

令和 5 年 4 月 28 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19K06125

研究課題名(和文) 固定翼UAVを用いた精密森林情報の低コスト更新手法の開発

研究課題名(英文) Development of a Low-Cost Method for Updating Precise Forest Information Using Fixed-Wing UAV

研究代表者

長谷川 尚史 (Hasegawa, Hisashi)

京都大学・フィールド科学教育研究センター・准教授

研究者番号：70263134

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：精密森林情報のデータ更新はコストや手間など実用面で問題が多い。本研究はGNSS技術、UAVによるSfM技術、LiDAR技術を統合し、低コストかつ効率的な高精度森林情報の収集・更新手法を開発することを目的に実施した。COVID-19の影響で固定翼UAVでは十分な解析を行うことができなかったが、地上での全球カメラおよび回転翼UAVの林内飛行によるSfM解析によって、低コストに実用的な精度での立木データの取得、更新が可能であることを明らかにした。また作業道補修現場においては、精密な土工量推定の新手法を確立した。今後、これらの成果を固定翼UAVに再適用し、同時にLiDAR SLAM技術との統合を図る。

研究成果の学術的意義や社会的意義

SfMやSLAM、LiDAR等の技術進展は極めて早く、近年では森林においてもデジタルツインをベースにした持続的資源利用に関する概念が広がりつつある。木材資源の持続的利用に関する社会の期待は極めて高いが、森林は構造が複雑で成長や災害等で刻一刻と変化するため、正確なデジタルツインの作成技術の確立は容易ではなく、他分野に比べてCPSに関する具体的手法の検討も遅れている。本研究は主に森林でのSfMを実用可能なレベルに高めた面で大きな意義があった。一方でより高効率に活用しうる固定翼UAVでは十分な解析ができなかった。今後、本成果を固定翼UAVに再適用し、LiDAR SLAMなど新たな技術との統合を図る。

研究成果の概要(英文)：Data updating of precision forest information is fraught with practical problems such as cost and labor. The objective of this study was to develop a low-cost and efficient method for collecting and updating high-precision forest information by integrating GNSS technology, SfM technology using UAVs, and LiDAR technology. Although fixed-wing UAVs could not perform sufficient analysis due to the COVID-19, we found that SfM analysis using a 360-degree camera on the ground and a rotary-wing UAV flying under tree canopies can acquire and update standing tree data at low cost and with practical accuracy. We also established a new method for precise earth volume estimation at a work road repair site. In the future, these results will be reapplied to fixed-wing UAVs and integrated with LiDAR SLAM technology.

研究分野：森林利用学

キーワード：精密森林情報 精密林業 Unmanned Aerial Vehicle Structure from Motion 林内飛行 データ更新

## 1. 研究開始当初の背景

近年、地球温暖化をはじめとする地球環境問題の顕在化により、来るべき循環型社会における森林の管理および資源としての利用法についての議論が活発に行われるようになってきた。特に資源としての国内の森林の価値は、国産材の成熟に伴って急激に上昇しつつあり、国も木材自給率 50%の達成を目標とするなど、次世代の成長産業としての林業、すなわち持続的木材生産の復権がなされようとしている。

一方で、森林を持続的に利用していくための中長期的な新たな森林管理方法については、経済性、環境性など個別に議論は行われているものの、総合的管理方法に関する本格的なイノベーションには至っていない。森林 GIS や森林クラウド、高解像度衛星、LiDAR (Light Detection And Ranging: レーザー光を利用した地表面および樹冠面のセンシング技術)、GNSS 技術 (Global Navigation Satellite System: 米国の GPS のほか、ロシアの GLONASS、EU の Galileo、中国の Beidou などが運用または構築中。日本でも準天頂衛星 QZSS の整備が進行中) など、個々の最新技術を現場に応用するため、近年は農林水産省等の研究プロジェクトにおいて「ICT 林業」「スマート林業」と冠して機械開発などの様々な実用化事業が行われてきているものの、あくまで従来の資源管理の手順の効率化をはかるために利用されるにすぎず、森林資源を循環的、持続的に利用していくための森林管理手法を構築するには至っていない。

研究代表者は「精密林業」という概念を元に、GNSS 利用技術を中心に研究を行ってきた。精密林業は、最新の技術と情報を用いて複雑な森林の立地特性を考慮した意思決定と森林管理および林産物の管理を行うこと、と定義されており (Proceedings of the First International Precision Forestry Cooperative Symposium, 2001)、森林管理手法を根本から覆すイノベーションを起こす可能性を有している。近年は LiDAR や SLAM 技術を用いた単木情報の収集まで可能になってきている。研究代表者もこれまで、精密情報活用の鍵となる林内での位置情報の取得技術に着目し、主に GNSS 利用技術に関して研究を行ってきた。しかし実際には、精密林業の概念を元にした統合的森林管理研究および実践はまだ本格運用には至っていない。

本研究の立案の背景は、こうした先端技術が様々な分野に応用されつつある現在、なぜそれらが実際の持続的森林管理に活用されないのか、それらが森林資源利用において本格的なイノベーションを起こすに至っていないのか、という問いから始まっている。研究代表者は行政・民間の様々な委員会等に出席し、これらの研究成果が現場ではほとんど活かされていない理由について検討を行ってきたが、その理由の一つが、データ更新をはじめとする中長期的なシステム運用サイクルが確立されていないことである、という結論に至った。様々な優れた研究の成果によって、広大な森林において、個々の木の位置と状態を把握することが可能になってきたが、実際にこのデータを中長期的に活用するには、データの更新を含めた単木管理サイクルが必要である。森林は伐採や林木の成長、自然災害等によって刻一刻と変化しており、一時的に精密情報を取得したとしても、情報はすぐに陳腐化する。また、精密情報に基づいて健全な森林の維持や木材利用のための伐採計画を立案したとしても、木材の市況もまた刻一刻と変化するため、経済的に実行可能であるかどうか不確定である。すなわち、より簡便に、森林の状況を必要な時にモニタリングし、データの更新を行うことによって、森林管理計画および販売計画の修正という PDCA サイクルを念頭に置いたシステムを構築しなければ、こうした技術はこれまでの伝統的な森林資源管理を簡略化するに留まり、森林資源管理に関するイノベーションを起こし得ないと考えられる。データ更新そのものは、最初のデータ取得時と同じ技術を用いて可能であるが、過去のデータとの整合を含めるとデータ取得時と同等以上の高いコストがかかるため、経済的持続可能性を損なうものとなり実現していないのである。

航空機や UAV による SfM および LiDAR 計測によるデータ更新時の現実的な課題は、3 点が考えられる。1 点目は、GCP (Ground Control Point) の設置の手間である。GCP は SfM 等によって作成した 3D モデルに絶対座標を与えるのに必要な座標既知点であるが、路網が整備されておらず特徴的な地物のない森林を対象にした場合、設置可能な地点や GCP の代替となる地物が少なく、GCP 設置に大きな手間がかかる。2 点目は、作成した 3D モデルと過去の立木位置図等のモデルとの整合性の問題である。通常的手法で更新した立木データは既存の立木データと独立しており対応性がない。誤差も含むため、どの立木がそれまで管理してきた立木であるか判断が難しい。3 点目は、間伐などの施業区域全体は数十 ha におよび、通常使用される回転翼型 UAV ではカバーしきれず、複数回の飛行計画と処理が必要となることである。これらの問題は、費用や手間を掛ければ回避できるが、現場での運用では大きな問題となる。

そこで本研究課題では、既存の立木位置データを GCP として利用することによって、新たに GCP を設置することなく、前回の立木データと整合性を持たせることができ、運用コストも実用可能なレベルに削減されるのではないかと考え、企画、実施した。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、実際に森林管理の現場で活用できる単木管理システムを提供することであ

り、そのために、高精度を維持したまま、データ更新サイクルを簡略化することにある。また、UAV 技術や SfM 技術は非常に速い速度で発展し、新製品も次々と開発、販売されていることから、新たに開発された機器やソフトウェアも積極的に活用し、現場での実用可能性に重点をおいて技術開発を行うこととした。

UAV による空中写真からの 3D モデル作成については、すでに安価またはフリーの SfM ソフトウェアを用いても可能となっているが、高精度データの作成には GCP の設置が必須で、急傾斜森林域等における GCP 設置を省略した手法の開発は独自性が高く、現場への応用可能性の点でも普及性が非常に高い。近年は森林域での UAV に関する研究は増加しているが、その多くは回転翼型 UAV を使用したもので、作業効率が低い。飛行速度の速い固定翼型 UAV は作業効率が高いが、高価で広い着陸地点が必要であったため傾斜地での研究はあまり行われてこなかったことから、森林での活用可能性を明らかにする。

一方、小規模なエリアにおける高詳細なデータの更新には、回転翼 UAV や手持ちカメラなどを活用できる可能性もある。本研究の目的は、あくまでデータ収集・更新に重点を置き、様々な機材を用い、費用対効果を重視して、実用性の高い技術の開発を目的に行った。

本研究の最終目的は、データ更新および木材サプライチェーンマネジメントにおけるデータ活用のために、高精度でありながら低コスト、省力型技術の確立を目指し、「森林における立木」を「消費者に木材製品」として持続的に届けるための木材サプライチェーンのベース情報を構築する手法を検討することである。

### 3. 研究の方法

研究開始時には、固定翼型 UAV を用いたデータ更新手法を中心に研究計画を立案し、伐採予定地において森林施業前後および施業後 1 年後のデータを取得、解析する予定であったが、COVID-19 の影響によって、伐採計画および研究計画の変更を余儀なくされた。実際には、①固定翼型 UAV の利用可能性の検討、②360 度カメラを用いて林内歩行時に撮影した動画からの SfM 解析による森林情報の収集、③回転翼型 UAV の樹冠下飛行によって取得した画像の SfM 解析による単木情報の解析、④作業道補修工事時の土工量モニタリングへの応用、4 つの研究を実施した。

### 4. 研究成果

#### ①固定翼型 UAV の利用可能性

山中の広い土場を用いて周辺植生の SfM 解析を行った。十分な解像度と解析能力を有することが確認できたが、一方で飛行時に上空の強風（地表では弱風）によって着陸が困難な状況に陥り、着陸位置が 20m ずれる結果となった。傾斜地では、上空を含めた慎重な天候に関する情報収集と日時の選定が欠かせないことが分かった。

#### ②360 度カメラでの動画を用いた SfM 解析

スギ人工林において歩行しながら 360 度カメラの動画を撮影し、SfM 解析を行った。立木の下部について 3D モデルを作成することができ、動画フレームのフィルタリングによって、立木の胸高直径が 1.96mRMSE で計測できることが明らかとなった。ただし、SfM 解析は PC に大きな負荷が掛かり、また立木の背景である上空とのコントラストが解析精度に大きな影響を与えるため、空部のマスキングと適切な動画フレーム選択について、より深い検討が必要となると考えられた。将来的には、森林歩行時にカメラを装着することによって、データ更新のために森林調査を行うことなく、自動的に取得した画像による森林データを更新できる可能性が示された。

#### ③回転翼型 UAV の樹冠下飛行による単木情報の解析

人工林において林内および上空から回転翼型 UAV による静止画撮影を行い、SfM 解析によって 3D モデルを構築した。樹冠直下部は枝および逆光の影響で 3D モデルを作成することが困難であったが、立木は概ね認識させることが可能であり、胸高直径は 1.52~1.82cmRMSE の精度で計測することが可能であった。また SfM では色情報が使用可能であり、樹幹・枝と葉は 98% の精度で識別が可能であった。本手法によって、森林のデータ取得・更新だけでなく、デジタルツイン作成とより詳細な施業方法の決定ができる可能性が示された。

#### ④作業道補修工事時の土工量モニタリング

作業道補修工事現場において、回転翼型 UAV による 6 回の静止画撮影を行い、地表の形状変化を観察した。トータルステーションによる計測と比較して、高さ方向で 0.098mRMSE の精度が得られた。工事前後のみの観察では切土量 48.6m<sup>3</sup>、盛土量 137.5m<sup>3</sup>であったが、各段階の土工状況を積算すると、トータルの土工量は切土量 171.3m<sup>3</sup>、盛土量 260.7m<sup>3</sup>となり、詳細なデータ取得によって、より正確な土工量評価が可能になることが分かった。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Hasegawa, Hisashi; Sujaswara, Azwar Azmillah, Kanemoto, Taisei; Tsubota, Kazuya	4. 巻 14(4)
2. 論文標題 Possibilities of Using UAV for Estimating Earthwork Volumes during Process of Repairing a Small-Scale Forest Road, Case Study from Kyoto Prefecture, Japan	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Forests	6. 最初と最後の頁 1-11
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/f14040677	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 山手規裕・長谷川尚史・小路丸未来	4. 巻 59(3)
2. 論文標題 UAV計測における位置決定手法の違いに注目した樹高，樹木位置の精度比較	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 写真測量とリモートセンシング	6. 最初と最後の頁 112-124
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 Sujaswara, Azwar Azmillah; Hasegawa, Hisashi
2. 発表標題 The Utilization of SfM that Combines Images Taken Above and Below the Canopy Using UAV for Deriving Forest Inventory Data
3. 学会等名 森林利用学会第29回学術研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 長谷川尚史・Azwar Azmillah Sujaswara・兼元大誠
2. 発表標題 林内ドローンSfMによる作業道補修工事における土工量の計測
3. 学会等名 森林利用学会第29回学術研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 長谷川 尚史, Azwar Azmillah Sujaswara, 兼元 大誠
2. 発表標題 林内ドローンSfMによる作業道補修工事における土工量の計測
3. 学会等名 森林利用学会第29回学術研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Sujaswara, Azwar Azmillah; Hasegawa, Hisashi
2. 発表標題 The Utilization of SfM that Combines Images Taken Above and Below the Canopy Using UAV for Deriving Forest Inventory Data
3. 学会等名 森林利用学会第29回学術研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 池端隆彦・長谷川尚史
2. 発表標題 動画撮影による簡易的な林内計測の手法に関する検討
3. 学会等名 森林利用学会第27回学術研究発表会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	白澤 紘明  (Shirasawa Hiroaki)  (50629186)	国立研究開発法人森林研究・整備機構・森林総合研究所・主任研究員 等   (82105)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------