

氏名	ゴンドゥブ オルベルメ エルヴェ GONROUODOBOU OROU BERME HERVE
本籍（国籍）	ベナン共和国
学位の種類	博士（農学）
学位記番号	連研第 828 号
学位授与年月日	令和 4 年 9 月 2 6 日
学位授与の要件	学位規則第 5 条第 1 項該当課程博士
研究科及び専攻	連合農学研究科 地域環境創生学専攻
学位論文題目	Understanding forest ecosystems in steep mountains using Unmanned Aerial Vehicles, Yamagata, Japan (無人航空機を用いた急勾配な山地の森林生態系の解明（山形、日本）)
学位審査委員	主査 山形大学教授 Lopez Caceres Maximo Larry 副査 山形大学教授 塩野 義人 副査 弘前大学准教授 加藤 千尋 副査 岩手大学教授 真坂 一彦

論文の内容の要旨

世界の陸地の 25%を山地が占めている。日本では国土の 68%が森林に覆われており。それは急傾斜の山々に広く分布している。山林は流域の生物の活動を支える重要な役割を担っているが、その生態系の構造や構成はまだよく解明されていない。流域のほとんどは天然林で構成されているが、人工林や高地にある森林ではよりモノカルチャーとなっている。

近年、無人航空機(UAV)が民間でも利用できるようになり、短期間のうちに自然生態系の研究、特に接近しての観察や測定が制限される地形の森林調査において必要不可欠なツールのひとつとなりつつある。UAV は空間的、時間的に非常に解像度の高く、柔軟性の高いデータを我々に提供してくれる。3次元構造復元(SfM)として知られている UAV で得られた画像を重ね合わせて森林をモデル化する写真測量技術によって、森林生態系の高度で詳細な 3D 情報を取得することが可能である。したがって、UAV は従来のたくさんのエネルギーと長い時間を消費するフィールドワークや低解像度のために精密でない衛星画像に変わる信頼性の高い手法である。UAV には様々なセンサーを取り付けることができるが、森林の特徴を詳細に捉えるために、デジタル RGB カメラは費用効率が高く、最も万能な手段である。

UAV の画像情報を最大限に活用するために非常に多くの方法論とアプローチが用いられているが、それらの画像の解像度を考慮することが地形、特に急斜面の地形においては大切である。よって、画像分析では斜面にある木々の位置が考慮されるため、画像の質や急斜面な森林を正しくモデル化することは森林生態系の全体的な理解を高める。UAV が一定の高さで飛ぶ場合、その高さは常に傾斜の最高高度よりも高いため、地形の起伏の変化によって、地上解像度(GSD)の均一性や主に底部における斜面の画像の詳細が損なわれることがある。

そこで、本研究の第一部では、地形を考慮して UAV からの画像を取得し、処理後の画像から生み出されたアルゴリズム性能を分析した。DroneDeploy ソフトウェアによって提供され

ている地形認識機能(TAF)は一般に利用可能な解像度の粗いデジタル地表モデル(DSM)に基づいており、UAV (Mavic 2 Pro)は地形の起伏に沿って飛ぶことができる。よって、斜面に沿う位置に関わらずに、UAV は常に地表との距離に基づいた高さを飛行する。TAF を用いた飛行任務の性能は、UAV が TAF を用いずに飛行した飛行任務(NTAF)と比較された。NTAF では UAV が常に一定の高さで飛ばされ、それは斜面の上部では UAV が地形の近くを飛行し、底部では地形からさらに離れた空中を飛行することになる。

調査地はトドマツ(*Abies mariesii*)が優占種となっている傾斜 20 度の斜面である。オートモザイク画像と TAF、NTAF によって作られた林冠高さモデル(CHM)の質を高めるために、森林の木々(梢の検出)が自動的に検知できるように 2 つのアルゴリズムが用いられた。コネクテッドコンポーネンツであるアルゴリズム 1 はスライディングウィンドウの手法で、ピクセルの CHM 高度を降順に並べて林冠を構成する木々を検出したうえで、最大値にポイントを割り当てる。他方、アルゴリズム 2 はいくつかのモルフォロジー演算を適用した後に最大値を割り当てた。その結果、TAF で飛行した場合、NTAF で飛行した場合よりも高密度ポイントクラウド(DPCs)が地形に沿ってより高い密度で、より均一的に分散されていた。アルゴリズム 1 においては、最小マッチング誤差が 1m で、NTAF で飛行した場合の正確度が 81.55%であったのに対し TAF で飛行した場合の正確度は 86.55%と、梢(樹木の最上部)の検出精度が 5%高まった。それに対しアルゴリズム 2 を使用した場合は、梢の検出精度は TAF で飛行した場合で 76.23%、NTAF で飛行した場合で 62.06%であった。よって、梢の検出に限っては、NTAF はアルゴリズム 1 のような緻密なアルゴリズムを用いた場合において有効であると言える。しかしながら、TAF では 2m の誤差で梢の検出をする割合がわずか(3.21%)であり、より高精度であることが示された。折り返し地点では梢が過大に検出される。

第二部では、アルゴリズム 2 を用いた際に、より急傾斜(傾斜 28 度)で複雑な地形構造において TAF は梢の検出の基準値を向上することを評価した。仮説は、より急斜面では梢の検出アルゴリズムに、より高い差異が見られるだろうというものであった。調査地は十分に成長しきったスギ林である。TAF は自動で生成される DSM(ただし、前回のように一般に利用可能ではない。)に基づいており、それは UAV の飛行コースの質を高めると期待される。我々は UAV データの取得データに、NAFT と比較して梢検出アルゴリズムの性能を評価する。我々の調査地は起伏の複雑な山々である。大半の梢は検出された。その結果、2.5mを最大許容誤差と設定した時、TAF では 93.95%で、NTAF では 91.42%で梢が検出された。TAF を使うとマッチング頻度が減少し、急勾配の傾斜でさえも予想より向上は小さかった。

最後の部分では、ブナ(*Fagus crenata*)、ミズナラ (*Quercus crispula*)、カラマツ(*Larix kaempferi*)、カエデ(*Acer monomaxim*)から成る混合林の樹種のマッピングのために TAF(オートモザイク画像の質は均一とする)と Python の半自動樹種判別を用いた。この森林では、葉のサンプルから窒素安定同位体(^{15}N)と窒素の濃度が分析され、各個体の木々から得られた値は自動樹種判別とその森林内の分布モデルを用いながら混合林全体の値であると推定された。このようにして、急斜面において UAV で得た質の高い空撮画像で作成されたオートモザイク画像を用いることで、自動的に樹木の分布と生物生理学的指標を同時に行った。

論文審査の結果の要旨

Gonroudobou 氏は蔵王山と山形大学附属演習林で行った彼の研究成果を発表しました。どちらの調査地も勾配が急であり、トドマツ (*Abies mariesii*)、スギ (*Cryptomeria japonica*)、ブナ (*Fagus crenata*)、カラムツ (*Larix kaempferi*)、ミズナラ (*Quercus mongolica*)、カエデ (*Acer spp*)で覆われています。モミ林とスギ林の場合は純林ですが、残りの4種は、同様に急斜面で混交林を形成しています。調査地の森林へアクセスするのは難しいため、その森林の特性と健康状態の評価は困難です。しかし、近年発達している無人航空機(UAV)によって、現在ではその困難さが解消されています。Gonroudobou 氏は東北地方の特性を持つ森林において、森林調査のための UAV の使用方法をマスターしました。彼はいくつかの独自の飛行プロトコルを開発し、それらをこれらの森林が分布している地形の特徴に適応させました。山岳地帯では、ドローンが同じ高さで飛行する場合、画像の収集は斜面の影響を強く受けます。したがって、彼の研究は最初に UAV が地形認識機能(TAF)を用いて傾斜に沿って飛行する場合とその機能を用いずに一定の高さを飛行する(NTAF)場合で収集される画像とその画質の向上の評価に着目しました。予想に反して、山岳地帯で行われた研究のほとんどが飛行の際に TAF を使用しておらず、森林の傾斜に着目した研究はほとんどありませんでした。彼の研究は TAF を使用して地形に沿って飛行することで画質の向上が見られることを示しています。また、林冠高さモデル(CHM)を作り出すために使用される高密度ポイントクラウド(DPC)の密度が向上されたというのは最も重要な発見でした。自動森林インベントリモデルの開発に繋がるため、梢(木の最上部)の検出は森林調査において最も重要なアプリケーションのひとつです。Gonroudobou 氏によって示されたように、そのモデルは木々が斜面で見られる場合には平地で見られる場合とは異なったやり方で形成される必要があります。彼の研究では、コネクテッドコンポーネンツアルゴリズム(CCA)とモルフォロジー演算アルゴリズム(MOA)の2つの梢の検出アルゴリズムを試験しました。トドマツ林では世界中で利用可能な数値標高モデル(DEM)によって導かれた TAF を使用し、急傾斜のスギ林では良い飛行の遂行を確実にするために UAV が自動で作成した高解像度の DEM を使用しながら CCA のみを適用しました。最初のトドマツ林では、CCA で最小マッチング誤差がたったの1mとした時、TAF を用いた場合には 86.55%、NAFT の場合には 81.80%の精度で梢を検出することができました。MOA による梢の検出では、最小マッチング誤差が1mで、TAF を用いた場合は 76.23%、NTAF の場合には 62.06%と、TAF においては14%精度が向上しましたが、CCA を用いた場合よりも低い精度となりました。一方のスギ林では、梢の検出精度は最小マッチング誤差が1.5m、2.0m、2.5mのそれぞれで TAF を用いた場合には 83.69%、88.82%、93.95%、他方では 83.27%、87.79%、91.42%でした。自動で作成された DEM において向上が乏しかったのは、アルゴリズムのパフォーマンスを高める CHM の向上が必要であることを示唆しています。また、スギ林よりもトドマツ林というように、樹種の構造がアルゴリズムのパフォーマンスそのものに影響を与え、梢の検出を左右することにも言及する必要があります。しかしながら、研究対象に応じて最小マッチング誤差を変化させることでかなり良い結果を得ることが可能です。この研究結果に基づき、Gonroudobou 氏は TAF を用いて作成された RGB による

オートモザイク画像を用いて、混合林における窒素の分布地図を作るために、ブナ、カラマツ、ミズナラ、カエデから構成される混合林において窒素含有量と窒素同位体を測定するフィールドワークに規模を拡大させました。

結論として、Gonroudobou 氏は博士の学位を取得するにあたって 1 つの論文の著書、2 つの論文の共著者として十分な成果をあげました。また、森林調査において UAV を応用させるために非常に大きな貢献をしました。

以上より、本審査委員会は、「岩手大学大学院連合農学研究科博士学位論文審査基準」に則り審査した結果、本論文を博士（農学）の学位論文として十分価値のあるものと認めた。

学位論文の基礎となる学術論文

Gonroudobou, O. B. H., Silvestre, L. H., Diez, Y., Nguyen, H. T., & Lopez, C. M. L. (2022). Treetop Detection in Mountainous Forests Using UAV Terrain Awareness Function. *Computation*, 10(6), 90.

- ・ 図表はこの要旨には記載しないでください。
- ・ A4判で作成し、最大4枚以内としてください。
- ・ タテ40行、ヨコ42文字の設定としていますので、変更しないでください。