

# UAV によるスギ林の自動空撮と立木本数および樹高の計測

小林裕之（富山県森林研）

富山県内のスギ林固定試験地 7 箇所において、一般向け UAV による静止画像の自動空撮を試み、立木本数および樹高を算出して地上調査結果と比較した。写真画像から SfM ソフトウェアを使用して DSM、オルソモザイク画像、DTM を作成した後、GIS ソフトウェアを使用して局所最大値法により樹頂点を抽出し、DSM から DTM を減じて樹高を算出した。立木本数については、地上調査と概ね同数を抽出することができた。樹高については 7 箇所中 2 箇所において、地上調査と概ね同じ平均樹高が得られたが、その他の試験地においては過大な値が得られた。既存の標高データを用いない今回の方法では確からしい樹高が計測できないことが示唆された。

キーワード：GIS, 樹高, 立木本数, SfM, UAV

## I はじめに

近年急速に低価格化し、普及しつつある UAV（ドローン、無人航空機）を利用すれば、有人航空機や人工衛星よりも安価で容易に森林の空撮画像が取得できる。一方、カメラの視点を変えながら撮影した複数枚の写真から被写体の 3 次元形状とカメラ位置を同時に復元する SfM（Structure from Motion）ソフトウェアも比較的安価なものが普及してきた。この 2 つを組み合わせると、森林計測や森林管理が効率化できる可能性がある。廣瀬ら（2017）は、産業用 UAV とデジタル一眼レフカメラの組合せで森林資源情報の把握を行っているが、カメラ一体型の安価な UAV による解析事例はまだない。そこで本論文では、カメラ一体型の一般向け UAV によりスギ林の空撮を試み、その成否を評価し、立木本数および樹高を算出して地上調査と比較した結果について報告する。

## II 方法

写真撮影は、2017 年 10～12 月に富山県内 7 箇所のスギ林固定試験地において行った。使用した UAV は障害物の検知、回避機能を持つ Phantom4 Pro（DJI, 中国）であり、送信機と iPad（Apple, 米国）を接続し、自動空撮アプリの GS PRO（DJI, 中国）で撮影範囲等を指定して実施した。

空撮を行った試験地の概要を表-1 に示す。これらの試験地は林野庁の酸性雨等森林衰退モニタリング事業のために 1990 年以降に設定され、定期的に毎木調査が行われている。最終調査時点での林齢は 46～70 年、平均樹高は 21.4～28.5m、立木密度は 450～880 本/ha、林分材積は 705～1,114m<sup>3</sup>/ha であり、いずれも 1 回以上間伐が実施済みである。今回取得した空撮画像から作成したデジタルオルソモザイク画像を図-2 に示す。

試験地 P1 は水田東側の緩やかな斜面上、P2 は林道東側の緩やかな斜面上、P3 は谷沿いを走る林道南西側のやや急な斜面上、P4 は水田西側のやや急な斜面上、P5 は林道東側の緩やかな斜面上、P6 は作業道西側の緩やかな斜面上、P7 は廃止された市道に囲まれたやや急な斜面上にある。

なお、空撮前に対空標識を設置するようなことはしていない。また、一連の空撮は、航空法に基づく無人航空機の飛行に係る承認（目視外飛行）の元に行った。

空撮の仕様と空撮時の状況を表-2 に示す。P1 から P4 までは、カメラを垂直下向き（-90 度）に固定し、撮影高度（離陸地点からの高度差）を 100m に設定した。P5 では、垂直写真と斜め写真の組合せ効果を評価するために、カメラ角度を -90 度と -60 度の 2 種類に設定した。P6 および P7 では撮影高度の違いによる影響を評価するために、撮影高度をそれぞれ 80m、60m と 80m、50m に設定した。

解析手順のフローチャートを図-2 に示す。空撮写真群は SfM ソフトウェアである PhotoScan Pro（Agisoft, ロシア）で写真のアラインメント、高密度クラウドの構築を行い、DSM（Digital Surface Model）、オルソモザイク画像および DTM（Digital Terrain Model）を作成した。DSM と DTM は GIS ソフトウェアである TNTmips Pro（MicroImages, 米国）に取り込み、一般的なレーザ計測から得られる標高データのメッシュサイズと同じ 0.5m メッシュにリサンプル処理を行い、村上・高橋（2012）と同様に、3x3, 5x5, 7x7pixel のフィルタを用いて局所最大値法により樹頂点候補を抽出した。樹頂点候補の点数が地上調査の本数と最も近いフィルタサイズのを樹頂点として決定し、本数計測を行い、DSM と DTM の差分から DCHM（Digital Canopy Height Model）を作成し、Z 値に樹高情報を持

Hiroyuki KOBAYASHI (Toyama Prefectural Forest Research Institute)

Automated aerial shooting, counting tree numbers and measuring tree heights for Sugi stands with a UAV

kobayasi@fes.pref.toyama.jp

つ3次元ポイントデータとした。

なお、解析に当たっては、地形図や国土地理院等のオルソ写真からGCPを取得することはせず、位置デー

タは写真に記録されたEXIF情報（緯度、経度、機体が記録した気圧高度計の値）のみを使用した。

表-1. 試験地の概要

試験地 ID	地区名	植栽年	植栽密度 (本/ha)	間伐年	最終調査年	林齢	平均 DBH (cm)	平均 H (m)	立木密度 (本/ha)	林分材積 (m3)
P1	池尻	1969	2500	'87,'07	2015	46	36.9	25.9	560	730.7
P2	芦峠寺	1957	3000	'76	2015	58	31.5	21.4	880	717.5
P3	東布施	1946	2500	'86,'90	2016	70	37.6	27.1	630	968.7
P4	大下	1956	2500	'91	2016	60	50.8	28.5	450	1114.1
P5	常福寺	1962	不明	'82,'85,'91	2017	55	40.3	24.2	500	705.4
P6	沢川	1970	不明	'91	2017	47	39.1	22.5	580	712.5
P7	刀利	1957	不明	'89	2017	60	43.2	27.6	580	1036.2

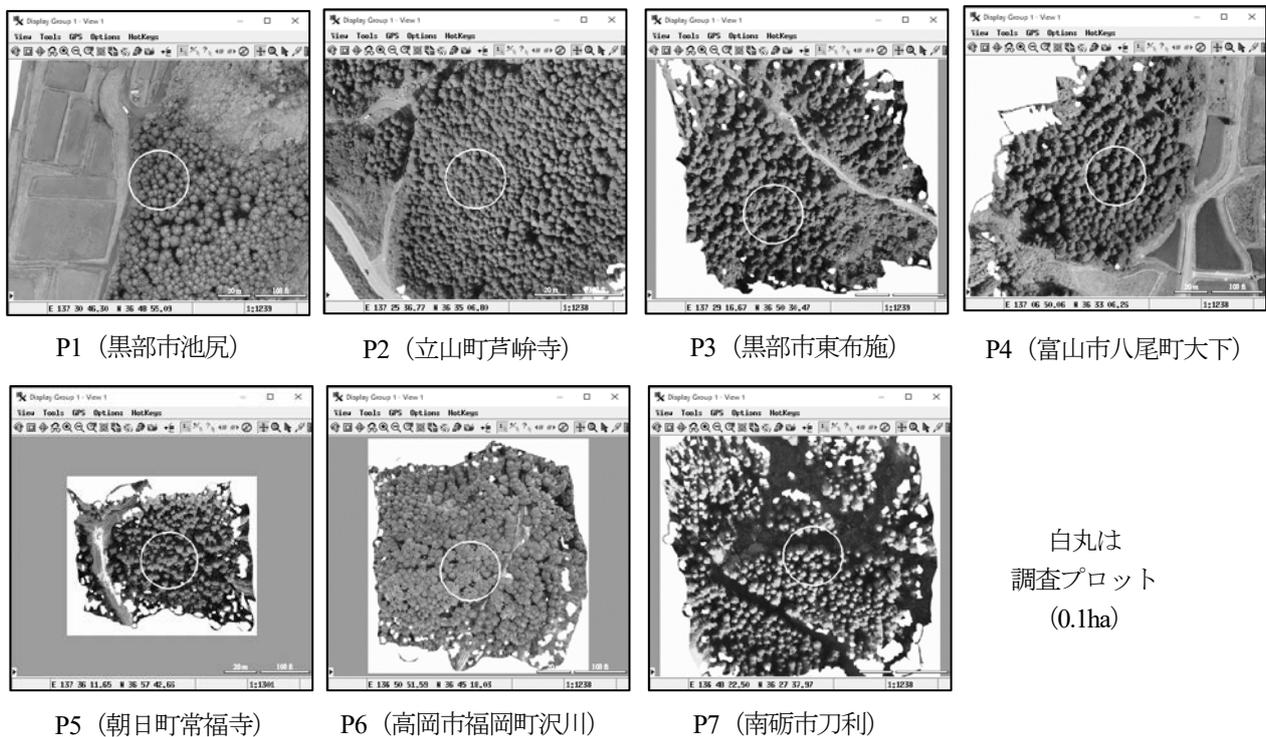


図-1. 調査地のオルソモザイク画像

表-2. 空撮の仕様と空撮時の状況

試験地 ID	撮影高度	カメラ角度	over lap	side lap	地上分解能	空撮時の状況
P1	100m	-90度	90%	70%	2.3cm	一時的に目視外になるも問題なく空撮終了
P2	100m	-90度	90%	80%	2.1cm	立木が障害となり失敗の後、高度を上げて成功
P3	100m	-90度	90%	80%	2.0cm	衛星数不足(<8)で離陸不可の後、場所を変えて成功
P4	100m	-90度	90%	90%	1.9cm	高度不足で2回墜落の後、高度を上げて成功
P5	50m	-90度	90%	70%	1.0cm	一時的に目視外になるも空撮成功
	"	-60度	"	"	1.1cm	"
P6	80m	-90度	90%	80%	1.3cm	衛星数不足で離陸不可の後、手動上昇+自動飛行で成功
	60m	"	"	"	1.0cm	"
P7	80m	-90度	90%	80%	2.1cm	一時的に目視外になるも空撮成功
	50m	"	"	70%	1.5cm	"

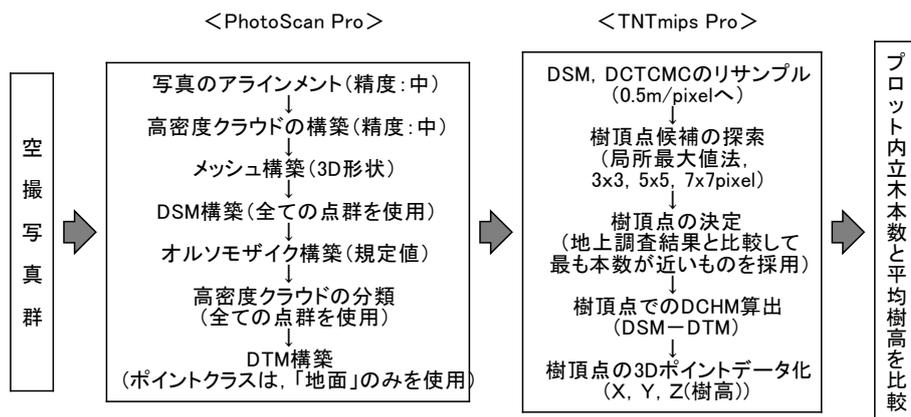


図-2. 解析手順フローチャート

### Ⅲ 結果と考察

#### 1. 自動空撮の成否

P1 においては、一時的に機体が目視外となったが、問題なく撮影に成功した。P2 においては1回目の撮影途中で機体がホバリングに入り、立木の樹冠を障害物として検知して停止したと思われたので、手動で機体を上昇させた後、手動帰還させた。その後撮影高度を上げたところ、無事撮影に成功した。P3 では試験地直下の林道から離陸を試みたが、GNSS 衛星数が不足(8個未満)し、自動空撮が開始されなかった。その後、同じ林道上で数カ所場所を変えてみたところ、8個以上の衛星を受信できる場所が見つかり、自動離陸と空撮に成功した。P4 では撮影中にホバリングに入ったので送信機の自動帰還ボタンを押したところ、自動帰還時の高度が撮影高度と同じ70mに設定されていたこと、並びに、自動帰還時の障害物回避機能がオフになっていたこと、のふたつの理由により樹冠に衝突したと思われ、墜落し、捜索に苦労した。自動帰還時の障害物回避機能については、筆者が設定を変更した記憶がないので、当初からオフになっていたと考えられる。日を改めて自動空撮を試みたところ、再び墜落した。2回目の墜落は、1回目の墜落で障害物検知センサに何らかの狂いが生じていたと推察された。その後ビジョンセンサの校正を行い、高度を上げて撮影に成功した。P5 については一時的に目視外になるも空撮に成功した。P6 については試験地付近の作業道上の数カ所から離陸を試みたが衛星数不足で自動離陸できなかった。その後、手動離陸と上昇を行い、8個以上の衛星を捕捉した後にGS PROによる自動計測を開始したところ、成功した。P7 においては一時的に目視外になるも問題なく空撮に成功した(表-2)。

#### 2. 本数と樹高の計測

地上調査と空撮調査との比較を表-3に示す。なお、P5~P7については、撮影条件の違いによってP5a, P5b~P7a, P7b というようにケース分けを行って記載している。

立木本数については、P1 において空撮調査が4本過

大、P3 および P6b において5本過小となったが、いずれのケースも誤差は1割以内に収まっており、概ね良好な結果が得られた。これは、全試験地が間伐済みで被圧木が少なく、ほぼ全ての樹頂点が上空から見えたことによると考えられる。

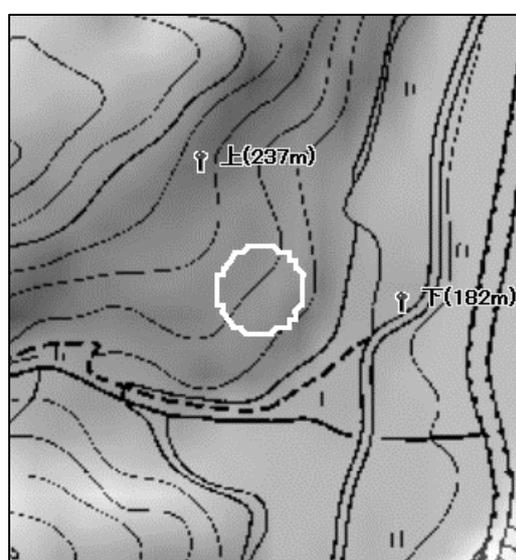
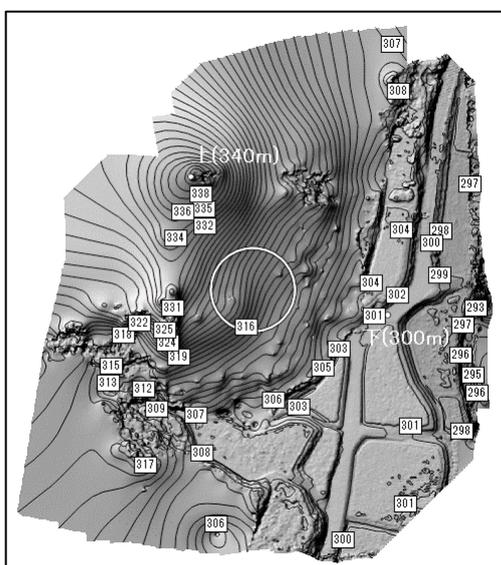
樹高については、P1, P6a および P6b において空撮調査と地上調査との平均値の差が1.0m以内に収まり、空撮結果が良好な値を示したが、その他のケースでは3.3~5.1m過大な値となった。また、廣瀬ら(2017)と同等の計測誤差(RMSE=1.58m)であったのは、P6a(RMSE=1.53m)だけであった。樹高が過大となるのはDTMが過小であることによると考えられる。そこで樹高の差が最も大きかったP4における空撮DTMと国土地理院の10mメッシュ標高データとの比較図を図-3に示す。この図からは、調査プロット上部と下部の2点(空撮は小さな塗りつぶしの白丸、地理院標高はピンで表示)間の高度差が、空撮結果では40mであるのに対して、地理院標高データでは55mと、やはり空撮結果の高度差が小さくなっていった。斜面下部は明らかに地表面であるので、空撮結果の斜面上部の高度が実際よりも低くなっていると考えられる。その理由には、PhotoScan Proのポイントクラウド分類のアルゴリズムやパラメータが現地に合わせていない、日陰の影響で地表面が写真に写っていない、撮影範囲が狭すぎる、などが考えられるが、よくわからなかった。いずれにしても、一定の立木密度を持った森林の空撮画像からDTMを作成するのは難しいと思われた。今後は既存のDTMを使用して樹高計測を実施すべきであると考えられる。

斜め写真と垂直写真を併用したP5bと垂直写真のみを使用したP5aとの比較では、立木本数、平均樹高ともほとんど差がなく、今回の事例では斜め写真を併用することのメリットは認められなかった。撮影高度が80mのP6aと50mのP5bとの比較では、本数に5本の差があったものの、樹高には差がなく、高度の違いによる影響はあまり認められなかった。

表-3. 地上調査と空撮画像解析結果との比較

ケース ID	本 数				樹 高 (m)			
	地上	空撮	差分 空撮-地上	探索 範囲(m)	平均 地上	平均 空撮	平均差分 空撮-地上	RMSE 空撮
P1	56	60	4	2.5	25.9	26.5	0.6	1.83
P2	88	86	-2	1.5	21.4	26.0	4.6	4.94
P3	63	58	-5	1.5	27.1	30.4	3.3	6.52
P4	45	47	2	1.5	28.5	33.6	5.1	7.12
P5a(直下視のみ)	50	47	-3	2.5	24.2	27.8	3.6	4.46
P5b(直下+斜視)	50	46	-4		24.2	27.5	3.3	3.91
P6a(高度 80m)	58	58	0	2.5	22.5	21.8	-0.7	1.53
P6b(高度 60m)	58	53	-5		22.5	21.6	-0.9	1.61
P7a(高度 80m)	58	*	*	2.5	27.6	*	*	*
P7b(高度 50m)	58	*	*		27.6	*	*	*

\* : 調査区中心経緯度が実際とずれており, 調査区が旧市道を含んだので評価せず



(大きな中抜き白丸は調査プロット)

斜面上と下の高度差 (340-300=40m)  
(空撮画像から得られた DTM)

斜面上と下の高度差 (237-182=55m)  
(国土地理院の 10m メッシュ標高, 背景は森林基本図)

図-3. P4 での空撮調査 DTM と国土地理院 10m メッシュ標高データの比較

#### IV おわりに

既存の標高データを用いない今回の方法では確からしい樹高が算出できなかったことから, 今後は, 対空標識を設置, 測量 (或いは, 地形図またはオルソ写真から GCP を採取) し, 既存の標高データ (国土地理院の 10m, 5m メッシュや航測会社が特定のプロジェクト用に作成したものなど) を用いる方法で空撮, 解析事例を増やしていきたいと考えている。

#### 引用文献

廣瀬裕基・沼本晋也・松村直人 (2017) UAV を用いた空撮による森林資源情報の把握 - 三重大学平倉演

習林の事例 - 中森研 65 : 87-90

村上拓彦・高橋雅博 (2012) スギ人工林 N 密度推定を行うために局所最大値フィルタ法を GeoEye-1 パンクロマチックデータに適用した研究. 新潟大農研報 65(1): 49-54