小型 UAV による空撮と SfM を用いた樹高計測

田村太彦^{*1)}・加藤 顕¹⁾・小花和宏之²⁾・吉田俊也³⁾

1) 千葉大学大学院園芸学研究科 Graduate School of Horticulture, Chiba University

2) 千葉大学環境リモートセンシング研究センター Center of Environmental Remote Sensing, Chiba University

3) 北海道大学大学院環境科学院 Graduate School of Environmental Science, Hokkaido University

摘要: 森林の管理には簡易なモニタリング技術が必要である。これまでの 3 次元データの取得は、レーザーによるデータの取得が行われてきたが、近年 Structure from Motion (以下 SfM) という技術が利用可能となった。SfM は写真測量の技術であり、小型 UAV を用いることで 3 次元データを簡易的に取得できる。本研究では、北海道大学雨龍研究林において、小型 UAV による空撮画像と SfM を適用することで森林の 3 次元データを取得し、樹種の違い、季節変化、地形が樹高計測に与える影響について検討した。その結果、季節変化が樹高計測に影響を与えること、展葉時期において高い精度で樹高を計測できることがわかった。

キーワード: SfM, 無人航空機, リモートセンシング, 樹高, DSM

TAMURA, Taichi, KATO, Akira, OBANAWA, Hiroyuki and YOSHIDA, Toshiya: **Tree height measurement from aerial images taken by a small Unmanned Aerial Vehicle using Structure from Motion.**

Abstract: Structure from Motion (SfM) is an advanced photogrammetry. In this study, three-dimensional data is taken by a small Unmanned Aerial Vehicle (UAV). Our study area is Uryu experimental forest of Hokkaido University. In this study, aerial images by a small UAV using SfM are used and applied to provide three-dimensional data of the forest. Tree height measurement from the UAV was compared with field measurement under the different condition of tree species, seasonal change, and terrain slope. The results suggest that seasonal change could largely affect the accuracy of the tree height measurement using a UAV.

Key words: Structure from Motion, Unmanned Aerial Vehicle, remote sensing, tree height, Digital Surface Model

1. はじめに

これまでの 3 次元データの取得には航空機レーザー¹⁴⁾や地上レーザー⁷⁾が用いられており、レーザーを用いることで広範囲を詳細に調査することが可能となった。レーザーの最長到達距離が数百メートルを超える地上レーザーも身近に利用可能となりデータの取得効率率はさらに良くなってきている。森林域^{5,8)}や都市緑地¹¹⁾、法面緑化地⁴⁾でもレーザー測量を用いて樹高や胸高直径、葉面積指数 (LAI)、樹冠量などを計測する研究が多く行われており、街路樹¹⁷⁾や都市緑地の管理のためのモニタリング技術^{6,13)}や、森林の構造・資源量を把握することが重要である森林生態系の調査・持続的な森林管理に活用されている。しかし、使用する機材が高価であることなどから高頻度のモニタリングを行うのは難しい。そのため、さらに低コストかつ簡易的に 3 次元データを取得する方法を検討する必要がある。そこで、近年注目されている Structure from Motion (以下 SfM) という手法に着目した。

SfM は写真測量の技術で、異なる方向から撮影した複数枚

のステレオ写真から、撮影位置と対象物の 3 次元構造を復元する手法である。SfM のための写真撮影方法は様々であるが、本研究では森林のような面積が大きい場所を上空から短時間で撮影するために小型無人航空機 (Unmanned Aerial Vehicle : UAV) を選択した。小型 UAV は比較的低空を飛行することが可能であるため、カメラを搭載することで対象物を近距離から撮影することができ、高解像度の写真を取得できるという利点がある。地形学の分野では、UAV と SfM を用いての 3 次元データの取得^{9,16)}が進められており、レーザー測量同様に高精度のデータを取得できることが先行研究^{2,3,10)}で示されている。一方で植物を対象として UAV と SfM を用いて計測した事例は少ない。その精度検証も海岸林¹⁾などで行われてはいるが、植物は風の影響を受けやすく 3 次元化が難しいなどの理由から地形学の分野に比べると事例が少ない。

そこで本研究では、SfM を森林分野で適用する際の精度検証を行うために、小型 UAV にデジタルカメラを搭載し、空撮画像を取得した。さらにその画像から SfM を用いて森林の

* 連絡先著者 (Corresponding author) : 〒271-8510 千葉県松戸市松戸 648 E-mail : aaau@chiba-u.jp

3 次元データを取得した。樹種の違い、紅葉・落葉などの季節変化、地形が樹高計測に与える影響について比較し、低コストかつ簡便な調査手法として確立を目指す。

2. 研究対象地と調査方法

2.1 研究対象地

研究対象地は北海道雨竜郡幌加内町字母子里に位置する北海道大学雨龍研究林である。平坦な落葉広葉樹林(東西約 190 m, 南北約 170 m, 面積約 3 ha, 斜度: 0~8°)と傾斜がある針広混交林(東西約 160 m, 南北約 140 m, 面積約 1.3 ha, 斜度: 11~21°)の2か所を調査地として設定した。対象地の植生状態としては、落葉広葉樹林ではミズナラ (*Quercus crispula* Blume), イタヤカエデ (*Acer pictum* Thunb) が優占しており、針広混交林ではミズナラ, トドマツ (*Abies sachalinensis* (F.Schmidt) Mast) が優占していた。研究林の林床はクマイザサ (*Sasa senanensis* Rehder) が優占しているが、対象地内はササが全て刈られて裸地に近い状態となっている。

2.2 UAVによる空撮

2014年9月上旬(落葉前), 10月上旬(紅葉時期), 10月下旬(落葉後)の計3回マニュアル操作による空撮を行った。今回調査で使用した Phantom 2 (DJI 社) は4枚の回転翼を持つクアッドコプターである。機体には GPS が内蔵されており、位置の自動修正やホバリングができるため、安定性が高い。また、回転翼であるため、固定翼と異なり滑走路を必要とせず、垂直の離着陸が可能である。そのため樹冠のギャップから離着陸させてデータを取得できた。デジタルカメラには、1) UAVの積載重量以下かつ画素数が高いこと、2) SfMには複数の写真を必要とするためインターバル撮影機能があること、3) GPSユニットを装着できることの以上3点を考慮して COOLPIX A (NIKON 社) (35 mm 換算での焦点距離 28 mm, 有効画素数 1616 万画素)を使用した¹⁰⁾。1回の撮影時間はカメラ搭載時の飛行可能時間短縮を考慮し、最長10分とした。撮影モードはシャッタースピード優先、シャッタースピードは手振れを防止するために 1/500 もしくは 1/800 に固定し、写真が十分にオーバーラップするようにインターバル撮影の間隔は最短の1秒に設定した。カメラは真下を向くようにセットした。飛行コースの一例を図-1に示す。撮影高度はマニュアル操縦のため一定ではないが、約 40~60 m である。空撮当日の風速は未計測だが、調査地から最も近いアメダス名寄で観測されたものを表-1に示す。

リモートセンシングの分野では Global Navigation Satellite System (GNSS) による位置の把握が重要であるが、林内では上空開放地に比べて測位に長時間を要し精度も劣るケースが多い¹⁵⁾。そのため、今回の調査では地上での GNSS 測量を行わなかった。本研究では簡便な調査手法の確立を目的としているため、カメラに GPS ユニットの装着することで写真データに緯度・経度・標高値を記録できるようにした。

図-1 調査地における UAV による飛行コース

Fig. 1 Flight track of the UAV over our research site

表-1 空撮当日の天候条件

Table 1 Weather condition reported from local weather station

観測場所: アメダス名寄				
調査日	調査地	時刻	天候	風速(m/s)
2014/9/17	落葉広葉樹林	11:16~11:24	晴れ	1.0
2014/9/18	針広混交林	10:20~10:29	曇り	2.3
2014/10/9	落葉広葉樹林	13:34~13:43	晴れ	3.9
2014/10/9	針広混交林	8:54~9:02	晴れ	0.5
2014/10/23	落葉広葉樹林	10:12~10:20	晴れ	3.0
2014/10/24	針広混交林	10:05~10:15	曇り	3.9

2.3 毎木調査

落葉広葉樹林と針広混交林のそれぞれで2つずつ調査プロットを設定し、10月下旬に現地での毎木調査を行った。毎木調査の測定項目は樹高、枝下高、幹周囲長、樹種、プロット内の樹木位置である。樹高は Vertex 4 (Haglof 社) を用いて測定した。毎木調査のデータの一部は2014年4月に北海道大学北方生物フィールド科学センターが現地調査したものを使用した。

3. 解析方法

3.1 SfM処理

Photoscan Professional 1.0.4 (Agisoft 社) を用いて、撮影した画像から各時期の点群データ、3次元モデル、オルソフォト、Digital Surface Model (DSM) を作成した。SfM処理に用いた画像枚数は400~550枚程度である。カメラの撮影位置を復元する処理では、出来る限り正確な撮影位置の抽出をするために写真間の同一点として使用する特徴点を無制限とした¹⁰⁾。また、SfM処理の中で最も時間を要する処理は対象物の3次元構造を復元する処理である。そのため、処理時間の短縮と計算に使用したPCにかかる負担を考慮して生成する点群数は5段階中3段階目とした。さらに点群データ

図-2 作成した DTM (落葉後)

Fig. 2 Digital Terrain Model generated by SfM (Leaf off)

図-3 DCM からの樹頂点抽出結果 (北海道大学雨龍研究林)

Fig. 3 Tree top extraction from Digital Canopy Model (Uryu experimental forest of Hokkaido University)

を地表面とそれ以外にクラス分けすることで地表面だけの 3 次元モデルを作成し、Digital Terrain Model (DTM) を作成した (図-2)。解析に使用した PC のスペックとしては、画像処理速度に影響するメモリは 64GB、計算・描画速度に影響する CPU には Intel(R) Core(TM) i7-5820K、グラフィックカードは NVIDIA GeForce GTX970 を使用した。

3.2 樹高計測

ArcGIS 上でラスタ演算を用いて DSM と DTM の差分から、Digital Canopy Model (DCM) を作成した。本研究ではこの DCM を SfM によって得られた樹高とした。さらに DCM から局所的なピークを抽出 (図-3) し、樹頂点の位置として毎木調査で得られた樹木位置図と照らし合わせ、現地で測定した樹高と比較した。

図-4 落葉広葉樹林における DCM と現地調査で得られた樹高の関係

Fig. 4 Comparison between DCM and field measurement in the deciduous broad-leaved forest

図-5 針広混交林における DCM と現地調査で得られた樹高の関係

Fig. 5 Comparison between DCM and field measurement in the mixed needle leaf and broadleaf forest

4. 結果と考察

4.1 各時期における DCM と実測値との比較

写真画像のみから 3 次元データを作成する際に、写真の色情報が樹高計測にどのように影響するかを検討した。そのため、3 つの時期でデータを取得し、その結果を現地データと比較した。DCM は樹冠の表面部のみを表したデータであるため、樹高が低い木は樹高が高い木に被覆されてしまい、DCM からは判別することができなかった。そのため、今回毎木調査で得られた樹高と比較できたサンプル数は落葉広葉樹林で 17 本 (広葉樹: 16 本、針葉樹: 1 本)、針広混交林で 12 本 (広葉樹: 8 本、針葉樹: 4 本) である。作成した DCM のセルサイズは約 0.06 m であり、高解像度の空撮画像を SfM 処理に用いたことで、樹冠の詳細な構造を把握できている。

図-6 落葉広葉樹林の DCM (上図が落葉前, 下図が落葉後)

Fig. 6 Digital Canopy Model of deciduous broad-leaved forest (The upper figure is displayed leaf on and the lower one is displayed leaf off)

各時期における DCM と現地調査で得られた樹高との関係を図-4・図-5 に示す。落葉広葉樹林と針広混交林の両方において 9 月のデータで最も相関係数が高くなった。相関係数が高くなった理由は、葉が完全に展葉していたことで、3 次元化する際に樹形が捉えやすかったためである。傾斜の有無で調査地を設定したが、レーザー測量などの精度検証の指標としてよく用いられる平均二乗誤差 (RMSE) を 9 月のデータから求めたところ、平坦な落葉広葉樹林 (斜度: $0\sim 8^\circ$) で 1.41 m、傾斜がある針広混交林 (斜度: $11\sim 21^\circ$) で 1.43 m と差が見られなかったため、傾斜による影響はほとんどないと考えられる。

また、9 月のデータに比べて 10 月上旬のデータの相関係数

図-7 針葉樹における DCM と現地調査で得られた樹高の関係

Fig. 7 Comparison between DCM and field measurement in the conifer

が低くなった理由は、紅葉による色の変化が樹高計測に影響を与えているためと考えられる。

10 月下旬のデータを解析した結果、落葉広葉樹林と針広混交林の間で大きな違いが見られた。落葉広葉樹林では調査区の北側にある樹木の多くが 3 次元化できなかった (図-6 参照) が、針広混交林では落葉している樹木でも 3 次元化できた。その理由としては、針葉樹の存在が 3 次元化に影響しているためと考えられる。針葉樹は年間を通じて葉があり、樹形が画像上でも明瞭であるため、SfM 処理で画像同士をマッチングする特徴点を見つけやすい。本来枝などの細かい形状のものは 3 次元化が難しいが、空撮画像の中に針葉樹がある場合、その針葉樹が特徴点として機能し、周囲の落葉樹も 3 次元化しやすくなったと考えられる。そのため、落葉樹と針葉樹の位置関係を事前にある程度把握し、UAV による撮影高度を上げるなどして写真に写る範囲を広げ、どの場所においても針葉樹が写るようにすることで落葉後でも 3 次元データを取得できると考える。

4.2 樹種ごとの実測値との比較

樹種別に樹高の計測の精度検討するために、針葉樹と広葉樹に分けて、現地データと比較した。

針葉樹における DCM と現地調査で得られた樹高との関係を図-7 に示す。相関係数を求めると $R=0.95\sim 0.97$ と、3 時期で高い正の相関を示し、平均二乗誤差は $0.97\sim 1.38$ m となった。このことから針葉樹においては SfM でも高い精度で樹高を計測できることがわかった。

落葉樹における DCM と現地調査で得られた樹高との関係を図-8 に示す。9 月のデータが最も相関係数が高いという結果になった。9 月のデータにおいて相関係数を求めると $R=0.86$ と、高い正の相関を示し、平均二乗誤差は 1.49 m となった。展葉している時期であれば、針葉樹には劣るものの比較的高い精度で樹高を計測できることがわかった。航空機レーザーを用いて行われた造林地^{8,12)}での精度検証や、UAV

図-8 落葉樹における DCM と現地調査で得られた樹高の関係
Fig. 8 Comparison between DCM and field measurement in the deciduous broad-leaved tree

図-10 色変更後の DCM と現地調査で得られた樹高の関係
Fig. 10 Comparison between DCM and field measurement after the color change

4.3 紅葉による色の変化の影響

樹高計測における季節変化の影響を検討したとき、紅葉後に相関係数が低くなっていることが図-4、図-5、図-8 からわかる。紅葉による色の変化が樹高計測に影響を与えているためと考えられる。しかし、今回の調査では、マニュアル操縦によって空撮を行ったため、撮影高度を調査区間及び季節間で同じにすることができなかった。また、風速などの気象条件も同じではないため、単純に多時期のデータを比較することができない。よって、色の変化による影響を検討するためには、色情報以外の条件を同じにする必要があった。そこで、9月に落葉広葉樹林で取得した一時期の空撮画像の RGB の順序を ArcGIS 上で GRB に変更することで画像上の葉の色を変化させた (図-9)。さらに加工した写真を SfM 処理することで作成した DCM を実測値と比較した (図-10)。その結果、葉の色を変化させる前よりも相関係数が低くなり、平均二乗誤差の値も 0.5 m 程度大きくなった。また、全体的な傾向として変化前に比べて DCM の値が低くなっていることが図-10 から読み取れる。よって、葉の色の変化が計測誤差を大きくする要因になっている可能性が示唆される。

5. まとめ

本研究は、小型 UAV による空撮画像のみを用いた場合の季節変化に対する SfM の精度検証を目的とした。展葉時期においては落葉樹、針葉樹共に SfM によって高い精度で樹高を計測することがわかった。しかし、紅葉や落葉などの季節変化が樹高計測に影響を与えているため、空撮を実施するには考慮する必要がある。平均二乗誤差は針葉樹で 1.17 m、落葉樹で 1.49 m であり、森林域で実施されたレーザーを用いた樹高計測の精度検証と比較しても同等の結果であった。そのため、空撮は葉が完全に展葉している夏頃実施することが望ましい。

空撮画像のみから作成した 3 次元データからでも地表面

図-9 写真の色情報の変更 (上図が変更前、下図が RGB の順序変更後)

Fig. 9 Change of color information of photos (The upper figure is displayed before change and the lower one is displayed after change of order of RGB)

と SfM を用いて海岸林で行われた精度検証¹⁾と比較しても、相関係数と平均二乗誤差の値は同等の結果であると考えられる。また、10月上旬のデータにおける相関係数は $R=0.72$ 、平均二乗誤差は 2.33 m となった。

(DTM)を作成することができた。しかし、樹高計測はDTMの精度や立木の状態に依存する。落葉前は空撮によって確認できる地表面の面積が小さくなり、樹冠に被覆されている部分は周囲の地表面の標高値から補間してDTMを作成しているため、精度が低くなる。本研究ではDTMの精度検証を行っていないが、DTMの精度も誤差の要因になり得るため、地上でのGround Control Point (GCP)にGNSS測量を行う必要がある。よって、空撮とは別にGNSS測量を調査対象地の上空開放地で3地点以上行い、GCPを設定することが望ましいと考える。

地上でGCPを設置できれば多時期で取得されたデータを組み合わせることが可能となる。落葉後は空撮によって確認できる地表面の面積が大きくなるため、精度の高いDTMを作成することができ、他時期のDSMと組み合わせてDCMを作成することでより正確な樹高計測が期待できる。また、樹高計測における最適なUAVの飛行高度や写真の解像度、撮影角度など、空撮方法の面からも改良を重ねていくことで計測誤差をより少なくできると考えられる。

3次元データの取得に小型UAVとSfMを用いることで、レーザー測量に比べて費用が安く、高頻度のモニタリングが可能となる。植物を対象とした調査・研究においても有用なツールであると言えるが、UAVには墜落の危険性もあるため、都市部などで空撮をする際は安全面に十分配慮する必要がある。本研究で得られた知見は計測できたサンプル数が少ないため、予備的なものに留まっている。そのため、今後サンプル数を増やし、他の森林でもデータを取得していくことで有効性を明らかにしていくことが重要である。

謝辞：北海道大学北方生物フィールド科学センター森林圏ステーションの方々には調査地やデータの提供に関して多大な便宜を図っていただいた。ここに感謝の意を表す。本研究は、環境省の環境研究総合推進費(2RF-1501)により実施された。

引用文献

- 1) 朝香智仁・青山定敬・岩下圭之・工藤勝輝・藤井壽生 (2010) 小型 UAV が観測した空中写真による海岸クロマツ林の樹高推定. 海岸林学会誌, 9(2):91-96.
- 2) Giménez, R., Marzolf, i., Campo, M.A., Seeger, M., Ries, J.B., Casali, J. and Álvarez-Mozos, J. (2009) Accuracy of high-resolution photogrammetric measurements of gullies with contrasting morphology. Earth Surface Processes and Landforms, 34(14):1915-1926.
- 3) Harwin, S. and Lucieer, A. (2012) Assessing the accuracy of georeferenced point clouds produced via

multi-view stereopsis from unmanned aerial vehicle (UAV) imagery. Remote Sensing, 4(6):1573-1599.

- 4) 加藤 顕・小林達明・福田聖一・有村恒夫 (2011) 法面緑化地での車載レーザー利用のためのシミュレーション開発. 日本緑化工学会誌, 37(1):96-101.
- 5) 加藤 顕・安藤祐樹・吉田俊也 (2014) 簡易型地上レーザーを用いた毎木調査法. 日本緑化工学会誌, 40(1):136-141.
- 6) 守村敦郎・中村彰宏 (2014) タブレット端末を用いた樹木管理に関する景観シミュレーションシステムの開発. ランドスケープ研究: 日本造園学会誌, 77(5):521-524.
- 7) 中村彰宏・戸田健太郎・前中久行 (2009) 地上型レーザースキャナを用いた天然記念物に指定されたソテツ(*Cycas revoluta* Thunb.)の形状計測. 日本緑化工学会誌, 35(1):63-68.
- 8) 根本 光・加藤 顕・小林達明 (2012) 航空機レーザー測量を用いた異なるスケールアプローチでのスギ・ヒノキ林材積の推定. 日本緑化工学会誌, 38(1):79-84.
- 9) 小花和宏之・早川裕式・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.
- 10) 小花和宏之・早川裕式・齋藤 仁・ゴメス クリストファー (2014) UAV-SfM 手法と地上レーザー測量により得られた DSM の比較. 写真測量とリモートセンシング, 53(2):67-74.
- 11) 佐藤 浩・小荒井衛・江田敏幸・伊藤麻子 (2008) 新宿御苑における航空レーザー測量データを用いた樹林の葉面積指数(LAI)のマッピング. 写真測量とリモートセンシング, 47(3):37-47.
- 12) 田口 仁・遠藤貴宏・安岡義文 (2008) LiDAR 点群データを用いた樹冠形状モデルに基づく単木樹冠抽出および樹高推定. 日本リモートセンシング学会誌, 28(4):331-341.
- 13) 戸田健太郎・中村彰宏・大藪崇司・前中久行 (2009) 地上レーザースキャナを用いた 3 次元環境計測における樹高の推定. 日本緑化工学会誌, 35(1):69-74.
- 14) 蔡 斌・秋山 侃・魏 宏 (2006) 航空レーザー計測による広葉樹林の樹高、樹冠面積の抽出. 写真測量とリモートセンシング, 45(3):4-11.
- 15) 露木 聡 (2014) GNSS. 加藤正人編, 森林リモートセンシング 第 4 版 一基礎から応用まで一, 日本林業調査会, pp.83-97.
- 16) 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, 81:37-60.
- 17) 山岸 裕・松江正彦 (2011) 地上型レーザースキャナを用いた樹木の形状及び堆積計測の試み. 日本緑化工学会誌, 37(1):241-244.

(2015.6.17 受理)