

報告書

令和4年度

国有林野境界情報のデジタルデータを活用した
境界管理手法検討委託事業

令和5年3月

精密林業計測株式会社

林野庁

目次

1 事業概要	1
1-1 件名	1
1-2 事業目的	1
1-3 事業内容	1
1-4 事業期間	2
2 無人航空機を使用した境界巡視手法の検討	3
2-1 境界巡視手順の検討	3
(1) 使用データ及び基本方針の検討	3
(2) 飛行計画作成方法の検討	5
(3) 境界写真確認方法の検討	7
(4) 境界巡視実施報告書の作成方法の検討	8
(5) オルソ画像作成ソフトを使用しない場合の巡視方法の検討	9
2-2 使用ツールの検討	11
(1) 無人航空機の検討	11
(2) 飛行計画作成ツール(自動操縦アプリ)の検討	12
(3) オルソ画像作成ソフトの検討	14
2-3 各種設定の検討	15
(1) 飛行高度の検討	15
(2) 空撮設定の検討	18
3 無人航空機を使用した境界巡検及び境界検測予備調査手法の検討	20
3-1 林内飛行による境界巡検及び境界検測予備調査手法の検討	20
3-2 上空飛行による境界巡検及び境界検測予備調査手法の検討	22
4 国有林野における検証	23
4-1 実施場所	23
4-2 事前調査	24
(1) 概要	24
(2) 無人航空機離着陸場所の選定	25
(3) 対象境界標の確認	29
(4) 試験飛行	30
4-3 国有林野境界における検証	31
(1) 境界巡視について	31
(2) 境界巡検について	34

5 総合考察	35
5-1 従来調査手法との比較	35
5-2 まとめ	36

1 事業概要

1-1 件名

令和4年度国有林野境界情報のデジタルデータを活用した境界管理手法検討委託事業

1-2 事業目的

国有林野の適切な管理のためには境界管理業務が必要不可欠である。境界の管理は主に以下の3つの業務により実施されている。①図面の写し、コンパスや巻尺などを携行し、目測又は実測により境界標識の異状や境界が侵害されていないかを確認する「境界巡検」、②林道、歩道等を利用して可能な限り境界標に接近した地点又は対岸、尾根上等の地点からの遠望により国有林野の隣接地の伐採・開発等の状況を把握する「境界巡視」、③境界標の不明箇所を効率的に復元するために基礎資料の収集としてコンパス等により境界標の状況、不明標の発生状況等を調査する「境界検測予備調査」である。また、国有林野の境界は延長約11万km、点数約370万点に及ぶことから、境界管理業務は森林官等にとって多大な労力を要している。そのため、境界管理業務の効率化や省力化が求められている。

近年森林分野で活用の幅を広げているリモートセンシングは森林管理のデジタルデータ化や管理業務の効率化といった面から大きな期待が寄せられている。特に無人航空機は飛行頻度や操縦の自由度が高いことなどから国有林野でも導入されている。

本事業では境界管理業務の効率化及び省力化を目的として、境界情報のデジタルデータと無人航空機を組み合わせた境界管理手法を検討する。さらに手法検討の結果を基に、森林官等が業務で利用できる実用的なマニュアルを作成する。

1-3 事業内容

本事業では以下の内容を実施した。

(1)境界巡視手法の検討

無人航空機を使用した境界巡視手法について、無人航空機で取得するデータの検討や境界情報デジタルデータを使用した飛行計画の作成方法の検討を行った。飛行計画とは無人航空機の

自動操縦にあたって「飛行ルート」と「飛行高度、飛行速度、データの撮影方法」の設定の2項目をデータ化して機体に飛行方法を指示するものであり、本事業では①境界情報デジタルデータの座標値を使用して飛行ルートを作成する方法及び②巡視に使用するデータを取得するための飛行高度、飛行速度、撮影方法の設定値について最適なものを検討した。加えて、③撮影時における機体カメラの設定方法の検討、④境界写真判定方法の検討、⑤境界巡視実施報告書の作成方法の検討を行った。

(2)境界巡検・境界検測予備調査手法の検討

無人航空機を使用した境界巡検及び境界検測予備調査の手法について、林内飛行及び林外(上空)飛行による方法の検討を行った。

(3)国有林野においての検証

(1)、(2)において検討した結果について検証を行った。

(4)マニュアルの作成

以下の内容について、森林官等が容易に再現できるようなマニュアルの作成を行った。

- ①無人航空機の操縦方法
- ②関連法令等の遵守事項
- ③自動操縦における飛行計画の作成方法
- ④自動操縦の実施方法
- ⑤データを使用した境界確認方法
- ⑥境界巡視実施報告書に貼付する結果出力図の作成方法

1-4 事業期間

令和4年10月5日～令和5年3月20日

2 無人航空機を使用した境界巡視手法の検討

2-1 境界巡視手順の検討

(1) 使用データ及び基本方針の検討

無人航空機を使用して取得できるデータには動画と画像(静止画)の2種類がある。動画は1つのファイルで1回の飛行で調査を行う巡視区間の境界線の様子を全て収めることができる一方で、境界侵害のおそれがある箇所などの異状を発見した際にその位置情報を特定するのが難しいという短所がある。無人航空機による空撮で得られる画像には位置情報が付与されているため発見された異状箇所の位置情報特定は容易であるが、撮影地点ごとに画像ファイルが生成されるためデータ量が多く管理が煩雑である。また、動画、画像ともにどこに境界線があるのかを正確に把握することは困難である。

この解決策として、本事業ではオルソ画像の利用を提案する。オルソ画像とは連続して撮影された空撮画像を専用ソフトウェアで解析し、つなげて地図化したものである。このオルソ画像と境界情報デジタルデータをGISに読み込み、GIS上で画像と境界線を重ねて表示することで、境界を容易に確認できる。1つの巡視区間が1枚の画像になるようオルソ画像を作成することで、簡素なデータ管理が可能となる。また、地図としてGISに表示することで巡視区間全体の異状有無の確認を一目で行うことができ、異状箇所の位置情報特定が容易となる。

無人航空機の操縦方法には①送信機のスティックを操作して機体の動作を制御する手動操縦と、②あらかじめ飛行ルートや飛行高度、飛行速度、データ撮影方法の設定を飛行計画としてファイル化し、専用アプリを用いて機体を自動飛行させる自動操縦の2種類がある。オルソ画像を作成するには画像の重なりについての条件を満たした空撮画像の取得が必要であり、一定高度・一定速度で飛行しながら一定間隔で画像撮影を行うため、手動操縦による飛行ではオルソ画像作成の条件を満たす画像の取得は困難である。そのため本事業では、自動操縦アプリを使用して事前に境界点の座標値を使用した飛行計画を作成し、境界巡視用オルソ画像作成に適した設定を行う方法を採用した。

本事業で行う境界巡視の手順を図 2-1 に示す。

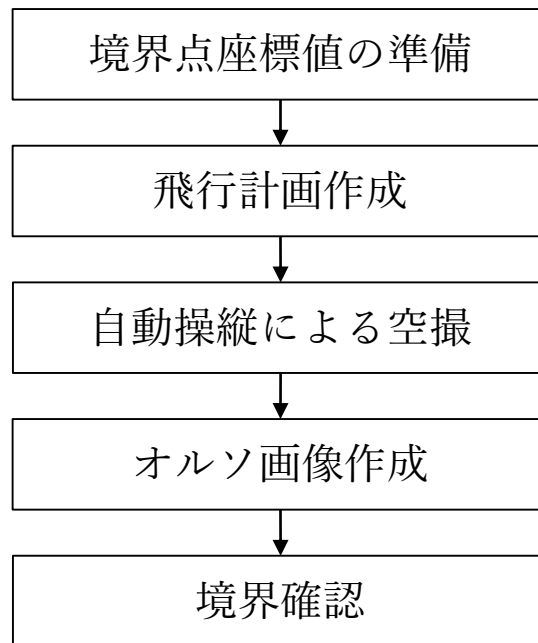


図 2-1. 本事業における境界巡視手順の概要

(2) 飛行計画作成方法の検討

無人航空機を使用した境界巡視において重要な事項は、境界の上で画像の撮影を行うことである。そのためには境界線にそって飛行する必要がある。

無人航空機の自動操縦においては、WAYPOINTの情報を使用して飛行計画を定義する。WAYPOINTとは飛行ルートの結節点のことであり、各WAYPOINTにおける位置情報(座標値)、飛行高度、飛行速度を指定すると、機体はそれらのWAYPOINT間を直線飛行する(図 2-2)。本事業では、境界情報デジタルデータの位置情報をアプリに読み込み、これを飛行ルートとして設定することとした。

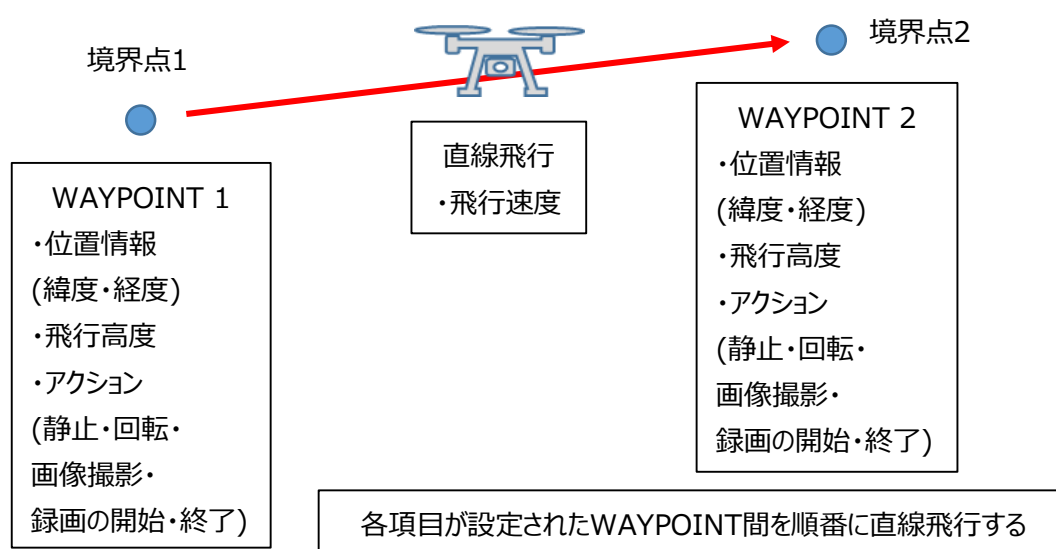


図 2-2. WAYPOINTのイメージ図

また、山林域では無人航空機の離着陸に適した地点が少ないため、離着陸場所を探索するための条件をマニュアルに明示したうえで、事前に離着陸場所を設定して当該地点で測位を行い、その位置情報を使用して、境界線までの往復を含めた飛行計画全体の安全性を確保できる内容をマニュアルに記載することとした。事前に現地に赴いて測位する時間を確保できない場合の手順として、国土地理院が提供する空中写真や標準地図をタイルとしてGIS上に表示し、離着陸場所の位置情報を飛行計画に追加する方法も記載したが、誤った地点を計画に追加したり、飛行の安全性に関わる注意点を見逃したりといったリスクがあるため、この場合は現地にて飛行前に安全の確認を行うこととしつつ、基本は現地にて事前確認及び測位を行い、得られた位置情報を使用する手順を推奨することとした。

飛行計画作成においては、境界情報デジタルデータをGIS上に表示して、標準地図や空中写真を確認しながら安全に飛行できる区間を設定することとした。オルソ画像と境界線を重ね合わせて確認する際にも境界情報デジタルデータをGIS上に表示する必要があり、シェープファイル

として整備されていると利便性が向上するため、事前処理として令和3年度の「国有林野境界情報のデジタル化のマニュアル」を参照して境界情報デジタルデータのExcelファイルをシェープファイルに変換する旨をマニュアルに記載した。

また、飛行計画を作成するにあたっては、飛行高度や飛行速度、画像撮影時のシャッター間隔といったパラメータを設定する必要がある。これらの設定値については2-3章のとおり検討し、その値を使用することとした。

作成される飛行計画の例を図2-3に示す。

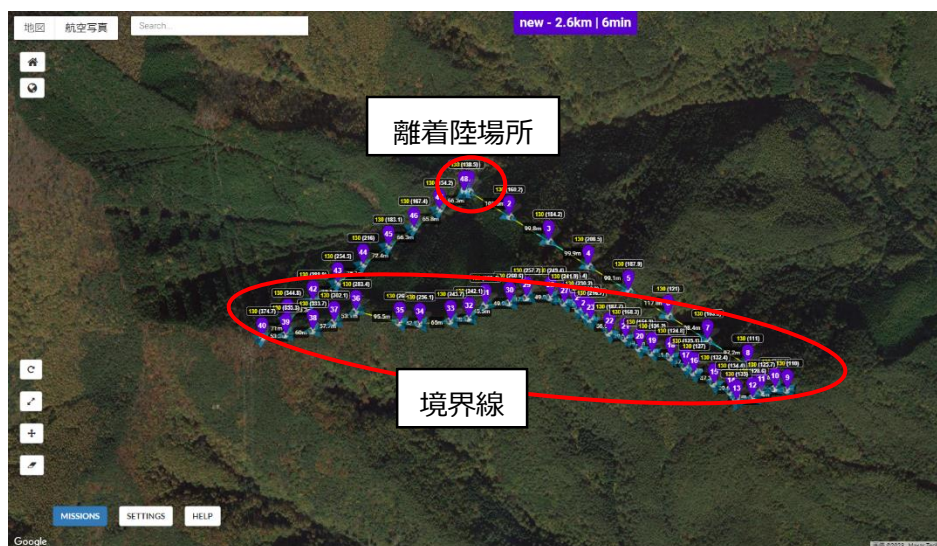


図 2-3. 作成される飛行計画の例

(3) 境界写真確認方法の検討

前述のとおり、本事業ではオルソ画像を作成してGIS上に表示し、境界情報デジタルデータと重ねて表示することで境界線付近の異状箇所の有無を確認する方法を採用している。しかし、境界情報デジタルデータは境界点の情報であるため、より正確な判読のためには境界線として表示する必要がある。

QGISのベクタ作成ツールの中には点をつないで線を作成するためのツール「点をつないで線に」が収録されているため、これを利用して境界情報デジタルデータから境界線を生成することとした。このツールではシェープファイルの属性を指定すると、各点の当該属性の情報を比較してその順番に線を引くことができる。境界情報デジタルデータには標識番号の情報が収録されているが、標識番号には漢字が含まれており、その順番を正確に指定するためには複雑な設定が必要になる。

そのため、マニュアルでは境界情報デジタルデータが境界点の並び順に情報を収録していることを利用し、QGIS属性テーブルの「フィールド計算機」機能を使用してデータの並び順に連番IDの属性を追加することで、属性から境界線を生成することとした。

また、境界の確認時に標識番号を表示させることで画面上での境界の特定が容易になるため、境界線の表示に加えて、標識番号を境界点に重ねて表示する手順についてもマニュアルに記載した。

上記の処理を行ったうえで、オルソ画像、境界線、境界点、標識番号の情報を画面上に表示し、縮尺を変化させながら境界の確認を行うこととした(図 2-4)。

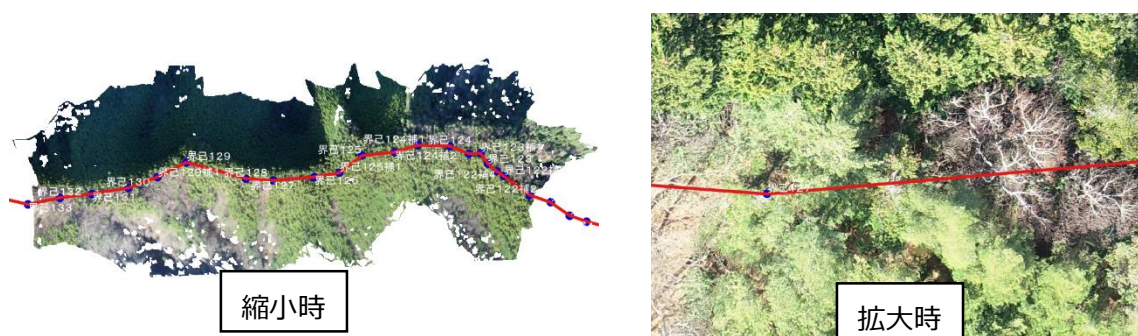


図 2-4. 境界確認時のGIS表示例

(4) 境界巡視実施報告書の作成方法の検討

境界情報デジタルデータ及び無人航空機を使用した境界巡視結果を実施報告書に記載する際には、データに基づいて巡視結果を示すことが重要である。これは従来の踏査や遠望による巡視ではなし得なかったことであり、より客観性や正確性をもった報告書が作成できるようになる。境界上で取得したオルソ画像と境界線を重ねて表示した状態を図として報告書に貼付することで、データに基づいた巡視結果を視覚的に示すことができる。

以上の事項を踏まえて、QGISの印刷レイアウトを使用してオルソ画像及びそれに重ねて表示された境界線に、標識番号や凡例、方位記号などを追加して巡視結果出力図として保存する方法をマニュアルに記載した。作成される巡視結果出力図の例を図2-5に示す。

また、データ管理を容易にすることで報告書作成の効率化も期待できるため、保存するファイル名の規則をマニュアルに記載し、オルソ画像のファイル名から調査年度及び巡視区間(国有林名、林班、標識番号)が確認できるようにした。

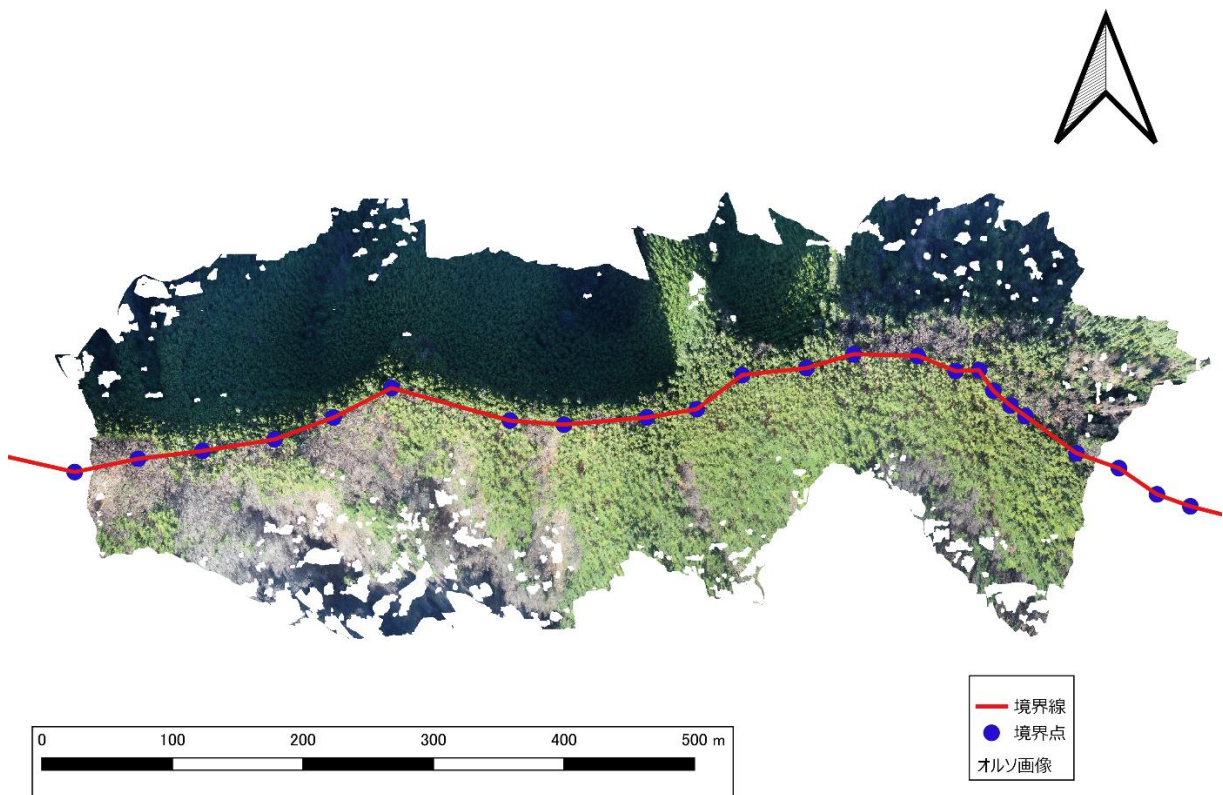


図 2-5. 作成される巡視結果出力図の例

(5) オルソ画像作成ソフトを使用しない場合の巡視方法の検討

オルソ画像作成のためには、専用ソフトウェアを使用しStructure from Motion(一般的にSfMという略称で呼ばれる)と呼ばれる解析を実行する必要がある。SfMは隣接する画像間で一致する特徴点を解析して被写体の三次元形状を復元する処理であり、解析を行うにはソフトウェア導入の有無や、PCのスペックによっては処理ができない、時間がかかるといった点が課題である。森林管理署や森林事務所にはSfMソフトやハイスペックPCの導入台数が少ないため、オルソ画像を使用した境界巡視を推奨手順とする一方で、オルソ画像作成を伴わない簡易的な境界巡視方法についても検討を行った。

オルソ画像を作成しない場合、使用するデータは画像(オルソ画像ではなく単写真)もしくは動画のいずれかが選択肢として考えられるが、(1)項で示したように、異状箇所が存在した際の位置情報特定が容易であるというメリットから、本事業ではオルソ画像の作成ができない場合には画像を使用して境界の確認を行うこととした。

オルソ画像を作成する場合には重なりをもった画像を連続的に撮影する必要があるが、単写真で判読を行う場合には画像の重なりは不要であるため、重複範囲を減少させた状態で画像を撮影し、データ容量を削減するのが望ましい。そのため、飛行計画作成時の画像撮影設定において、特定の地点で自動撮影を行うように設定することとした。

境界巡視において重要なのは、画像のどこが境界に該当するかという点である。境界が特定できない状態では、異状点が発見されたとしてもそれが境界を侵害しているのか否かという点が判断できない。機体は飛行計画で計画したとおり境界点を順に結んだ境界線上を飛行するため、基本的には画像の左右方向における中心線が境界線と一致するが、境界線は各境界点で屈曲しているため境界点を特定できないと境界線の屈曲を把握することができず、誤判読の原因となり正しく巡視を行うことができない。

そのため、本事業では、取得された画像の中心点の位置が境界点となるよう、飛行計画において境界点上で画像を撮影するよう設定することとした。この設定において、機体は①前の境界点から境界線上を直線飛行して境界点に到達後、②画像を撮影してから③方向を転換し、④次の境界点に向けて直線飛行を行う。機首方向が画像の上側に撮影されるため、境界点上で方向転換する前に撮影された画像においては、画像の中心点より下側は左右方向における中心線が飛行してきた軌跡(境界線)と一致する。画像の上半分については境界点から次の境界点に向けて伸ばした直線が境界線となるため、境界線の屈曲角度を計測して画像の中心点からその角度の方向に直線を引くことで仮想境界線を作成することができる(図 2-6)。境界線の屈曲角度の計測は、①境界点の位置情報をGIS上に表示し、②GISの角度計測ツールを起動して③(1)対象境界点の一つ前の点→(2)対象境界点→(3)対象境界点の次の点を順番にクリックして対象境界点と前後の点を結んだ2直線がなす角度を計測するという方法で行うこととした。

当該画像が撮影された境界点については、画像が撮影された順番と巡視区間内の境界点の順番を比較することで特定することとした。画像ファイルのプロパティから確認できる撮影位置の座標値と、境界情報デジタルデータに収録された座標値とを比較することによって画像が撮影された境界点の特定結果に誤りがなかったか確認を行うことも可能である。

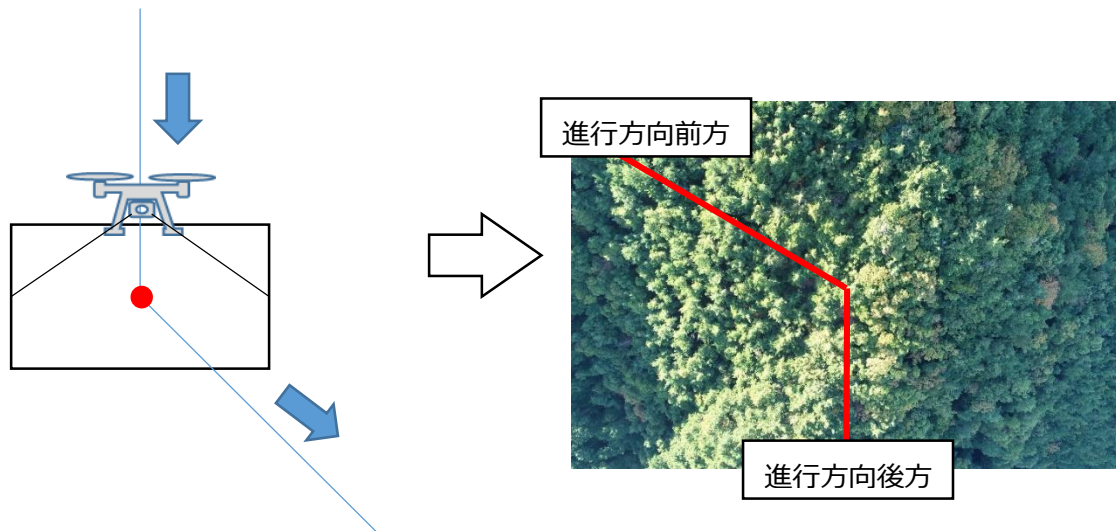


図 2-6. 仮想境界線のイメージ図

2-2 使用ツールの検討

(1) 無人航空機の検討

本事業は国有林野において森林官等が行う境界管理業務を、無人航空機を使用して効率化する方法を検討するものであるため、調査に使用する無人航空機については既に森林管理署や森林事務所において保有している機種を活用するのが望ましい。よって、本事業では森林管理署や森林事務所で使用実績のあるDJI社のPhantom 4 Proを使用した方法を検討することとした。DJI社Mavic 2 Proも森林管理署や森林事務所で使用されているが、カメラの焦点距離がPhantom 4 Proと比較して短いため1枚の画像に写る範囲も狭くなり同一区間の撮影におけるオルソ画像作成に必要な画像の枚数が多くなる。データ軽量化の観点から、本事業では使用する無人航空機をPhantom 4 Proとし、マニュアルにおける飛行計画の設定値についても同機種に対応したものを基準として記載することとした。また、他機種を使用して境界巡視を行う場合も考慮し、機体カメラのスペックに依存する飛行高度や飛行速度、シャッター間隔のパラメータについてはその計算方法を詳細にマニュアルに記載することとした。

また、無人航空機の飛行を行う際に送信機と接続するタブレット端末に関しても、導入数が多いiPadを採用し、マニュアルに掲載するアプリケーションの画面はiOS版のものとした。

(2) 飛行計画作成ツール(自動操縦アプリ)の検討

自動操縦アプリにはいくつかの種類があり、DJI社純正のDJI GS PROのほか、サードパーティ製のアプリ(DJI社以外が提供する純正でないアプリ)も複数提供されている。GS PROではオルソ画像を作成したい範囲を設定すれば自動的に飛行計画を作成できるが、一定高度での水平飛行しか対応していないため、境界巡視の対象となる国有林野の境界線の大半は山間部に存在しており、水平飛行のみでは地形の変化に対応できず、地面や立木との接触、航空法の許容範囲(150m)を超えた高度での飛行といったリスクが極めて高い。一方、サードパーティ製アプリの中には地形の変化に対応した山間部での飛行計画を作成できるものがある(図2-7)。

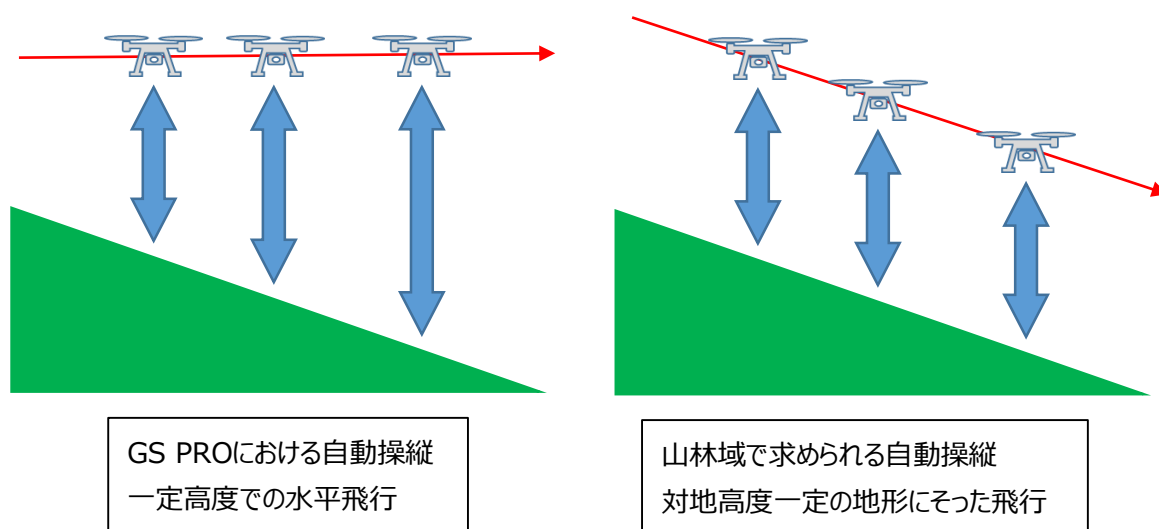


図2-7. 自動操縦アプリによる飛行方法の違い

そのため本事業では、DJI社純正アプリのGS PROではなくサードパーティ製のアプリを使用して飛行計画作成及び自動操縦を行うことを検討した。

アプリの選定においては、①地形の変化に対応できること、②位置情報を読み込めることを条件とした。これらの条件に合致するものの中から、最も安価なアプリとして、VC Technology社のLitchiを採用した。LitchiにはWebページで飛行計画を作成するためのブラウザ版アプリとタブレット端末にダウンロードして自動操縦に使用するタブレット版がある。ブラウザ版はユーザー登録すれば無料で使用できるが、タブレット版は買い切りで購入する必要がある。

ブラウザ版はCSVファイルやKMLファイルを飛行ルートのWAYPOINTとして読み込むことが可能であり、作成した飛行計画をクラウドに保存することができる。また、WAYPOINTごとに機首方向、写真や動画の撮影設定のほか、その地点における地面からの高さの設定ができるため、山間部における自動操縦も可能な飛行計画を作成できる。タブレット版ではタブレット端末をインターネットに接続してアカウントにログインすることで、クラウドに保存された飛行計画を読み込むことができる。そのため、あらかじめ事務所でタブレット端末をインターネ

ットに接続して飛行計画の読み込みを行うことで、現地では計画の呼出しとカメラの設定のみを行えば事前に作成した飛行計画通りに自動操縦を行うことができる。また一度作成した飛行計画は何度でも使用可能であり、同一ルートで定期的に行う境界管理業務との親和性も高い。

以上を踏まえて、Litchiを使用した飛行計画作成及び自動操縦の手順をマニュアルに記載することとした。

(3) オルソ画像作成ソフトの検討

オルソ画像を作成するためにはSfM解析¹を行うための専用ソフトウェアが必要となる。主要なSfMソフトウェアとして①Agisoft社「Metashape」と②Pix4D社「Mapper」が挙げられるが、本事業では森林管理局での導入実績を踏まえ、「Metashape」を採用し、その操作方法をマニュアルに記載することとした。

SfM解析は計算量が多いため、スペックの高いPCの使用が推奨されており、例えば公式推奨スペックでは使用するPCのメモリは32GB以上と記載されている。メモリが32GB未満のPCで処理を行うと計算に膨大な時間がかかり、場合によっては処理中にソフトが強制終了することも懸念されるため、メモリ16GBかつGPU²の搭載がないPCにMetashapeをインストールして、本事業で実際に撮影した境界上の画像113枚からオルソ画像の作成を行い、処理が可能であるかを検証した。その結果、オルソ画像作成手順において最も多くの計算時間を要する「高密度クラウドの構築」³処理において11時間30分を要したものの、他の処理においては長くても30分以内に終了したため、メモリ16GBのPCでもソフトが強制終了することはないと、境界巡視のためのMetashape導入は可能であると結論付けられた。なお、メモリが32GBのPCにおいて処理を行う場合にも各段階においてある程度の時間を要するため、「高密度クラウドの構築」以外の過程においてはメモリ32GBのPCを使用した場合と比較して所要時間に大きな差はないとした。「高密度クラウドの構築」については時間がかかり、その間PCの画面が占有され他のソフトが使用できなくなるため、バックグラウンド処理を行いPCの画面を解放する方法についてもマニュアルに記載した。

¹ SfM解析：Structure from Motionの略。対象物について様々な視点から撮影された大量の画像を解析して対象物の三次元形状を復元する技術のこと。

² GPU：Graphics Processing Unitの略。PCにおいて画像計算を行う領域であり、これがあるとMetashapeでの処理を高速化できる。

³ 高密度クラウドの構築：MVS(Multi View Stereo)という処理により、復元された三次元点群を増幅する処理。オルソ画像を作成する際に重要な処理である。

2-3 各種設定の検討

(1) 飛行高度の検討

無人航空機で空撮を実施する際には、飛行高度によって1枚の画像に写る範囲や分解能である地上画素寸法が変化する。飛行高度が高くなると画像に写る範囲は広くなり、地上画素寸法は大きくなる(画像は粗くなる)。反対に飛行高度が低くなると地上画素寸法は小さくなるため詳細が確認できるが、画像に写る範囲は狭くなる。画像に写る範囲が広くなれば境界線付近の状況を俯瞰的に確認することが可能であることに加え、同じ距離で撮影を行う場合に必要な画像の枚数が少なくなるためデータ容量を低減することができる。地上画素寸法については値が大きくなると画像が粗く不明瞭になるので、境界線付近の異状を正確に把握できなくなる可能性がある。飛行高度の検討にあたっては画像に写る範囲と地上画素寸法を基準とし、①画像に写る範囲が広く、②地上画素寸法が大きくなりすぎない(異状箇所を問題なく識別できる程度)という条件に合致する飛行高度の値を境界巡視における最適高度とした。

画像に写る範囲と地上画素寸法の値はカメラのセンサーサイズと焦点距離、画素数、機体の飛行高度から計算できるため、各高度における値をそれぞれ計算し、境界巡視に最適な飛行高度を検討した。

飛行高度については航空法において制約があり、機体直下の地面からの高さが150m以内となるように飛行させる必要がある。また、境界巡視において無人航空機の飛行を行う場所はほとんどが森林域であるため、立木への接触リスクを回避するために一定以上の高度で飛行を行う必要がある。ここでは標準的な高木の樹高を30mとして検討を行った。

2-1 (1) 章(P3)で検討した通り、本事業では境界情報デジタルデータの座標値を活用し、境界管理業務を効率化するための手法として自動操縦アプリを使用した。自動操縦においては飛行ルートの結節点であるWAYPOINTの座標値や飛行高度を設定する。無人航空機は設定されたWAYPOINT間を直線飛行するため、WAYPOINTが設定されていない直線飛行区間においては地形の変化によって機体と地面との距離が変化する。加えて、30mより高い樹高の立木も存在することや、飛行計画の高度設定に使用する標高データに誤差がある可能性を考慮し、これらの飛行の安全を担保できる距離として航空法における制約及び林冠からの距離に対してそれぞれ20mずつ余裕をもって、50m～130mの範囲において飛行高度の検討を行った。

1枚の画像に写る範囲については、画像の縦方向の長さや横方向の長さで評価できる。無人航空機のカメラにおいては画像の縦方向は機首方向の軸、横方向はそれに直交する軸である。1枚の画像に写る範囲の縦方向の長さ(m)はセンサーの縦方向の長さ(mm)×飛行高度(m)÷焦点距離(mm)という算式で、横方向の長さ(m)はセンサーの横方向の長さ(mm)×飛行高度(m)÷焦点距離(mm)という算式で、それぞれ求めることができる。地上画素寸法(cm)につ

いては、画像に写る範囲の縦(横)方向の長さ(m)÷センサー縦(横)方向のピクセル数(pix)×100
 という算式で求めることができる。画像に写る範囲及び地上画素寸法の計算におけるイメージ
 図を図 2-8に示す。本事業では境界巡視用の無人航空機としてDJI社Phantom 4 Proを使用した
 が、この機体のカメラのスペックは表 2-1のとおりであるため、この数値を使用して計算を行う。20
 m間隔で飛行高度を仮定し、画像に写る範囲と地上画素寸法を計算した結果を表 2-2に示す。

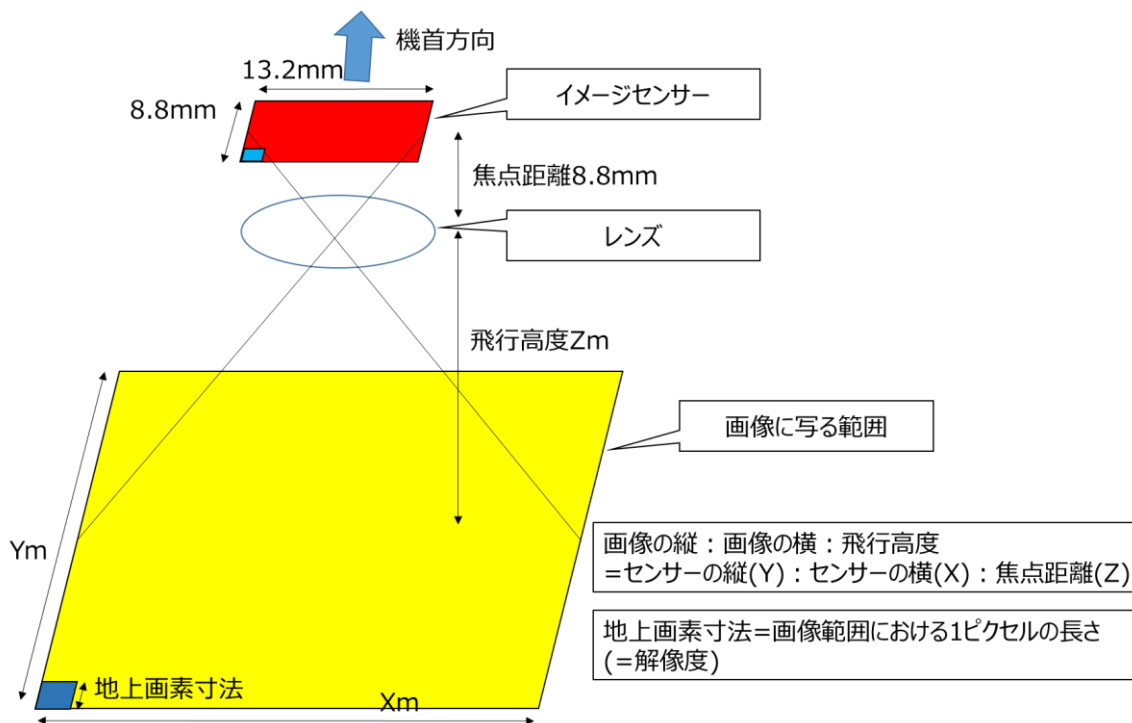


図 2-8. 画像に写る範囲及び地上画素寸法計算のイメージ図

表 2-1. Phantom 4 Proのカメラスペック

項目	値
センサーサイズ	13.2mm × 8.8mm
焦点距離	8.8mm
ピクセル数	5472 × 3648pix

表 2-2. 各飛行高度における画像に写る範囲と地上画素寸法

飛行高度(m)	画像に写る範囲(m)	地上画素寸法(cm)
50	75 × 50	1.37
70	105 × 70	1.92
90	135 × 90	2.47
110	165 × 110	3.02
130	195 × 130	3.56

これらの事項を勘案し、飛行高度については画像に写る範囲が広く、境界線付近の様子を俯瞰して確認でき調査に必要なデータ容量の低減も可能な高度130mを採用した。高度130mの場合でも地上画素寸法は3.56cm確保されており、異状箇所の識別は問題なく行えると判断した。

以上の結果より、無人航空機を使用した境界巡視には飛行高度130mを推奨することとした。

(2) 空撮設定の検討

前章の検討結果(P15)により飛行高度を130mとすることが決定したことで、空撮画像に写る範囲が確定した。これにより、オルソ画像作成時に必要な画像の重なり条件を満たすための撮影設定が計算できるようになる。

オルソ画像作成のためのデータ取得時に設定が必要となるのは、無人航空機の進行方向(縦方向)における画像の重なりであるオーバーラップと、それに直交する横方向の重なりであるサイドラップの2種類のパラメータであり、これらの設定に誤りがあると、画像の重なりが不足してオルソ画像が作成できなくなる。本事業における境界巡視では境界線上のオルソ画像の作成のみで目的が達成できるため、サイドラップについては考慮する必要はない。したがってオーバーラップを適切に設定することがオルソ画像の作成失敗を防ぐためには重要になる。

オルソ画像を作成するためには前後の画像でオーバーラップ率を80%以上とすることが推奨されている⁴。すなわち、ある画像とその直前に撮られた画像に写っている範囲の縦方向の長さのうち80%以上が重複していることが重要であり、オーバーラップを確保するためには画像撮影位置の間隔が画像に写る範囲の縦方向の長さの20%以内である必要がある(図 2-9)。

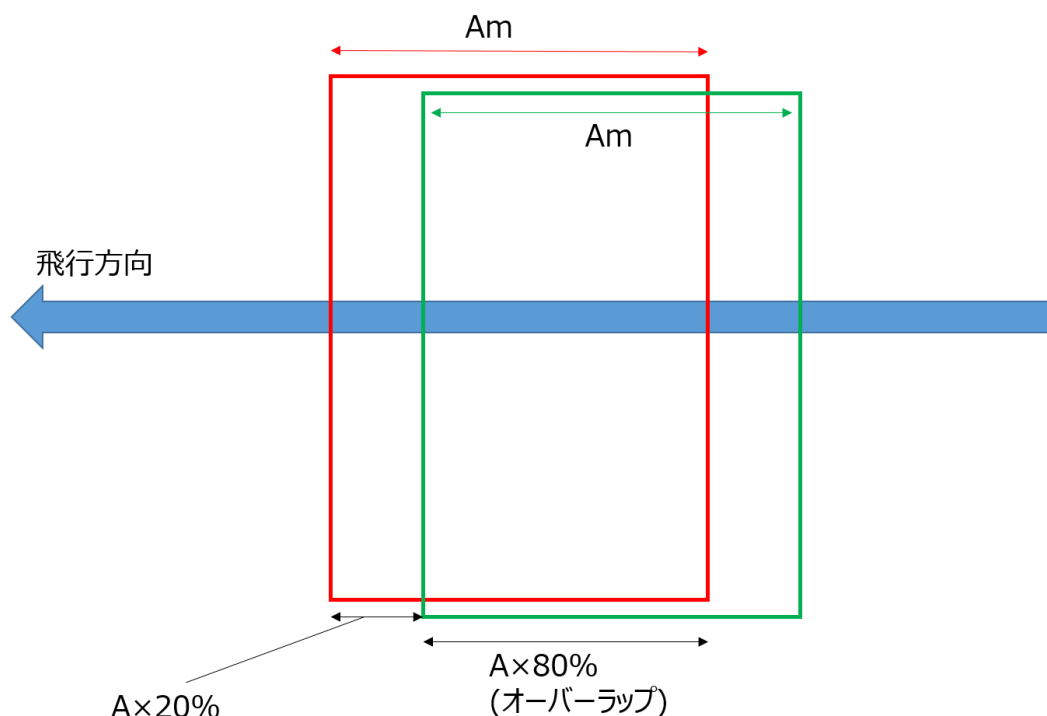


図 2-9. 画像のオーバーラップのイメージ図
(画像の縦方向の長さをA、オーバーラップ率80%とする場合)

⁴ 国土地理院「UAVを用いた公共測量マニュアル」、<https://www.gsi.go.jp/common/000186712.pdf> (2023年3月13日閲覧)

撮影位置の間隔と飛行速度、シャッター間隔の関係は、撮影位置の間隔(m)=飛行速度(m/s)×シャッター間隔(s)という式で表される。同じ撮影位置の間隔でもシャッター間隔が長くなると飛行速度を遅く設定する必要がある。無人航空機のバッテリー消費スピードは機体の速度を速めてもあまり変化しないため、限られたバッテリー持続時間の中で効率的に調査を行うためには、飛行速度を上げて少しでも長い距離を飛行させるのが望ましい。飛行速度を上げるためにはシャッター間隔を短くする必要があるため、機体スペック上の最短間隔である2秒に設定することとした。

また、飛行高度130mにおける画像に写る地上範囲の縦方向の長さは、前章(P15)に示したとおり130mとなる。ただし、この長さは飛行高度から地表面を撮影した場合の長さであり、森林域では林冠の分だけ画像に写る範囲が狭くなるため、地表面の範囲の数字で計算してオーバーラップ率80%とした場合、実際に画像に写る林冠部分では重なりが少なくなりオルソ画像が作成できなくなる可能性がある。林冠部分の高さを正確に把握して適切なパラメータを計算することが望ましいが、各対象地に対して毎回植生高を調査しパラメータ計算を行うことは余計な労力がかかるため現実的ではない。そこで本事業では、すべての飛行対象地で地表面におけるオーバーラップ率を85%として一律に計算することで画像の重なりを確保することとした。

必要な撮影位置の間隔は、前後の画像とのずれ(重複していない部分)の長さと一致するため、 $130\text{m} \times (100-85)\% = 19.5\text{m}$ と求められる。シャッター間隔2秒で撮影位置の間隔19.5mを達成するために必要な速度は $19.5 \div 2 = 9.75(\text{m/s})$ であり、扱いやすい整数値に近似すると秒速10mとなる。これを時速換算すると $36000\text{m/h} = 36\text{km/h}$ となる。したがって飛行高度130m、シャッター間隔2秒の場合には飛行速度を36km/h以下に設定すればオルソ画像作成に必要な空撮画像を取得できることになるため、本事業ではシャッター間隔2秒、飛行速度時速36kmを境界巡視における自動操縦設定の推奨値とした。

なお、林冠の高さを30mと仮定して検証すると、機体から林冠までの距離は100mであり、画像に写る範囲の縦方向の長さは100mとなる。時速36km(=秒速10m)での飛行で2秒間に進む距離は20mであり、これは前後の画像における重複していない部分の長さと一致するため、オーバーラップは $100-20=80\text{m}$ と計算できる。画像の縦方向の長さ100mに対して重複部分の長さが80mであるため、オーバーラップ率は $80 \div 100 = 80\%$ と計算され、オルソ画像作成に必要なオーバーラップが確保できているため、設定値は妥当な値であると言える。

マニュアルには検討の結果得られた飛行高度130m、シャッター間隔2秒、飛行速度36km/hを使用して飛行設定を行うための手順を記載し、他機種を使用する際に参照するための資料としてこれらの計算過程も記載した。

3 無人航空機を使用した境界巡検及び境界検測予備調査手法の検討

3-1 林内飛行による境界巡検及び境界検測予備調査手法の検討

境界巡検や境界検測予備調査には、境界標そのものを視認する必要があるため、無人航空機を林内で飛行させて境界標を確認する方法について検討を行った。近年では林内でも安定した飛行が可能な無人航空機も市販されているが、実効性の点から、国有林野で導入実績があり、かつ機体が小型であるDJI社Mavic 2 Proを使用した林内飛行について検討した。

実際に林内で手動操縦により飛行を行い、境界巡検や境界検測予備調査への応用可能性について検討した。事前の懸念点として、①GNSS受信状況が悪いため機体の位置が安定せず、GNSS環境下で可能な自動ホバリングができない(スティックを操作しない状態で同じ場所に留まり続けることができない)こと、②枝や下層植生といった障害物が飛行の支障となることが挙げられたが、操縦者及び補助者に相当の技量があれば自動ホバリング不能な機体を制御し障害物を回避することは可能であったため、飛行自体は不可能ではないという結果が得られた。また、第1種境界標上で0.8m～1.2mほどの飛行高度で画像の撮影を行ったところ図 3-1のような画像が得られたことから、林内飛行を行う無人航空機が境界標の真上に到達して画像を撮影できれば境界巡検や境界検測予備調査と同等の調査が可能であると考えられる。

一方、境界巡視と同様の自動操縦方法については、上記の①機体位置が安定しない、②障害物が多いという課題に対応できないため、安全を確保した状態で自動操縦による林内飛行手法を確立することは現時点では不可能であると判断した。



図 3-1. Mavic 2 Proの林内飛行により撮影された境界標

一方で実際に林内飛行を行ったことにより、多くの課題も明らかになった。まず、事前に懸念された通りGNSS受信状況が悪く機体が安定しないことが大きな課題である。安定してGNSSを受信できる環境下では機体は自己位置を正確に把握できるため、ホバリングにより同じ位置に留まり続けることができる。しかし、林内ではGNSS受信状況が悪化し安定したホバリングが不可能なため、常に操縦者が手動で調整し続ける必要があり、相当の技量が必要となる。

また、機体には障害物検知機能があり、障害物から1.5mの距離で機体が自動的に静止し、それ以上近づけないように設計されている。境界巡検を行う際にも境界線や境界標が立木と近接していると、障害物検知が動作して機体が進行しなくなるため、機体が想定したとおりの挙動をとらず調査ができなくなる。機体の角度によっては障害物検知の反応が弱まるため強引に進行することは不可能ではないが、障害物との接触リスクが高まるため推奨できない。

さらに林内には低木層の枝や葉といった障害物があり、送信機と接続するタブレット端末に転送される機体カメラでは捉えられないものが多いため、操縦者は常に機体を直接的に目視で確認する必要がある。したがって操縦者は機体を追尾して歩きながら操縦を行うことになり、従来の踏査による境界巡検よりも非効率的であり、かつ機体損傷のリスクが生じる。

以上の事項より、現行の技術では無人航空機の林内飛行を利用して境界巡検や境界検測予備調査を行うことは現時点では困難であるという結論に至った。林内飛行による境界巡検を達成するために解決されるべき課題としては、①障害物を検知して自動で安全な飛行ルートを判断し自律飛行を行う技術や、②立木から1.5m以内の距離に近づくことができ、かつ絶対に衝突しない強固な障害物検知センサー及び機体制御技術の普及が挙げられる。

一方、林内飛行で撮影された画像からは境界標を明確に視認することができたため、これらの課題が解決されれば無人航空機の林内飛行による境界巡検や境界検測予備調査の実現は可能であると考えられる。

3-2 上空飛行による境界巡検及び境界検測予備調査手法の検討

無人航空機を使用して上空から境界標を確認することが可能か否かの検討も行った。

まず、林内に存在する境界標については、機体からの視界が林冠に遮られるため確認不能である。機体の飛行高度を林冠に接触するほど下げたとしても境界標が正常な状態で存在しているか否かを判断することはきわめて困難である。

また、境界標の確認が可能であったとしても林冠と同程度の高さで飛行を行うことは高度な機体制御を必要とし、機体損傷のリスクが高いため調査方法として推奨することはできない。

そこで本事業では境界標の上空が完全に開けている場合(林道と畑地の境界など)を想定し、上空から境界標がどの程度視認できるのかについて検討を行った。

検討する飛行高度は50mと80mに設定した。50mについては、2-3 (1) 章に記載したとおり立木への接触リスクを回避できる最も低い飛行高度であり、詳細な画像の取得が可能であるという点を理由として選定した。また、80mについては、50mより少し高い高度で飛行を行うことで調査に必要な画像の枚数を削減してデータ容量の軽量化を図り、より確実に機体と送信機との間の電波通信の確保が期待できる高度として選定した。地上画素寸法を計算すると飛行高度50mでは約1.37cm、飛行高度80mでは約2.19cmとなり、どちらも第1種境界点の境界標として想定される石標及びコンクリート標の規定サイズよりも地上画素寸法が小さいため、理論上は境界標の判読が可能な値である。

4 国有林野における検証

4-1 実施場所

長野県松本市梓川にある金松寺山国有林(中部森林管理局管内)の境界及びそのデジタルデータを使用して、検証を実施した。東側の入り口から中央付近まで林道が整備されており、また西側には高圧送電線が存在している。検証実施場所を図 4-1 に示す。

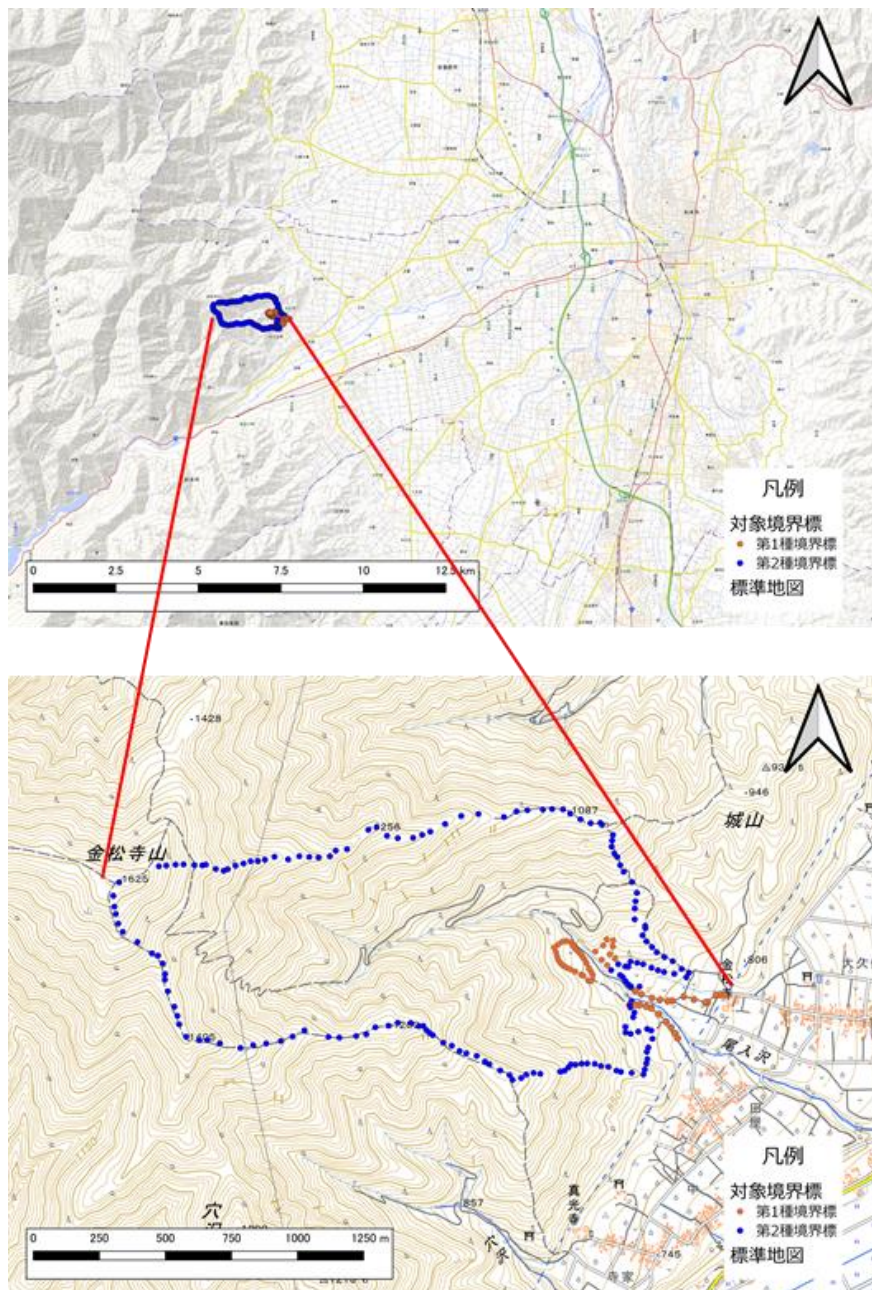


図 4-1. 実施場所の位置図

4-2 事前調査

(1) 概要

令和4年10月21日に、検証実施場所の事前調査を行った。実施した内容は以下のとおりである。

①無人航空機離着陸場所の選定

検討した手順を再現するために、事前調査にて離着陸場所の選定、安全の確認、位置情報の測位を行った。

②対象境界標の確認

境界巡検手法について検証の方針を決定するために、対象となる境界点の標識を事前に確認した。

③試験飛行

試験飛行により、選定した離着陸場所にて正常な離着陸が可能であるか、境界点上での画像の撮影が可能であるかという点を確認した。

それぞれの詳細について次頁以降に示す。また、3-1 章に記載した林内飛行による境界巡検及び境界検測予備調査の検討についても同日に実施した。

(2) 無人航空機離着陸場所の選定

無人航空機の飛行にあたっては機体の離着陸場所を適切に選定することが重要となる。離着陸場所を選定するための条件として、以下の2項目を設定した。

- ①地面がある程度平坦で周囲に障害物がなく、上空も開けている箇所。
- ②飛行範囲内の地点との高低差が-330m～+370mの範囲内に収まる箇所。

①については、離着陸時の安全確保に加え、機体のGNSS衛星の受信を確保するためにも重要な事項である。無人航空機の機体はGNSSの測位結果に基づいて自己位置を特定し飛行の制御を行うため、離着陸時点でGNSSを適切に受信できていない場合自動操縦が不可能になる。

②については、機体の仕様上離着陸地点から-200m～+500mの範囲内でしか飛行が行えないため、離着陸場所選定時に注意すべき事項である。機体の位置が-200m～+500mに収まっている必要があるため、対地高度130mで飛行を行う場合、機体直下の地面は離着陸場所との高低差が-330m～+370mの範囲内であることが必須条件となる。

条件に合致する場所として、林道沿いの地点から離着陸場所の選定を行った。現地の地形を考慮しながら林道を踏査した結果、①と②の条件を同時に満たし、対象となる境界点を網羅できるような地点は存在しなかった。そのため、図 4-2、図 4-3及び図 4-4に示す2地点を離着陸場所とし、対象地南側及び東側の計3区間で境界巡視の検証を実施することとした。

また、離着陸場所2の付近には林道と畑地との境界に上空の視界が開けた境界点が複数存在しているため、上空飛行による境界巡視の検証についてもこの地点を離着陸場所として行うこととした(図 4-5)。

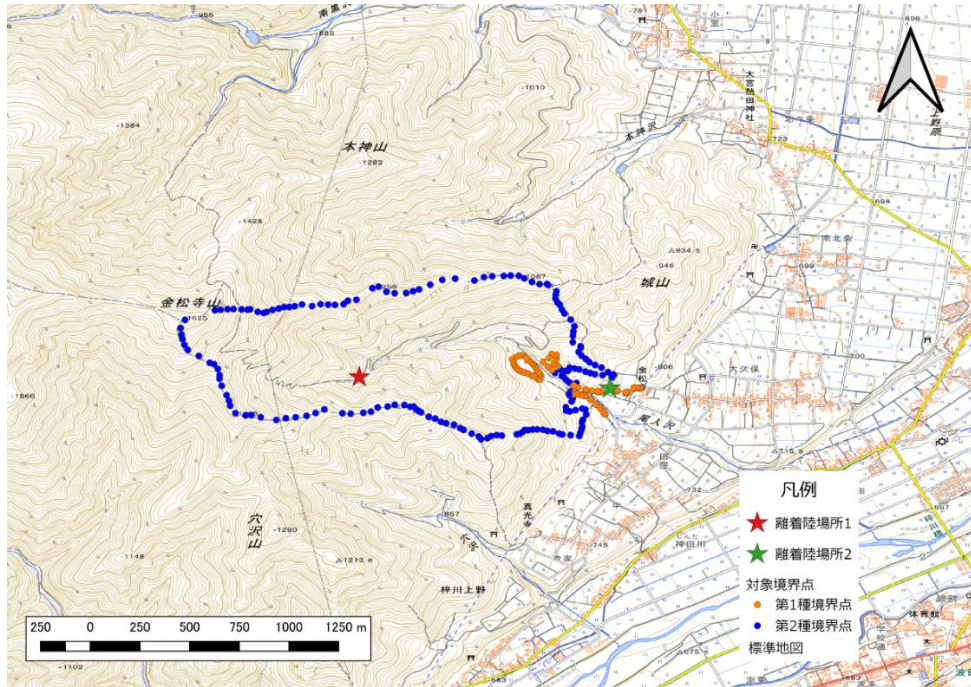


図 4-2. 離着陸場所の位置図

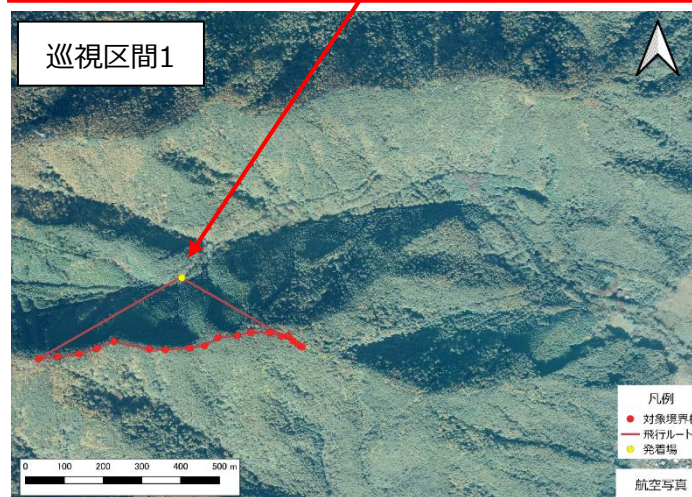


図 4-3. 離着陸場所1の写真及び対応する巡視区間

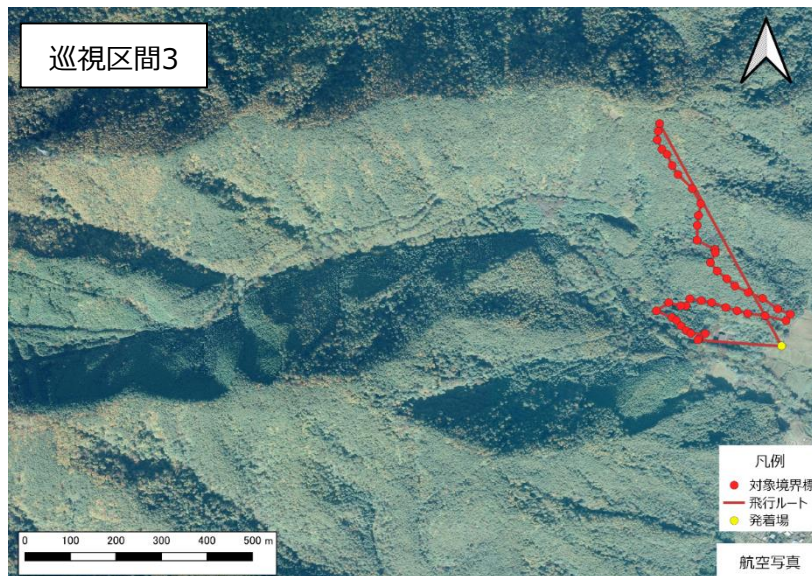
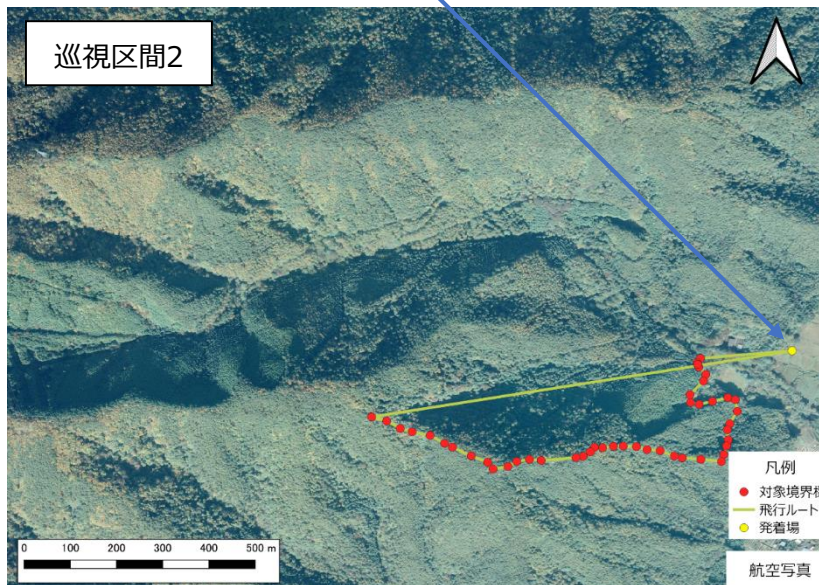


図 4-4. 離着陸場所2の写真及び対応する巡視区間

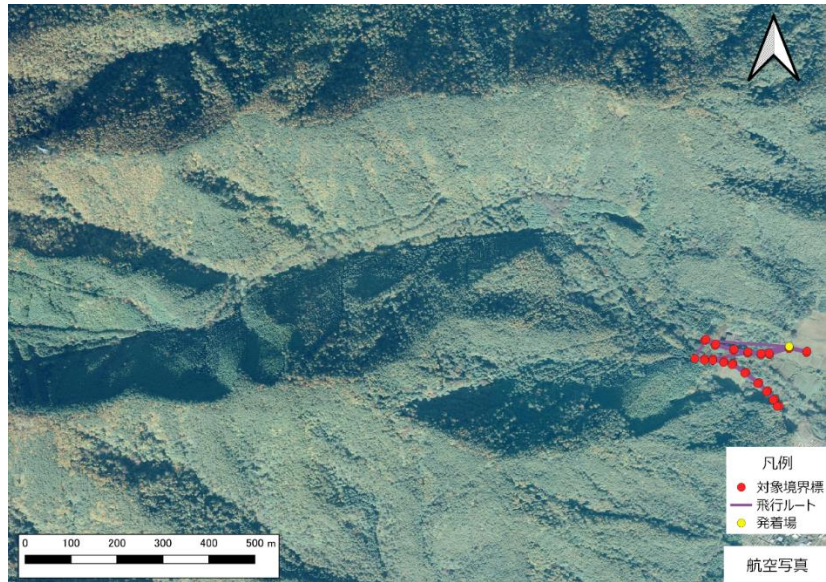


図 4-5. 離着陸場所2より行う境界巡検検証の計画

(3) 対象境界標の確認

上空飛行による境界巡検の検証対象となる境界標について、事前に確認を行った。その結果、当該区間では境界標のほとんどが図 4-6のように地中に埋まっており、地上から視認可能なのは境界見出標のみであった。そのため、今回の検証では上空飛行で得られるデータから境界見出標を確認できるか否かという点に重点を置くこととした。



図 4-6. 検証対象区間における境界点

(4) 試験飛行

①選定した離着陸場所(離着陸場所1)にて正常な離着陸が可能であるか、②自動操縦中に電波通信が途切れる心配がないか、③境界点上で画像を撮影することが可能であるかという点を検証するために、試験飛行を行った。自動飛行アプリ(Litchi)に境界点の位置情報をインポートし、順番に飛行しながら境界点の真上で画像を撮影する飛行計画を作成して自動操縦を行った。この時、機体バッテリーの消耗を抑えるために、常に移動しながら境界点上で画像を撮影するように設定した。離着陸については、GNSSの受信状況も良く、問題なく行うことができた。飛行中の電波通信についても、切断されることなく送信機で常にモニタリングしながら飛行することができた。

境界点上での画像撮影について、結果を図 4-7に示す。正常に撮影が行われた点については境界点の位置情報と画像の撮影地点の位置情報はおおむね一致した。一方で、境界点間の距離が短い箇所では、境界点上で画像を撮影してから次の境界点に到達するまでの時間がカメラの最短シャッター間隔である2秒よりも短くなってしまい、画像の撮影が正常に行われなかったという課題も明らかになった。この結果を踏まえ、マニュアルでは境界点上で画像を撮影する場合には境界点に到達後2秒間静止してから画像を撮影することとし、その手順を記載した。

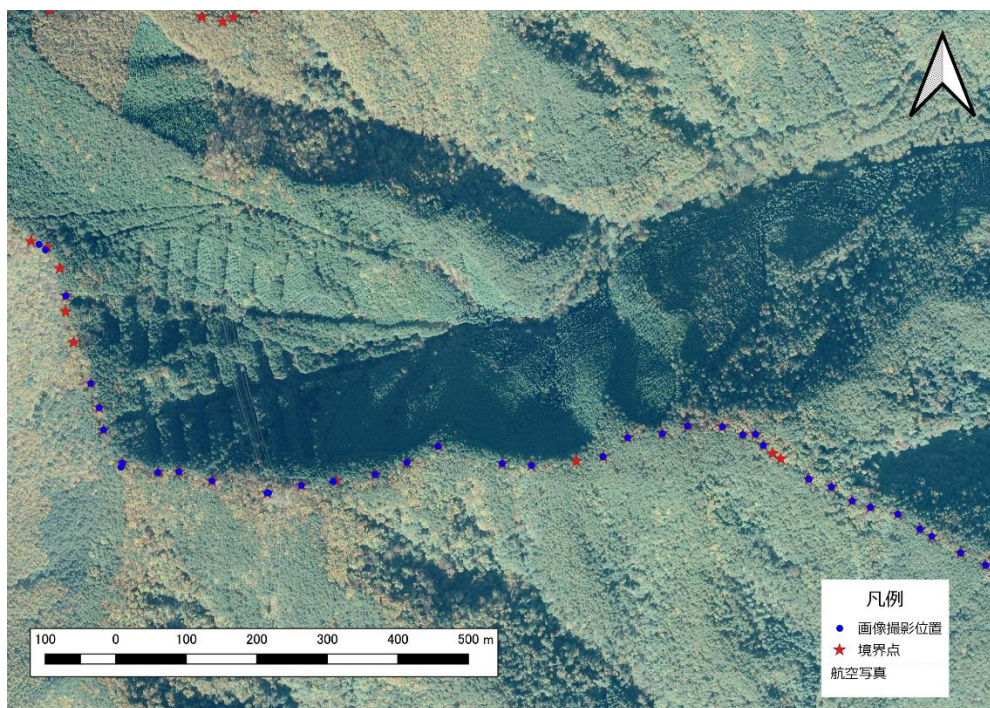


図 4-7. 境界点位置と画像撮影位置の比較結果

4-3 国有林野境界における検証

令和4年11月25日に、本事業における検討事項の検証を行った。検証した事項は以下の2項目である。

- (1)検討した手順で作成した飛行計画を使用して、実際に境界巡視を実施できるか。
- (2)上空が完全に開けた箇所において、境界標や境界見出標を無人航空機の画像にて視認することは可能であるか。

(1) 境界巡視について

P25で示したとおり、2箇所の離着陸場所から3区間の飛行計画を作成し、自動操縦により境界線上での空撮を行った。①各区間の飛行ルート総延長、②離着陸場所-境界点間の最長距離(≒飛行時における機体-送信機間の最長距離)、③飛行に要した時間を表 4-1に示す。結果として、3区間とも飛行中に機体-送信機間の電波通信が切断されることはなく、機体バッテリーの持続時間内で自動操縦によるデータ取得を滞りなく実施することができた。またそれぞれオルソ画像を作成し、GIS上で境界線と重ねて表示することで境界線付近の異状の有無を確認することが可能であった。結果を図 4-8、図 4-9及び図 4-10に示す。なお、オルソ画像の一部にみられる白抜き箇所は、SfM解析において隣接する画像間での計算がエラーとなった点である。

表 4-1. 各巡視区間の詳細

巡視区間	飛行ルート総延長(m)	離着陸場所-送信機間の最長距離(m)	飛行に要した時間
1	1569.6	457.8	8分
2	2401.9	927.5	11分
3	1917.7	660.5	9分

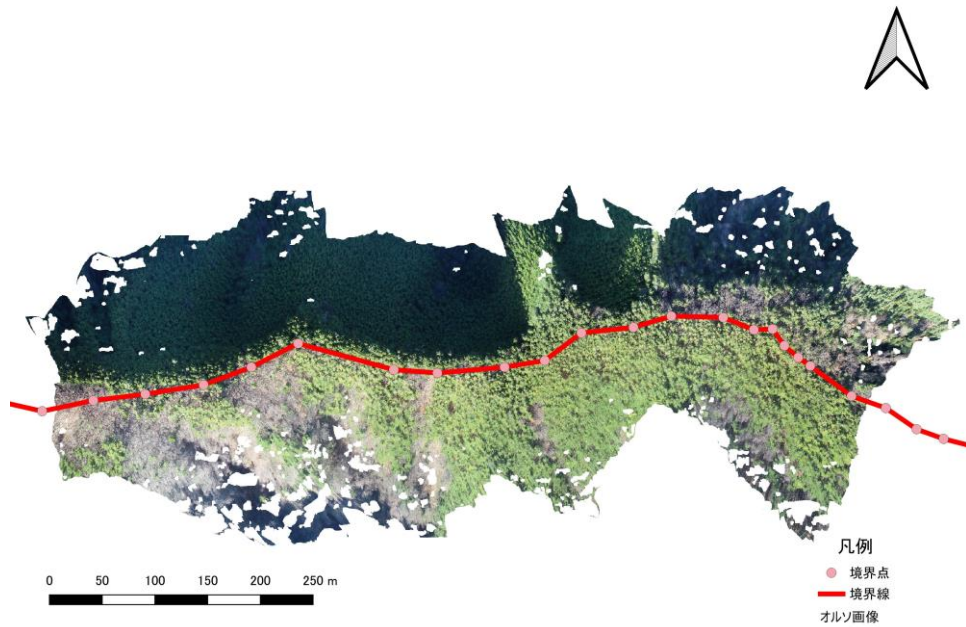


図 4-8. 巡視区間1におけるオルソ画像及び境界線

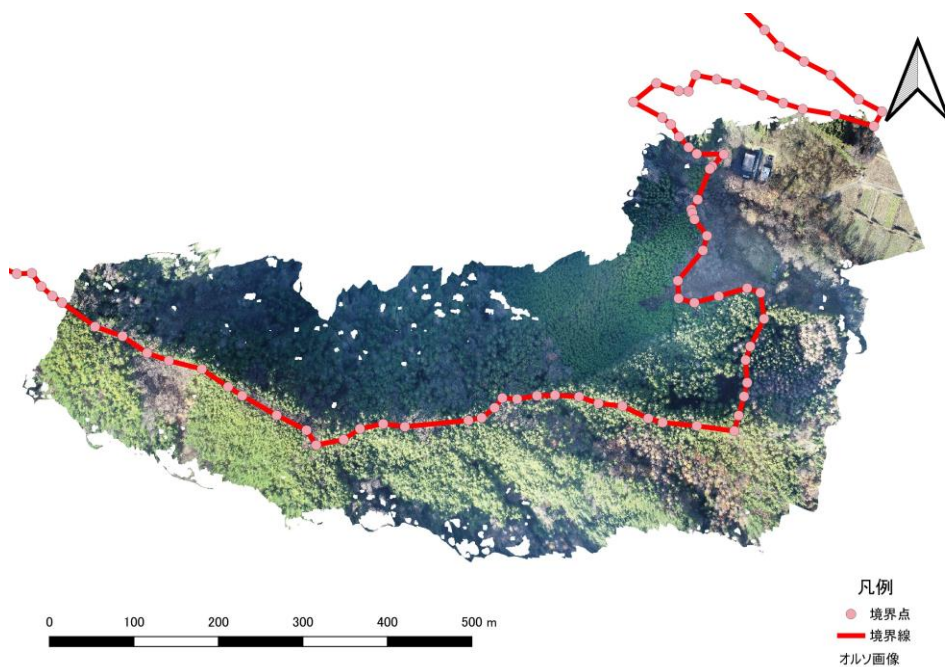


図 4-9. 巡視区間2におけるオルソ画像及び境界線

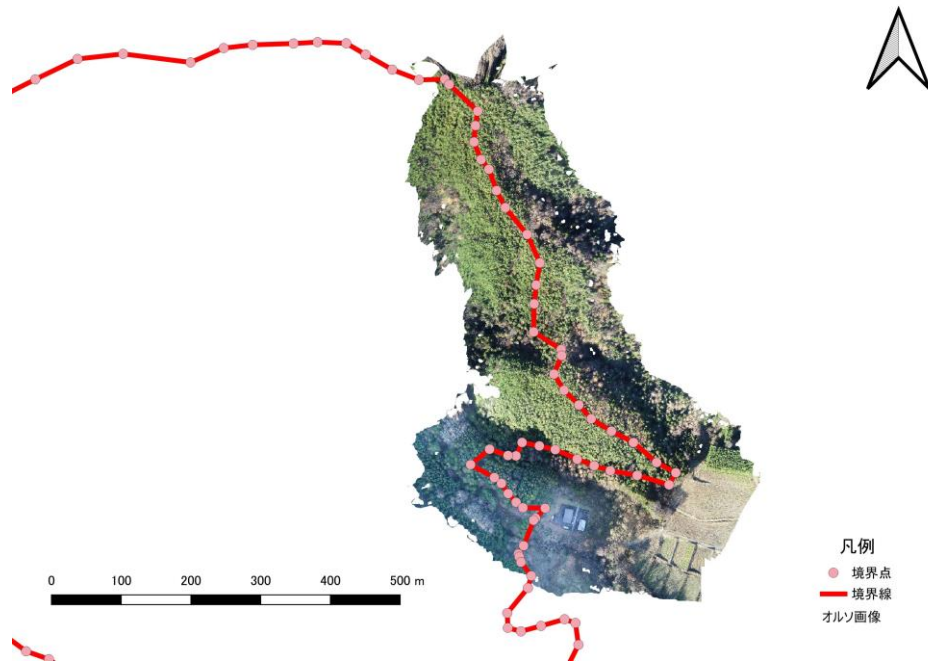


図 4-10. 巡視区間3におけるオルソ画像及び境界線

(2) 境界巡検について

境界巡検については、P29で述べたとおり、検証した区間においては地上からは見えない境界標がほとんどであったため、飛行高度50mで撮影した画像から境界見出し標が確認できるか否かを検証した。結果、図 4-11のように境界見出し標と思われる物体をオルソ画像上で視認できる箇所はあるものの、境界見出し標が視認できない箇所も多く、また、視認できたとしても不明瞭であるため境界巡検や境界検測予備調査に無人航空機を活用することはレンズをハイスペックなものに交換するなどの余地はあるものの、現行の機体では難しいと言える。

無人航空機の上空飛行では境界見出し標を明瞭に視認できなかったため、上空が開けている場所であっても、境界標が埋もれていると境界点を確認することは不可能であると言える。境界標上の土や草を取り除くことで無人航空機から確認できる可能性はあるが、そのためにはあらかじめ境界点を踏査し、すべての境界標が上空から確認できるように準備を行う必要が生じるため、効率が悪くなる。したがって、従来の踏査による調査の方が早くて確実であり、無人航空機による境界巡検や境界検測予備調査は現状困難であると結論づけられる。

ただし、境界巡視と同様に隣接地の伐採や開発状況の変化が確認できれば、1年に1回以上行っている境界巡検の頻度を減らすことも可能であると考えられる。高度130mからの撮影で得られるオルソ画像からは立木1本の存否を確認できるため、境界に異状がないかを無人航空機を使用し確認することができる。現在1年に1回の境界巡検を行っている第1種境界線に対し、上空からの巡視を1年に複数回行い、境界の確認を行う方が省力化を図れる可能性があるため、境界巡検の頻度の見直しを検討する余地はあると考えられる。

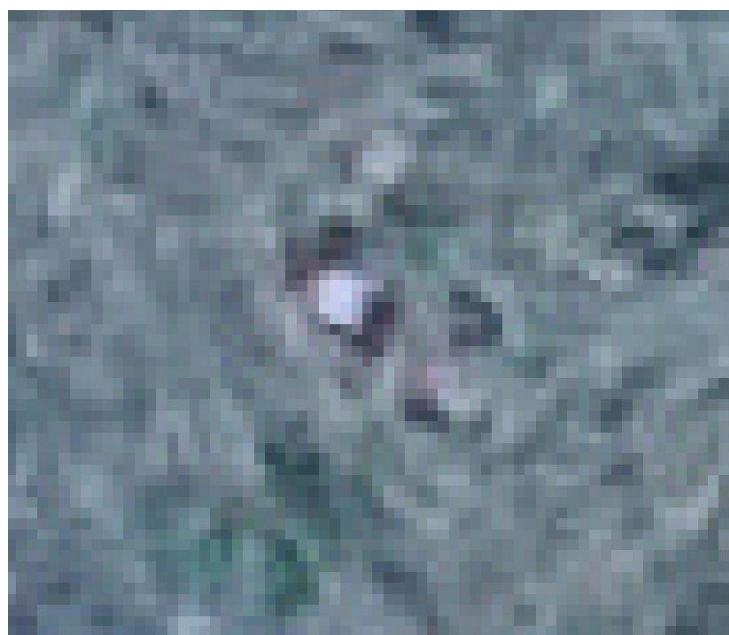


図 4-11. オルソ画像から視認できる境界見出し標と思われる物体

5 総合考察

5-1 従来調査手法との比較

本事業で検討した境界巡視手法では、無人航空機が境界線上を飛行して画像の撮影を行うため、遠望による巡視と比較してより正確に、見落としなく境界線付近の様子を確認することができる。また、境界線付近を実際に踏査して行う巡視と比較すると、必要となる時間や労力が削減されるため調査の効率化が期待できる。無人航空機を使用した場合、1箇所から複数区間の巡視が可能である。すべての境界について踏査や遠望によって直接目視で巡視する場合と比較すると、例えば従来の調査では2箇所からの遠望が必要だった区間を無人航空機で調査する場合には調査には、作業時間や労力が単純計算で約50%削減されると言える。初年度には飛行計画を作成する必要があるため多少手間がかかるが、2年目以降は既に作成された計画を利用して飛行を行うのみで良いため、調査の大幅な省力化が期待できる。

さらに、撮影された画像からオルソ画像を作成することで境界線付近の画像を地図として扱うことができる。これに境界情報デジタルデータから作成した境界線を重ねて表示することで、従来の巡視ではなし得なかった、データに基づいた調査結果の判定が可能になる。加えて、境界線付近に異状を確認した際にその位置情報を容易に特定することができるようになるため、迅速な対応も可能となる。

無人航空機を使用した境界巡視は数値的データに基づいた調査であり、境界線の位置や調査手順に関して個人の経験や判断に頼ることがないため、従来の調査手法と比較して後任への引継ぎが容易になるという利点もある。マニュアルには飛行計画の作成手順や境界線シェープファイルの作成手順が記載されているが、これらは一度作成すれば何度でも使用できる。境界巡視業務については飛行計画、離着陸場所の位置情報及び境界線シェープファイルの引継ぎを行うのみで良いため業務の引継ぎについても効率化が期待できる。

境界巡検及び境界検測予備調査についても検討を行ったが、境界標を直接確認しようとする場合においては、作業員による境界線の踏査は省略できなかったため、無人航空機を介入させず従来のおりに作業員が踏査して巡検や検測予備調査を行う方が効率的であるという結果となった。一方で、無人航空機の巡視手順を第1種境界線に応用し調査頻度を増やすことで、従来の境界巡検方法を見直して効率化が図れる可能性も示唆された。

5-2 まとめ

本事業では、デジタルデータ化された境界情報と無人航空機を使用して、効率的かつ正確な境界巡視を行う方法について検討し、手法を確立した。従来の境界管理業務と比較した際の利点については前章に記載したとおりである。これにより、令和3年度までの事業の成果である境界情報デジタルデータを実際の業務に活用するための方法を具体的に示すことができたため、境界情報のデジタル化及びそのデータの活用の推進において有意義な結果が得られた。

一方で境界巡検や境界検測予備調査については、現行の技術では無人航空機を使用して境界標そのものを調査する場合の効率化が期待できないという結果が得られた。そのため、本事業では境界巡検や境界検測予備調査での境界標確認において境界情報デジタルデータを活用するに至らなかった。

境界巡検や境界検測予備調査で実地踏査を行う際の境界情報デジタルデータの活用方法としては、データの位置情報を利用して境界点上に当該境界点の情報を投影したり、境界点を結んだ境界線を実空間の境界線上に投影したりといった拡張現実(AR)技術の活用が考えられる。これが実現すると踏査時に境界点の情報や境界侵害の有無を直感的に把握できるようになるため、デジタルデータを活用した境界調査の効率化につながる。