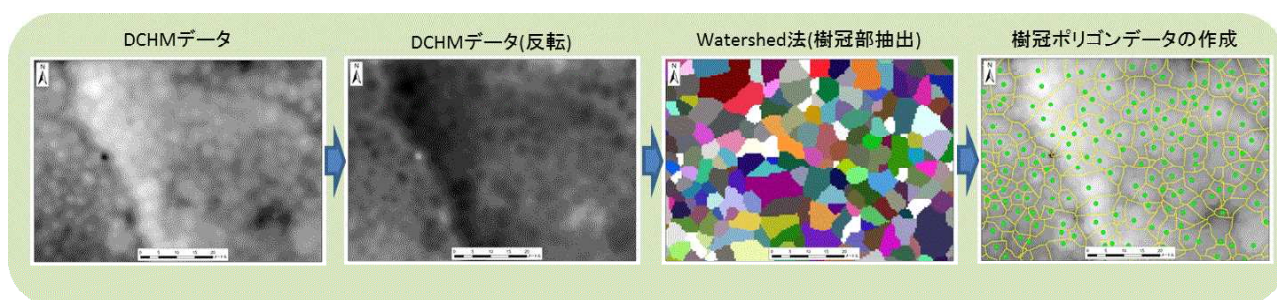


図3.2.19 樹頂点の抽出イメージ

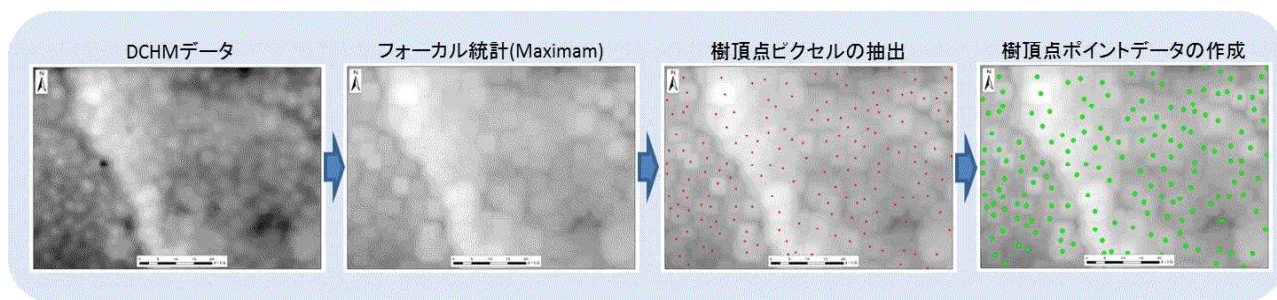


図3.2.20 樹冠の抽出イメージ

3.3 UAVによる跡地検査

無人航空機による効率的な跡地検査方法について、従来の手法と比較しその有効性を検証する。跡地検査に係る検証の実施フローは表3.3.1の通り。

表3.3.1 跡地検査実施フロー

跡地検査実施フロー		
(茨城森林管理署管内)		
	UAVによる跡地検査	従来型跡地検査
手順1	UAV高精細画像撮影(※2)	現地踏査(写真撮影)
手順2	区域確認(※1活用) 但し、今回は既存写真活用	
手順3	画像確認(※1と※2の対比)	
手順4	検査報告書調整	検査報告書調整

3.3.1 検証手順について

跡地検査は、森林の立木を販売または素材生産を請け負わせ、伐採搬出が完了した後に、立木買受業者または素材生産請負者から提出される完了届けを受けて行われる。

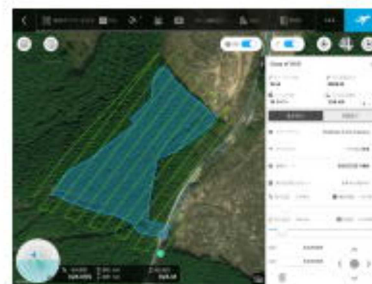
検査項目は、契約書に定めた範囲を超えることなく区域内が適正に伐採されているかのほか、区域外の立木等に損傷を与えていないか、区域内外の林地を毀損していないか、末木枝条が適正に整理されているか等を直接目視により確認する行為である。

今回の検証は、これらの行為をUAVによる写真画像から確認できないかを明らかにすることを目的としている。

具体的手順は、図3.3.1の通り。

UAVによる跡地検査の手順

- 飛行プログラムの用意
立木調査で利用した飛行プログラムを利用
(今回の検証では新規作成)
- 撮影飛行
撮影飛行時の準備・留意点等は立木調査と同じ
- オルソ画像の作成
オルソ画像へ区域境界の位置情報を挿入
- 事業実施前後のオルソ画像比較



※ 94ち林小班:飛行プログラム



※ 94ち林小班:国有林 GEの航空写真

図3.3.1 UAVによる跡地検査の手順

(説明)

- ① 事業完了後にUAVによる写真撮影を実施する。飛行プログラムは収穫調査時に設定したプログラムが活用できる。ただし、離発着ポイントの変更等、飛行プログラムの設定条件を変更する場合は、再度条件に合わせてプログラムする必要がある。
- ② 取得した空中写真からオルソ画像を作成し、収穫調査時に作成した区域を画像に挿入する。
- ③ 事業実施前後のオルソ画像と区域データを比較し、正しい大きさと位置に表示されているか確認する。
- ④ 上記③で重ね合わせた画像をもとに、区域のはみ出し、林地の毀損、作業道の位置等が契約書、仕様書に定めた通りとなっているか、目視により確認する。隣接する区域外に無立木部分があれば、事業実施前からの無立木地かどうかを確認する。

3.3.2 検証結果について

検証は、茨城森林管理署管内94ち・97ろ林小班的の伐採跡地において、茨城森林管理署の協力を得て行った。

検証の結果、事業完了後に作成した高精細オルソ画像により、仕様書通りに伐採、収去、跡地整理がされていることが確認できた。また、区域に隣接する無立木部分については、事業実施前からのものであることが確認できた。

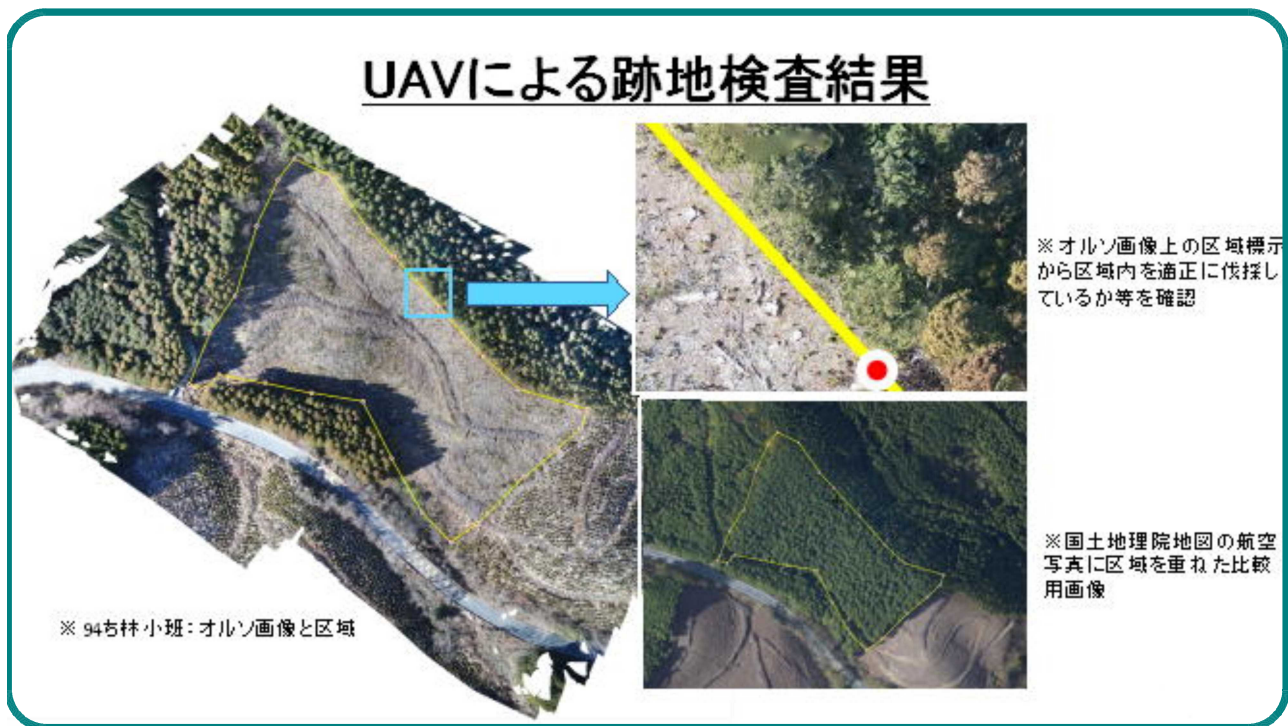


図3.3.2 UAVによる跡地検査結果

3.3.3 分析

- ① UAVによる区域標示を前提とした場合、UAVによる跡地検査については、十分に実用に耐えられるものであることが示唆された。
また、検査に使用した画像を残すことで、境界問題発生時の判断材料として使用することができるものと考えられる。
- ② 収穫調査時には、上空からの地物の確認が樹冠によって遮られて困難であるが、伐採跡地であれば画像による境界判読が極めて容易となる。また、対空標識も設置しやすく、UAVによる区域測量が最も実施しやすい状況となる。このため、跡地検査と併せてUAVによる高精細オルソ画像から正確なデジタル位置情報データを整理することで、デジタルデータによる位置情報インフラの整備に寄与できるものと考えられる。


3.3.4 UAVを活用した極印等確認検査

UAVによる区域標示が行われなかった箇所において、踏査に代わりUAVにより極印、ペンキ標示等の地物による区域標示を画像により確認し、検査できないかを参考として検証した。

3.3.4.1 検証手順について

UAVを活用した極印等確認検査は、表3.3.2の手順で実証を行った。

表3.3.2 UAVを活用した極印等確認検査手順

- ・踏査に代わり、UAVを手動でコントロールし区域界を動画撮影、または、区域界から一定の離隔距離を飛行させるプログラムを作成し、プログラム飛行により区域界を動画撮影する。
- 
- ・撮影動画から極印を確認。

3.3.4.2 検証結果について

- ① カメラ性能から、ある程度近接して撮影する必要があるが、立木の枝の張りだし等、手動によるUAVのコントロールは、高い操縦技能が必要であった。(目視外飛行におけるUAV機体上方の障害物確認は困難。)また、接触に注意しながらの操縦となることから、飛行速度を低下させざるを得なかった。
- ② 撮影した画像確認では、立木にペンキ標示した区域標示は比較的明瞭に確認できたが、極印の確認は困難であった。また、区域界(ライン)を画像で推定するためには複数のペンキ標示等(ポイント)が画像上に存在することが必要であるが、画像視野角の関係から、複数の標示物を捉えることができず、区域界を正しく把握できなかった。

(参考) 今回検証に使用したPhantom 4 Proには障害物回避機能があるが、この機能をonにした場合、認識した障害物に一定以上近接しないような仕様となっている。ただし、この機能は、細い枝やつる、機体上方の障害物が認識できない場合があり留意が必要である。

現地踏査(従来型)をUAVに置き換えた場合

※現地踏査時に撮影した94㍊林小班極印写真



◆極印をUAVで撮影するためには、区域外の残存立木及び地際に接近する必要がある。下層植生等への接触のおそれもあることから、カメラで明瞭に捉えられる離隔距離からの確認は困難である

※94㍊林小班区域標示をUAVから撮影



◆区域外縁木にペンキで標示した区域は、比較的容易に撮影が可能であるが、目視外での飛行となるため操縦者の技術が求められる

図3.3.3 現地踏査(従来型)をUAVに置き換えた場合

3.3.4.3 分析

- ① 明瞭な区域標示があれば、検査可能であるが、高度な操縦技能が要求されるため、現状の標示方法では効率性が低いと考えられる。
- ② UAVにより上空から全景写真を撮影して、全体の概況把握、林地の毀損、作業道の位置確認に活用することは十分に可能であると思われる。特に、全域をくまなく俯瞰できるため、問題の見落としを防ぐといった効果が期待される。また、立木買受業者や素材生産請負者への説明材料としても有効であると考えられる。

3.4 デジタル計測機器による検知

デジタル計測機器による検知方法の検証の実施フローは表3.4.1の通り。

表3.4.1 検知実施フロー

検知実施フロー					
<small>(東北森林管理局管内)</small>					
	地上レーザ検知(シミュレーション)	画像検知(A)	画像検知(B)	従来型毎木検知	従来型層積検知
手順1	スキャニング画像取得	写真撮影	写真撮影	毎木検尺計測	層積計測
手順2	画像解析	画像解析(注)	画像解析(注)		
手順3	検知野帳調整	検知野帳調整	検知野帳調整	検知野帳調整	検知野帳調整

画像解析方法：画像解析は2次元画像解析（画像検知A）及び3次元画像解析（画像検知B）

3.4.1 検証する検知方法について

国有林材の生産量が増加していくことが予測される中で、生産請負現場における素材の検知を効率的に実施していくことが求められている。このため、デジタル計測機器(地上レーザスキャナー、スマートフォン、3Dカメラ)を用いた検知について検証を行った。

検証は、表3.4.2の3箇所で行った。

表3.4.2 検証場所及び検証内容

検証場所	検証内容
愛媛県西予市宇和町 (株)宇和原木市場土場	地上レーザスキャナー検知の可能性
岩手県雫石町 盛岡森林管理署管内673林班土場	画像検知2種類、毎木検知、層積検知
神奈川県秦野市 神奈川県森林組合連合会林業センター土場	撮影距離別の画像検知(参考)

3.4.2 地上レーザスキャナーによる検知

3.4.2.1 検証手順について

地上レーザスキャナーによる検知について、表3.4.3の手順で実証を行った。

表3.4.3 地上レーザスキャナーによる検知の手順

- ・ 土場において極No.を確認。樹種、材長を確認。
- ↓
- ・ レーザスキャニング装置をセッティング。適切な撮影距離、レーザ密度の設定。
- ↓
- ・ スキャニング実施。
- ↓
- ・ 解析

(説明)

- ① 現時点において、地上レーザスキャナーで取得した点群データを自動認識できる汎用検知ソフトウェアは存在しないことから、今回の検証では、正確な点群データが取得できているかどうかを確認した。

(参考)

- ① 今回検証に使用した機材とレーザスキャニング時の極とスキャナーとの位置関係。極の木口面までの距離は5mとした。



FARO FOCUS 3D



スキャンの実施

図3.4.1 検証に使用したレーザスキャナー

3.4.2.2 検証結果について

検証は、愛媛県西予市宇和町内の(株)宇和原木市場土場で大木坑木有限会社の協力を得て、地上レーザスキャニングデータから木口面を捉えた3D点群データが正しく取得できるかを確認した。

- ① 地上レーザスキャナー (FARO FOCUS 3D) を用いてスキャンを行った。機器の設置からスキャン完了まで約10分であった。データを確認した結果、計測極の明瞭な点群データが得られ、木口の周縁部も十分識別でき、また、木口径を正しく捉えていることがわかった。

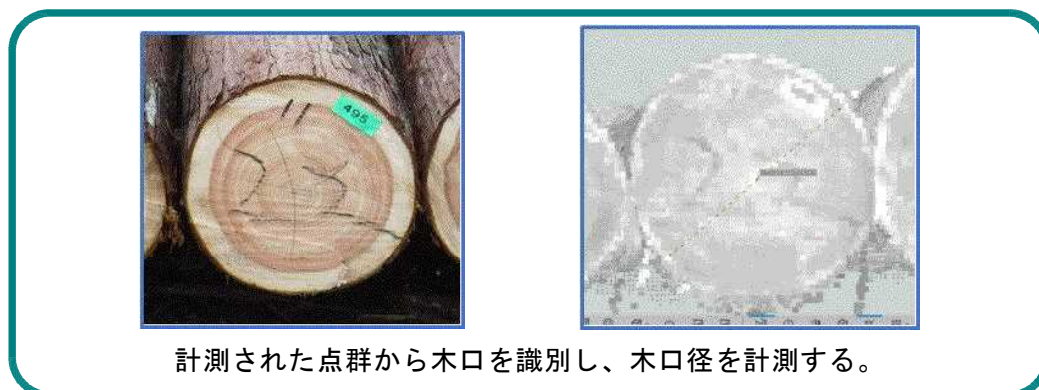


図3.4.2 計測した丸太木口と点群データから計測した木口径

- ② 現時点では、これらの点群データを解析する汎用検知ソフトウェアは存在しないが、ソフトウェアが開発されれば、レーザスキャナーによる検知も可能になるものと示唆される。

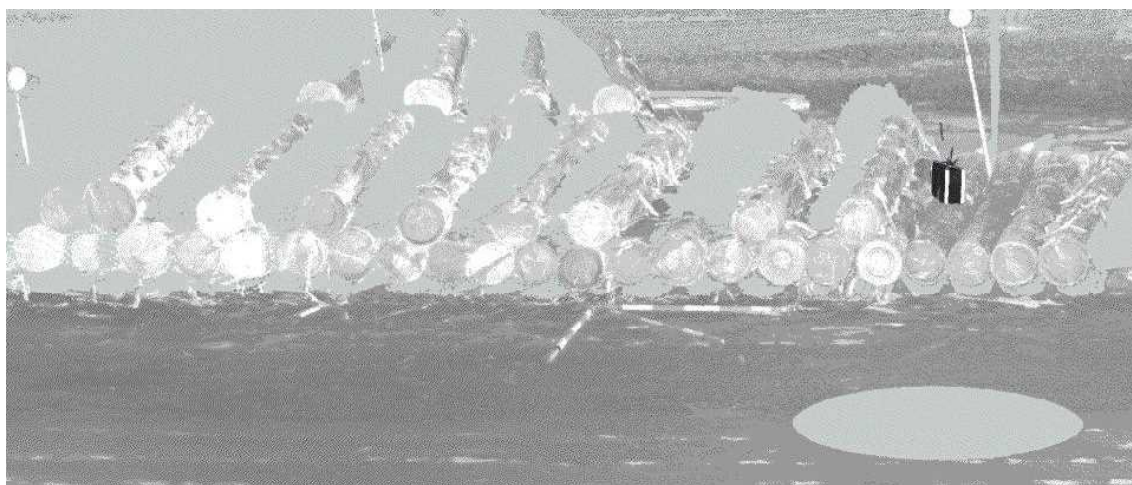


図3.4.3 計測された点群データ

3.4.3 画像解析による検知

画像解析による検知は国内外で様々なソフトウェアが販売され、国内においても利用されはじめている。

その解析方式は、

- ① 通常の2D写真の明度、色度、形状から木口を抽出し、別に与えた長さを基準として、それぞれの木口の径級を計測する手法
- ② ステレオ写真を3Dに変換し、認識された木口のエッジから径級を計測する手法に大別される。

今回は、それぞれの手法から各1手法(FOVEAによる検知、3Dカメラによる検知)を選定し、盛岡森林管理署管内673林班土場において、盛岡森林管理署、現地で製品生産事業を行っている雫石地区国有林材生産協同組合、検知業務を行っている岩手県国有林材生産協同組合連合会、素材流通を行っているノースジャパン素材流通協同組合担当者の協力を得て検証を行った。

3.4.3.1 FOVEA（フォベア）による検知の手順

FOVEAによる検知について、表3.4.4の手順で実証を行った。

表3.4.4 FOVEAによる検知の手順

- ・ 土場において桧No.を確認。樹種、材長を確認。
- ↓
- ・ 桧積幅を計測。FOVEAに桧幅を入力。
- ↓
- ・ スマートフォン等の端末で連続写真となるように横方向へ移動しながら撮影。
- ↓
- ・ アプリケーションによりパノラマ写真を自動合成。自動で本数、径級を認識。
- ↓
- ・ スマートフォン等の端末画面上で未検出丸太の追加、木口径の修正。樹種、品等々の登録。
- ↓
- ・ 丸太の本数、材積、層積が自動計算され、帳票が作成される。

（説明）

- ① FOVEAは、二次元画像解析(FOVEA～スマートフォン用の材積計測ソフト(ドイツ製))による検知ソフトであり、インターネットからアプリケーションがダウンロードできる。二次元の画像解析により丸太木口を認識し、長さの基準となる指標から単木毎の径級を認識するものである。国内においてもほぼ同様の仕組みで検知を行うソフトが販売されている。
- ② FOVEAには品等の自動認識機能は搭載されていないことから、必要があれば別途確認を行わなければならない。なお、ヨーロッパ方式の検知方法となっており、日本農林規格の末口自乗法には対応していない。(今回の検証では、別途計算し末口二乗法で求積。)
- ③ FOVEAは、連続写真からパノラマ写真を合成する機能を備えており、これにより、桧幅の大きな場合も一度に解析が可能である。

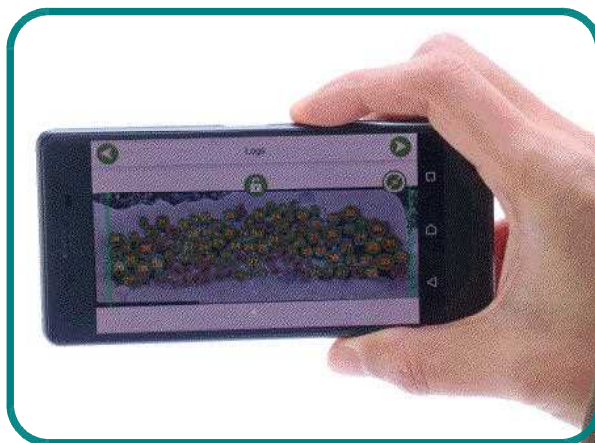
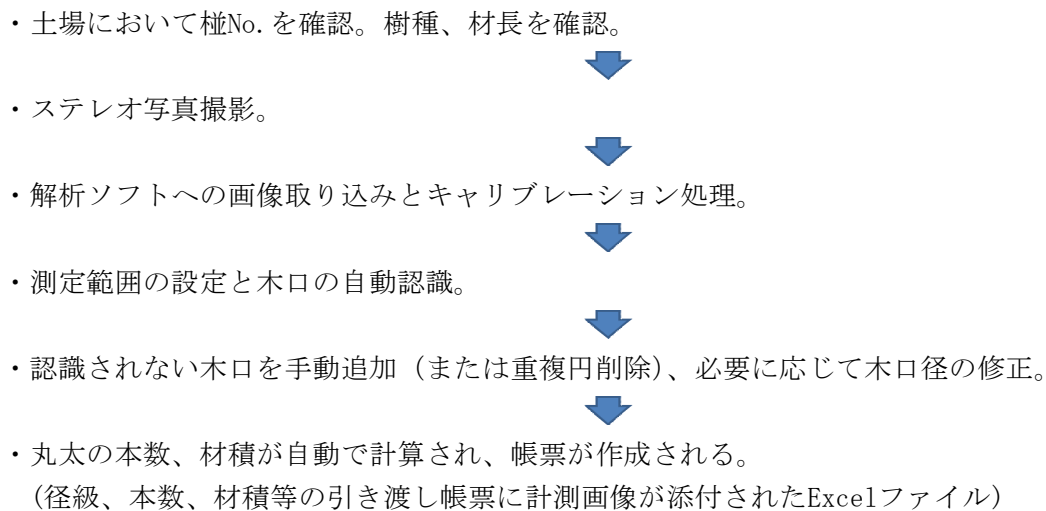


図3.4.4 スマートフォン画面上でのFOVEA

3.4.3.2 3Dカメラによる検知の手順

3Dカメラによる検知について、表3.4.5の手順で実証を行った。

表3.4.5 3Dカメラによる検知の手順



(説明)

- ① 今回検証を行った三次元画像解析による検知は、市販の3Dカメラと原木材積測定システム(静岡県農林技術研究所森林・林業研究センター星川健史らが開発)による検知ソフトである。

ステレオ写真から3D点群データの生成、木口面エッジの抽出を行い、木口形状に内接する円の大きさから単木毎の径級を認識するものである。国内においてもほぼ同様に仕組みで検知を行う機材、ソフトが供給されている。



図3.4.5 富士フィルム製3Dカメラ(FinePix REAL 3D W3)



図3.4.6 3Dカメラで撮影

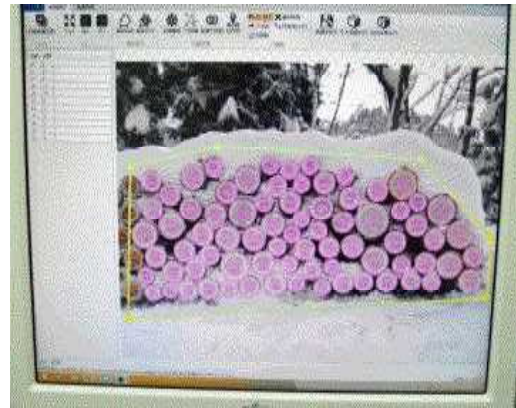


図3.4.7 原木材積測定システムでの解析画面

- ② 今回検証を行った三次元画像解析による検知システムには品等の自動認識機能は搭載されていないことから、必要があれば別途確認を行わなければならない。
- ③ 原木材積測定システムには3D点群データを合成する機能がないため、大きな桧の場合は区分して撮影し、解析後に合算して帳票を作成する。

3.4.4 検証結果について

検証は、岩手県雫石町、盛岡森林管理署管内673林班土場(請負事業者による素材生産事業実行中の箇所)で行い、FOVEA及び3Dカメラによる検知及び従来型の毎木検知、層積検知について、2桧(桧No. 1、桧No. 2ともにスギ4m材)を対象に、それぞれの手法による検知データの取得、検知に要する時間等を観測した。また、現地において素材生産を請け負っている事業者等からの聞き取りを行った。

3.4.4.1 検知結果について

FOVEA及び3Dカメラによる検知の結果、自動認識及び手動修正により取得された本数及び数量は表3.4.6の通りであった。

表3.4.6 FOVEA及び3Dカメラによる検知結果

径級 (cm)	桧 No. 1			桧 No. 2		
	毎木検知	FOVEA	3Dカメラ	毎木検知	FOVEA	3Dカメラ
12		1				
14		6			2	
16		12			16	1
18	23	13	13	61	36	35
20	19	21	21	56	45	58
22	13	23	9	33	54	45
24	20	15	21	25	29	24
26	12	6	19	15	13	23
28	8	4	10	11	7	11
30	7	1	6	5	3	8
32	3	2	4	2	3	2
34		1	2			1
36	1	1		1	1	1
38		1	1			
40	1					
42			1			
合計本数(本)	107	107	107	209	209	209
合計材積(m ³)	23.812	20.325	25.904	39.684	39.334	42.526
材積精度	-	85%	109%	-	99%	107%
平均径級(cm)	23.16	21.29	24.17	21.49	21.40	22.26
層積材積(m ³)	23.853			39.431		

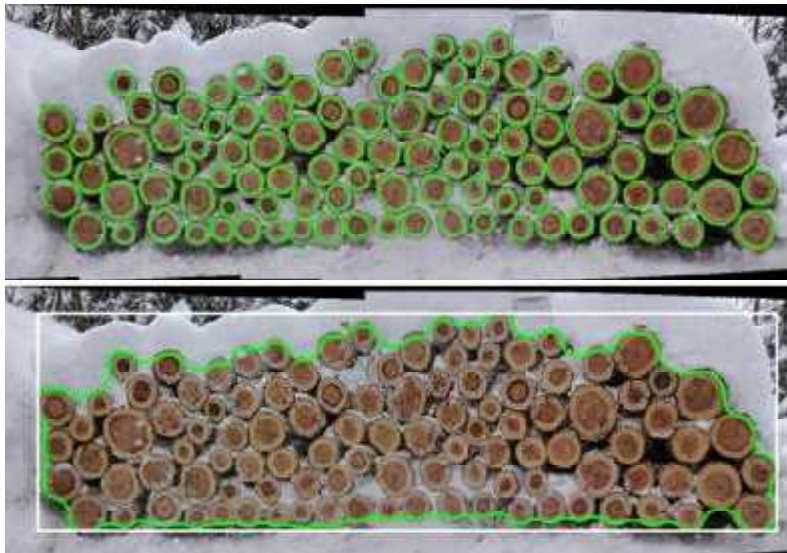


図3.4.8 桧No. 1のFOVEA計測画像

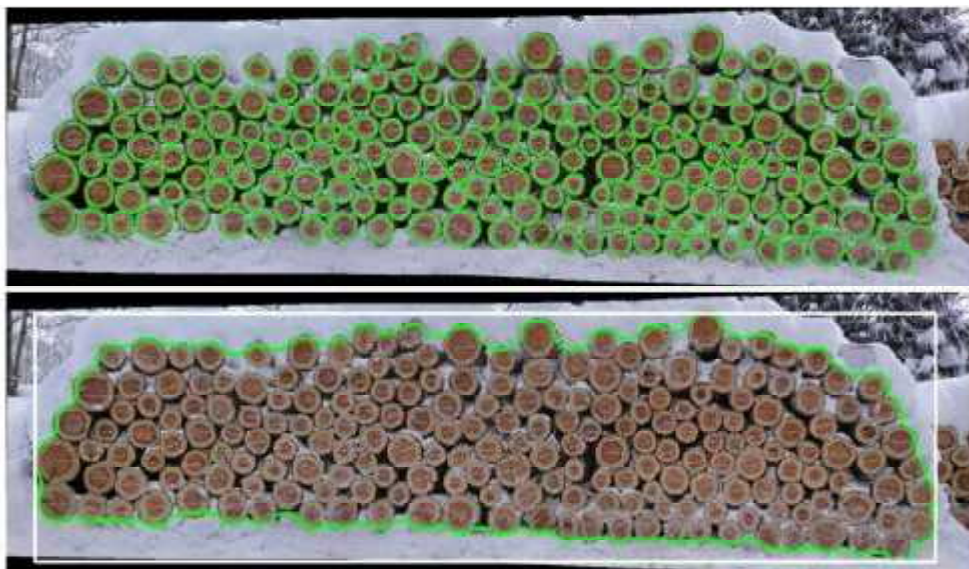


図3.4.9 桧No. 2のFOVEA計測画像

計測画像(桧No.1)~3Dカメラ(原木材検定システム)

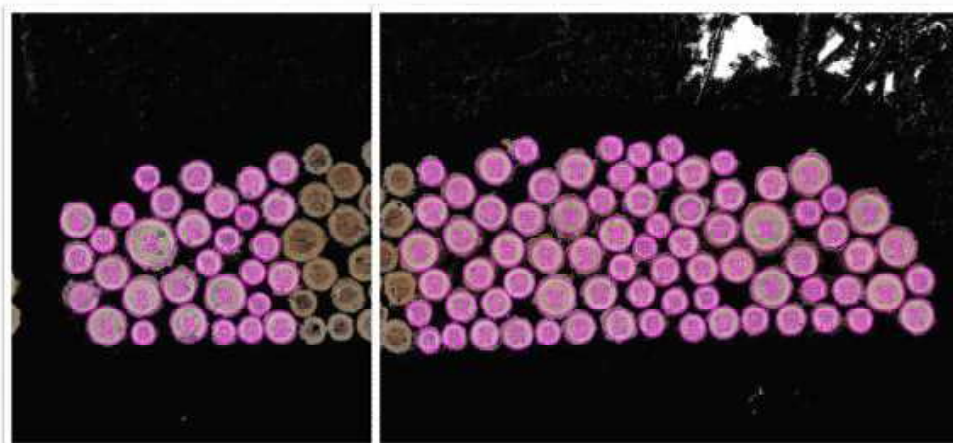


図3.4.10 桧No. 1の3Dカメラ計測画像

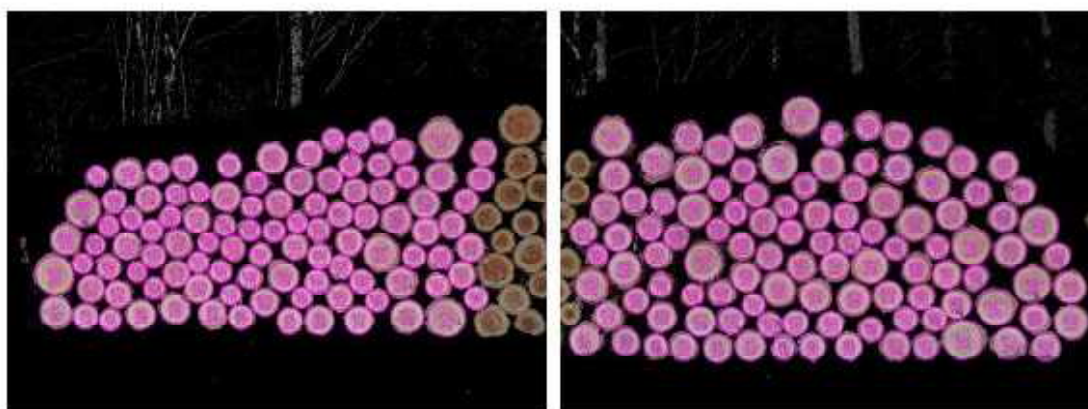


図3.4.11 柱No. 2の3Dカメラ計測画像

3.4.4.2 検知工程について

FOVEA及び3Dカメラによる検知工程及び従来型検知工程については表3.4.7の通りであった。

表3.4.7 FOVEA及び3Dカメラによる検知工程計測結果

区分	毎木検知	FOVEA	3Dカメラ	層積検知
柱No. 1	計測 2名×30min 集計 1名×10min	桧積み幅計測 2名×30min 撮影 1名×1min 解析 1名×11min	撮影 1名×5min 解析 1名×38min	桧幅、桧高計測 計算、整理 1名×14min
柱No. 2	計測 2名×40min 集計 1名×10min	桧積み幅計測 2名×30min 撮影 1名×1min 解析 1名×11min	撮影 1名×5min 解析 1名×48min	桧幅、桧高計測 計算、整理 1名×14min
計	160min	35min	96min	34min

3.4.5 分析

FOVEA及び3Dカメラによる検知結果について、精度、可能性等について分析を行った。

3.4.5.1 精度について

FOVEA及び3Dカメラによる検知については、ともに、画像情報から解析を行っており、明るさ、光の方向等の撮影条件、画像の色度、明度の補正条件、アプリケーション内の解析エンジンの特性等により精度は変化するものと思われるが、今回の実証で得られた結果を比較・分析すると、以下の点の特筆される。

- ① 従来の毎木検知と材積を比較したとき、FOVEAでは85%～99%と過小に評価され、3Dカメラではプラス107%～109%と過大に評価される結果となっている。この違いについては、アプリケーションの認識特性のほか、アプリケーションの機能として付加されている手動補正機能の使用(FOVEAでは)が影響していることも考えられる。(今回の実証においては、真円材ではないものが多く、FOVEA及び3Dカメラともにこの機能を多用)

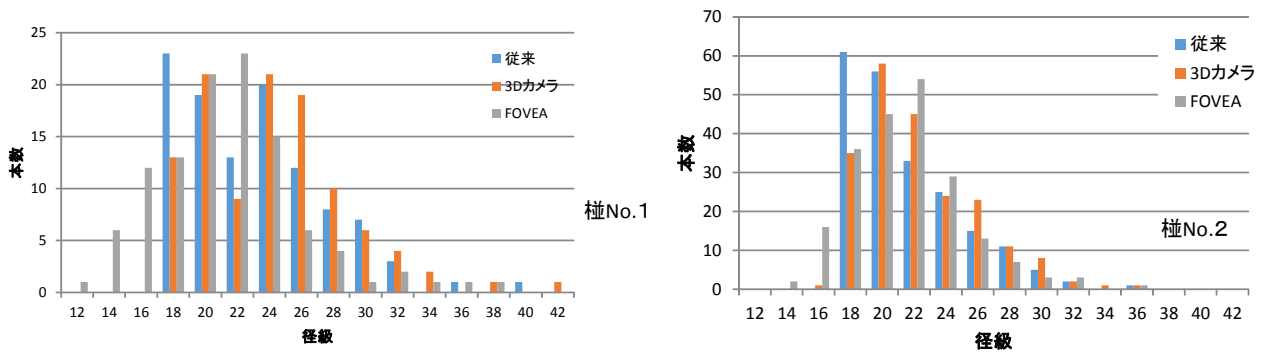


図3.4.12 検知手法別の径級別本数

- ② 丸太を自動で抽出できなかったものや、丸太以外の画像上の形状を丸太と誤認識したものもあり、これらについても手動補正機能を使用して直径を求めている。以上のことが材積の認識精度に影響していると考えられ、認識率の向上、直径認識精度の向上が期待される。(なお、携帯性や現場からの通信機能を重視しているFOVEAにあっては、スマートフォン等の端末画面上で入力、手動補正を行うものであるが、画面の大きさの制約から詳細な画像確認が難しいこと、スマートフォン等の端末画面上をピンチイン、ピンチアウトして手動補正を行うなど、操作性に影響している可能性もあり得る。)

3.4.5.2 検知環境について

- ① 一般に、山土場はスペースが限られており、桧間隔を広く確保することが困難な現場が多い。このような環境下では、FOVEAや3Dカメラの桧木口面までの最適撮影離隔距離とされる5m程度の距離を確保することが困難な場合が発生する。

今回の検証現場は、林道脇の限られたスペースを使用しており、かつ、積雪環境下にあるため、除雪スペース等も必要で、桧間隔は全体的に1～2m程度となっていた。多くの桧は間隔が狭い形で桧積みがされており、画像検知を行うことができなかった。このような環境下では桧積み時に順次撮影するなどの工夫が必要と考えられる。



図3.4.13 林道脇の樅（画像検知を実施）



図3.4.14 樅の間が狭く画像検知不可
樅積み時に順次撮影するなどの工夫が必要

- ② 今回の検証現場では、一般的な積み方と違い、樅積み時に末口方向を揃えていたため、検知において末口の確認作業は不要であった。しかしながら、末口方向を揃えて樅積みを行うことは、樅のバランスが悪化するほか、樅積み工程における揃え手間や、トラック積み込み時にバランスを確保するため材を回転させる等により工程が悪化するなどの課題が発生することが想定される。現在においてカメラによる検知システムには末口、元口の抽出機能は搭載されておらず、末口方向を揃えずに樅積みされている箇所では、画像検知は困難であるが、将来的にはAIによる認識が期待される。

（参考）

今回の現場では、プロセッサーによる造材が行われており、玉切りを終えた丸太は末口、元口方向が一定となるよう作業道に沿って存置されていたとのこと。フォワーダー運材時にもこの丸太の方向を変化させないように積み下ろししており、その結果、樅においても末口方向が揃えているとのことであった。（請負事業者からの聞き取り）

3.4.5.3 工程について

- ① 今回の検証によって得られた工程改善効果は、従来型の毎木検知と比較してFOVEAでは約2割、3Dカメラでは約6割の所要時間(延時間)で検知を行うことが可能であった。また、検知実施者が経験を重ねることにより、画像調整、手動補正に要する作業時間が短縮していく傾向が認められ、更に効率の良い工程で検知が実施できるものと見込まれる。
- ② 解析プログラムの解析精度が向上すれば、手動補正に要する時間が短縮され、更に効率の良い工程の実現が可能であることが示唆された。

3.4.6 評価

今回の実証の結果、画像検知について次のように評価できる。

- ① 直接の作業時間(現場への往復や雪払いなどの作業時間を除いた時間)を毎木検知と比較すると、今回の現場では22%~60%に短縮され、工期の向上によるコスト削減効果が十分に見込まれる。
- ② 画像検知で取得した画像データ及び桧積み情報(量や位置)がデジタル化されており、IoT、ICTを活用して関係者間での共有が容易。また、計測の根拠を保存・再現が可能。
- ③ 本数については手動補正機能を併用すれば正確に認識でき、径級についても径級認識のプログラム特性を把握することで比較的正確に把握できると見込まれる。このような検知特性を適切に説明し、買受者側の理解が得られるなら国有林材の販売に採用することも可能であると考えられる。なお、画像検知の認識精度が向上すれば、更に活用の可能性は高まるものと思われる。
- ④ 今回検証した画像検知においては品等区分を自動で行う機能は備えていなかったが、この機能が付加されれば更に活用可能性は高まるものと思われる。

(参考) 撮影距離別の検証結果

3Dカメラを用いた画像検知では、撮影距離によって精度が変化することが示唆された。このため、撮影距離を3m付近、4.5m付近、6m付近として画像検知を行い、毎木検知結果との比較を行った。検証は神奈川県森林組合連合会林業センターの協力を得て、毎木検知済みの桧で行った。

<撮影条件>

ヒノキ4m材の桧(毎木検知では171本、22.566m³)を撮影し解析した。末口と元口が混在しているため、別途、高解像の写真で末口に記入されたサインを識別し、その後、原木材積計測システムで材積を計測した。

<解析結果>

- ① 計測材積は、毎木検知結果と比較して、3m付近が93.7%、4.5m付近が98.8%、6m付近が95.8%であった。
- ② 材積が最も近かった4.5m付近からの径級別本数内訳を見ると、3m付近や6m付近と比べて毎木検知に近い内訳が得られた。ただし細い丸太を過小評価する傾向が見受けられた。

表3.4.8 撮影距離別の検証結果 (3Dカメラ)

径級 cm	従来型 毎木検知	3Dカメラ 3m付近	3Dカメラ 4.5m付近	3Dカメラ 6m付近
12				1
13		1	1	1
14	24	44	35	46
16	65	54	52	44
18	31	25	30	30
20	22	23	27	25
22	10	13	7	7
24	15	8	14	12
26	3	2	4	4
28	1	1	1	1
本数	171	171	171	171
材積	22.566	21.154	22.294	21.614
材積比率	100	93.7	98.8	95.8

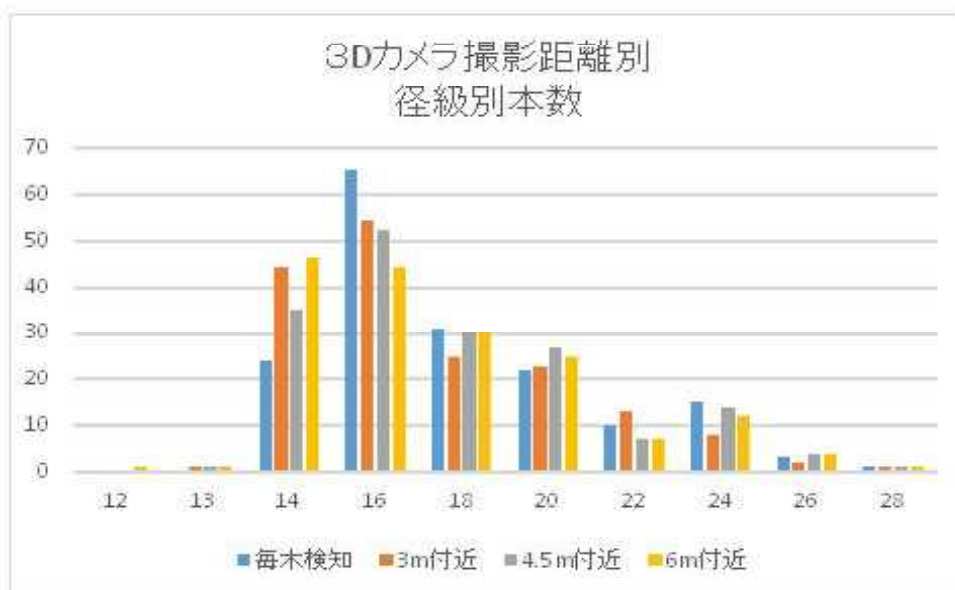


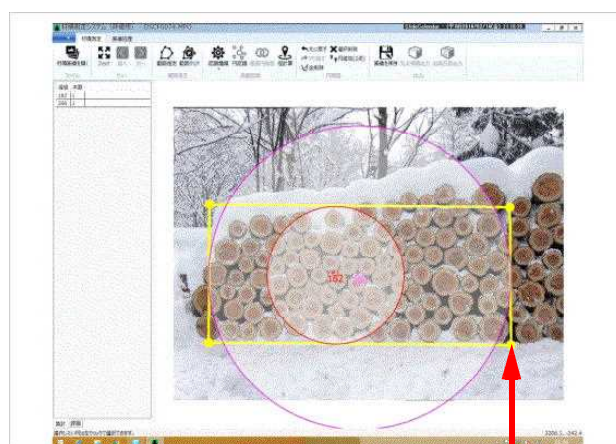
図3.4.15 3Dカメラ撮影距離別の径級別本数

(参考) 画像による層積検知

3Dカメラ(原木材積測定システム)の機能を活用して、従来型の層積検知を画像上で実施した。

【層積検知の手順】

- ① ステレオ写真取り込みとキャリブレーション処理
- ② 測定範囲設定機能を用いて層積範囲を設定
(範囲外の材と範囲内の空隙が均衡するよう長方形を設定)
- ③ 縦横の長さを直径計測機能で自動計測し、材長を乗じて層積を算出
- ④ 当該地域の層積換算率を乗じて材積を算出



ここから左を層積で計測

図3.4.16 3Dカメラを活用した層積検知

【層積検知の結果】

3Dカメラ(原木材積測定システム)の機能を活用して簡易に層積寸法を計測できることが判明した。

また、3Dカメラで撮影した画像が保存できること、原木材積測定システムを使用して単木毎の材積も取得できることから、層積検知で使用する層積率の適合性の検証に活用できることが示唆された。

3.5 全体評価

3.5.1 デジタル位置情報インフラとGNSS環境の有効性について

3.5.1.1 デジタル位置情報インフラの有効性

ICT技術の活用は、今回のUAVによる収穫調査や跡地検査においても明らかになったように、正確なデジタル位置情報が与えられることにより極めて効率的に収穫調査や跡地検査を行えることが示唆された。また、区域標示の再現性の検証でも明らかになったように、立木販売における買受者側が、デジタル位置情報を共有し、自由に利用できる環境が構築されれば、森林における関係者の各種活動が効率的になることも示唆された。

このような環境を構築するためには、これまでの標柱、極印等の地物を基本とした位置情報の提供に代わって、国有林の土地に係る共有可能な位置情報の整備が不可欠であると考えられる。また、デジタル位置情報は、随時必要な箇所、必要なときに再現されることで有効となるが、現在整備が進められている準天頂衛星による測位システムの完成と、この測位システムを関係者が利用できることが求められる。

このためにも、特に整備に時間を要すると思われる国有林に係るデジタル位置情報インフラの整備促進が課題と言える。

一方、現時点においては、準天頂衛星による測位システムが整備途上にあることや、国有林GIS上にある程度信頼できる位置情報が整備されていることを踏まえれば、当面は、この国有林GISを有効に活用しながら、国有林の生産請負箇所や林相が異なるなど区域界が明らかな箇所において、UAV及びGNSSを活用した収穫調査を進めていくことが、経費の効率的な使用、将来に向けた国有林の技術基盤を高めていく観点からも有効と考えられる。

更に、今後主伐が計画的に実施されていく中で、立木地に囲まれた伐採跡地が発生するが、このような箇所は区域界が明確であり、かつ、GNSSを測位する環境が良好であり、国有林に係る極めて正確(サブメーター級)なデジタル位置情報整備が効率的に行える箇所と言え、このような箇所から正確な位置情報を取得しつつ、国有林全体のサブメーター級デジタル位置情報インフラを整備していくことも有効と考えられる。

国有林に係るデジタル位置情報インフラの整備が収穫区域の特定、UAVによる立木調査の活用範囲にどのように影響するかを整理すると表3.5.1の通りとなる。

表3.5.1 国有林に係るデジタル位置情報インフラの整備の影響

国有林に係るデジタル位置情報インフラ整備状況	UAVによる収穫区域の特定	UAVによる立木調査の可能性
整備済み(サブメーター級の整備水準)	収穫区域を正確に特定できる	UAVによる立木調査が可能
整備済み(メータ級の整備水準)	収穫区域の正確性に欠ける	UAVによる立木調査は限定的(※)に可能 ※第三者の財産権侵害のおそれのない箇所(請負生産団地等)や、画像判読により区域を特定できる箇所(孤立箇所)等
未整備	収穫区域の特定が困難 但し、天然林内の孤立した人工林や明らかに林相の異なる林分については画像判読により区域特定は可能	UAVによる立木調査は限定的(※)に可能 ※立木調査可能画像判読により区域を特定できる箇所(孤立箇所)等

3.5.1.2 GNSS環境の有効性

現在、「みちびき」による準天頂衛星による測位システムの整備が進められ、まもなく位置情報を高精度に測位可能な環境が整備される。準天頂衛星による測位システムが完成すれば区域界を含めた国有林のデジタル位置情報インフラの整備は極めて効率的に行うことが可能と見込まれる。今回の検証では、メーター級GNSS環境のもとであっても、区域標示されたUAVによる高精細画像により区域の再現は可能であるとの結果を得たが、区域界探索に時間を要する、利用の都度区域界を再現しなければならないなど、課題は多く残る。一方で、国有林のデジタル位置情報インフラを基礎とした区域標示の利用者である立木買受者や請負事業者において、デジタル位置情報を有効に活用できる環境を有していない場合は、従来型の極印等の地物標示が必要となり、国以外の者においてもデジタル位置情報を利用できる環境の構築は重要な課題と言える。これを整理すると表3.5.2の通りとなる。

表3.5.2 立木買受者、請負事業者のGNSS環境と標示のあり方

立木買受者、請負事業者のGNSS環境	従来型区域標示(極印等地物標示)	区域標示された高精細画像と区域境界に係る位置情報	位置情報データのみ
GNSS環境なし	○	▲	▲
メーター級GNSS環境	○	△ (条件を選ぶ)	▲
サブメーター級GNSS環境	○	○ (区域標示画像不要)	○

注：○ 区域情報の共有が可能
 △ 区域情報の共有がある程度可能
 ▲ 区域情報の共有が不可能

3.5.2 国有林材の販売に係るデジタルデータの活用イメージ

今回検証を行った各種ICTを活用した収穫調査等で得られた情報は、それぞれデジタルデータ化されている。このデジタル化されたデータをクラウドを経由して国有材の販売に係る各段階で共有し、それぞれ段階で活かしていくことにより、国有林材の販売に係るIoT(Internet of Things：物のインターネット)を構築することが可能となる。

例えば、収穫調査で得られた単木毎の立木情報を、製材所が市場から把握した需要情報とIoTによりマッチングさせることで製品生産における採材に速やかに反映させることが可能になる。このように、国有林材の販売に係る各段階でのIoTの活用は、無駄のない、また、タイムリーな生産活動に誘導することとなり、ひいては林業全体の成長産業化に貢献していくものと言える。これを各段階全体で整理すると図3.5.1の通りとなる。

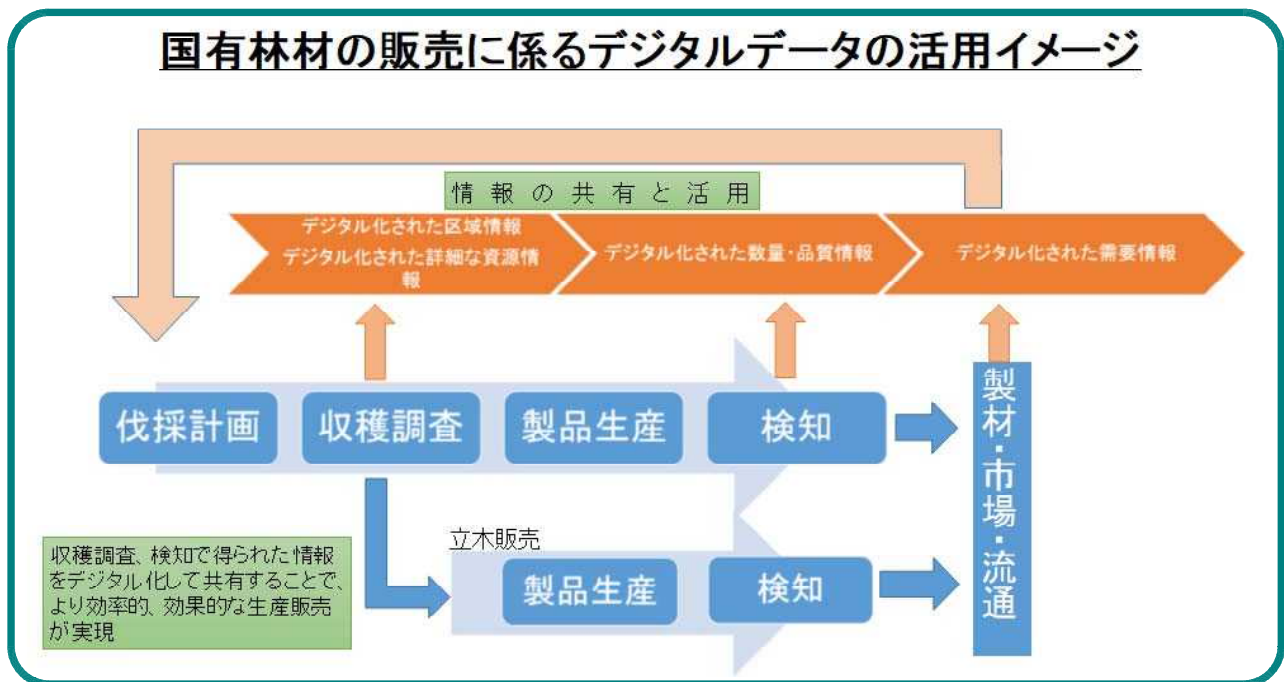


図3.5.1 国有林材の販売に係るデジタルデータの活用イメージ

3.5.3 UAVを活用した収穫調査等の今後の方向性について

今回の検証において、UAVを活用した収穫調査等を推進していくにあたって特に必要な取り組むべき事項として、以下が抽出された。

- ① 区域標示を地物標示からデジタル化された位置情報標示へ更新していくためには国有林に係るデジタル位置情報インフラの整備が必要である。
- ② 立木買受業者等国有林材の販売に係るデジタル情報の利用環境の整備が必要である。
- ③ UAVによる立木調査で使用される適合性の良い地域別回帰式の整備が必要である。

これらについては、実現不可能な課題ではないものの、その整備に一定の時間がかかると思われる。しかしながら、今回の検証では、精密な位置情報環境や正確な資源把握水準でなくともある程度の信頼性が確認できたところであり、林相が周囲と明確に区分される箇所や、国有林内の請負生産が毎年度接続して行われる団地等では、今回検証した収穫調査方法を試行的に実施しながら、将来の本格的なUAVによる収穫調査等の実用化に向け技術水準を高めていくことも重要である。

以上のことを整理すると図3.5.2の通りとなる。

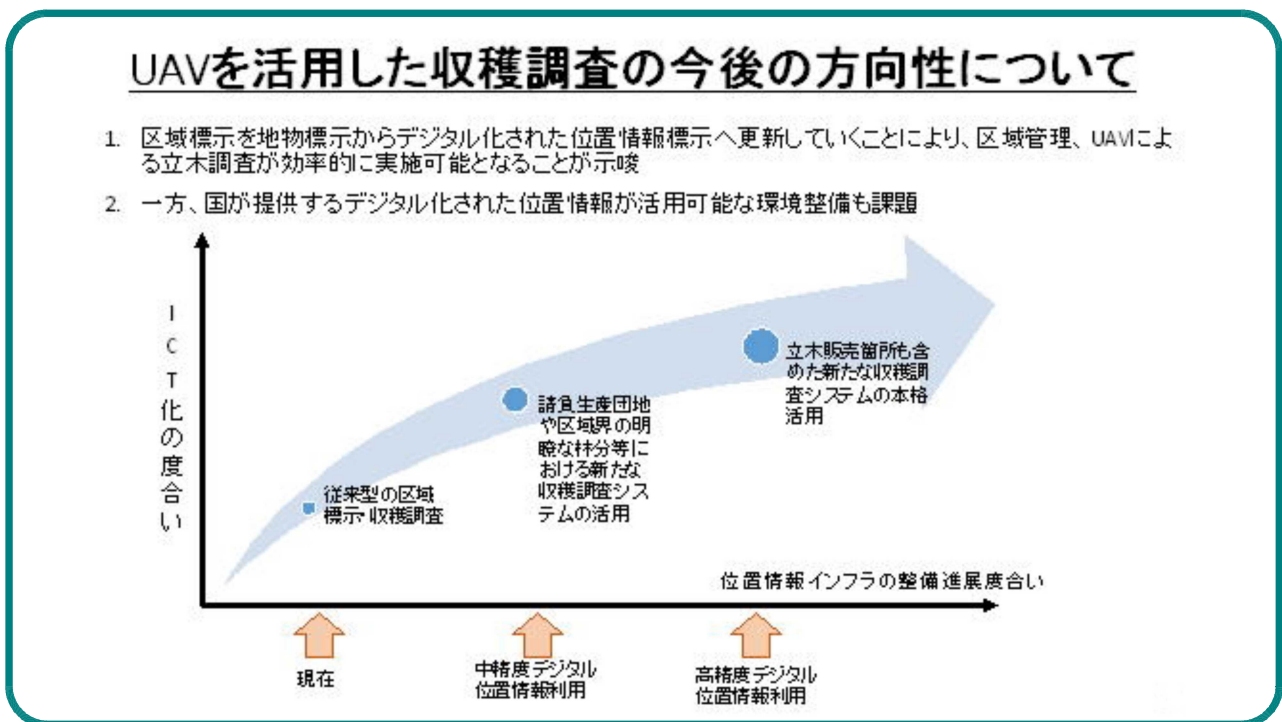


図3.5.2 UAVを活用した収穫調査等の今後の方向性

4 まとめ

国有林野事業においては、利用期に達した人工林の伐採、立木販売を中心とした収穫量の増大に対応して、収穫調査を効率的かつ適切に実施していくことが重要な課題となっている。

今回の検証においては、国有林の置かれた情勢の中で、各種のICT技術を活用して一定の効率的な収穫調査等が実施可能であるとの結論を得たところであるが、同時に各種課題も抽出された。

本格的にICT技術とIoTによる関係者間の情報の共有、各段階での業務や事業への反映は、国有林のみならず、わが国全体の林業活動においてもその必要性が高まっており、今回抽出された課題等に対応しつつ、更に技術の開発、環境の整備についても引き続き取り組んでいく必要がある。

国有林に係る収穫調査等において革新的な技術を積極的に利用していく意義は極めて大きく、わが国の林業の成長産業化を実現するためには、今回の検証で明らかとなった各種課題を計画的に解決しながら、実用的で効率的な収穫調査等の技術開発を推進するとともに、これら技術が、関係者間で有効に活用されることが重要であると言える。

国有林材の販売に係る収穫調査等の効率化手法検討委託事業報告書

平成 30 年 3 月

業務受託：一般財団法人日本森林林業振興会
〒112-0004 東京都文京区後楽一丁目7番12号
TEL：03-3816-2471
担当：石田祐二