

低価格固定翼 UAV を用いた林分現況把握の試み

東京大学北海道演習林
東京大学院農学生命科学研究科
森林総合研究所北海道支所
東京大学北海道演習林

犬飼 慎也・遠國 正樹・中川 雄治
Sadeepa Jayathunga
古家 直行
尾張 敏章

はじめに

広い面積の森林を低コストで簡便に調査する方法として、UAV (Unmanned Aerial Vehicle; 無人航空機) の利用が進んでいる⁽¹⁾。東京大学大学院農学生命科学研究科附属演習林北海道演習林 (東大北演) でも、数年前から UAV を試験的に導入し、林分施業法に基づく林種区分など、森林調査の省力化に取り組んでいる⁽²⁾。

固定翼型の UAV は、回転翼型に比べて長時間の高速飛行が可能であり、1回のフライトでより広範囲の森林を撮影することができる。著者らはこれまでに、固定翼 UAV を用いた森林管理計画図の作製を試行し、その方法や手順を具体的に示してきた^(3,4)。固定翼 UAV は価格が数百万円と高額な機種が多く、森林管理の現場に導入する上で支障の1つとなっているが、最近では価格が20万円以下の低価格機種も市販されるようになった。低価格固定翼 UAV の利用により、森林調査のさらなる効率化が期待される。

そこで本研究では、東大北演内の人工林と天然林を対象に、低価格固定翼 UAV を用いた撮影を行い、林分現況の把握を試みた。撮影および画像処理の方法・手順とともに、撮影画像から得られた成果 (オルソ画像, 林冠高モデル) を示し、森林調査における利用可能性について検討した。

資料と方法

1) 調査地

調査地は北演46林班内の天然林と人工林(43°14'28"-38" N, 142°34'55"-35°9' E, 430-476 m a.s.l.; 面積計9.92 ha) とした。全体的に緩やかな南西向き斜面に位置している。天然林はハリギリ, トドマツ, シナノキ, イタヤカエデが優占する針広混交林で、立木密度 (DBH \geq 5 cm) は470本/ha, 蓄積は271.9 m³/haである。2013年に材積伐採率10%の択伐が行われた。人工林は1985年植栽のトドマツ単層林で、立木密度は1,430本/ha, 蓄積は414.3 m³/haである。

2) 調査方法

撮影に使用した低価格固定翼 UAV は Parrot Disco FPV (Disco; 図-1) である。本機は価格が18万円(税抜)で市販されている。他機種と対比するため、東大北演が保有する固定翼 UAV の Trimble UX5 (UX5) による撮影を同時に行った。両機種の主な仕様を表-1に示す。寸法, 航続時間, 最大時速は両機種ともほぼ同等だが、重量は Disco が UX5 の1/3以下である。Disco の機体先端には1,400万画素のカメラと F2.3, 2mm の魚眼レンズが搭載されている。離陸は手投げで行い、着陸は胴体着陸となる。離着陸には少なくとも80m \times 80mの広さが必要である。UX5に

は1,600万画素(4912 \times 3264ピクセル)のカメラ(SONY NEX-5T)とF4.5, 15mmのレンズを用いる。離陸にはカタパルトを使用し、着陸はDiscoと同じく胴体着陸で行う。離着陸に際して50m \times 30mの平面が必要である。両機種とも、調査地から約1.2km離れた平坦で障害物のない広い場所を離着陸地点とした。



図-1 低価格固定翼 UAV (Parrot Disco FPV)

表-1 使用した固定翼 UAV の主な仕様

項目	Parrot Disco FPV	Trimble UX5
重量 (g)	750	2,500
寸法 (mm)	1,150 \times 580 \times 120	1,000 \times 650 \times 100
航続時間 (分)	45	50
最大時速 (km/h)	80	80
衛星測位システム	GPS + GLONASS	GPS

出典: 各機種の製品仕様をもとに作成。

両機種による飛行および撮影は2017年6月6-7日に行った。撮影に先立ち、各機体の飛行計画を作成した。Discoは専用アプリケーションのParrot FreeFlight Proを用いた。Apple iPad上でタッチ操作により通過地点をマークし、調査地全域をカバーするように飛行ルートを設定した(図-2)。飛行コースの間隔は概ね10-15m, 飛行コース数は計24(12往復)とした。飛行高度(離陸地点からの対地高度)は150m (FreeFlight Proで指定可能な最大高度)とした。調査地での対地高度は74-120mである。画像記録形式は1920 \times 1088ピクセルの「画面キャプチャ」とし、キャプチャ時間の間隔は最短の1秒とした。また、キャプチャ画角は83°(最も下向き)とした。

UX5の飛行計画作成には専用ソフトウェアのTrimble Aerial Imagingを用いた。調査地全域が入るように撮影範囲を指定し、撮影画像のオーバーラップ率とサイドラップ率をいずれも90%とした。飛行高度は、東大北演の通常施業で1施業区域(300-400ha)をUX5で撮影する際に適用している高度(650m)とした。調査地上での対地高度は

Shinya INUKAI, Masaki TOKUNI, Yuji NAKAGAWA (The Univ. of Tokyo Hokkaido Forest, Furano 079-1563), Sadeepa JAYATHUNGA (Grad. Sch. Agric. Life Sci., The Univ. of Tokyo, Tokyo 113-8657), Naoyuki FURUYA (Hokkaido Res. Center, FFPRI, Sapporo 062-8516), Toshiaki OWARI (The Univ. of Tokyo Hokkaido Forest, Furano 079-1563)

A trial of forest stand assessment using low-cost fixed-wing unmanned aerial vehicle (UAV)

574-620m となる。飛行ルートは以上のパラメータ値から Aerial Imaging が自動的に決定した。飛行コース数は計 6 (3 往復) であった。

さらに、撮影を行う前に標定点 (GCP) を 1 点設置した。GCP の位置は上空から視認できる林道上とし、対空標識を置いて撮影した。GCP の測位には高精度 GNSS 受信機 (Trimble Pro 6H) を用いた。GNSS データ後処理ソフトウェア (Trimble Pathfinder Office) と国土地理院電子基準点 (富良野, 南富良野) による補正後の測位精度は、水平方向が 0.54 m, 垂直方向が 1.19 m であった。

撮影当日の天候は晴れ、風速は 0-4 m/s, 風向は西北西 (6 日) と南東 (7 日) であった。Disco は離陸から着陸までに 28 分間飛行し、うち 18 分間に調査地の画像を計 1,015 枚撮影した。UX5 の飛行時間は 11 分間で、うち 4 分間に計 36 枚の画像を撮影した。

2017 年 7 月 18 日に調査地内で地上調査を実施した。天然林と人工林において、林冠上層の立木を各 10 本選定し、GNSS 受信機 (Pro 6H) を用いて位置座標を取得した。また、レーザー距離計 (LTI TruPulse 200) を用いて各立木の樹高を 3 回ずつ測定し、平均樹高を算出した。

3) 分析方法

両機種とも、撮影した画像の処理には写真測量ソフトウェアの Pix4Dmapper pro (Pix4D) を使用した。Pix4D は、UAV など撮影した複数の画像データから、三次元形状の復元やオルソ画像の作成が可能ソフトウェアである。Pix4D による画像処理は、①初期処理、②GCP の付与、③オルソ画像とデジタル表層モデル (DSM) の作成、の 3 つのステップで行った。

Disco で撮影した画像の処理には、機体が写り込んだ 52 枚を除く計 963 枚の画像を使用した。①Disco による画像の撮影位置は画像ファイル (JPEG) の Exif 情報に記録されている。高度は離陸地点を 0 m とする相対高度であるため、画像処理の際に離陸地点の標高値から実際の標高値 (ジオイドモデル: GSIGEO2000) に換算した。「画像プロパティ」で画像撮影位置の水平・垂直精度をそれぞれ「20 m」と「30 m」にした。また、「処理オプション」の「初期処理」タブで「自由飛行または陸地」を選択して初期処理を行った。②初期処理後の画像に GCP を付与した。調査地内に予め設置した 1 点に加えて、既存のオルソ画像 (2015 年撮影の空中写真より作成) から 4 点の GCP を取得し、計 5 点を画像にマークして再処理を行った。③再処理の結果から点群と 3D メッシュを作成し、さらにオルソ画像と DSM を作成した。

UX5 で撮影した画像の処理には 36 枚の画像を全て使用した。①画像の撮影位置は、UX5 が飛行中に自動記録する飛行データのなかに含まれている。UX5 専用タブレット (YUMA 2) を使って飛行データを Aerial Imaging に取り込んだ後、撮影位置情報 (CSV ファイル) を Pix4D にインポートした。高度は楕円体高で記録されるため、調査地のジオイド高 (GSIGEO2000) を 32.399m と設定して出力した。画像撮影位置の水平・垂直精度は Disco と同じ値とし、「処理オプション」の「初期処理」タブは「空中グリッドまたは回廊」を選択した。②と③は Disco と同様の手順とした。

調査地のデジタル地形モデル (DTM) は、2015 年に実施

した航空レーザー測量の成果を用いた。DTM の地上解像度は 10 cm である。GIS ソフトウェア (Esri ArcGIS) を使って DSM と DTM の差分を計算し、デジタル林冠高モデル (DCHM) を作成した。

作成したオルソ画像および DCHM 上において、地上調査の対象とした立木を目視で特定し、位置座標と樹高を取得した。地上調査による測定結果との差分により、立木位置 (水平方向) と樹高 (垂直方向) の誤差を算出した。

結果と考察

1) オルソ画像と DCHM の作成

Disco と UX5 の撮影画像から作成したオルソ画像を図-3 に示す。オルソ画像の地上解像度は、Disco が 7.6 cm, UX5 が 19.1 cm であった。Disco は低高度から撮影したこともあり、UX5 に比べて高解像度でオルソ画像を作成できた。Disco に搭載されているカメラ (魚眼レンズ) や画像記録形式 (画面キャプチャ) から、撮影画像のオルソ化ができるかを心配していたが、実用上十分な画質でオルソ画像を作成できることが確認された。

ただし、調査地西側の一部区域ではオルソ画像を作成できなかった。また、その周囲でも画像に大きな歪みが生じた。Disco の飛行軌跡 (図-2) によれば、機体はほぼ飛行計画どおりに調査地の上空を飛行していたが、調査地西側を飛行した際の画像が記録されていなかった。飛行計画では撮影するように設定しており、なぜ画像が記録されなかったのかについては原因不明である。

Disco と UX5 の撮影画像から作成した DCHM を図-4 に示す。DCHM の地上解像度は、Disco が 10.0 cm, UX5 が 19.1 cm であった。Disco で DCHM の解像度がオルソ画像よりも低下したのは、使用した DTM の解像度が 10 cm だったことによる。UX5 に比べて、Disco による画像からは高低差がより際だった精細な DCHM が作成された。画像処理の過程で生成された 3 次元点群データの平均密度は、UX5 が 0.34 点/m³ に対して Disco は 7.16 点/m³ と多かった。低高度での撮影とともに、画像処理に用いた画像の枚数が多かったことから、より高密度の点群データが生成され、精細な DCHM を作成できたものと推察される。

2) 地上調査による立木位置・樹高との比較

オルソ画像と DCHM から取得した立木位置と樹高について、地上調査による測定結果との誤差を機種別、林種別に示したのが図-5 である。調査対象とした立木のうち、Disco と UX5 の両方において画像上で個体を特定できたのは、天然林が 9 本、人工林が 4 本の計 13 本であった。Disco の平均誤差は、立木位置が 3.1 m, 樹高が 3.9 m であった。立木位置の平均誤差は機種間、林種間とも有意な差は認められなかった。樹高の平均誤差は、人工林において Disco (1.6 m) が UX5 (4.2 m) よりも有意に小さかった ($p < 0.05$, 対応のある t 検定)。また、Disco における樹高の平均誤差は、人工林 (1.6 m) よりも天然林 (5.0 m) で有意に大きかった ($p < 0.01$, t 検定)。

3) オルソ画像と DCHM による林分現況の把握

Disco 撮影画像によるオルソ画像に、東大北演の施業区域図 (林種区分図) を重ねたものを図-6 に示す。施業区域図は 2013 年の通常施業時に現地踏査と地上測量によって作成した。広葉樹択伐林 (広葉樹が優占する針広混交天

然林) とトドマツ・アカエゾマツ人工林との境界は, Disco のオルソ画像でも明瞭に判別することができた。

Disco によるオルソ画像と DCHM について, 調査地の北側を拡大表示したものを図-7 に示す。風倒木による林冠ギャップ (図の左側) が DCHM では低い林冠高 (青色) として表示されており, オルソ画像でもはっきりと視認できた。また, 林冠上層にある立枯れ木も, オルソ画像から十分に判別することができた。

おわりに

本研究により, 一事例ではあるが, 低価格固定翼 UAV による撮影でもオルソ画像や DCHM を作成でき, 林分現況や森林被害等の把握に利用できることが示された。ただし, 林分構造や地形, 天候などの撮影条件の違いによって, 飛行計画や画像処理のパラメータ調整が必要かもしれない, 実用化にあたっては技術的ノウハウの蓄積が求められる。

本研究の実施にあたって, 東大北演の江口由典氏には

Disco による撮影でご協力いただいた。本研究は JSPS 科研費 16H04946 (代表: 平田泰雅) の助成を受けて行った。

引用文献

- (1) 田村太壱・加藤 顕・小花和宏之・吉田俊也 (2015) 小型 UAV による空撮と SfM を用いた樹高計測. 日緑工誌 41 : 163-168.
- (2) 尾張敏章・中川雄治・遠國正樹 (2015) 林分施業法は空間情報技術により進化する. 森林計画誌 49 : 27-30.
- (3) 犬飼慎也・中川雄治・遠國正樹・尾張敏章 (2016) 固定翼型無人航空機 (UAV) を利用した森林管理計画図の作製. 第 1 回東京大学技術発表会予稿集 : P4-11.
- (4) Inukai S, Owari T, Nakagawa Y., Tokuni M (2015) Using a fixed-wing unmanned aerial vehicle (UAV) for silvicultural management planning at the University of Tokyo Hokkaido Forest. Proc. 6th Intl. Symp. Asian Univ. For. Consortium: 61.

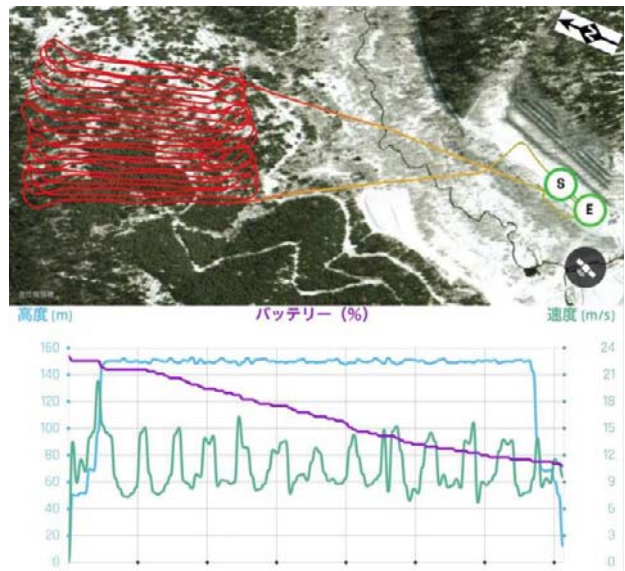


図-2 Disco の飛行計画 (左) と飛行記録 (右)

注) Parrot FreeFlight Pro により作成。右上の図は実際の飛行軌跡を, 右下のグラフは飛行高度 (青), バッテリー残量 (紫), 飛行速度 (緑) をそれぞれ表す。

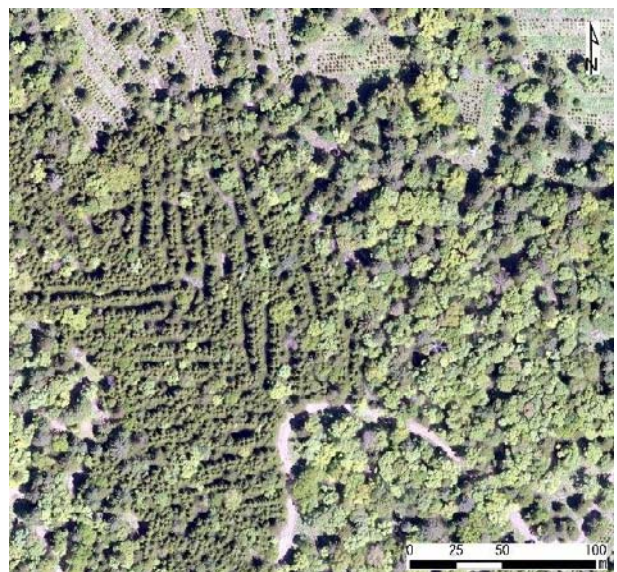


図-3 固定翼 UAV 撮影画像から作成したオルソ画像 : Disco (左) と UX5 (右)

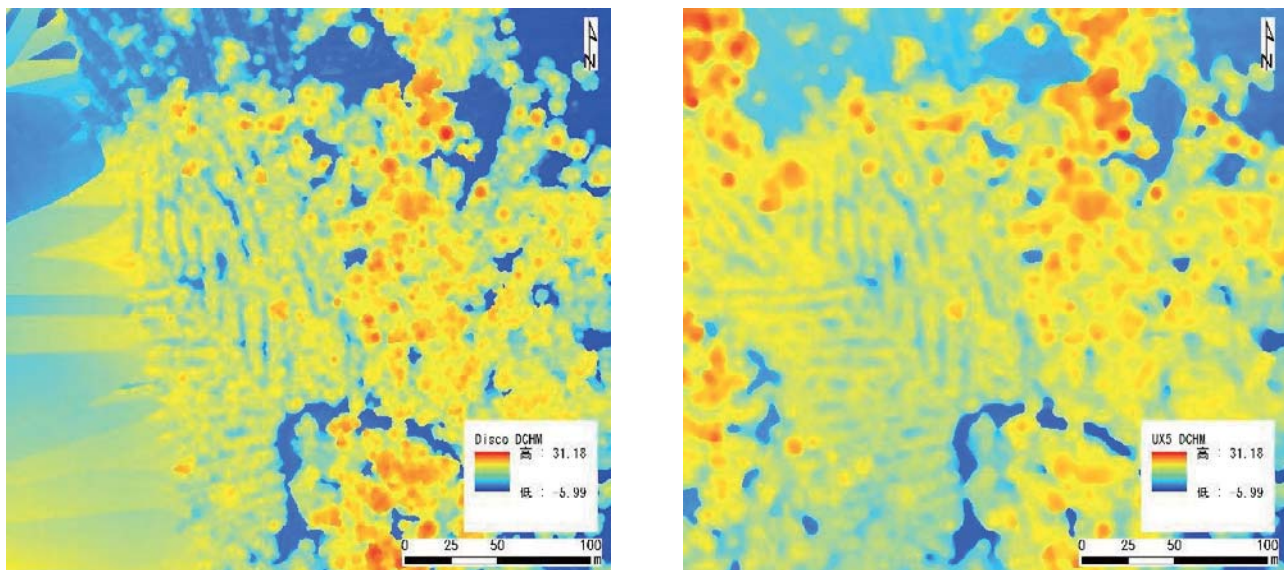


図-4 固定翼 UAV 撮影画像から作成したデジタル林冠高モデル (DCHM) : Disco (左) と UX5 (右)

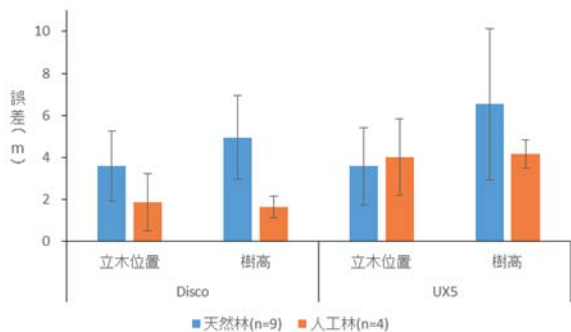


図-5 DCHM と地上調査による立木位置座標および樹高の誤差 (平均 ± SD)

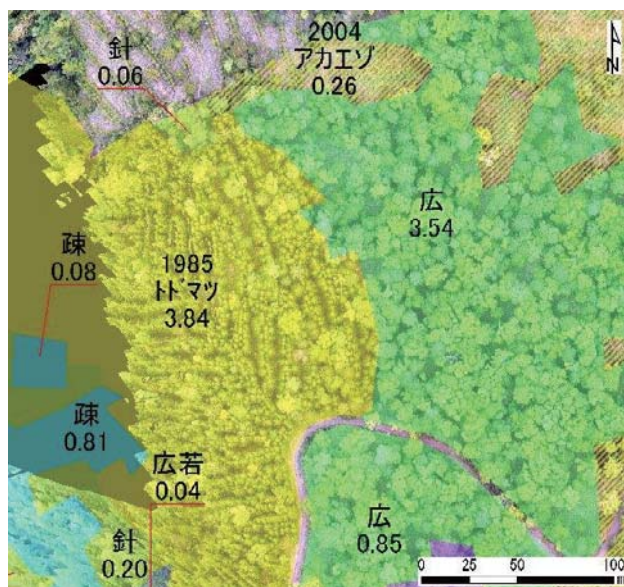


図-6 Disco オルソ画像と施業区域図との重ね合わせ
注) 針: 針葉樹択伐林, 広: 広葉樹択伐林, 広若: 広葉樹若齢林, 疎: 疎生林, 樹種名は人工林。林種名下の数字は面積 (ha), 人工林樹種名の上にある数字は植栽年を表す。

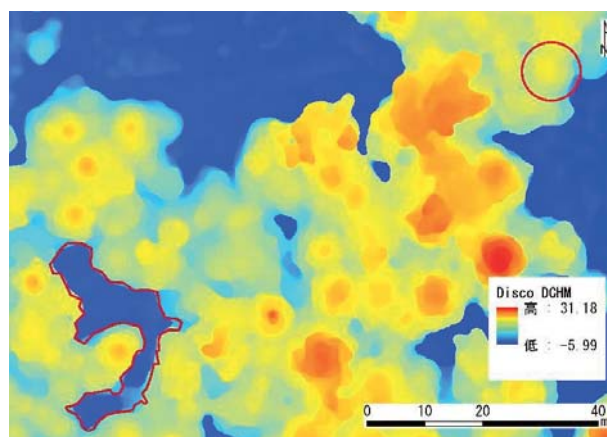


図-7 林冠ギャップと立枯れ木 (赤枠で表示) の抽出例
注) 図-3, 4 (Disco) の北側を拡大表示した。