

SfM を用いた競合状態定量化手法の検討

松永宙樹（信州大学大学院総合理工学研究科）
斎藤仁志・植木達人（信州大学学術研究院農学系）

下刈りの省力化や回数の削減を検討するためには、目的樹種の成長量の把握に加えて、他種との競合状態を把握する必要がある。本研究では、競合状態の定量化を試みるため、天然下種更新したカラマツ実生発生地を対象として撮影したデジタルカメラ画像を SfM 処理し、3次元化した。ここから得られる DSM から競合状態を解析し、実生成長への影響を評価するとともに、撮影条件や解析の範囲を検討した。さらに、カラマツ実生の D^2H を応答変数とするモデルを作成した。分析の結果、期首の競合状態と D^2H から、落葉前までの D^2H 増加量の説明が可能であった。本手法を用いることで、実生個体ごとの競合状態の定量的な把握が可能と考えられた。

キーワード：競合状態の定量化、デジタルカメラ、SfM、DSM、カラマツ実生

I はじめに

下刈りの効果を検討するには、目的樹種他種との競合状態の把握が不可欠である。競合植生との競合状態と成長量の関係に関してはこれまでも検討されており（丹下ら 1993, 平岡ら 2013, 北原ら 2013, 鶴崎ら 2016）、近年は低コスト再生林に注目が集まる中、下刈り手法の検討と同時に競合状態を表す指標の再検討も取り組まれている（山川ら 2016）。

一方、既報における競合状態の把握は、現場での調査者の判断に委ねられており再現性の高いデータとは言えない。また、競合植生全体を把握することは困難であり、現場の代表的な個体あるいは平均的な個体や最もサイズの大きい個体を抽出して計測する場合が多い。さらに、競合植生の判断も、調査者が目視判断しており、個人差があると考えられる。これらの競合状態の把握・評価手法は、現場での調査を効率化した手法であるが、定量的な分析を行う場合、競合状態の表現が目視や経験に委ねられる状態は、信頼性の観点から改善が必要と考えられる。したがって、目的樹種の苗木や実生の成長に加えて、他植生との競合状態の定量的な把握手法の開発が必要であると考えられる。

そこで本研究では、近年森林資源量や植物高、被度を定量的に把握する手法として注目されている、SfM (Structure From Motion) -MVS (Multi View Stereo) の活用を試みた。SfM-MVS は多数のステレオペア画像から目的とする対象物の 3次元データを得ることができ、自然物を対象としたものでは、地形学等の地球科学分野での活用が進んでいる（早川ら 2016）。SfM-MVS の活用による地形測量や森林資源把握に関しては、主に UAV (小型無人航空機) に搭載したデジタルカメラ

による空撮画像を用いる例が近年急速に広まっている。

SfM-MVS では、3次元の点群データ、3次元メッシュモデル、DEM (Digital Elevation Model)、オルソ補正画像が出力できる。点群データは対象領域全体の 3次元位置情報 (X,Y,Z) と光の三原色の色情報 (RGB) を持つ。このように、デジタルカメラで撮影した画像を、3次元の空間情報及び色情報としてデータ化できるのが SfM-MVS の特徴である。

UAV で撮影した画像から地形を計測した例では、20~40m の精度が確保された (Hugenholtz et al.2013) ほか、森林計測の分野では、同じく UAV で撮影した画像を処理したもので、樹高計測の場合 RMSE (平均二乗誤差) で 0.8~1.2m であった (田村ら 2015)。

一方、天然更新実生発生地のような、対象物のスケールが小さく、枝や葉といった複雑な形状を対象とした例は少ない。新植地を対象に UAV で撮影した画像を SfM 処理した学会報告では、GCP (Ground Control Point) の位置精度不足が課題としてあげられていることから、これらを克服したうえで、競合状態の定量化を進めていくことが求められる。SfM-MVS を活用して競合状態の把握が可能になれば、定量的なデータをもとに、下刈りの必要性に対する判断を行うことが可能になると考える。

本研究では、天然下種更新したカラマツ実生発生地を対象として、デジタルカメラ画像と SfM-MVS を用いて競合状態を定量的に評価する手法を提案することを目的とした。

II 研究手法

1. 調査地概要

調査地は長野県南佐久郡北相木村の山木村有林である。調査地では2014年7月～8月にかけて、周囲のカラマツ立木からの種子供給による天然更新を誘導するため、小面積皆伐およびA層の掻き起こしが実施された。面積は1.06ha、標高は1,280m、斜面傾斜は6～9℃と緩傾斜であり、年降水量は約1,000mm、年平均気温は9.3℃と比較的冷涼な気候である。2015年春に実生の発生が確認され、初期密度は75,000本/ha、翌2016年春の本数密度は35,000本/haであった。更新誘導の際に掻き起こしが実施されたため、実生発生初年度は他種の発生が抑えられたが、実生発生から2年目にあたる2016年初夏にはクマイチゴを中心とした競合種の繁茂が確認された。クマイチゴの植生高は競合状態の調査を実施した2016年8月はじめには、高いもので1m近くに達しており、カラマツ実生の多くが競合植生に被圧された状態となった。

2. 調査手法

調査地内に、20m×2mのベルト状のプロットを設置し(図-1)、2016年7月末と10月末にカラマツ実生の地際径および実生高、形質、実生位置の調査を行った。さらに、このプロットを1m×1mのグリッドに区分けし、グリッド単位でデジタルカメラによる競合植生の把握を行った(図-2)。グリッドおよび実生位置に関してはトータルステーションで測量を行った。撮影は、1m×1mのグリッドごとに約2mの高さで19方向からグリッド内の植生が写るように行った。グリッドの角4箇所にz方向にメモリのついたダンポールを設置し、撮影の際はこのポールが画角内に収まるようにした。使用したカメラはDJI社のHG310で、カメラ諸元値は表-1の通りである。

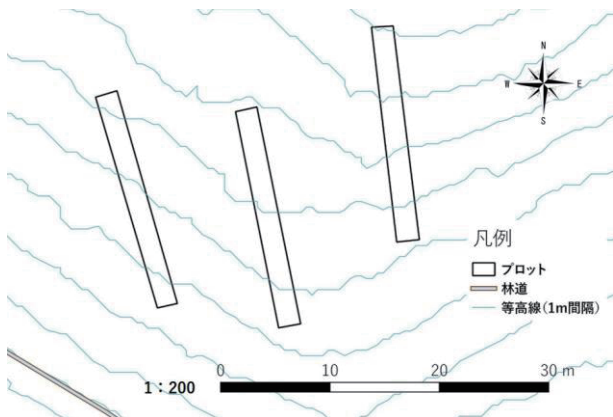


図-1. 調査地とプロット

撮影した画像はAgisoft社のPhotoscan3.2.2で処理を行った。PhotoscanはSfMソフトの一つであり、同じくAgisoft社が提供するAgisoft Lenzeを用いてカメラレンズのキャリブレーションを行い、画像を合成、3次元化し、点群データを作成した。また、撮影の際に設置したポールの目盛をGCPとして写真上で指定した。GCPは各グリッド四隅のポールのz方向0.3mお

よび0.5mの位置として、グリッドあたり19枚の写真それぞれ全てに付与した。点群データと位置情報をもとに、DSM(Digital Surface Model)およびオルソ画像を出力した。DSMのピクセルサイズは1.5mm×1.5mmとした。

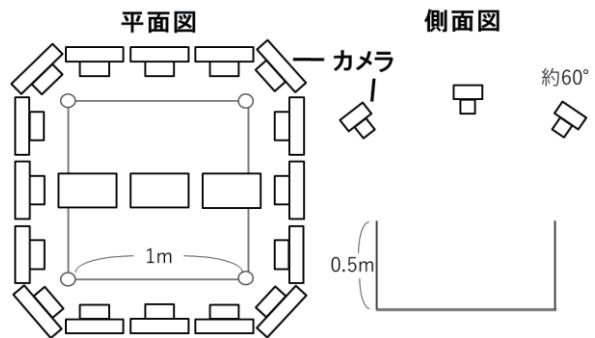


図-2. デジタルカメラによる植生把握

次に、本手法により作成されたDSMの精度検証を試みた。しかし、対象がクマイチゴをはじめとした可塑性の高い植物であり、真値を精密に計測することが極

表-1. カメラ諸元値

型番	DJI HG310
f値	2.8
焦点距離	4mm
画素数	1200万(4000×3000)
解像度	72dpi
ISO感度	200-800

めて困難であったため、SfMにより作成・合成された点群モデルに対して、値が既知のもの座標値を求め、モデル上の値と実際の値を比較して検証する便宜的な方法をとった。今回は、基準として設置した測量ポールとグリッド4隅のダンポールを対象とした。座標の抽出は、Cloud Compareを用いた。

撮影および解析時の作業の簡略化を検討するため、合成に供する画像枚数を減らした場合の解析も試みた。図-2における19枚のカメラ画像から、一枚間隔で画像を抜き出して10枚でSfM処理する場合と、上方からの3枚のみで処理する場合を検討した(図-3)。この際も、19枚の場合と同様にGCPを与えた。

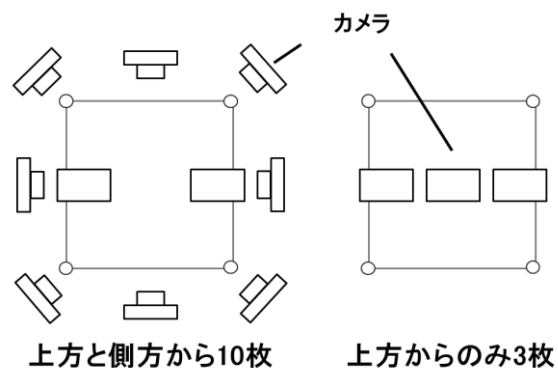


図-3. カメラ枚数の検討

さらに、実生の成長と競合状態の評価方法を明らかにするため、カラマツ実生の位置座標を中心として、

GIS (地理情報システム) 上で任意の円形バッファを発生させた。バッファの半径は、実生位置から 0.1m, 0.2m, 0.3m, 0.4m, 0.5m および実生高さの 0.5 倍, 1.0 倍, 1.5 倍, 2.0 倍の 9 パターンである。GIS 上で、実生ごとのバッファ範囲内について、SfM 処理により作成した DSM の z 方向の値をラスターベースで解析することで、バッファ内の平均値を算出し、実生ごとの競合状態を把握した。解析は QGIS2.14.0 を使用した。次に、算出した値をそれぞれの実生高で除することで競合植生の相対高を示す RH (Richardson et al.1999) を算出した。この RH と実生のバイオマス量である D^2H (D : 実生高, H : 地際径) の増加量の関係について、一般化線形モデルをあてはめ、競合状態でカラマツ実生の成長量が説明可能か検討した。本研究では、個体サイズのバラつきが大きい天然更新実生が対象であるため、計測以前の成長量や個体サイズ等もパラメータとして検討した。なお、解析の際多重共線性の認められる変数に関しては、候補から除いた。また、今回扱ったデータは、ヒストグラムが対数正規分布であったため、対数変換を行ってから解析している。統計解析には、R3.2.3. (R Core Team 2015) を用いた。

III 結果と考察

1. 実生データ

実生データを表-2 に示す。SfM による競合状態の把握直前 2016 年 7 月末の平均実生高は 15.7cm, 平均地際径は 3.0mm, D^2H は 1.9 であった。落葉前 (同年 10 月末) の平均実生高は 19.4cm, 平均地際径は 3.4mm で、 D^2H は 4.1 であった (表-2)。

表-2. 実生サイズ

	7月末	10月末
平均実生高(H)	15.7	19.4
平均地際径(D)	3.0	3.4
平均H/D	49.7	57.0
平均 D^2H	1.9	4.1
密度(本/ha)	35,000	34,750

2. 競合状態の精度検証

測量ポールとグリッド 4 隅のポールの座標値の把握可能な点を点群モデル上で 2 点指定し、その座標の距離を抽出して既知の値と比較したところ、誤差は表-3 の通りであった。平面方向に比べて、高さ方向の精度がやや落ちるものの、RMSE は 4.23mm と高い精度で合成できていることが確認された。

表-3. SfM の精度

	mm	平面	高さ
誤差	最大	9.0	6.0
	最小	-11.0	-4.5
RMSE		3.56	4.23

表-4. 合成結果

	合成できたグリッド数	検出された平均点群数(点)
3枚	104/120	4,607
10枚	99/120	1,518
19枚	111/120	36,064

一方、作業の簡略化を目指し、画像枚数を減らした場合は、多くのグリッドで SfM 合成が不能となった (表-4)。合成できたグリッド数も、画像 10 枚の場合は特に少なく、グリッド当たりの平均点群数も 1/10~1/20 と減少した。画像 10 枚の場合、ひとつの面からの画像数減少によりラップ率が不足し、合成が正常に行えなかったと考えられる。また、ノイズを多く拾っており、正確な 3 次元モデルを得られていない (図-4)。画像 3 枚の場合は、上方からのラップ率は確保されたことから、合成可能グリッド数は画像 10 枚の場合と比較して確保できたものの、点群数では画像 19 枚の場合と比較して大幅に少なく、横方向からの情報が不足し、作成された DSM も不明瞭な箇所が多かった (図-4)。調査や解析の省力化は重要であるが、本研究のように小スケールを対象に近距離から撮影した画像で解析を行う場合は、画像数の削減は適切でないと考えられた。

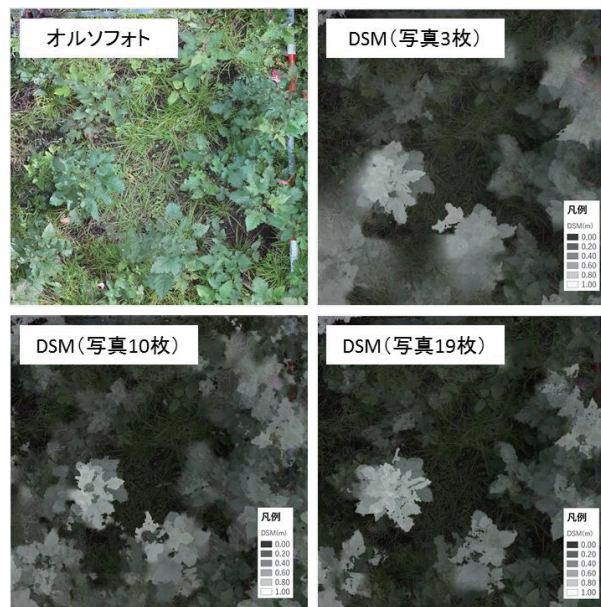


図-4. オルソフォトと写真枚数ごとの DSM

3. カラマツ実生の D^2H 増加量と競合状態の関係
ステップワイズ法による変数選択および重回帰分析の結果、初夏から落葉前までの D^2H の増加量は、 RH および期首の D^2H で説明可能と考えられた (表-5)。また、 RH の解析対象範囲であるバッファの半径は実生高に関係なく一律で実生位置から 0.5m が妥当であった。本調査地の場合、カラマツ実生が競合植生に被圧された状態であったため、より広い範囲に存在する競合種の影響を受けていたと考えられる。

表-5. 重回帰分析結果

変数	偏回帰係数	標準誤差	t値	有意確率
RH	-0.558	0.252	-2.217	0.029
期首のD ² H	1.077	0.162	6.666	5.33×10 ⁻⁹
切片	-0.083	0.062	-1.352	0.181
自由度調整済み 決定係数				0.633
P値				3.598×10 ⁻¹⁶
AIC				98.938

今回選択された変数の単回帰分析の結果を図-5 および図-6 に示す。それぞれ、RH が大きくなるほど D²H の増加量は小さく、期首の D²H が大きいほど D²H の増加量は大きくなることを確認できる。今回選択した重回帰モデルとのAICを比較すると、単回帰では、RHのみの場合 103.175, 期首の D²H のみの場合 133.976 であったのに対して、今回の重回帰モデルでは 98.938 とやや下がっていた。

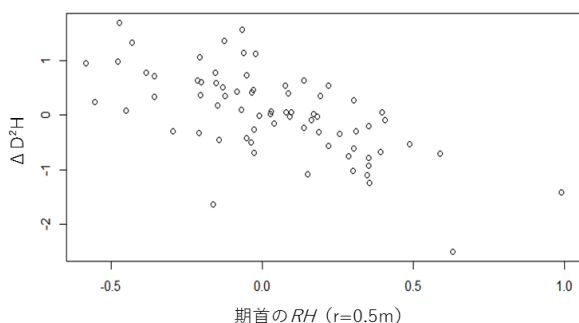


図-5. RH と D²H 増加量の関係

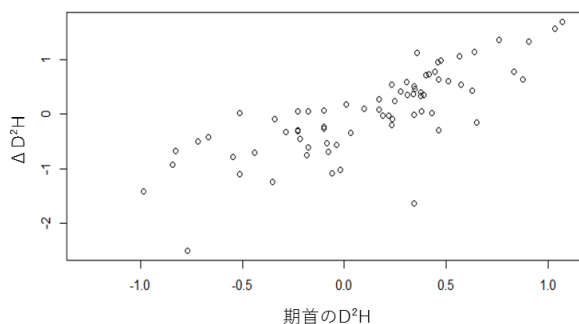


図-6. 期首の D²H と D²H 増加量の関係

IV まとめ

本研究では、SfM-MVS の技術を用いて、カラマツ実生と競合する植生を 3 次元情報として捉えると同時に、実生の成長量とモデル化することで競合状態を定量的に把握した。複数方向から写真を撮影し、GCP を与えることで、小スケールを対象にした場合でも一定程度の精度で把握可能であった。本研究の対象では競合状態の範囲は実生高に関係なく一律であったが、3

次元情報としてデジタルデータで捉えることで、競合状態の表現も様々な解析が可能と考えられた。また、カラマツ実生の期首サイズに競合状態を加えることでモデルの精度が向上し、定量的な競合の把握が成長量のモデル化に効果的であることが明らかとなった。

一方、本手法では、競合種という正確なサイズ計測が困難なものを対象としたため、真の精度検証が不可能であった。競合状態に関しては、重回帰分析で説明可能であったものの、必ずしも高い予測精度ではなかった。今後は精度検証方法の改良に加えて、競合状態の表現方法の検討が必要と考えられる。また、膨大な写真枚数と GCP の付与が必要であったため、現場での応用には課題が残る。したがって、写真枚数や現場に設置する GCP とする点を再検討し、手動で指定する GCP を極力減らし、SfM ソフトで自動的に 3 次元モデルが作成可能な状態にする必要があると考える。

本研究では、手動では定性的な判断になりがちな競合状態をデジタルデータで把握、3 次元化することを試みた。課題は残るものの、下刈り必要性の判断を行う上で、定量的なデータを提示する手段として、活用が期待できる手法を示すことができたと思う。

本研究は JSPS 科研費 26450222 の助成を受けた。

引用文献

- 早川裕式・小花和宏之・齋藤仁・内山庄一郎 (2016) SfM 多視点ステレオ写真測量の地形学的应用. 地形 37-3:321-343
- 平岡裕一郎・重永英年・山川博美・岡村政則・千吉良治・藤澤義武 (2013) 下刈り省略とその後の除伐がスギ挿し木クローンの成長に及ぼす影響. 日林誌 95:305-311.
- Hugenholz C.H., Whitehead K., Brown O.W., Barchyn, T.E., Moorman T. (2013) Geomorphological mapping with a small unmanned aircraft system: Feature detection and accuracy assessment of a photogrammetrically-derived digital terrain model. *Geomorphology*194:16-24
- 北原文章・渡辺直史・光田靖・山川博美・酒井敦・垂水亜紀 (2013) スギ植栽木の成長と下刈り対象木の競合状態との関係. *応用森林研究* 22:1-6
- R Core Team (2015) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Richardson B., Kimberley M. O., Ray J. W., Coker G. W. (1999) Indices of interspecific plant competition for *Pinus radiata* in the central north island of New Zealand. *Canadian Journal of Forest Research* 29: 898-905
- 田村太壺・加藤頭・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(1):163-168
- 丹下健・鈴木祐紀・八木久義・佐々木恵彦・南方康 (1993) 雑草木の刈り払いが植栽木の成長に与える影響. *日林誌* 75: 416-423
- 鶴崎幸・佐々木重行・重永英年・山川博美 (2016) 下刈りがスギの幼齢木と雑草木の成長に及ぼす影響. *九州森林研究* 69
- 山川博美・重松英年・荒木眞岳・野宮治人 (2016) スギ植栽木の樹高成長に及ぼす期首サイズと周辺雑草木の影響. *日林誌* 98:241-246