

UAV 空撮画像を活用した 河道内に繁茂する竹林の樹頂点の抽出

手塚 透吾¹・溝口 裕太²・中村 圭吾³

¹正会員 (国研) 土木研究所 流域水環境研究グループ流域生態チーム
(〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6)

E-mail: tezuka-t574cl@pwri.go.jp (Corresponding Author)

²正会員 (国研) 土木研究所 流域水環境研究グループ流域生態チーム (同上)

E-mail: mizoguchi-y577bt@pwri.go.jp

³正会員 (公財) リバーフロント研究所 (〒104-0033 東京都中央区新川 1-17-24)

(研究当時: (国研) 土木研究所水環境研究グループ河川生態チーム)

E-mail: nakamura-keigo@rfc.or.jp

河道内植生の把握は、効率的かつ効果的な河川管理の実現に必要な基礎情報を捉えるという点で重要である。本研究では、高密度に繁茂するハチク (*Phyllostachys nigra* var. *henonis*) の竹林を対象に、UAV の空撮から得られる高解像度の DSM (Digital Surface Model) に LMF (局所最大値フィルタリング) を適用することで樹頂点の抽出を試みた。LMF の性能を左右するパラメータである WS (探索範囲) を様々に変化させ、樹頂点の抽出精度を評価した結果、直径 0.5m の WS で最大の F 値を確認した。既往研究では高密度な竹林における抽出精度の低さが課題とされたが、本研究では高解像度の DSM と、適切な WS の設定により、高い精度での樹頂点の抽出が可能であることを示すことができた。

Key Words: Individual tree detection, *Phyllostachys nigra* var. *henonis*, UAV, high-resolution images, local maximum filtering

1. 序論

河道内の竹林は、古くは水害防備林 (以下、水防林) として造成され、洪水による被害の軽減に効果を発揮してきた。しかし、管理が行き届かない状況下では、立竹密度の高まりと、その旺盛な生長による繁茂域の拡大が相まって、洪水時の流下能力低下の一因になることが多く、河川管理上の課題になりやすい。特に、河道内竹林に占める竹林の割合は、関東以西で顕著であることが報告されている¹⁾。

立竹密度が高い竹林では、老竹が増加する一方で、新竹の発生数の低下と生育不良のために倒伏しやすく、洪水時に水防林としての機能を十分に発揮できない可能性が考えられる²⁾。しかしながら、立竹密度が高い竹林であっても、適切な管理によって水防林の機能が向上する可能性を示唆する報告もある²⁾³⁾。したがって、水防林の機能はもちろんのこと、水理解析をともしなう洪水時の流下能力の評価という点でも、それらの土台となる竹の

稈本数や立竹密度といった基礎情報を精度よく把握することが求められており、なおかつ、河川区域のような広範囲の情報を効率的に収集することが可能な技術に対する要求が高い。

近年の航空レーザ技術の進歩により、広範囲の植生情報の効率的な取得が可能になった。例えば、森林分野では針葉樹人工林を対象に、航空機によるレーザデータを用いて、樹冠の高さ情報から局所的な最大値を樹木 1 本の樹頂点として抽出する局所最大値フィルタリング (Local Maximum Filtering ; 以下、LMF) などの手法を適用することで、立木位置、本数、密度および資源量を把握している⁴⁾。他方、竹林についても同様な技術が適用され、樹頂点の抽出、立竹密度を把握する研究はあるものの数は少なく、針葉樹人工林と比べて、樹頂点の抽出精度は低い傾向にある⁵⁾。例えば、立木位置や本数と抽出された樹頂点の対応関係から評価される抽出精度 (後述の再現率) は、間伐などで密度が管理された針葉樹人工林では 90%以上とされているが⁶⁾、竹林ではその密度

が管理されたとしても 68%程度の抽出精度に留まっている⁹⁾。さらには、管理されずに立竹密度が高くなった竹林における樹頂点の抽出精度は 23%程度であり、精度向上の必要性が指摘されている⁹⁾。ここでは、樹頂点の抽出に用いた航空機によるレーザデータの空間解像度が 1m 四方であったために、LMF の適用において竹 1 本ごとの頂点を捉えるには十分な解像度をラスターデータが有していなかったこと、また、竹林に適したパラメータを設定できなかったことが課題として残された。他方、無人航空機 (Unmanned Aerial Vehicle ; 以下, UAV) は、航空機よりも低空で飛行できるため高解像度のデータが取得可能である。既往研究⁷⁾では、UAV 空撮画像から生成された 3 次元点群データを解析することで立竹位置の抽出が試みられたが、立竹密度が低い環境、かつモウソウチク 1 種に限られるという課題がある。

そこで本研究では、河川管理において効率的なモニタリングに対する必要性の高い竹林を対象に、UAV 空撮画像を用いた LMF による樹頂点の抽出法の構築を目的とする。とりわけ、適用事例のないハチク、かつ既往研究⁹⁾でも精度の向上が課題となっている、管理が行き届かず立竹密度が高くなった河道内の竹林を対象とする。

2. 材料と方法

(1) 概要

本研究では、樹頂点の抽出法の構築のために、現地調査と、そこで取得したデータに基づく解析を行った。まず、現地調査については、樹頂点の抽出法の入力データである数値表層モデル (Digital Surface Model ; 以下, DSM) を作成するために UAV を用いた現地の空撮と、検証データである立竹位置、樹冠形状の記録を行った。その後の解析では、UAV 空撮画像から高解像度の DSM を SfM-MVS 解析によって作成し、それを入力データとして様々なパラメータのもと LMF を実行した。それら解析結果の精度を、現地で取得したデータとの比較から求め、評価することで立竹密度が高い竹林における樹頂点の抽出法の構築を試みた。

(2) 現地調査

a) 生育状況

利根川水系小貝川の河道内に存在する延長約 150m、幅約 35m の竹林を対象とし、2021 年 11 月 11 日に現地調査を行った。竹林はハチク (*Phyllostachys nigra* var. *henonis*) で構成されていた。平らな地盤に 5m 四方の検証プロット (以下、プロット) を 3 か所設置し、GNSS 受信機一体型の Geo 7 X handheld (Trimble 社製) を用いて位置情報を取得した。また、樹冠がプロットに干渉する全ての

表-1 プロットごとの竹の生育状況

プロット	稈本数 [本]	立竹密度 [本/100m ²]	樹冠面積		樹冠短径		推定樹高	
			合計値 [m ²]	平均値 [m ²]	平均値 [m]	平均値 [m]	標準偏差 [m]	
plot1	36	117	30.7	0.9	0.73	12.4	0.90	
plot2	36	117	30.8	0.9	0.71	12.0	0.77	
plot3	39	129	30.3	0.8	0.72	9.5	0.68	
全体	111	121	91.7	0.8	0.72	11.3	1.52	

竹を対象に調査を行い、総数 111 本の立竹位置と樹冠形状を記録した。なお、UAV の空撮で捉えることができない樹冠下の竹は検証対象から除外した。樹冠形状は、現地調査の際に記録したスケッチと、後述するオルソモザイク画像との整合を確認した後、QGIS ver. 3.18.3 (<http://www.qgis.org>) を用いて樹冠面積と、樹冠内部で重心を通る最短の直線の長さ (以下、樹冠短径) を算出した。立竹密度は、樹冠の合計面積に対する稈本数の割合とし、推定樹高は、DSM から求めた樹冠ごとの最高点から、5m メッシュの数値標高モデル (国土地理院) を減じることで算出した。プロットごとの竹の生育状況を表-1 に示す。

b) UAVによる空撮

UAV による空撮は、光学カメラ一体型の Mavic 2 Pro (DJI 社製) を使用し、現地調査と同日の午前中に、晴天かつ平均風速が 0.5m/s 以下の環境で実施した。撮影条件は高田ほか (2020)⁸⁾を参考にし、対地高度が約 62m (地上画素寸法: 1.45cm) の鉛直下向きの撮影に加えて、対地高度が約 62m で天底角 30° の斜め撮影を行った。撮影のオーバーラップ率は、進行方向 80%、隣接コース間 60%に設定し、飛行速度は 6m/s とした。また、撮影範囲内に対空標識を 6 個設置し、5 個を標定点、1 個を検証点として使用した。各対空標識の座標は、Geo 7 X handheld により取得した。なお、後述する SfM-MVS 解析における検証点の精度誤差は 0.05m であった。

(3) 樹頂点の抽出

a) 空撮画像からの DSM の作成

ソフトウェア Mctashape Professional Ver.1.6.4 (Agisoft 社製) を用いて、SfM-MVS 解析により空撮画像から点群密度 0.474 点/cm² の 3 次元点群データを生成し、エラーと考えられる点を除去した後、オルソモザイク画像と DSM を作成した。DSM はオルソモザイク画像における空隙などの配置と大きな差異がないことを確認の上 (図-1)、解像度 0.05m/pixel のラスターデータとして出力した。なお、竹林で樹頂点の抽出を試みた既往研究⁹⁾では、1.0m/pixel のラスターデータを用いたことから、本研究で使用した DSM は 20 倍程度の高解像度データということになる。オルソモザイク画像については、先述のように現地調査の記録との整合を確認の上、竹 1 本ごとの樹冠

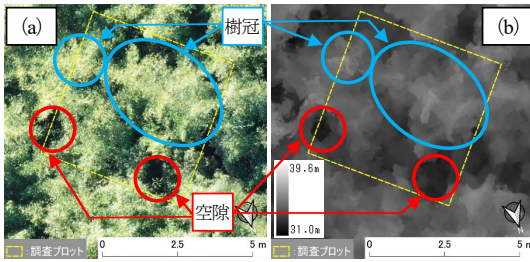


図-1 オルソモザイク画像 (a) と DSM (b) の比較

を特定した。他方、DSM のラスタデータは、次項に示す樹頂点を抽出する LMF の入力データとした。

b) 局所最大値フィルタリングによる樹頂点の抽出

竹の樹頂点の抽出法として、ラスタデータを用いる LMF を採用した。図-2 に LMF による樹頂点の抽出法の概念図を示す。LMF では、まずパラメータとして樹頂点の探索範囲 (Window Size : 以下, WS) を設定する。次に、WS に合わせて探索対象メッシュが選択された後、探索対象メッシュ内の最大値が中心のメッシュであったときに、その中心メッシュを樹頂点として抽出する⁹⁾。WS を過大もしくは、過少に設定することは、樹頂点の未抽出や誤抽出につながる⁹⁾。したがって、対象とする樹種や、立木の樹冠に応じて適切な WS を検討することが重要である。

LMF による解析は、R ver. 4.1.2¹⁰⁾ の lidR パッケージ¹¹⁾ を使用した。なお、竹林で LMF を適用した既往研究⁹⁾ では直径 2.0m の円形 WS を用いたが、立竹密度の高い竹林では 1.0m 未満の小さい WS の適用が課題とされていた。そのため、直径 2.0m を含む 10 個の定数 (直径 0.2~1.0m (0.1m 間隔), 2.0m) として円形 WS を設定した。

(4) 抽出精度の検証方法

抽出された樹頂点の抽出精度は、現地で記録した立木位置からの一定の許容範囲を基準として評価した既往研究¹²⁾を参考に、樹頂点を含む範囲として精度が保たれる樹冠を基準に評価した。まず、樹冠内に樹頂点が抽出された竹を抽出 (True Positive : TP), 樹冠内に樹頂点が抽出されなかった竹を未抽出 (False Negative : FN) とした。なお、樹冠内に複数の樹頂点が抽出された場合は、最も高い樹頂点を抽出 (TP) とし、その他の樹頂点は誤抽出 (False Positive : FP) として分類した¹³⁾ (表-2)。さらに、抽出精度は、Li *et al.* (2012)¹⁴⁾ を参考に、抽出 (TP), 未抽出 (FN), 誤抽出 (FP) の値から以下の式により再現率 (r), 適合率 (p), F 値^{15), 16)}を計算し、評価を行った。

$$r = TP / (TP + FN) \quad (1)$$

$$p = TP / (TP + FP) \quad (2)$$

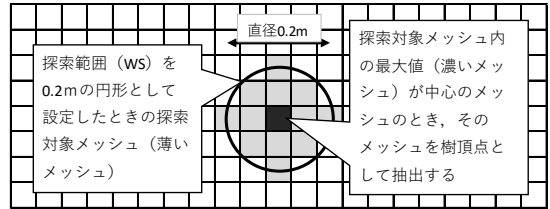


図-2 局所最大値フィルタリング (LMF) による樹頂点の抽出法の概念図 (1メッシュ=0.05mの例を示す)

表-2 抽出結果のカテゴリー

カテゴリー	内容
抽出 (TP)	樹冠内に樹頂点が抽出された竹 また、樹冠内に複数の樹頂点が抽出された場合は最も高い樹頂点を「抽出 (TP)」とする
未抽出 (FN)	樹冠内に樹頂点が抽出されなかった竹
誤抽出 (FP)	樹冠内に複数の樹頂点が抽出された際に、「抽出 (TP)」を除く、すべての樹頂点とする

$$F = (2 \times r \times p) / (r + p) \quad (3)$$

ここでの再現率は現地調査で記録した稈本数に対する抽出 (TP) された稈本数の割合を、適合率は抽出された樹頂点の総数に対する抽出 (TP) された稈本数の割合を表す。また、 F 値は再現率と適合率の調平均であり、再現率と適合率が高いほど F 値も高くなる。これら再現率、適合率、 F 値は、プロットごとと、全プロットの集計値として求めた。なお、本調査地における最適な WS は、この F 値が最も高いものとした。

また、LMF により抽出される樹頂点の総数を樹冠面積の合計値で除して推定立竹密度を計算した。

3. 結果

樹頂点の抽出結果のうち、全プロットの集計結果を表-3 に示す。再現率は、WS が小さいほど高く、WS が 0.2m~0.6m のとき、0.5 以上となった。適合率は、WS が大きいほど高く、WS が 0.4~2.0m のとき、0.5 以上となった。 F 値は、一峰性の傾向となり、WS が 0.5m のときに 0.67 と最大となった。なお、WS が 0.5m のときの樹頂点の抽出結果は図-3 の通りである。

次に、プロットごとの再現率と適合率 (図-4) と F 値 (図-5) について述べる。まず、再現率は、全てのプロットで WS が大きくなるにつれて次第に低下することがわかる。プロットごとに差があり、plot1 は常に低く、plot3 は高く推移した。適合率は、全てのプロットで WS が大きくなるにつれて増加するが、プロットごとに大きな差はみられなかった。 F 値については、全てのプロッ

表-3 樹頂点の抽出精度に関する全プロットの集計結果

現地 稗本数	WS	抽出された 樹頂点数	抽出 (TP)	未抽出 (FN)	誤抽出 (FP)	再現率 (r)	適合率 (p)	F 値
111	0.2m	566	105	6	461	0.95	0.19	0.31
111	0.3m	232	87	24	145	0.78	0.38	0.51
111	0.4m	139	77	34	62	0.69	0.55	0.62
111	0.5m	84	65	46	19	0.59	0.77	0.67
111	0.6m	66	55	56	11	0.50	0.83	0.62
111	0.7m	56	50	61	6	0.45	0.89	0.60
111	0.8m	47	45	66	2	0.41	0.96	0.57
111	0.9m	42	41	70	1	0.37	0.98	0.54
111	1.0m	39	38	73	1	0.34	0.97	0.51
111	2.0m	20	20	91	0	0.18	1.00	0.31

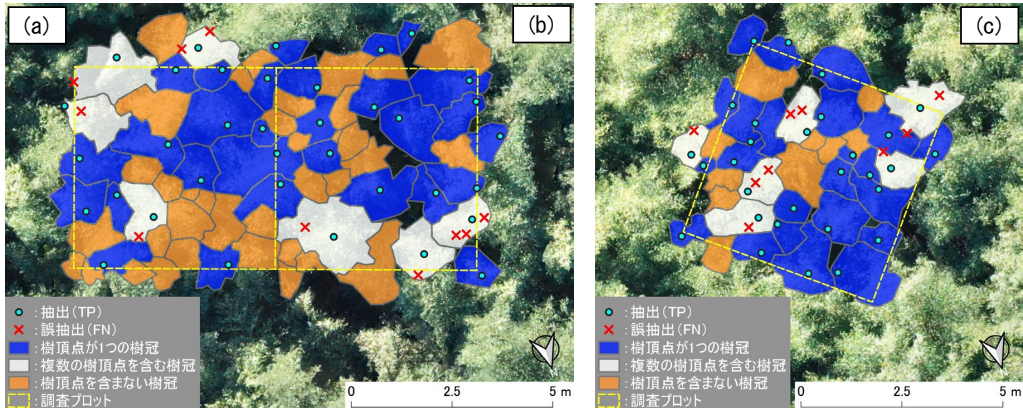


図-3 WSが0.5mのときの(a)plot1, (b)plot2および(c)plot3での検証結果

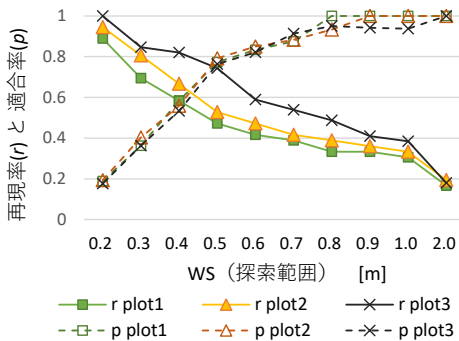


図-4 プロットごとの再現率 (r) と適合率 (p)



図-5 プロットごとの F 値

トで WS が 0.5m のときに最大となる一峰性の傾向を示した。しかしながら、その値はplot1で0.59, plot2で0.63, plot3で0.75となり、プロットごとに差がみられた。

最後に、現地調査で記録した樹冠の面積と、抽出した樹頂点の数から算出した推定立竹密度を図-6に示す。推定立竹密度は WS が小さくなるにつれて単調に減少した。また、WS が 0.5m のとき、92 本/100m²と現地調査 (121 本/100m²) に最も近い値となったが、プロットごとにみると、71~126本/100m²の範囲にばらついた。

4. 考察

(1) 樹頂点の抽出精度

a) 既往研究との抽出精度の比較

本研究では、河川管理においてモニタリング技術の確立が求められている竹林を対象に、樹頂点の抽出法の構築を試みた。とりわけ、既往研究⁵⁾でも精度向上が課題となっている立竹密度が高い竹林に焦点をあて、高解像度のDSMの作成と、様々なWSによるLMFの適用に基

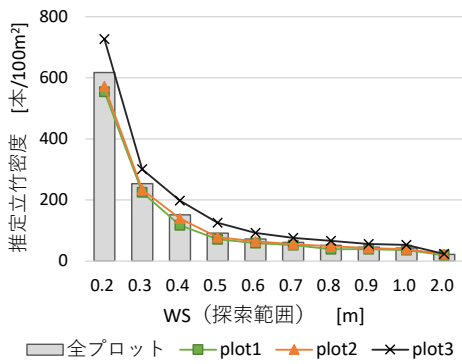


図-6 WS (探索範囲) ごとの推定立竹密度

づき、樹頂点の抽出法の精度向上を検討した。その結果、全プロットでは、 F 値が最大の 0.67 を得た 0.5m の WS の妥当性が示唆された。

次に、本研究で得られた樹頂点の抽出精度について、立竹密度が比較的高い竹林で同様な技術により解析を行った既往研究⁹⁾との比較から考察する。ただし、既往研究⁹⁾はレーザデータ、本研究では画像データから 3 次元点群データを生成し、解析していることに留意されたい。既往研究⁹⁾では管理がされていない竹林 (50 本/100m²) において 0.23 程度の再現率が確認されている。本研究は、既往研究⁹⁾の 2.4 倍ほどの立竹密度 (121 本/100m²) であったが、 F 値が最も高いときの再現率は 0.59 となり、抽出精度を高めることができた。

この理由には、LMF の入力データとした DSM の解像度、樹頂点の抽出に用いる WS の適切な設定および竹の種類の違いが考えられる。まず、DSM の解像度については、航空機によるレーザデータから求めた 1.0m/pixel のラスタデータを用いた既往研究⁹⁾に対して、本研究では UAV 空撮画像から求めた 0.05m/pixel の DSM を用いた。そのため、低い解像度では捉えることが困難な細かな凹凸および、樹冠の形状を表現できたことが高い抽出精度に貢献したと考えられる。また、WS については、2.0m を採用した既往研究⁹⁾に対して、本研究では相対的に小さい 0.2m から 2.0m を採用し、WS が 0.5m のときに最大の F 値を得た。詳細は後述するが、本研究では既往研究⁹⁾と比べて小さな WS を設定したことで、樹冠の特徴を捉えることができたため、高い抽出精度につながったと考えられる。なお、本研究で採用した 0.05m/pixel を DSM の解像度とし、既往研究⁹⁾と同様の 2.0m の WS としたケースでは、再現率は 0.18 となった。このことから、高解像度の DSM を用いるだけでは抽出精度を高めることは困難であり、高解像度の DSM の使用に合わせて、適切な WS の設定が必要であることが示唆される。このほか、1.0m/pixel のラスタデータを使用した既往研究⁹⁾では、2.0m が設定できる WS の最小値であったよう

に、DSM の解像度は設定できる WS の大きさを制限する。したがって、高解像度の DSM を用いることは、LMF による樹頂点の抽出において、高い精度を得るために総じて有利に働くと考えられる。竹の種類については、既往研究⁹⁾ではモウソウチクを、本研究ではハチクを対象とした違いがある。LMF は針葉樹のように樹頂点が明瞭な樹木に適している⁹⁾。そのため、樹頂点が垂れる特徴のあるモウソウチクと、垂直に生長し樹頂点が比較的明瞭なハチクでは、LMF による解析は本研究で対象としたハチクに有利だったと考えられる。しかしながら、竹の種類による樹頂点の抽出精度の違いについては検討が進められておらず、今後の課題だと考えられる。

b) WS (探索範囲) と樹冠面積・短径との関係

本研究では、様々な WS による LMF の適用に基づいて樹頂点の抽出精度を検討した。本項では、はじめに WS の変化が樹頂点の抽出に及ぼす影響について、樹冠面積との関係に基づき考察する。

図-7 には、全プロットにおける竹 1 本の樹冠面積と、その樹冠内に抽出された樹頂点の数との関係を示し、特徴的な結果を得た WS である 0.3m, 0.5m, 0.7m, 0.9m を

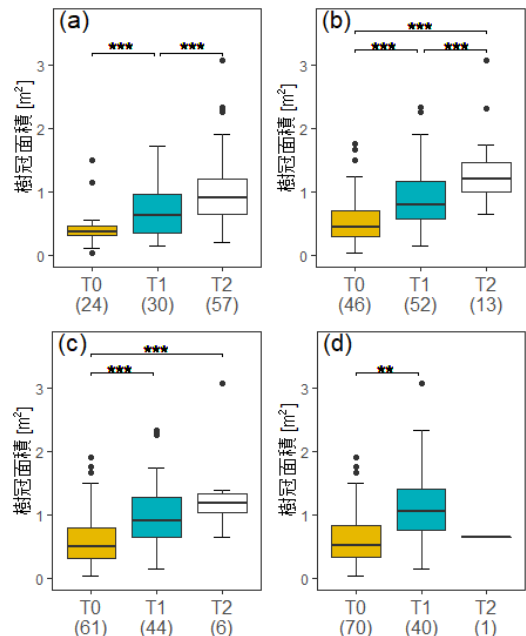


図-7 抽出された樹頂点の数と樹冠面積の関係 (a) : WS=0.3m, (b) : WS=0.5m, (c) : WS=0.7m, (d) : WS=0.9m, 横軸ラベルの () : サンプルサイズ, ** : p -value < 0.01, *** : p -value < 0.0033 (Bonferroni 補正後), T0 : 樹頂点を抽出できなかったもの, T1 : 1 つの樹頂点を抽出できたもの, T2 : 樹頂点を過剰に抽出したものを示す。各群間で Brunner-Munzel 検定による比較を行うとともに、3 群以上の比較の場合は Bonferroni 法による多重比較を行った。なお、サンプルサイズが 5 以下の群は解析から除外した。))

例示する。ここでは、樹頂点を抽出できなかったものを T0、1つの樹冠から1つの樹頂点を正しく抽出できたものを T1、樹頂点を過剰に抽出したものを T2 の3つに分類した。以下、四分位範囲に着目し、考察を深める。

まず、樹頂点が1つも抽出されなかった T0 に焦点をあてる。樹冠面積の第1四分位は WS に依存せず、ほとんど同じ値をとることがわかる。その一方で、第3四分位からは、WS が大きくなるにつれ、大きな樹冠面積を持つ竹の抽出が困難になることが読み取れる。なお、T0 の稈本数は WS が 0.3m のときに 24 本であったが、WS が 0.9m のときには 70 本となり、WS が大きくなるにつれ増加した。

次に、樹頂点を過剰に抽出した T2 について、サンプルサイズが一定以上ある WS が 0.3m から 0.7m の範囲（図-7(a)~(c)）を議論する。WS が大きくなるにつれ、第1四分位は大きくなることから、T2 に分類された相対的に小さな樹冠の竹は、樹頂点が正しく1つ抽出されるようになり、T1 に分類されたと考えられる。また、第3四分位は 0.5m の WS にピークを持つことがわかる。これは、樹冠形状が明瞭であれば、設定した WS に比べて大きな樹冠面積を持つ竹についても、T1 に分類されたことを意味する。なお、T2 の稈本数は WS が 0.3m のときに 57 本であったが、WS が 0.9m のときには 1 本となり、WS が大きくなるにつれ減少した。

最後に、樹頂点が正しく1つ抽出された T1 は、WS が大きくなるにつれて第1、3四分位ともに大きくなることからわかる。これは、T2 および、T1 の樹冠面積が相対的に小さいものが、WS が大きくなるにつれ、T2 から T1 に、また、T1 から T0 に分類されるために T1 の第1、3四分位が大きくなったと考えられる。

図-7(b)から、最大の F 値を認めた WS が 0.5m のとき、T1 の樹冠面積は、T2 よりも有意に小さく、T0 よりも大きいことがわかる。このように、有意に大きい、もしくは小さい樹冠面積を持つ竹を抽出するには、本研究のように WS を1つの定数として扱うことに限界があると考えられる。仮に、WS が 0.5m の抽出結果について、T2 として分類された 13 サンプルに 0.7m の WS を、T0 の 46 サンプルに 0.3m の WS を適用すると、F 値が 0.67 から 0.81 に改善することが確認できた。実装方法には課題はあるが、樹冠面積に対して変化する、少なくとも3つの定数として WS を扱うことができれば、樹頂点の抽出精度の向上に貢献する可能性が示唆された。

図-8 には、WS との関係性を樹冠面積よりも直接的に考察しやすい樹冠短径について、全プロットの頻度分布を示す。WS が 0.5m のときの樹頂点の抽出結果 (T0, T1, T2) を内訳として示すことで、樹冠短径と抽出結果との関係の明確化を試みた。

樹冠短径が小さいほど T0 に分類される樹冠が多く、

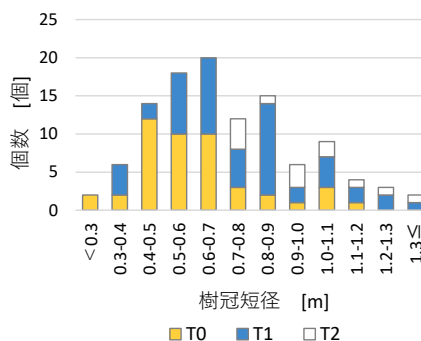


図-8 全プロットの樹冠短径の頻度分布 (WS が 0.5m のときの樹頂点の抽出結果 (T0, T1, T2) を内訳として示す。T0, T1, T2 の意味は、図-7 と同様とする。)

とりわけ、樹冠短径が 0.7m 未満に顕著である。これは、樹冠の小ささのために、隣接する優勢な竹の影響を受けやすく、竹稈が傾くことで隣り合う樹頂点間の距離が、樹冠の大きさに比べて小さくなったために、LMF では未抽出になったと考えられる。

次に、樹冠短径が 0.7 以上では、T2 と分類される樹冠が多い。例えば、樹冠短径が 1.0m 以上は、WS の 2 倍以上であるため、樹頂点が明瞭でない形状を持つ樹冠であれば必然的に誤抽出は増えると考えられる。樹冠短径が 1.0m 未満でも T2 に分類されたのは、T0 と同様に、隣接する樹頂点間の距離に依存したものと推察される。

最後に、T1 に分類された樹冠は、0.5m 以上かつ 0.9m 未満の樹冠短径に集中した。高密度な竹林であっても、WS と同等から 2 倍程度の樹冠の竹であれば、LMF の原理から考えて樹冠内に1つの樹頂点が抽出されると考えられるので、妥当な結果だと言える。

(2) プロット間の抽出精度の差異

プロット間の抽出精度の差異に焦点をあてる。WS が 0.5m のとき、プロットごとの樹冠面積や、樹冠短径には目立った差異が確認されなかった (表-1) にもかかわらず、F 値は 0.59~0.75 の範囲でばらついた。樹木間の競争が激しくなりやすい高密度の環境では、樹高の高い優勢な樹木に、樹高の低い樹木の樹頂点が被覆されることで、樹頂点の抽出精度が低下することが報告されている¹⁷⁾。そこで、樹冠ごとに推定樹高の標準偏差を計算し、推定樹高のばらつきを求めると plot1 は 0.90m、plot2 は 0.77m、plot3 は 0.68m となった (表-1)。したがって、樹高のばらつきが相対的に小さい plot3 では、優勢な竹による被覆の影響は他のプロットに比べて小さいために再現率が高く、結果として抽出精度が高まったと考えられる。このように、優勢な竹に樹高の低い竹の樹頂点が被覆される影響は無視できず、本研究のように立竹密度が高い竹林を対象とする場合には、抽出精度を低下させる

要因である可能性が高い。こうした優勢木による影響が生じる環境では、DSMなどのラスタデータを用いたLMFなどの抽出法ではなく、三次元の点群データを用いた手法¹⁴⁾が優れていると報告されている¹²⁾。点群データの解析は、高い精度が期待される反面、ラスタベースの解析に比べて処理に時間を要するという短所がある¹⁸⁾。そのため、河川区域など広域を対象にする場合には、管理に求められる稈本数、密度などの精度を勘案し、抽出法を選択する必要があると考えられる。

(3) 立竹密度の推定

本研究では、抽出した樹頂点と樹冠の関係から推定立竹密度を算出した。全プロットでは、 F 値が最大となった0.5mのWSのとき、推定立竹密度は92本/100m²となり、現地のデータから求めた立竹密度である121本/100m²と比べて、0.75倍程度の推定精度となった(図-6)。プロットごとでは、plot3では126本/100m²となり現地の立竹密度(129本/100m²)に近かったが、plot1では72本/100m²(現地立竹密度:117本/100m²)、plot2では78本/100m²(現地立竹密度:117本/100m²)と過小に推定された(図-6)。なお、推定立竹密度は、抽出および誤抽出の樹頂点の総和から求めているため、WSが小さいほど誤抽出は多く、立竹密度は過剰に推定されやすい。したがって、図-6の推定立竹密度はWSが大きくなるにつれて小さくなる傾向になった。このように、立竹密度はやや過少に推定されるものの、最大の F 値を得たWSが0.5mのときの推定値を用いることの妥当性を確認することができた。なお、水防林としての竹林の機能は、樹高、胸高直径など複数の要因から決まるが、立竹密度に焦点をあてると、ハチクと同じ大型タケ類であるマダケでは、不良林であっても120本/100m²程度で発揮される可能性に言及がある²³⁾。LMFによる抽出法の性質に基づく、本調査地の立竹密度の117~129本/100m²よりも密度が低ければ抽出精度は向上、密度が高ければ低下すると推察されるものの、様々な立竹密度を有する竹林を対象とした適用性の検証が必要である。

このほか、立竹密度は、河道の流下能力の評価に必要な水理解析を実行する上で、その精度を左右する重要なパラメータの一つである¹⁹⁾、²⁰⁾。本研究で対象とした竹林だけでなく、そのほかの樹種を含め、広範な河川区域で効率的に、それらの密度を求め、入力データとすれば、竹林や樹林による流水抵抗を精度よく再現することが可能な、精緻な水理解析の実行につながると考えられる。

(4) 樹頂点の抽出精度向上に関する検討

本研究では、高解像度のDSMを用いて、WSが0.5mのLMFを適用した結果、既往研究⁹⁾と比べて立竹密度が高い竹林を対象にしたにもかかわらず、0.67という F

値を得ることができた。しかしながら、UAVの空撮画像による針葉樹混交林を対象とした研究²⁴⁾では、0.85を超える F 値が報告されており、さらなる抽出精度の向上が見込めるものと期待される。既往研究⁹⁾では、樹冠直径と樹高との関係を基本に、航空機によるレーザーデータから求まる樹高を用いてWSを逐次計算し、それを変量とすることで様々な大きさの樹冠を有する針葉樹林や広葉樹林において抽出精度の向上を実現した⁹⁾。4.(1b)項で述べたように、竹林においても樹冠面積に応じて適切なWSを設定できれば、抽出精度は高まるものと考えられる。既往研究⁹⁾を参考に、樹冠面積と推定樹高との関係を求めたところ、両者に関係性はみられなかった($R^2=0.023$)が、樹冠の面積を説明する竹林の特性を見出すことで抽出精度が向上する可能性がある。今後、他河川の竹林における適用に向けては、適用例の拡大と精度向上に関する検討が必要と考えられる。

5. 結論

本研究では、立竹密度が高い竹林における樹頂点の抽出法の構築のために、UAVとSfM-MVS解析による高解像度のDSMの作成と、様々な探索範囲(WS)を用いた局所最大値フィルタリング(LMF)による樹頂点の抽出精度の比較から最適なWSを検討した。以下に、本研究で得られた主な知見をまとめる。

- 1) 立竹密度が高い竹林において、高解像度のDSMを入力データとし、直径0.2~2.0mの円形WSのLMFを適用した結果、最大の F 値である0.67となった0.5mのWSが、本調査地において妥当性が高いことを確認した。
- 2) 立竹密度が高い竹林を対象にしたが、既往研究⁹⁾と比較して、高い樹頂点の抽出精度が得られた。その要因には、入力データの解像度の高さ、樹頂点の抽出に用いるWSの適切な設定および、LMFに適したハチクを対象とした3点が考えられる。このほか、3次元点群データの生成元であるレーザーデータと画像データの違いが精度に及ぼす影響についての検討も必要だと考えられる。
- 3) F 値が最大となったWSを設定しても、LMFでは樹冠面積が大きい、もしくは小さい竹の抽出に限界があるため、様々な樹冠面積を有する竹を捉えられるように、複数の定数としてWSを扱うことが樹頂点の抽出精度の向上に貢献することが示唆された。
- 4) 立竹密度の高い竹林を対象とする場合には、優勢な竹に樹高の低い竹の樹頂点が被覆されることで抽出精度が低下する可能性が示された。

謝辞：国土交通省関東地方整備局下館河川国道事務所には、現地調査に際して特段の配慮をいただいた。ここに記して御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 佐貫方城, 大石哲也, 三輪準二: 全国一級河川における河道内樹林化と樹木管理の現状に関する考察, 河川技術論文集, Vol.16, pp.241-246, 2010.
- 2) 上田弘一郎: 水害防備林, 産業図書, 1955.
- 3) 松浦茂樹, 山本晃一, 浜口達男, 本間久枝: 水害防備林の変遷についての一研究, 日本土木史研究発表会論文集, Vol.8, pp.193-204, 1988.
- 4) 林真智: 森林バイオマス推定のリモートセンシング, 日本リモートセンシング学会誌, Vol.40, No.1, pp.2-12, 2020.
- 5) Nagashima, K., Kinami, Y., and Tanaka, K.: Classifying Managed and Unmanaged Bamboo Forests using Airborne LiDAR Data, *J. For. Plann.*, Vol.21, No.1, pp.13-20, 2016.
- 6) 平田泰雅: 航空機レーザーสキャナーを用いたスギ人工林計測におけるレーザー光の林冠透過率と地上照射密度の影響, 森林計画誌, Vol.39, No.2, pp.81-95, 2005.
- 7) Liu, K., Wang, A., Zhang, S., Zhu, Z., Bi, Y., Wang, Y., and Du, X.: Tree species diversity mapping using UAS-based digital aerial photogrammetry point clouds and multispectral imageries in a subtropical forest invaded by moso bamboo (*Phyllostachys edulis*), *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.*, Vol.104, 102587, 2021.
- 8) 高田雅也, 水津佑輔, 松岡祐仁, 野末晃, 神野有生: 造成地の GCP 不使用型 UAV 写真測量の SfM 段階における撮影方法・解析設定の影響, 日本写真測量学会学術講演会発表論文集, pp.43-46, 2020.
- 9) Popescu, S. C. and Wynne, R. H.: Seeing the trees in the forest, *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, Vol.70, No.5, pp.589-604, 2004.
- 10) R Development Core Team.: R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2021.
- 11) Roussel, J. R., Auty, D., Coops, N. C., Tompalski, P., Goodbody, T. R., Meador, A. S., Bourdon J. F., Boissieu F., and Achim, A.: lidR: An R package for analysis of Airborne Laser Scanning (ALS) data. *Remote Sens. Environ.*, Vol.251, 112061, 2020.
- 12) Ma, K., Chen, Z, Fu, L., Tian, W., Jiang, F., Yi, J., Du, Z. and Sun, H.: Performance and Sensitivity of Individual Tree Segmentation Methods for UAV-LiDAR in Multiple Forest Types, *Remote Sens.*, Vol.14, No.298, 2022.
- 13) 川北憲利, 長島啓子, 田中和博: 地上型レーザースキャナーを用いた森林計測の精度検証, 森林計画誌, Vol.51, No.2, pp.47-56, 2018.
- 14) Li, W., Guo, Q., Jakubowski, M. K. and Kelly, M.: A new method for segmenting individual trees from the lidar point cloud, *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, Vol.78, No.1, pp.75-84, 2012.
- 15) Sokolova, M., Japkowicz, N. and Szpakowicz, S.: Beyond accuracy, F-score and ROC: A family of discriminant measures for performance evaluation, In Proceedings of the Australasian Joint Conference on Artificial Intelligence, Springer, Berlin, Heidelberg, pp.1015-1021, 2006.
- 16) Goutte, C. and Gaussier, E.: A probabilistic interpretation of precision, recall and F-score, with implication for evaluation, Proceedings of the European Conference on Information Retrieval, Springer, Berlin, Heidelberg, p.345-359, 2005.
- 17) 伊藤拓弥, 松英恵吾, 内藤健司: 航空機 LiDAR による樹冠の再現性, 日林誌, Vol.91, No.5, pp.326-334, 2009.
- 18) Latella, M., Sola, F. and Camporeale, C.: A density-based algorithm for the detection of individual trees from lidar data, *Remote Sens.*, Vol.13, No.2, pp.1-22, 2021.
- 19) 清水義彦, 辻本哲郎: 植生帯を伴う流れ場の平面 2 次元解析, 水工学論文集, Vol.6, pp.513-518, 1995.
- 20) 吉田圭介, 前野詩朗, 小川修平, 井関禎之, 赤穂良輔: ALB 点群を用いた樹木群の密生度算定法の検討, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.74, No.4, pp.547-552, 2018.
- 21) Mohan, M., Silva, C. A., Klauber, C., Jat, P., Catts, G., Cardil, A., Hudak, A. T. and Dia, M. Individual tree detection from unmanned aerial vehicle (UAV) derived canopy height model in an open canopy mixed conifer forest. *Forests*, Vol.8, No.9, pp.1-17, 2017.

(Received March 28, 2022)
(Accepted August 22, 2022)

TREETOP DETECTION FOR A RIVERINE BAMBOO FOREST USING UAV IMAGES

Togo TEZUKA, Yuta MIZOGUCHI and Keigo NAKAMURA

Treetop detection was conducted at a dense bamboo (*Phyllostachys nigra* var. *henonis*) forest using local maximum filtering (LMF) with a circular window under a high-resolution digital surface model (DSM) via UAV images. Optimal window size (WS) was evaluated based on applications in some WS cases. Treetop detection results showed that the highest F -value was obtained in 0.5-m WS, with a detection accuracy that was relatively higher than that of a previous study, although in a denser bamboo forest. Thus, high-resolution DSM and an appropriate WS are important factors for accurate treetop detection by LMF.