

4.6 収穫調査報告に向けた検討

4.6.1 毎木調査結果との検証

毎木調査結果（調査区1は全数調査、調査区2及び3は樹高標準地調査）とUAVレーザ計測結果と胸高直径を求める条件①、条件②-1、条件②-2を用いて照査区内全域の比較検証を実施した。検証の結果、本数は調査区1～3で15%以内の精度で推定できた。合計材積は調査区1で誤差率10%以内、調査区2と調査区3で20%前後となった。

表 4.6.1 推定手法による調査区別の推定誤差率

| | 調査区1 | | | |
|-------|-------|-----|---------------------|-----|
| | 本数(本) | 誤差率 | 材積(m ³) | 誤差率 |
| 毎木調査 | 1550 | | 1091 | |
| UAV計測 | 1456 | 6% | 1035 | 5% |
| 条件① | 1509 | 3% | 1112 | 2% |
| 条件②-1 | | | 982 | 10% |
| 条件②-2 | | | 1038 | 5% |
| | 調査区2 | | | |
| | 本数(本) | 誤差率 | 材積(m ³) | 誤差率 |
| 毎木調査 | 2220 | | 1767 | |
| UAV計測 | 1886 | 15% | 1452 | 18% |
| 条件① | 1914 | 14% | 1366 | 23% |
| 条件②-1 | | | 1210 | 32% |
| 条件②-2 | | | 1457 | 18% |
| | 調査区3 | | | |
| | 本数(本) | 誤差率 | 材積(m ³) | 誤差率 |
| 毎木調査 | 1056 | | 925 | |
| UAV計測 | 973 | 8% | 771 | 17% |
| 条件① | 1026 | 3% | 829 | 9% |
| 条件②-1 | | | 721 | 21% |
| 条件②-2 | | | 725 | 21% |
| | 全体 | | | |
| | 本数(本) | 誤差率 | 材積(m ³) | 誤差率 |
| 毎木調査 | 4826 | | 3783 | |
| UAV計測 | 4325 | 10% | 3258 | 14% |
| 条件① | 4449 | 8% | 3307 | 12% |
| 条件②-1 | | | 2913 | 11% |
| 条件②-2 | | | 3220 | 3% |

4.6.2 胸高直径推定式の使用範囲

現行の UAV レーザ計測や航空レーザ計測では立木の胸高直径を直接計測することができないため、レーザ計測から得られた樹高や樹冠情報をもとに、立木の胸高直径を推定する回帰式（胸高直径推定式）を用いる必要がある。胸高直径推定式の利用に際して、スギやヒノキなどの樹木の成長は地域ごとに異なるため、ある地域で作成した推定式を別の地域にそのまま適用することには注意が必要である。3.9節や4.10節では全国各地のデータを集約した”一般式”を用いて本調査区の胸高直径を推定したが、現地のプロット調査データを使って作成した胸高直径推定式による計算結果と比べて推定精度が低いことがわかる。地域による違いのほかにも、植栽本数の違いや定性間伐や列状間伐といった施業方法の違いによる樹木の成長差が想定され、近隣の林木であっても推定式の適合具合が異なることが考えられる。

今後、レーザ計測による胸高直径の推定については推定式の適用範囲について検討を進めるとともに、各地域で実証的な調査を進めてデータを蓄積し、推定法を改善していく必要がある。

4.6.3 収穫調査区域の設定

収穫調査では区域を設定する必要があるが、区域の設定方法としては、GIS 上で区域設定する場合と現地で区域設定する2つのパターンが考えられる。1つ目の手法として GIS 上で区域を設定する場合、GIS 上で設定した地点と現場で設定する地点が同一であることを示す必要がある。GIS 上の地点は絶対座標を用いるために GNSS の利用が考えられるが、森林内では GNSS の精度が懸念される。

2つ目の手法として現場で区域設定する場合、UAV 写真測量、UAV レーザ測量、TS 測量、RTK 測量が挙げられる。表 4.6.2 にその特徴を整理したが、いずれの手法も測量結果を GIS 上で再現する必要があるため、位置ずれの問題を解消する必要がある。UAV 写真測量と UAV レーザ測量は UAV に内蔵される GNSS 受信機によって絶対座標が取得され、また遮蔽物がない森林域上空で位置を取得できることから高精度な位置情報の取得が期待できる。TS 測量では相対座標の情報となるため GIS 上で区域を設定する場合には、地上に目印がある場合はその目印に合わせる必要がある。目印がない場合は各測量地点で最低1地点は絶対座標の取得が必要である。既存の航空レーザ計測データを目印に合わせる場合、既存の計測データにその目印が存在するかまたは地形が変化してその目印の位置が変化していないかを確認する必要がある。目印がない場合には GNSS を利用して位置を合わせる必要があるが、やはり GNSS で取得する位置情報の精度が懸念される。RTK 測量では、絶対座標を取得するため、測量成果をそのまま GIS 上に使用できるが、電波が通っていない区域では使用できないという制約がある。

いずれの場合も区域設定を再現する際に GNSS が必要であるが、近年、2周波対応 RTK レシーバの登場や GNSS 受信機の精度向上した機器が登場しており、GNSS 位置情報の利用が期待される。

表 4.6.2 区域設定で選択される測量法の特徴

| 測量方法 | 取得方法 |
|-----------|---|
| UAV 写真測量 | UAV により空中写真を撮影し、TS の測量地点の相対関係を考慮して区域を合わせる。 |
| UAV レーザ測量 | UAV レーザ計測により、TS の測量地点の相対関係を考慮して区域を合わせる。ただし、UAV レーザ計測用の対空標識が必要である。 |
| TS 測量 | 相対座標のため、地上で最低1地点は絶対座標を取得する必要がある。 |
| RTK 測量 | 電波が捉えられる区域に限定される。 |

4.6.4 収穫調査復命書への取りまとめ

既存の航空レーザ計測データを使用して収穫調査復命書へのとりまとめ方法の検討をした。本手法によって取りまとめできる資料の一覧を表 4.6.2 示す。

表 4.6.2 航空レーザ解析データから作成可能な資料

| 調査項目 | UAV レーザ計測結果 | | 備 考 |
|------------|-------------|------|--------------------|
| | 単木情報 | 地形情報 | |
| 収穫調査復命書 | 一部可 | | 区域表示や伐採木表示は現地調査による |
| 立木調査野帳 | 一部可 | | 材種以外の入力が可能 |
| 野帳本数集計表 | 一部可 | | 材種以外の入力が可能 |
| 樹高調査野帳 | 作成可 | | |
| 樹高平均曲線図 | 作成可 | | |
| 樹材種別一覧表 | 一部可 | | 材種以外の入力が可能 |
| 測量野帳 | | | 現地実測が必要 |
| 実測図 | | | |
| 位置図・基本図挿入図 | | 作成可 | GIS で位置図作成 |
| 更新計画書 | | 作成可 | |
| 更新計画図 | | 作成可 | |
| 搬出系統図 | | 作成可 | |
| 搬出関係調査票 | | 作成可 | |

なお、航空レーザ計測データから立木の樹幹形状の計測や品質評価をすることは現状では期待できない。そのため、収穫調査復命書に記載する品質区分に関しては、標準地調査等を現地で実施して目視判定した結果を集約して、収穫調査復命書に取り込む必要がある。

5 UAV空中写真の画像解析による簡易な立木調査

平成30年度「国有林における収穫調査等の効率化手法実践体制構築委託事業」において、汎用ソフトを用いた SfM 解析では、汎用画像解析ソフトを活用する際に用いる各種パラメータの最適値について試行錯誤が必要であるといった課題が明らかになった。したがって汎用ソフトによる SfM 解析で抽出される樹頂点をそのまま利用して、立木本数や樹高を正確に測定することは容易ではないことが示唆された。

一方で、国有林の現場では UAV の導入が進められ、UAV 画像を活用した様々な業務改善の取り組みが行われつつあり、すでに解像度 5cm 程度のオルソ化された UAV 空中写真を職員実行で簡単に取得できるようになり、オルソ画像から目視で立木を判読し GIS 上に表示できることなどが報告されている。平成31年度林野庁業務研究成果として報告された宮崎森林管理署の室木・井(2019)は、オルソ化された UAV 空中写真から樹頂点を判読する簡易な手法により、高い精度で立木本数を認識可能との成果が発表された。これは単に立木本数を把握するというだけでなく、立木の空間配置も同時に把握できるという点で、森林調査の効率化・簡略化を図るための標本木のサンプリング法を開発する上で非常に有益な手法である。

従来、立木本数の把握と言えば、地上踏査によって多大な労力をかけて行う必要があった。具体的には、毎木調査において林分全体の立木を対象に胸高直径を調査することで立木本数を把握することになる。樹高については、「樹高標準地」あるいはサンプル木の任意抽出によって計測し、樹高曲線で推定する方法が主流である。一方、立木本数と立木標本に基づく「本数比例調査法」は実態としてほとんど行われて来ていない。しかしながら、比較的容易に立木本数及び立木配置を UAV による画像上で事前に把握することが可能であれば、適切な標本木を選択しておいて、それらを現地調査するだけで立木の径級や林分材積を把握するといった効率的な調査法となる可能性がある。

このような背景から、UAV 空中写真を GIS 上で目視判読により本数把握し、標本調査により得られる資源情報をもとに立木材積や品質区分等を求める簡易で実用的な調査法について検討することとしたものである。本報告では、この簡易な画像解析により立木の目視判読に基づいて標本木を選定して立木調査を行う一連の調査プロセスを「簡易画像解析法」と呼ぶ。

5.1 簡易画像解析法の基本的手順と課題

本事業における簡易画像解析法については、第1回検討委員会において、その方法論および想定される課題等について議論・意見交換し、具体的な進め方や留意事項について整理した。

5.1.1 簡易画像解析による立木調査法の基本的手順

簡易画像解析による立木調査法の手順については、第1回検討委員会で検討・整理され、図5.1.1に示す作業フローで検証を行うこととした。図中のメッシュ区分をした後、ケース1およびケース2と2通りの経路を想定しているが、これはサンプリング調査法として、無作為抽出および層化抽出の両方について調査手法ならびに推定精度を比較検討し、収穫調査としての実行可能性を検討して、最適な手法を選択することを想定したものである。

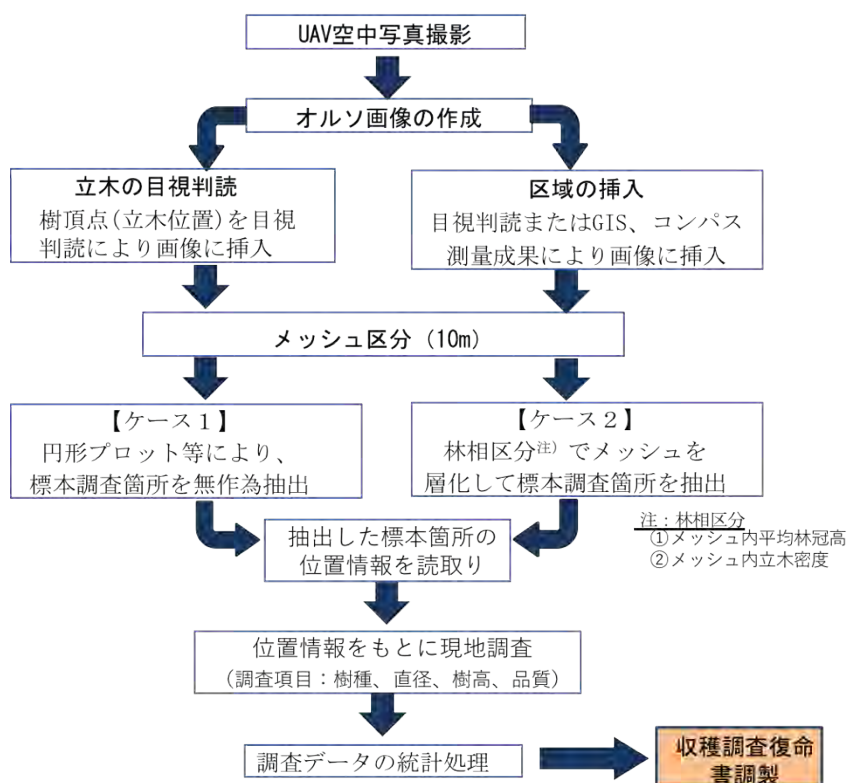


図5.1.1 立木本数をUAV画像上で把握する場合の調査手順

5.1.2 簡易画像解析による立木調査法で想定される検討課題

前項5.1.1の手順案に基づき、簡易画像解析による立木調査法実施時における各工程の具体的な作業内容を検討した。国有林の職員等が、収穫調査の実査命令から復命書作成に至る一連の本調査法を実施することを念頭に、想定される問題点とその解決方策や効率的な実施のために留意すべき点を考慮して、以下の検討項目を想定した。

- ① オルソ画像の取得・・・必要なオルソ画像を短時間で容易に生成すること
- ② 区域表示・・・地上の区域表示を画像に正確かつ容易に再現すること
- ③ 立木頂点の目視判読・・・適切に判読するとともに、判読不能な場合の措置を講じること
- ④ サンプリング調査・・・サンプリングにより精度の高い調査結果を得ること

また、標本抽出方法、調査精度等を検討するため、調査区1について地上レーザスキャナ（OWL：

アドイン研究所製)により立木の位置情報を取得し、これに毎木調査で取得した DBH および樹高情報を付与したデータベースを作成した。

5.2 適切なオルソ画像の取得

簡易画像解析に必要な画像を取得するためには、UAV 撮影飛行、撮影した連続画像の SfM 解析によるオルソ画像の作成といった工程が必要である。立木をオルソ画像から目視判読することが、調査精度を確保する上で最も重要であるが、そのためには適切なオルソ画像を確実に作成する必要がある、その前段として適切な空中写真の撮影と画像のオルソ化手法が、簡易画像解析法の成否を左右する。

本節 5.2 では、適切な撮影計画の実施手順ならびに撮影画像の適切な解析工程について検討する。

5.2.1 UAV 撮影飛行

通常、UAV によるオルソ画像取得のための連続写真の撮影は、専用の飛行プログラムによって行われる。今回の検討では UAV は DJI 社製 Phantom 4 Pro、飛行アプリは DJI 社製 DJI GS Pro (Ground Station Pro) を用いた。

オルソ画像作成に必要な連続写真を得るためには、**解像度** (地上画素寸法と関係がある。下記【参考 5.1】参照)、シャッター速度及び ISO 設定、オーバーラップ率及びサイドラップ率、撮影範囲等を適切に設定する必要がある。これらの設定が適切でない場合、判読に必要な鮮明なオルソ画像が得られないばかりでなく、オルソ化そのものが困難となるといった問題が生じる。また、現地の撮影条件によってもオルソ画像の画質は低下する。特に、強風時は立木の揺れに注意する。適切なシャッター速度の下では単独写真での「ぶれ」は発生しないが、複数枚の連続写真写真上では樹頂点が揺れるために「ぶれ」が発生し、オルソ画像の生成が困難となる。本事業では、様々な条件下で撮影飛行を行い、オルソ画像の画質等を分析して留意事項を整理した。

(留意事項 1) 適切な解像度の選択

立木頂点の読み取り、地上の表示等を確実に視認するためには少なくとも 10cm 程度以上の解像度が必要であり、5cm 程度あれば容易に読み取りが行える (Phantom 4 等に標準搭載されるカメラで飛行高度 150m 以内であれば必要な解像度は得られる)。なお、解像度を高めるためには、対地高度を低くする、画素数の大きいカメラを使用する、焦点距離の長いレンズを使用する等の選択肢があるが、SfM 解析に使用する写真枚数が増えれば、画像解析の時間が長くなるなど、PC の処理能力にも依存する点に留意する必要がある。



図5.2.1 解像度によるオルソ画像の画質の変化
対地高度による解像度の違いを画素数の変化によって疑似的に再現した。

【参考 5.1】撮影高度の計算

取得したい画像の解像度から撮影高度を計算するためには、必要とする地上画素寸法、使用するカメラのセンサーサイズ、画像サイズ、焦点距離(35mm換算ではない)の4つのデータが必要で、計算式は以下の通り。

(計算式)

撮影高度 = 画像サイズ(pixel) × 焦点距離(mm) × 地上画素寸法(m/pixel) / センサーサイズ(mm)

・ Phantom3 pro の場合：

横幅の画像サイズ 4000 pixel, 焦点距離 3.6 mm, 横幅のセンサーサイズ 6.3mm で, 地上画素寸法 0.01m/pixel の画像を撮影するためには, 撮影高度 は 22.85m となる。

・ Phantom4 pro の場合：

横幅の画像サイズ 5472 pixel, 焦点距離 8.8 mm, 横幅のセンサーサイズ 13.2mm で 撮影高度は 36.48m となる。

(なお DJI GS Pro を使用すれば、自動で撮影高度を計算することが可能)

* Phantom 3 pro の場合、地上画素寸法 0.01m とすると高度は 22.857m、0.02m で 45.714m、0.03m で 68.571m、0.04m で 91.428m、0.05m で 114.285m となる。

* Phantom 4 pro の場合、地上画素寸法 0.01m とすると高度は 36.48m、0.02m で 72.96m、0.03m で 109.44m、0.04m で 145.92m、0.05m で 182.4m となる。

(留意事項 2) 適切なオーバーラップ率、サイドラップ率の選択

一般に、SfM 解析ソフト上では、UAV で取得した連続写真から共通するポイントを特定し、3次元の点群を生成する。今回使用した SfM 解析ソフト Agisoft 社製 Metashape Professional では、樹冠表面等の起伏が激しい場合にオーバーラップ率あるいはサイドラップ率が低くなると、オルソ画像が適正に生成できないケースがあった。連続写真のオーバーラップ率、サイドラップ率については国土交通省のマニュアルでも示されているが、80 (90) % × 60%を確保することによって、適切なオルソ画像が取得できることが確認された。

自動飛行の設定ラップ率が対地高度の変化に対応して適正に補正されていない場合や、実際の UAV の対地高度が補正に用いた対地高度よりも小さい場合などでは、十分なラップ率が得られず、オルソ画像が適正に生成できない場合がある。一般に森林地帯は標高差が大きいため、オルソ画像の欠損、画像が流れるような「ぶれ」が、特に、撮影エリアの外縁部ほど発生しやすい(図 5.2.2)。

撮影高度を一定に設定する際は、対地高度が最も小さくなる地点で、必要なオーバーラップ率、サイドラップ率となるように設定する必要がある(図 5.2.3)。このため、撮影対象地の標高範囲、UAV 離発着地点の標高を事前に確認した上で、飛行プログラムにおけるオーバーラップ率、サイドラップ率を必要に応じて補正する等の対応が必要である。そのためには、対象区域の標高等を十分に把握するとともに、事前の撮影飛行と仮オルソ画像の作成を行って、オーバーラップ率を確認・調整しておくことが望ましい。



図5.2.2 オーバーラップ率が低い場合に生じやすいオルソ画像の乱れ
オルソ画像の周縁部等に発生しやすい「欠損」(左)や「ぶれ」(右)

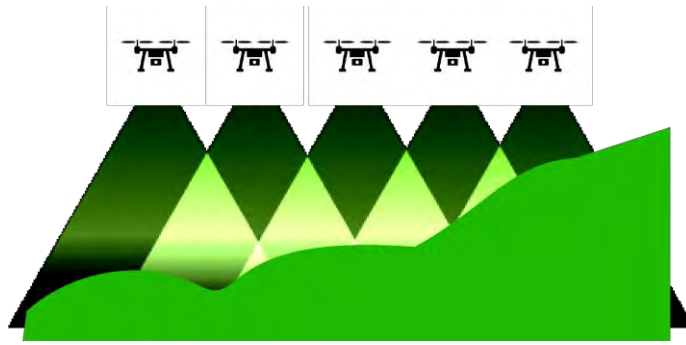


図5.2.3 標高差のある森林地帯でのオーバーラップ率の変化

（留意事項 3） 適切な撮影範囲の決定

留意事項 1 および 2 に留意したとしても、オルソ画像の外縁部から 60m 程度の範囲で樹冠形が流れるような現象「ぶれ」（図 5.2.2 右）が見られた。空撮画像の周縁部ではオーバーラップ率が十分ではないことが原因の可能性はある。飛行計画を立てる際は、対象林分の境界部の外側についても 1～2 ライン分のマージン（追加的な飛行ライン）を確保することが望ましい。

（留意事項 4） 適切な撮影環境

撮影時の気象条件は、適正なオルソ画像の生成に大きく影響する。特に、強風時は UAV の飛行姿勢が安定しにくく、写真そのものの「ぶれ」が生じやすい。このためシャッター速度を $1/600 \sim 1000 \text{sec}$ に設定するなどの対応が必要である。強風時は立木そのものが揺れて、連続写真間で「ぶれ」が発生する。この現象はシャッター速度だけでは回避できないため、撮影時に風速の強い時間を避けるなど気象条件への配慮も必要である。

また晴天時の直射光環境で撮影した場合、画像のコントラスト比が大きくなりすぎ、日陰の立木などでは画像判読がむずかしい場合がある。コントラスト比が適度に小さくなる、薄曇りの光環境下で撮影することが望まれる。

【参考 5.2】 本事業では、UAV は DJI 社製 Phantom4pro、オペレーションアプリケーションは DJI GS Pro (Ground Station Pro) を使用した。諸元等は以下のとおり。

| Phantom4proの諸元 | |
|--|--|
| 重量 | 1388g (バッテリーとプロペラを含む) |
| 最大飛行時間 | 約30分 |
| 動作環境温度 | 0～40 °C |
| GPSモード | GPS/GLONASS |
| カメラ | CMOS、有効画素数：2,000万画素 |
| レンズ | 視野角：84°、8.8mm/24mm (35mm判換算)、f/2.8 ～ f/11 オートフォーカス |
| ISOレンジ | 動画：100 ～ 3200 (自動)、100 ～ 6400 (手動) |
| | 静止画：100 ～ 3200 (自動)、100 ～ 12800 (手動) |
| メカニカルシャッター | 8 ～ 1/2000 |
| 電子シャッター | 8 ～ 1/8000s |
| 最大静止画サイズ | 3:2アスペクト比：5472×3648 |
| | 4:3アスペクト比：4864×3648 |
| | 16:9アスペクト比：5472×3078 |
| DJI GS Pro (Ground Station Pro)の概要 | |
| 自動飛行をiPad上で制御または計画するように設計されたDJI社製UAV専用アプリ タブレット上で撮影範囲、ラップ率等を設定し、UAV搭載のGPSにより自動飛行 必要な範囲の連続写真を撮影 | |

5.2.2 オルソ画像の作成

オルソ画像の作成に必要な画像解析ソフトウェアは各社から提供されているが、今回は Agisoft 社製 Metashape Professional を使用した。オルソ画像の生成では、3次元の点群密度が高いほど滑らかな立体像が再現されるが、画像解析の所要時間も多くなる。PC スペックによっては解析途中で解析作業を停止し、PC 自体がハングアップすることもある。

今回、点群密度決定のパラメータを変えて、生成されるオルソ画像の画質を確認したところ、オルソ画像を目視判読して個々の立木を識別する作業では、必ずしも高い点群密度が必要というわけではないことが判明した。試みに、点群密度決定のパラメータを最も低い値に設定してオルソ画像を生成したところ、目視判読に必要な画像が生成され、しかも SfM 解析の所要時間も短縮することができ、PC の解析停止も回避できた。

【参考 5.3】今回使用した画像解析用ソフトウェアは Agisoft 社製 Metashape Professional である。諸元及びシステム条件を示す。

| | |
|---|--|
| <p>【主要機能】 ポイントクラウドの生成 ポリゴンモデルの生成（テクスチャー含む） パノラマ写真の生成 高密度ポイントクラウドの自動分別（樹木や建物の除去） 測定座標と測定スケールでの出力（緯度・経度情報の出力） 距離・面積・体積の測定（写真に位置情報が含まれる場合） GCP(地上基準点)のサポート ターゲットマーカー（番号認識 or 非番号）の自動検出 マルチスペクトルイメージ（赤外線写真等）のサポート 座標を含んだオルソフォト(地形の平行投影写真)の出力 オルソフォトの境界線の編集 DEM データ (Digital elevation model) :DSM / DTM の出力 階層的なタイルモデルの生成と出力</p> | <p>【推奨動作環境】 Windows Windows: 7 SP 1以降/64bit Mac OS X Mojave以降 Linux OS Debian/Ubuntu, GLIBC 2.13以降 (64 bit) Intel Core i7 以降の CPU 32 GB 以上の RAM</p> |
|---|--|

5.3 区域表示の方法

区域表示に関して収穫調査規程準則では、「売払区域の境界は、伐開等によって明瞭にし、さらに必要に応じて境界線付近にある区域内外立木等に標識を付して、売払区域を明らかにしなければならない。」と規定されており、また「調査区域の周囲は、実測しなければならない。」と規定している。すなわち、調査区域は標識等による地物表示を基本としており、地物表示された区域をオルソ画像上にどのような手法で再現するかが課題である。

区域を精度良く再現する方法としては、上空が十分に開けた場所に地上基準点（GCP: Gound Control Point）を設置して、正確な位置情報を取得し、GCP から区域標示された標識をトータルステーション（TS）で測量し、その成果をオルソ画像上に再現する方法がある。しかし収穫調査としては、労力、コストの面から現実的ではない。このため、比較的精度が良く、しかも簡易に行えるコンパス測量を基本とした区域再現手法を検討した。

5.3.1 対空標識等の活用

対空標識を地上に設置し、これから計測したコンパス測量成果を GIS 上に表示したオルソ画像に正しく再現する手法を検討した。このとき、対空標識が正しい位置に再現されているかどうかをオルソ画像上で確認したところ、林床など立木の陰になって連続写真に映り込まない箇所が多くある場合は

地表の位置を正しくオルソ化できない現象（位置ずれ）が発生していることが判明した。

このような現象は、画像解析ソフトにおけるオルソ化のプロセスで、立木等の陰になって対空標識が写らない写真が混入することが原因と考えられたことから、UAV 搭載カメラの視野角（Phantom4 Pro の場合 84°）が確保できない場合は、連続写真に確実に映り込む頂点の明瞭な樹木を対空標識として活用することとした。また、対空標識とする樹木の位置をオルソ画像上で容易に見いだせるよう、比較的開けた場所にマーカーを配置し、オルソ画像に再現されたマーカーを手がかりに対空標識とした樹木を特定することとした。

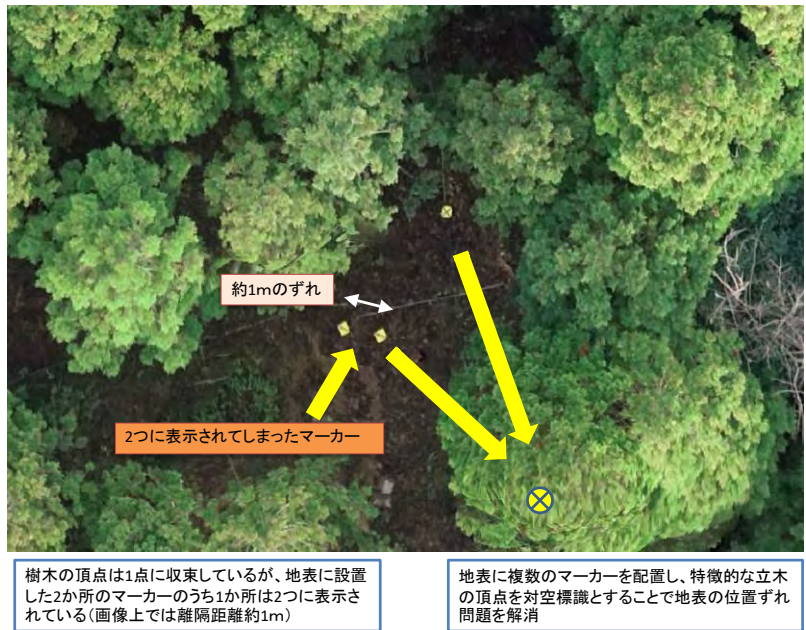


図5.3.1 オルソ画像の”ゆがみ”で生じる対空標識のダブリ
小さい黄色■は地表付近に設置した対空標識で、中央付近に写りこんでいる2つは元々1箇所だが、画像のゆがみで二重になっている。地表付近でこうした現象が生じやすい。

5.3.2 誤差補正

複数の画像を重ね合わせてオルソ画像を作成する際に、それぞれの画像に対する様々なゆがみが含まれているために、前節で述べたような正しいオルソ画像が作成されない。また、コンパス測量についても測量誤差（一般に閉合誤差 1/200 以内）が内在している。そこで、UAV 撮影画像の各種ゆがみをアフィン変換によって幾何補正することで、空間的な誤差を修正することができる。

本来であれば、対象区域の全体に散らばるように複数の対空標識を配置することが望ましいが、森林では明確に識別可能な対空標識を多数配置することは困難である。そこで、調査対象地の周囲測量地点の付近で、上空から明らかに識別可能な「標識木」4本以上を選んでこれらに対空標識として、アフィン変換によりコンパス測量成果を補正し、シェイプファイルを作成し GIS 上に区域を挿入する手法を採用することとした。図 5.3.2 に示したように、これらの作業により、概ね正しく調査対象区域をオルソ画像に再現することができたものと考えられる。



図5.3.2 アフィン変換によるオルソ画像の幾何補正
外周の標識立木を用いてアフィン変換することでオルソ画像の「ゆがみ」やコンパス測量に内在する誤差が解消され、区域測量成果を挿入できる。

5.4 樹頂点の目視判読

GIS に表示したオルソ画像上で目視により、立木の樹頂点を判読し、立木の位置、本数をカウントする方法については、室木・井 (2019) によって実施されており、本事業でも同様の方法で樹頂点の目視判読を行い、判読精度、判読時間を計測するとともに、目視判読にかかる課題及び解決方法を検討した。

5.4.1 効率的な判読方法

目視判読にあたって使用した GIS ソフトはフリーのオープンソースである QGIS3.4.14Madeira である（注：現在の長期安定版は QGIS3.10.3Coruña）。具体的な作業は、GIS 上にラスタレイヤとしてオルソ画像を表示、5.2.2 で示した方法により作成した区域シェイプファイルをベクタレイヤとして重ねて表示した。目視判読により区域内の立木を特定しポイントレイヤを作成する方法を採用した。

この結果、ヘクタール当たり 30～40 分程度で判読することができた（表 5.4.1）。また、習熟や工夫により作業時間の短縮、作業精度の向上が図られるものと推測された。判読された立木本数は、実本数に対する割合（認識率）が 2～5% 程度過小となるケースが多い。ただ調査区 3 では立木認識率が 88% と低かったが、その理由の一部で広葉樹が混生し被圧木が多かった（1 割程度）ことに起因していると考えられる。目視判読による立木の認識率については、室木・井 (2019) でもほぼ同様であり、実本数に対し画像読み取りで確認できた本数は、同数となった 1 例を除いていずれも過少であったことが報告されている。

表 5.4.1 目視判読結果と作業時間

| 調査区 | 林齢 | 面積 (ha) | 立木密度 (本/ha) | 実本数 (本) | 判読本数 (本) | 認識率 (%) | 所要時間 (分/ha) |
|-----|----|---------|-------------|---------|----------|---------|-------------|
| 1 | 68 | 2.43 | 638 | 1,550 | 1,496 | 96.5 | 30.5 |
| 2 | 58 | 2.17 | 1,023 | 2,220 | 2,171 | 97.8 | 39.5 |
| 3 | 53 | 2.16 | 489 | 1,056 | 934 | 88.4 | 33.2 |
| 4 | 54 | 1.91 | 1,064 | 2,033 | 1,924 | 94.6 | 39.5 |
| 5 | 46 | 1.73 | 666 | 1,152 | 1,118 | 98.0 | 37.6 |

オルソ画像上での樹頂点を効率的かつ極力正確に判読するための具体的対処法は、判読可能なオルソ画像の取得に加え、次の点に留意して作業することが望ましい。

- ① 立木の頂点だけでなく、樹冠と樹冠の枝葉のない空間、色調、樹冠の形状等に注目して判読する。（樹種の判読もある程度可能）
- ② 画像のズームインとズームアウトを活用することで判読しやすくなる。
- ③ 境界上の立木は、樹冠頂点と区域境界の位置関係を見てカウントの可否を判断する。
- ④ GIS ソフトのグリッド表示機能で 10m 程度のグリッドを表示させて、メッシュごとに立木をチェックすることで判読漏れを防止できる。

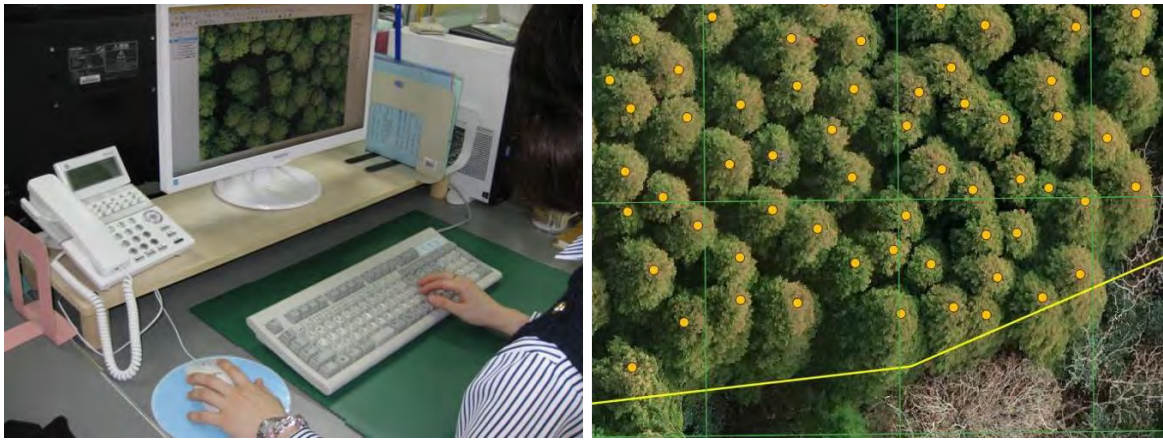


図5.4.1 オルソ画像からの目視判読

左：モニターでの目視判読作業

右：目視判読された立木の樹頂点

5.4.2 実本数に対して過少となる判読結果への対処

画像判読によって得られた立木本数は、すでに述べたように、毎木調査によって得られた立木本数に比べて、過少となる。この主たる原因は、図 5.4.2 に例示したように、上層木に隠されて画像上では確認困難な立木（被圧木）があるためと考えられる。



図5.4.2 オルソ画像だけでは目視判読が困難な被圧木上層木による被覆、個々の樹冠の密集、幹曲がりなどによる樹冠の変形など、様々な要因で上空からのオルソ画像では確認困難な立木（被圧木）がある。

目視判読による立木本数が実本数よりも少ないということは、本数比例を基本とする簡易画像解析による立木調査法では、収穫材積の見積にも影響する。この対応策として、被圧木の出現割合をもとに立木本数を調整する方法の有効性を検討した。現地での標本調査の際に、個々の標本木が上空から見て「被圧木」になり得るかどうか判断しておき、立木本数に占める被圧木の割合を算出し、目視判読本数を補正した（表 5.4.2）。

補正後の本数誤差率（表 5.4.2 の薄緑色の数値）に着目すると、標本抽出率（5%～20%）が高くなるにしたがい本数誤差率が低下することが確認された（図 5.4.3）。抽出率 15%以上ではすべての調査区で誤差率が 2%以下であり、抽出率が確保されれば概ね適切に補正できると判断された。

表5.4.2 調査区における立木本数の判読結果

| 調査区 | 名称 | 1 (伊豆) | 2 (伊豆) | 3 (伊豆) | 4 (茨城) | 5 (茨城) |
|--------|---------|---------|---------|----------|---------|---------|
| | 区域面積 | 2.43 ha | 2.17 ha | 2.16 ha | 1.91 ha | 1.73 ha |
| 林分全体 | 毎木調査本数 | 1,550 本 | 2,220 本 | 1,056 本 | 2,033 本 | 1,152 本 |
| | 目視判読本数 | 1,496 本 | 2,171 本 | 950 本 | 1,924 本 | 1,118 本 |
| | 本数誤差率 | -3.48 % | -2.21 % | -10.04 % | -5.36 % | -2.95 % |
| 5 %抽出 | 標本本数 | 80 本 | 109 本 | 59 本 | 107 本 | 56 本 |
| | うち被圧木本数 | 6 本 | 3 本 | 10 本 | 5 本 | 0 本 |
| | 補正総本数 | 1,617 本 | 2,232 本 | 1,144 本 | 2,018 本 | 1,118 本 |
| | 本数誤差率 | 4.32 % | 0.54 % | 8.33 % | -0.74 % | -2.95 % |
| 10 %抽出 | 標本本数 | 159 本 | 215 本 | 111 本 | 213 本 | 119 本 |
| | うち被圧木本数 | 9 本 | 3 本 | 16 本 | 10 本 | 6 本 |
| | 補正総本数 | 1,586 本 | 2,202 本 | 1,110 本 | 2,019 本 | 1,177 本 |
| | 本数誤差率 | 2.32 % | -0.81 % | 5.11 % | -0.69 % | 2.17 % |
| 15 %抽出 | 標本本数 | 230 本 | 331 本 | 161 本 | 321 本 | 174 本 |
| | うち被圧木本数 | 11 本 | 7 本 | 19 本 | 17 本 | 6 本 |
| | 補正総本数 | 1,571 本 | 2,218 本 | 1,077 本 | 2,032 本 | 1,158 本 |
| | 本数誤差率 | 1.35 % | -0.09 % | 1.99 % | -0.05 % | 0.52 % |
| 20 %抽出 | 標本本数 | 308 本 | 442 本 | 209 本 | 426 本 | 233 本 |
| | うち被圧木本数 | 16 本 | 7 本 | 19 本 | 19 本 | 9 本 |
| | 補正総本数 | 1,578 本 | 2,206 本 | 1,045 本 | 2,014 本 | 1,163 本 |
| | 本数誤差率 | 1.81 % | -0.63 % | -1.04 % | -0.93 % | 0.95 % |

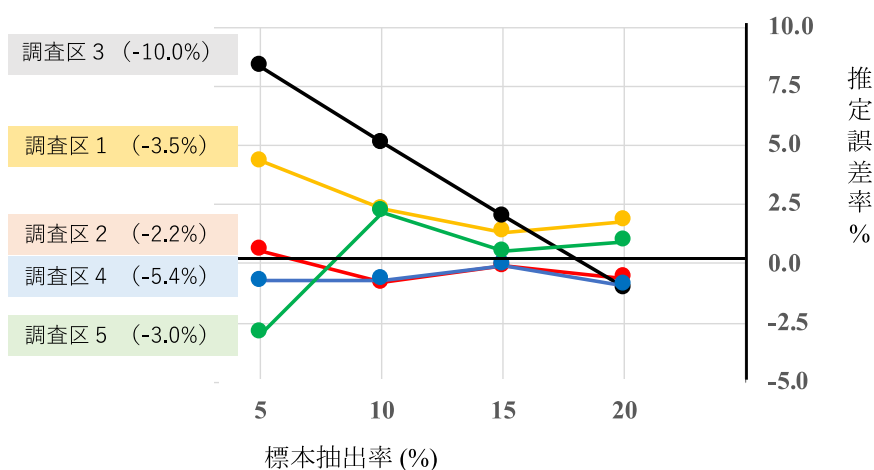


図5.4.3 被圧木本数調整後の立木本数の推定誤差率と標本抽出率の関係
 () 内は被圧木の本数調整なしの推定誤差率(%)で、いずれもマイナスである。
 本数調整後の推定誤差率は、標本抽出率が大きくなると推定誤差率は0に収束する。