

論文の内容の要旨

氏名：亀山 翔平

博士の専攻分野の名称：博士（生物資源科学）

論文題名：経済的分析に基づく持続可能な森林管理に向けた UAV 活用に関する研究

第1章 緒言

日本は約 2,500 万 ha の森林を有しており、その約 4 割が人工林である。その人工林の多くは、戦後の拡大造林により造成された森林であり、現在では木材として利用可能な 50 年生を超えている。このような成熟した森林資源を持続的に活用するためには、伐採して適切に木材を利用し、さらに再植林することで次世代の森林を作り上げていかなければならない。そのため、林業・木材産業の活性化や持続可能な森林管理を推進していくことが必要になる。しかし、東京都あきる野市と静岡県三島市の 2 か所の伐採事業を対象とした既往研究では、どちらの事業体も素材生産における生産性は低位であるとともに、収入（原木売上）だけでは支出（間伐作業費、作業道開設費）を賄うことができず、補助金を活用することで黒字の収支を維持している状況であった。そのため、補助金に依存することなく森林管理を行っていくためには、生産性の向上によるコストダウンが求められている。しかし、日本における素材生産においては急峻な地形や路網整備の遅れなどの要因により、導入できる林業機械や作業システムが制限されるため生産性の向上が困難であり、大幅なコストダウンは望めないと考える。そのため、持続可能な森林管理を実施するためには、素材生産の分析に加え、原木市場における木材流通の分析と新たな技術の活用の検討が必要であろう。

そこで、本研究は持続可能な森林管理の実現に向けた課題を明確にするため、原木市場における産地証明材と森林認証材（FSC: Forest Stewardship Council と SGEC: Sustainable Green Ecosystem Council）の経済的な分析を基に実態解明を行い、それらに加え新たな森林管理の手法として近年注目されている通信情報技術（ICT: Information and Communication Technology）の一つである UAV（Unmanned Aerial Vehicle）を活用した森林管理の可能性について検討することを目的とした。

第2章 原木市場における取引の実態

原木市場は、製材工場などへの原木の供給に加え、原木を市場へ供給した素材生産業者や森林所有者などに利益を還元する役割を担っている。そのため、原木市場は木材流通の実態を解明するのに重要な拠点である。そこで、東京都西多摩郡日の出町にある原木市場の多摩木材センターを対象に、原木の取扱量や価格について分析を行い、持続可能な森林管理に向けた課題の検討を試みた。

その結果、産地証明された多摩認証材や持続可能な森林資源のお墨付きを受けた森林認証材（FSC と SGEC）が取扱われて以降、その需要が増加したことで多摩木材センターを介した原木の安定供給に寄与したと考えられる。しかし、原木価格は日本全国の平均と同様に多摩木材センターでも長期的に下落している。また、多摩認証材や森林認証材も価格プレミアムが付かないため、現状の原木価格では、認証を取得しても素材生産業者や森林所有者への利益の還元は困難といえる。そのため、市場で評価されないとすれば、新たな手法を用いた作業の効率化や省力化の検討が必要である。

第3章 異なる飛行条件による UAV 推定値の精度検証

第2章の結果から、原木の差別化（多摩認証材、FSC 認証材、SGEC 認証材）を図ったとしても、原木価格には反映されない現状が明らかとなった。現状では、原木価格の向上による収益の改善を望むことは難しいため、新たな技術の導入が必要であろう。現在、UAV は新たな技術として様々な分野で積極的に活用されており、UAV による空撮画像を SfM（Structure from Motion）処理し、生成した 3D モデルや DSM（Digital Surface Model）から高さの推定などが行われている。しかし、その飛行条件や空撮画像の SfM ソフトウェアによる画像の処理方法は体系化されておらず、UAV による推定のプロセスは幾多も存在する。森林分野においても UAV が活用できれば、人的な資源調査のコストを削減

できる可能性が高まる。そのため、UAV の導入における基礎的なデータの蓄積が急務である。そこで、本章では、実務レベルでも活用可能である UAV による簡易な森林資源把握手法を用い、樹高や材積の推定とその精度検証から、UAV 活用の基礎的な知見の蓄積と森林域における UAV の活用の可能性について検討した。

まず、UAV の飛行条件が、樹高や材積の推定値に影響を与えるのか検証を試みた。対象は八雲演習林の試験地とし、UAV (Phantom3 Advanced) を活用した空撮画像の撮影と SfM ソフトウェア (Terra Mapper) を活用した空撮画像の処理と推定を行った。飛行条件は、飛行高度が 5 条件 (60m, 80m, 100m, 120m, 140m)、オーバーラップとサイドラップがそれぞれ 4 条件 (80%, 85%, 90%, 95%) の計 80 条件を設定した。飛行条件ごとに生成された画像やモデルを基に、樹高と樹冠面積の推定およびその推定値から材積の算出を行った。樹高と材積において毎木調査の実測値と比較し、UAV 推定値の精度検証を行った。

その結果、3D モデルから樹頂点と樹冠の判読が可能なのが 64 条件、判読が不可なのが 16 条件であった。樹高の推定値は、実測値と比較すると過少傾向であり、飛行条件ごとの RMSE は 5.2~7.1m であった (図 1)。また、材積の推定値も実測値と比較すると過少傾向であり、飛行条件ごとの RMSE は 0.31~0.4 m³であった (図 2)。本章の結果より、RMSE はどの飛行条件においても同程度であり、飛行条件が推定値に与える影響は少ないと考えられた。しかし、画像の処理が不可となり、空撮画像を再撮影する可能性を考慮すると、空撮画像の重複率が高い飛行条件の設定が求められる。また、実測値と比較すると精度は低いため、現場での運用には地形や林況を考慮した飛行条件を設定するなどによる精度の向上が求められる。

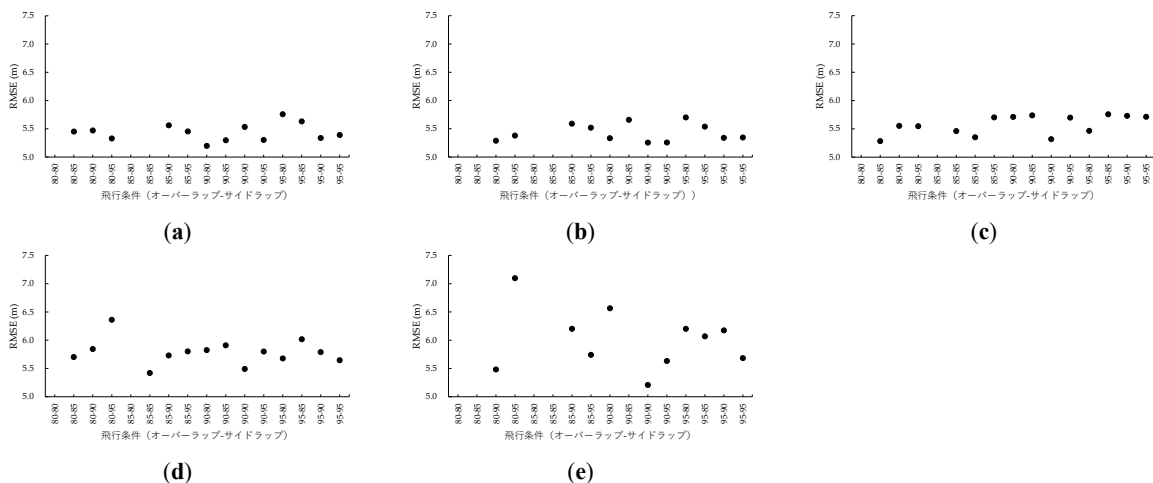


図 1. 飛行条件ごとの樹高推定値の RMSE. (a) 飛行高度 60m, (b) 飛行高度 80m, (c) 飛行高度 100m, (d) 飛行高度 120m, (e) 飛行高度 140m

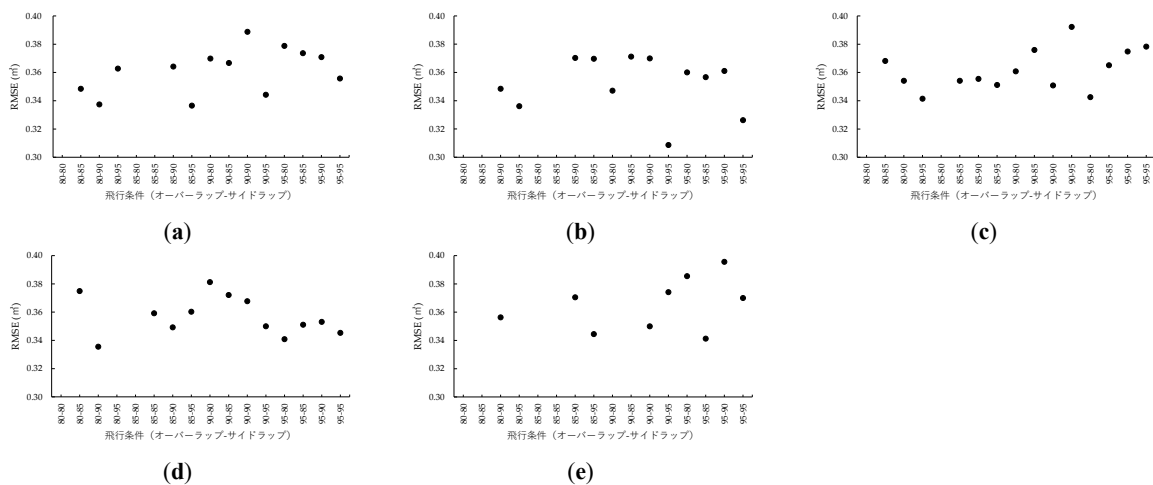


図 2. 飛行条件ごとの材積推定値の RMSE. (a) 飛行高度 60m, (b) 飛行高度 80m, (c) 飛行高度 100m, (d) 飛行高度 120m, (e) 飛行高度 140m

第4章 異なる SfM ソフトウェアによる UAV 推定値の比較

UAV による空撮画像の処理および樹高や材積の推定には、SfM 技術の活用を必要とするが、SfM ソフトウェアによる処理はブラックボックスであるということが指摘されている。また、SfM ソフトウェアについては有償のソフトウェアの活用が推奨されているが、ソフトウェアによって処理工程やパラメータの設定方法が異なるため、ソフトウェアによって推定結果が異なることが予測される。

そこで、本章においては、異なる 3 つの SfM ソフトウェアによる空撮画像の SfM 処理および生成される画像やモデルの違いと、樹高や樹冠面積の推定値を比較することを試みた。使用した SfM ソフトウェアは、Terra Mapper, PhotoScan, Pix4Dmapper である。また、用いた空撮画像は、第3章と同様のものであるが、本章では、飛行高度が 5 条件 (60m, 80m, 100m, 120m, 140m)、オーバーラップとサイドラップがそれぞれ 2 条件 (90%, 95%) の計 20 条件による比較とした。SfM ソフトウェアの画像処理における各ステップのパラメータは、マニュアルの推奨値や初期値に設定した。その SfM 処理により生成された画像やモデルをもとに樹高と樹冠面積を推定し、異なる SfM ソフトウェアにおける推定値の差を検定するため多重比較を行った。また、樹高においては毎木調査の実測値と比較し、UAV 推定値の精度検証を行った。

その結果、どの SfM ソフトウェアでも生成された画像やモデルの解像度は約 2~5cm/pix であり、同一の飛行条件である場合には SfM ソフトウェアによる違いはなかった (図 3 (a))。高密度点群数は、SfM ソフトウェアにより大きく差があり、PhotoScan は最も多く的高密度点群が生成されていた (図 3 (b))。それぞれの SfM ソフトウェアにより生成された画像やモデルは図 4 に示す。また、SfM ソフトウェアにおける推定値の多重比較を行った結果、樹冠面積 (表 1. 左)、樹高 (表 1. 右) とともに多くの飛行条件で統計的な有意差 ($P < 0.05$) が確認された。さらに、樹高の RMSE は、どの SfM ソフトウェアにおいても 5~6m であるが、多くの飛行条件において Pix4Dmapper の推定精度が高かった。本章の結果より、SfM ソフトウェアにより樹冠面積と樹高の推定値は有意に異なることが明らかになった。また、生成された高密度点群数からは PhotoScan, RMSE からは Pix4D の活用が推奨された。具体的な例を挙げると、災害地の状況把握などのモニタリングには PhotoScan, 樹高などの推定には Pix4Dmapper が有効と推察された。

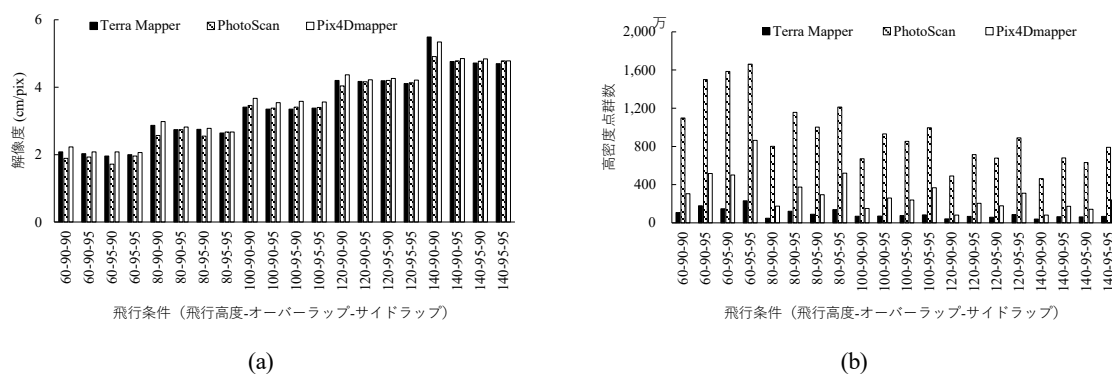


図 3. ソフトウェアごとの画像処理結果. (a) 生成された画像やモデルの解像度, (b) 高密度点群数

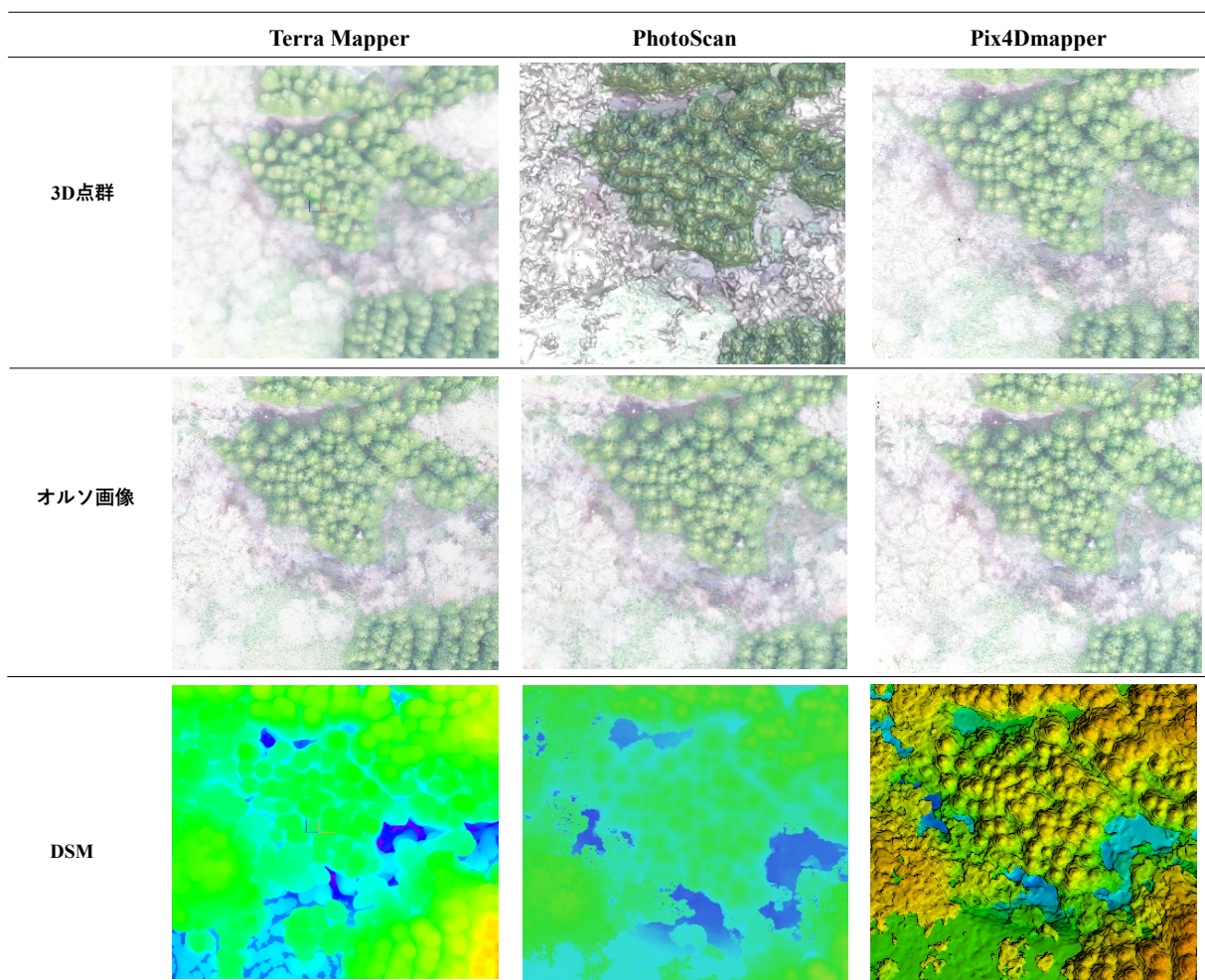


図 4. SfM ソフトウェアにより生成された 3D 点群, オルソ画像, DSM.

表 1. 多重比較により有意差が確認された飛行条件数. 左: 樹冠面積, 右: 樹高

SfM ソフトウェアの組合せ	有意差が確認された 飛行条件数	SfM ソフトウェアの組合せ	有意差が確認された 飛行条件数
Terra Mapper - PhotoScan	14	Terra Mapper - PhotoScan	15
Terra Mapper - Pix4Dmapper	16	Terra Mapper - Pix4Dmapper	19
PhotoScan - Pix4Dmapper	11	PhotoScan - Pix4Dmapper	20

第 5 章 総括

本論文では, 持続可能な森林管理に向け原木市場の経済的な分析を試みた結果, 原木の差別化 (多摩認証材, FSC 認証材, SGEC 認証材) による価格プレミアムもなく, 原木価格の下落による収入の減少が大きな課題であることを解明した。現状では, 持続可能な森林管理のためには, 新たな技術を用いた作業の効率化や省力化が求められることが明らかとなった。そこで, 人的作業の省力化が期待できる新たな森林管理の手法として UAV の活用の可能性を検討した。森林域においても UAV による森林情報の取得が可能であり, 作業の省力化や効率化に向けた新たな森林管理の手法として十分に活用の可能性が高い。短期的な視点では大幅なコスト削減にはつながらないが, 持続可能な森林管理に求められる長期的な森林の可視化が容易にでき, 将来的には森林管理のコスト削減につながる可能性がある。本研究で得られた成果は, 今後の UAV 技術を導入した森林情報の蓄積や情報共有のための基礎的な情報としての活用が十分に期待される。