

UAV を用いた空撮による森林資源情報の把握

—三重大学平倉演習林の事例—

廣瀬裕基・沼本晋也・松村直人（三重大院生資）

近年、国際的に様々な分野で開発・活用が進められている UAV（無人航空機）は森林・林業の分野においても注目を集めている。特に、UAV を森林モニタリングツールとして活用することで、従来の森林資源調査における欠点を解消し、より効率的な調査が可能になると期待されている。そこで本研究では、大学演習林での UAV を用いた空撮実験から、SfM（Structure from Motion）技術による画像解析手法を用いて、三次元モデルの作成、樹高・胸高直径の推定及び精度検証、再空撮時の誤差比較を行い、今後の活用の方角性を検討した。精度検証の結果、推定樹高の二乗平均平方根誤差（RMSE）=1.58m、樹高と直径の関係式から推定される胸高直径は RMSE=3.88cm、再空撮時の推定樹高誤差は RMSE=0.21m であった。

キーワード：森林モニタリング、リモートセンシング、UAV、SfM、GIS

I はじめに

近年、国際的に様々な分野で開発・活用が進められている無人航空機（Unmanned Aerial Vehicle : UAV）は、現在、森林・林業の分野においても注目を集めている。特に、UAV を森林モニタリングツールとして活用することで、従来の地上計測やリモートセンシング手法における欠点を解消し、より低コストかつ効率的な森林調査が可能になると期待されている。さらには、SfM（Structure from Motion）と呼ばれる、複視点の画像から撮影場所および対象物の三次元位置を復元する手法（4）が登場し、SfM を用いた UAV システムの可能性は大きな高まりを見せている。しかしながら、現在のところ、UAV を森林調査に用いた研究例は少なく、測定精度や空撮可能範囲といった UAV の実用にあたって必要なデータが不足している。また、我が国では平成 27 年に航空法の一部が改正され、UAV の飛行に関する法令順守が義務付けられた。このように技術的な側面だけでなく、飛行ルール等の利用条件から UAV システムの活用を検討していく必要がある。

そこで本研究では、大学演習林での UAV による空撮実験から、三次元モデリングソフトウェアを用いて、基本的な森林資源情報である樹高、胸高直径の推定及び精度の検証を行う。また、UAV システムの継続的利用を見据えて、再空撮時の誤差比較を行う。最後に、以上の結果を踏まえて、UAV システムの森林モニタリングツールとしての可能性や今後の具体的な活用の方角性を検討する。

II 実験器具

1. UAV とカメラ

本研究で使用する UAV は Spreading Wing S900 (DJI, 中国) である (図-1)。S900 はマルチローター型ヘリコプターであり、また、回転翼が 6 つであることから

飛行安定性と操縦性に優れ、主に映画撮影や写真測量などの空撮に利用される（1）。なお、S900 には自動追尾/衝突回避機能は搭載されておらず、林内での撮影は困難であるため、本研究では森林上空からの撮影を行うものとする。



機体重量	3.3kg
飛行時間	最大18分
離陸重量	最大8.2kg
最高速度	80km/h

図-1. Spreading Wing S900

機体本体には、機体の姿勢制御に関わる装置（GPS, IMU, ジャイロセンサ）、リアルタイムの飛行データの管理・通信を行う装置（Datalink, iOSD）、カメラ及びバッテリーが搭載される。

本研究で使用するカメラはデジタル一眼レフカメラ Canon EOS M2 である。カメラの有効画素数は約 1800 万画素、撮像画面サイズは 22.3×14.9 mm、撮影に使用するレンズは焦点距離 22mm である。空撮時のカメラの傾きは、機体の姿勢制御機能とジンバル（カメラの装着台）の作用によって、一定範囲内に抑えられる。

2. 飛行ルール

近年の我が国における UAV 利用者の急増を背景として、平成 27 年に航空法の一部を改正する法律により、UAV（重量 200g 以上のマルチコプター、ラジコン機等）の飛行に関する基本的なルールが定められた（3）。これにより、所定の飛行空域（地表又は水面から 150m 以上、人口集中地区、空港等の周辺）、飛行の方法（夜間飛行、目視外飛行、人又は物件から 30m 以内の飛行等）には、国土交通大臣の許可・承認を受ける必要がある。

HIROSE Yuki, NUMAMOTO Shinya, MATSUMURA Naoto, Grad. School of Bioresources, Mie Univ, nma@bio.mie-u.ac.jp

Information acquisition of forest resources using photographing from UAV —Case study in the Mie University Forest, Hirakura—

Ⅲ 空撮概要

空撮対象地は三重県津市美杉町に位置する三重大学附属平倉演習林内の10林班ろ小班及び周辺林分(標高:550-620m)である(図-2)。樹高・胸高直径推定にあたっては対象地をさらに絞って、10林班ろ小班A,B(林齢59年生スギ人工林,2013年時実測データ;平均樹高:22.5m,平均胸高直径:30.1cm,相対幹距比:14.3%)とする。なお,本研究対象地上空での飛行には国土交通大臣の許可は不要である。

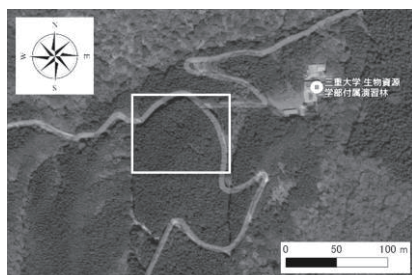


図-2. 三重大学附属平倉演習林試験地

空撮は2016年10月10日午後1時に実施した。当日の天候は晴れ,軽風(木の葉がゆれる程度)であった。空撮の実施にあたっては,飛行支援ソフトPC Ground Station 4.0.11(DJI,中国;以下「GS」という)を使用する。GSでは,撮影高度や重複率,範囲等の撮影条件を設定することで,所定のアルゴリズムの下,最適な飛行経路が自動的に作成される。また,現地においてGSとUAV本体の通信を行うことで,機体の離陸及び飛行経路上の移動を自動的に行うと同時に,機体の位置,機首方向,高度といったリアルタイムの飛行情報を確認することができる。なお,作成された飛行経路はPCへのエクスポート及び保存ができるため,同一の飛行経路において継続的な空撮が可能となり,定点観測や時系列モニタリングへの活用が期待される。詳細な撮影条件を表-1に示す。

表-1. 撮影条件

PC Ground Station	カメラ	
オーバーラップ率	90%	シャッター
サイドラップ率	60%	露出プログラム
撮影対地高度	100m	シャッター速度
撮影高度	100-175m	絞り値
撮影面積	0.9ha	ISO感度
飛行速度	3m/s	画像ファイル
飛行時間	約8分	カメラ撮影間隔
		スピード優先
		1/1600 秒
		8
		オート
		(2500-6400)
		JPEG
		2秒

Ⅳ 研究手法

1. 画像解析

空撮画像は三次元モデリングソフトウェア(SfM解析ソフト)PhotoScan Professional 1.2.6(Agisoft,ロシア)に取り込み解析を行う。PhotoScanでは,SfMに

よってまず写真撮影位置を推定すると同時に,三次元モデルとなるポイントクラウド(点群データ)が生成される(7)。その後,生成された点群データに高密度処理を施し,その高密度点群データに基づいて,三次元モデル,オルソモザイク画像,数値地表モデル(Digital Surface Model:DSM)が作成される。なお,オルソモザイク画像,DSMの作成にあたっては,地理空間座標を定義するために複数の地上基準点(Ground Control Points:GCPs)の設置が必要である。一般的に3点以上のGCPsがあれば,三次元的な空間配置が復元可能であるとされており(8),本空撮では4点設置している。

2. 樹高推定

PhotoScanで作成したDSMと,国土交通省のウェブサイトから入手した10mメッシュの基盤地図情報数値標高モデル(Digital Elevation Model:DEM)の差分をとり,数値樹冠高モデル(Digital Canopy Height Model:DCHM)を算出する。続いて,DCHMに対し,ArcGIS 10.0(ESRI社,米国)の近傍統計解析と流域解析機能を用いて,DCHMの平滑化,半自動的な樹冠部領域の抽出(単木抽出)を行う。各樹冠部の最大DCHM値を単木の樹頂点及び推定樹高(H')とする。

3. 胸高直径推定

三重県の長伐期スギ・ヒノキ人工林において作成された樹高と胸高直径の関係式(スギ林 $D=0.3914H^{1.407}$)(6)に,前節で求めた推定樹高(H')を代入したものを推定胸高直径(D')とする。

4. 精度検証

精度の検証は,I.単木抽出の結果と2013年時の実測データ,II.推定樹高(H'),推定胸高直径(D')の結果と実測データに基づく予測値(H,D)(2013年時の実測データと樹幹解析から算出した予測成長分の和)を比較する。IIの精度指標には,二乗平均平方根誤差(RMSE)及びRMSEを平均予測値で除した相対RMSEを用いる。

以上の解析フローを図-3に示す。

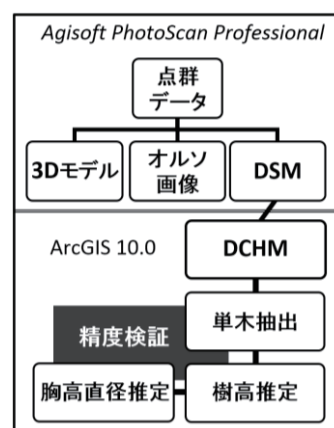


図-3. 解析フロー

5. 再空撮時の誤差比較

UAV システムを継続的に利用していくためには、空撮間の測定誤差を把握しておく必要がある。そこで、本研究では、上記の解析フローを同一条件の下、再び実施し、DSM 及び単木抽出、樹高推定の結果を比較する。なお、胸高直径推定の結果は推定樹高 (H') に依存しているため、今回、比較の対象から除外している。

V 結果と考察

1. 画像解析

本空撮では約 8 分間の飛行の中で、150 枚 (画像サイズ: 8.5-12.0MB) の撮影を行った。PhotoScan による画像解析の結果、約 7,700 万点の高密度点群データに基づいて、図-4 に示す三次元モデル、オルソモザイク画像、DSM が得られた。三次元モデルからは樹冠部の詳細な形状や林相構造が確認でき、森林、特に樹冠部の現況把握が可能であることがわかった。オルソモザイク画像は 1.5cm という高い分解能を有しており、対象樹種であるスギの葉の形状がおおよそ確認できたことから、他の樹種の判読も可能であると考えられる。DSM の分解能は 3.0cm で、オルソ画像よりも多少劣るものの、同様に高分解能を有しているといえる。上記の分解能は空撮画像の解像度に依存しているため、各種設定を変更することで、より高い分解能を得られると考えられる (本空撮画像の解像度は水平、垂直ともに 72dpi である)。

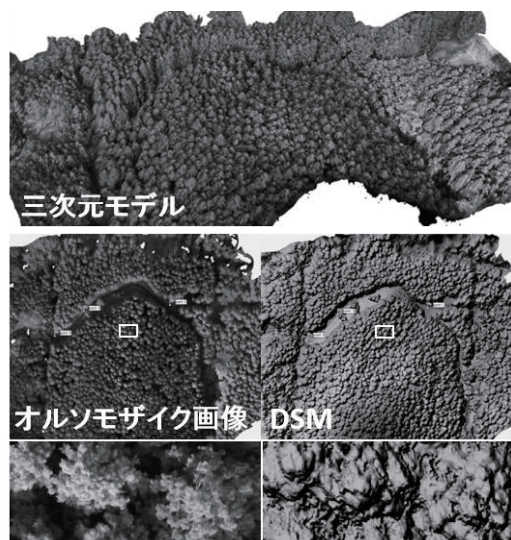


図-4. 画像解析結果

2. 樹高推定と精度検証

単木抽出を行った結果、44 本の単木が抽出され、実測データ 46 本に対する割合からその抽出精度はおおよそ 96% であるといえる (過剰抽出はなし)。抽出された単木 44 本の樹頂点に対し、DCHM から推定樹高 (H') を求めた (図-5、左図)。予測樹高 (H) と推定樹高 (H') を比較してみると、全体的に推定樹高 (H') が過大の傾向にある結果であった (図-5、右図)。精度

検証を行ったところ、二乗平均平方根誤差 (RMSE) = 1.58m, 相対 RMSE (RMSE/平均予測樹高) = 6.7% となった。

今回、DCHM の算出には国土地理院が提供している 10m メッシュの DEM データを用いたが、本研究対象地における 10m メッシュ DEM データは地形図の等高線を元に作成されており、その高さ精度は 5m となっている (2)。すなわち、この DEM データの高さ精度の向上が最終的な樹高推定の精度向上につながるといえる。例えば、オープンデータを使用する場合、DEM データには 10m メッシュの他に、航空レーザ測量や写真測量によって作成した 5m メッシュデータがあり、その高さ精度は 1m 未満となっている (提供地域に制限あり)。そこで、この 5m メッシュ DEM データを使用することで精度向上が実現できると考えられる。

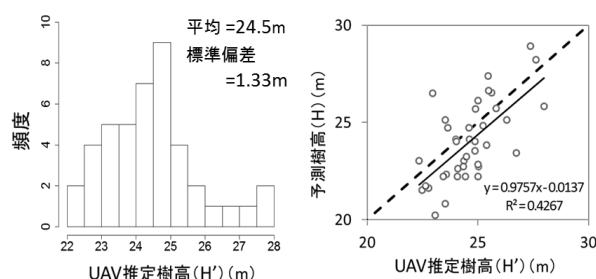


図-5. 左: 推定樹高分布, 右: 樹高値比較

3. 胸高直径推定と精度検証

樹高と同様に、抽出された 44 本に対し、(胸高) 直径推定を行った。予測直径 (D) と推定直径 (D') を比較してみると、樹高推定とは異なり、過大・過小評価ではなかったものの、精度検証の結果、RMSE=3.88cm, 相対 RMSE=11.3% となり、樹高推定よりも相対 RMSE は大きくなり、精度が悪化していることがわかった (図-6)。これは、推定樹高 (H') を樹高のみを説明変数とする関係式に代入したことで、推定樹高 (H') の誤差がそのまま反映されたことに加え、関係式固有の誤差が影響していると考えられる。また、空撮は、樹高とは異なり、直接樹幹部を撮影できないので、樹高と同レベルの推定精度を求めることは困難であるといえるが、樹冠形状やサイズ、疎密度などを用いることでより精度の高い推定ができる可能性がある。

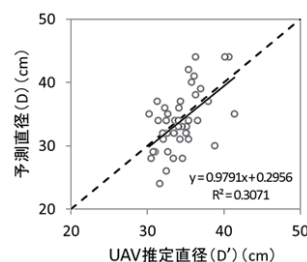


図-6. 直径値比較

4. 再空撮時の誤差比較

両空撮間の DSM を比較してみると、影の少ない樹冠上部は誤差が小さかったのに対し、樹冠下部の陰部は誤差が大きいという結果になった（図-7、上図）。SfM では、影が強く出る箇所において特徴点を正しく抽出することは困難であり、できたとしても点群が粗くなってしまう。そのため、三次元位置を十分に復元することができず、結果として、樹冠下部で誤差が大きくなったと考えられる（5）。また、再（2回目）空撮時は雲量が1回目よりも少ない、すなわち日射強度が異なっており、このことがさらに誤差を増大させた可能性がある。今後、定点観測等の同一地点での空撮を行う場合は、日射強度や風等の気象条件を合わせることで空撮間の誤差を抑えることができると予想される。

しかしながら、本研究における DSM 誤差は、樹冠部領域の抽出に多少影響を与えたが、抽出本数そのものには変化がなかった。両空撮間の 44 本に対する推定樹高（H'）の誤差は、RMSE=0.21m、相対 RMSE=0.9% となり、数本を除いては高い一致率を示す結果になった（図-7、下図）。

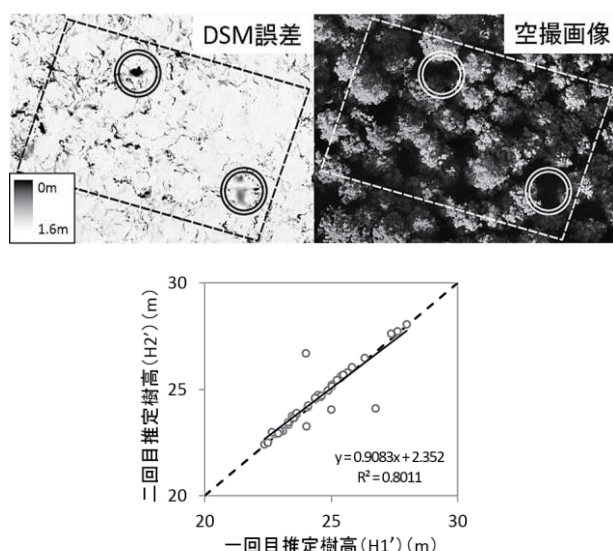


図-7. 上：DSM 誤差と空撮画像
下：再空撮時の推定樹高値比較

VI おわりに

本研究の結果から、UAV システムを活用することで、三次元モデルによる森林、特に樹冠部の現況把握、高分解能画像による樹種の判読が可能であることが示された。そして、DSM と GIS の流域解析機能を用いて、単木抽出、樹高・胸高直径推定及び精度検証、再空撮時の誤差比較から、森林モニタリングにおける UAV システムの基礎データが取得できた。現状として、精度に関する課題はあるが、本研究で提案した具体的な取り組みにより、改善していくと予想される。

現在、航空法により、UAV の操縦は原則として撮影対象林分から一定範囲内であることが要求されている。しかしながら、この制約をむしろ利用して、例えば UAV による空撮と地上計測を組み合わせることで、互いの長所を活かした効率的な森林調査ができる可能性がある。

謝辞

本研究で使用した UAV の購入並びに操縦講習会にあたり、株式会社快適空間 FC には大変お世話になりました。ここに感謝の意を表させていただきます。

引用文献

- (1) DJI Spreading Wings S900.
<https://www.dji.com/jp/spreading-wings-s900>
(平成 28 年 11 月)
- (2) 国土地理院 基盤地図情報数値標高モデルの種類と概要.
<http://fgd.gsi.go.jp/download/DEMkind.htm>
(平成 28 年 11 月)
- (3) 国土交通省 航空局 (2015) 無人航空機（ドローン、ラジコン機等）の安全な飛行のためのガイドライン, 11pp.
- (4) 小花和宏之・早川裕弼・ゴメスクリストファー (2014) UAV 空撮と SfM を用いたアクセス困難地の 3D モデリング. 地形, 35 (3), 283-294
- (5) Robert H. Fraser, Ian Olthof, Trevor C. Lantz, and Carla Schmitt (2016) UAV photogrammetry for mapping vegetation in the low-Arctic. Arctic Science 2, 79-102.
- (6) 島田博匡 (2010) 三重県のスギ・ヒノキ人工林における長伐期施業に対応した林分収穫表の作成. 三重県林業研報, (2), 28pp.
- (7) 内山庄一郎・井上公・鈴木比奈子 (2014) SfM を用いた三次元モデルの生成と災害調査への活用可能性に関する研究. 防災科学技術研究所研究報告, 第 81 号, 37-60.
- (8) 山村充 (2015) UAV 空撮画像と SfM で構築した地形モデルの精度評価と適応事例. 高解像度地形情報シンポジウム 論文集～地形情報のすべて～, 28-30.