

間伐選木作業への UAV の応用可能性の検討

吉井達樹・久保 杜・松村直人（三重大学大学院生物資源学研究所）

近年、航空レーザーをはじめとするリモートセンシング技術によって高精度な森林情報の整備が始まっている。その中でも UAV は安価で計測時期の自由度が高く、森林組合をはじめとする事業者規模でも利用しやすい計測機材であり、今後普及していくことが期待されている。本研究では、UAV の森林管理への応用例として、定性間伐における選木作業を UAV から得られた情報に基づき地上での選木作業との比較を行った。技術職員による選木では、UAV と地上作業の結果が 6 割程度一致した。学生による選木では 4 割程度の一致率であった。UAV を用いた選木は定性的な選木という高度な作業の標準化や見積もり作成作業への有効な支援になると思われる。

キーワード：UAV、間伐、選木作業、ヒノキ人工林、三重県

I はじめに

近年、多面的機能の発揮や森林に対するニーズの高度化など、森林管理における課題に対して高精度な森林基盤情報の整備や森林管理手法の革新が求められている。e-forest (松村 2015) といった新しい森林管理のシステムも提案されているが、高度な情報管理が求められるシステムにはリモートセンシング技術によるモニタリングシステムが欠かせない。一方、森林リモートセンシングの分野においても多様なプラットフォームやセンサの開発が進んでおり、応用可能性の検討が求められてきている。UAV は新しい森林モニタリングのプラットフォームとして近年注目されており、再測の時間間隔を決めることができる点や、低高度飛行によって対象物により近づけることができ、空間分解能の高いデータを取得できること、運用コストを低く抑えることができる (村上 2018)、といった特徴から既存のリモートセンシング技術を補うものと期待される。

森林整備事業の申請や検査へのリモートセンシング技術の活用を考えた場合、植付や下刈・間伐などの施業の実施に合わせて撮影が可能か、また苗木の植栽や立木の伐採状況の把握が可能な解像度を得られるか等の課題がある (諏訪 2020)。このような点を踏まえると衛星画像や空中写真・航空レーザーではなく、ドローンや地上レーザーが現実的な選択肢となる。

しかし、UAV から得られる森林上空からの情報は林内から人間が林分を観察する情報とは大きく異なる。特に定性間伐における選木作業は作業者の経験や主観に大きく影響を受けるため、参照する情報が変化した場合も結果が異なることが予想される。本研究では以上の課題に対して、定性間伐における選木作業への普及型 UAV の応用可能性を検討することを目的とする。

II 方法

1. 対象地

対象地は三重県亀山市に位置する 46 年生のヒノキ人工林である。2010 年に間伐の収益性評価を行っており、間伐実施から 9 年経過している (松村ら 2010)。林分の概況を表-1 に示す。地形は平坦で、下層植生に乏しい立地であった。島田 (2010) が調製した三重県の収穫表によると、地位は I と区分され成長がよい林分である。

表-1. 調査対象地の林分概況 (2019 年)

名称	内容
位置	三重県亀山市
斜面傾斜	12度
樹種	ヒノキ
林齢	46年生
立木密度	1070 本/ha
平均胸高直径	25.9 cm
平均樹高	18.1 m
林分材積	470 m ³ /ha

2. UAV-SfM による森林計測

UAV データから選木を実施するにあたり、SfM 技術を用いて、空撮写真から 3 次元点群モデルを作成し、ALS データ (Aerial Laser Scanning, ALS) を ICP アルゴリズム (Besl 1992) に併用することで、単木毎の立木情報を解析し、GIS で表示する (図-1)。立木情報は樹高、胸高直径、オルソ写真から目視で手動抽出した樹冠領域を利用する。詳細な解析過程は図-2 に示す。

また、検証用のデータとして毎木調査も行う。0.072ha の方形プロット (大プロット) を設定し、全立木の胸高直径と立木位置を計測する。またプロット中央に 0.014ha の一回り小さい方形プロット (小プロット) を設定し、

YOSHII Tatsuki, KUBO Morio, MATSUMURA Naoto*

Applicability of UAV-SfM techniques for tree selection of thinning procedure

nma@bio.mie-u.ac.jp

その中の立木については樹高も計測を行う。

小プロット内の立木 15 本と比較し、樹高の計測精度は平均二乗誤差が 0.30m であった。胸高直径は、樹高と樹冠幅を説明変数とした重回帰式を毎木調査の結果から調製し、回帰式を用いて推定した。樹冠幅は樹冠領域の面積から真円を仮定して算出する。胸高直径の推定精度は平均二乗誤差が 2.11cm であった。松村ら (2020) が行った UAV を用いた精度検証の結果と同等以上の結果を得られたことから、UAV を用いて選木の資料を作成した。

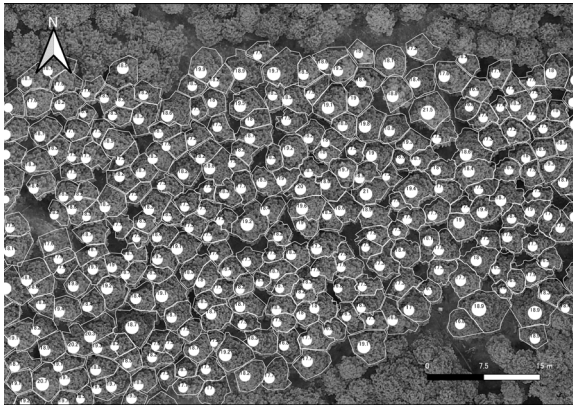


図-1. 選木に用いる資料

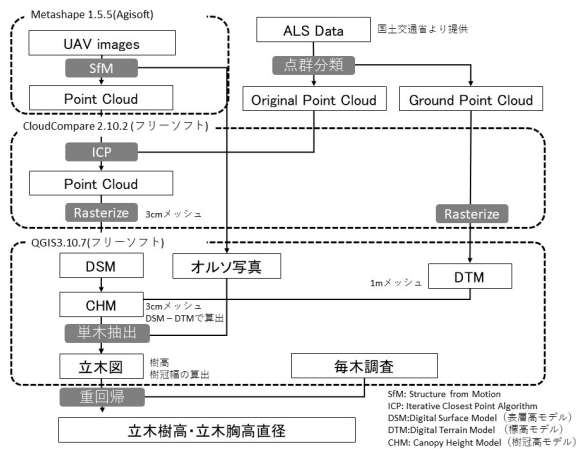


図-2. UAV による森林計測の解析過程

3. 地上と UAV からの選木の比較

三重大学演習林の技術職員による選木結果を用いて、地上で行う選木作業と UAV から行う選木作業の比較を行う。技術職員は専門的な経験を有する者が選木作業を行う。先入観を排除するために、技術職員は未経験である UAV からの選木作業を行ってから、地上での選木作業を行う。間伐方法は下層間伐で、劣勢木を除くことを目的として選木を行う。また、定量的な目安として本数間伐率 20% 程度を設定する。基本的には定性間伐 (坂口 1980) によって選木作業が行う。

UAV からの選木のために資料を 3 種類作成し、技術職員からヒアリングを行って使用する資料を絞り込む。資料に表示させる情報は立木位置のみを表示したもの (パ

ターン 1)、UAV で撮影したオルソ写真に樹冠境界を加えたもの (パターン 2)、立木位置、オルソ写真、樹冠境界を表示させてもの (パターン 3) を作成する。ヒアリングの結果、3 種類作成した資料のうちパターン 3 が採用された。

地上での選木作業は、UAV から選木を行った技術職員ともう一名の技術職員の 2 名で行う。選木作業中はヒアリングを並行して行い、選定理由などを記録する。選木作業終了後、UAV と地上の選木結果を比較し、一致した立木の本数や一致した割合を算出する。なお、UAV での選木を行う範囲が地上での選木範囲を包含しているため、一致率については地上の選木範囲を基準に計算する。

4. 技術職員と学生の選木の比較

選木技術の習熟度による比較を行うために、技術職員と学生による選木結果を比較する。地上と UAV による選木方法は前節の説明と同様である。学生は森林科学を専攻しているが、選木などの実務経験はない。前節と同様に選木範囲が異なる場合は、狭い範囲を基準に一致率を算出する。また、機械的な選木作業として、胸高直径の小さい 20% の立木を間伐木として他の選木結果と比較する。

5. 選木の定量的評価

選木の結果を定量的に評価するために、森下の I_0 指数 (Morisita 1959) と間伐の特性を示す指数 TH を算出する。 I_0 は選木された立木の空間分布を示す指数であり、指数が 1 以上の場合には集中分布、1 と等しい場合はランダム分布、1 以下の場合には一様分布を示す。

TH は式 (1) を用いて算出する。指数が 1 以上の場合には上層間伐を示し、1 以下の場合には下層間伐を示す。

$$TH = \frac{\text{間伐木の平均胸高直径}}{\text{間伐前の平均胸高直径}} \quad (1)$$

6. 間伐収益の推定

UAV の選木方法が、間伐収益をどの程度見積もることができるのか比較するために林分内に設定した小プロット (0.014ha) から推定される材積 (標本調査) と UAV から推定される材積 (全数調査) を二変数材積式で (林野庁 1970) 比較する。標本調査ではプロットの毎木調査の結果から、面積あたりの間伐による収穫量を推定し、UAV で計測をおこなった林分面積 (0.496ha) の間伐材積を推定する。全数調査では技術職員が行った UAV の選木結果を用いて林分全体の間伐木の材積を推定する。

III 結果と考察

1. 選木結果の比較

選木結果の比較を表-2 に示す。また、具体的な選木結果を図-3, 4 に示す。技術職員による UAV による選木と地上からの選木の比較では、一致率が 58% となった。地上で選木を行った範囲では UAV から 66 本の選木が実

施されており、地上の38本と比較してUAVの方が多く間伐木が選定されていた。UAVと地上での選木が一致した立木は明らかに樹冠や胸高直径が小さい立木で、一致しない場合は隣り合う立木で選定結果がずれている場合が多くみられた。ヒアリングの内容と照らし合わせると、地上での選木では、太り（胸高直径サイズ）、樹冠の広がり、曲がり、傷の有無、隣接する立木との関係性、作業道に隣接している立木は選定されないなど、個体条件と立地条件を総合的に判断して選木が行われていた。

一方、UAVからの選木では樹冠の広がり、隣接する立木との関係性から選木が行われていた。地上とUAVを用いた選木の違いとしては、幹に関わる情報の有無が影響を及ぼしていると考えられる。地上での選木では他に考慮する要因が増えるため、UAVでは樹冠が歪んでおり、劣勢木と思われる立木についても地上では選木されていない場合があった。

以上の結果からUAVを用いた選木作業は基準となる情報の質が異なるため、熟練した技術者が作業に当たったとしても地上での作業を完全に代替することは難しい。特に、UAVから検出が難しい幹に関する情報は選木には重要な要素と思われる。実際の選木作業では隣接木との関係性も加味されることから地上からの選木の再現性を高めることは難しいと思われる。

表-2. 選木結果の対応表

	選木数		一致本数/一致率			
	本数/ha	本数	UAV		地上	
技術職員	284	141	12	97	22	6
UAV	学生	286	60%	15	4	7
	機械的	284	69%	75%	23	7
地上	技術職員	543	58%	20%	61%	8
	学生	1000	35%	41%	41%	47%

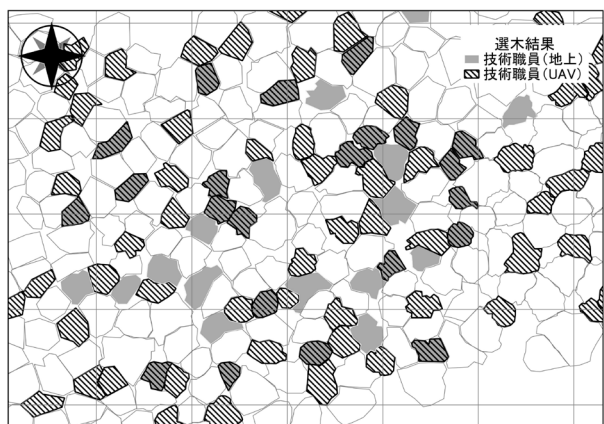


図-3. 技術職員による地上とUAVからの選木結果の比較

学生のUAVと地上の選木結果の一致率は41%であり、技術職員の58%より低い一致率となっていた。加えて、機械的に選木を行った結果は学生がUAVで行った選木と最も一致率が高く75%であった。学生の選木は技術職員に比べて規則的で立木位置など林分の中の相対的な関係性など高度な基準を考慮できていないことがわかった。

間伐木の定量的評価を表-3に示す。全ての場合でI_s

指数が1を下回っており、一様に分布していた。UAVと地上での選木の両方で学生が技術職員の指数を下回っており、学生は空間的に一様に選木を行ったことが示されている。また、学生の場合は、地上の選木結果の方がより一様な分布を示していた。また、TH指数は技術職員が地上から選木を行った場合のみ指数が1を下回っており下層間伐の傾向を示した。指数の差は大きくないが、選木経験豊富な技術職員が地上から選木を行うことで確実な定性間伐が行えたと思われる。

学生と技術職員の選木結果については、地上での選木結果の一致率が47%であり、選木作業には熟練した経験が必要であると考えられる。一方、UAVでは一致率が60%と比較的高い割合を示した。これはUAVからの選木作業は技術職員も経験がないためであると考えられる。

UAVでの選木結果はGISで簡単に可視化することができ、選木結果の見直しや林分全体を俯瞰的に観察できるため、技術の伝承や教育的には効果的な資料を提示できるとと思われる。同時に間伐を担う森林組合などの事業者が森林所有者へ提示する資料にも利用が可能で、客観的な証拠に基づいた施業を実施するうえでは重要な資料になり得ると考えられる。

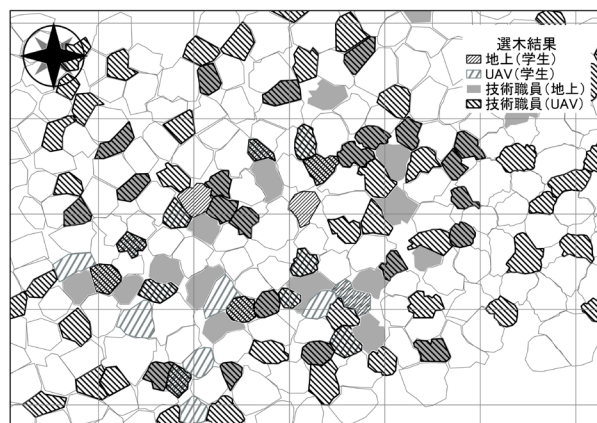


図-4. 学生と技術職員による地上とUAVからの選木結果の比較

表-3. 選木された立木の森下のI_s指数及びTH指数

		I _s	TH
UAV	技術職員	0.97	1.031
	学生	0.75	1.016
地上	技術職員	0.97	0.964
	学生	0.63	1.044

2. 間伐収益の推定

プロット調査の結果から推定された林分の間伐材積は77.7m³で、本数間伐率は33%程度であった。UAVで林分全木の選木を行って、間伐材積を推定した場合は52.3m³で本数間伐率は34%であった（表-4）。本数間伐率は概ね一致しているが、間伐木の材積では3割程度の差がみ

られた。UAVによる全数調査も計測誤差を含んでいるが、本研究で得られた計測精度を考慮すると UAV による全数調査による推定結果は標本調査に比べて正確な見積もりを算出できる。本研究で設定されたプロットは林分面積に対して 3%程度の面積であり、極端に小さい標本数ではない。従って、立木の抽出精度や推定精度などの UAV による計測の課題や選木基準について課題は残るものの、UAVによる計測は全数調査であるため、プロット調査を用いた推定結果と比べて正確な見積もりを算出できると思われる。

表一4. 間伐収益の推定結果

	標本調査(地上調査)	全数調査 (UAV)
本数間伐率 (%)	33.3	34.0
間伐木材積(m ³)	77.7	52.3
間伐木材積(m ³ /ha)	156.7	103.4
間伐収入(万円)	78.4	51.7

間伐収入は松村 (2010) で使用された単価から算出。

IV まとめ

定性間伐における選木作業について UAV は俯瞰的で客観性のある情報を提示できるが、選木作業そのものを再現することは難しいことが示された。定性間伐は十分な経験知が必要であり、地上から森林上空からの情報を基盤とした作業への転換は新たな知見が必要である。また、UAVの選木結果を伐採作業へ引き継ぐには高精度な立木位置を林内で得る技術的課題もある。

本研究では選木の基準を明確に示すことができなかったが、ニューラルネットワークを用いた選木作業の試み(美濃羽 1977)では 90%以上の正答率が得られていることから間伐のデータを蓄積することでニューラルネットワーク又は深層学習を用いた自動的な選木の実現も可能であると思われる。美濃羽の試みにおいても林分内の立木サイズを平準化することで汎用性の高いモデル構築を目指しており、UAVを活用することで林分全体の情報を効率よく取得し、応用することが期待できる。

謝辞

本研究を進めるにあたり協力頂いた三重大学附属演習林、三重大学緑環境計画学研究室にお礼申し上げます。

引用文献

- Besl, Paul J., and Neil D. McKay (1992) A Method for Registration of 3-D Shapes. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 14 (2): 239-56
- 松村直人・黒瀬宗樹・谷知大輔 (2010) ヒノキ人工林における間伐の収益性評価と生産林事業支援—三重県亀山市民有林の事例—。中部森林研究 58: 161-164
- 松村直人・野々田稔郎 (2015) スマート林業を実現する新たな森林管理システム e-forest の設計。三重大学大学院生物資源学研究所紀要 41: 3-42
- 松村直人・有田貴洋・廣瀬裕基・沼本晋也・島田博匡・野村久子 (2020) 高精度森林資源情報の取得に向

- けた各種計測装置の精度検証。森林計画誌 54(1):55-61
- 美濃羽靖 (1997) 非線形工学的手法による主観的森林情報の解析—ニューラルネットワークを用いた間伐木選定の試み—。日林誌 79 (3): 143-149
- Morisita M (1959) Measuring of the dispersion of individuals and analysis of the distribution pattern, Mem.Fac.Kyusyu Univ.Ser.E (Biol.) 2: 215-235
- 村上拓彦 (2018) UAV を利用した森林リモートセンシング。日本リモートセンシング学会誌 38(3): 258-265
- 林野庁計画課 (1970) 立木幹材積表西日本編. 319pp, 日本林業調査会, 東京
- 坂口勝美 (1980) 間伐のすべて 生産から搬出・加工・販売まで. 331pp, 日本林業調査会, 東京
- 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 2:1-28
- 諏訪実 (2020) 森林整備事業の申請・検査におけるリモートセンシング技術等の活用について。日本リモートセンシング学会誌 40(1): 26-31