

# UAV 空撮画像と樹頂点位置の抽出技術による 河道内に繁茂する竹林の密生度推定法の検討

手塚 透吾<sup>1</sup>・溝口 裕太<sup>2</sup>・斉藤 展弘<sup>3</sup>・崎谷 和貴<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 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)

<sup>2</sup>正会員 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)

<sup>3</sup>非会員 国土交通省 中国地方整備局浜田河川国道事務所 (〒697-0034 島根県浜田市相生町 3973)

河道内樹木群の密生度や樹高などは、水理解析に必要な基礎情報であるものの、長大な河川を対象とした場合には、その取得に多大な労力を要するため、リモートセンシング技術による情報取得の効率化が期待される。そこで、本研究ではマダケ、ハチク、モウソウチクの3種の竹林を対象に、UAVの空撮画像へのLMF (local maximum filtering) の適用による程1本ごとの樹頂点の抽出と、それに基づく密生度の推定を試みた。最も精度の高い推定結果に注目すると、竹林の密生度は、全ての種で10%ほど過少ではあるが、比較的高い精度で現地に繁茂する竹林の状況を捉えることができた。また、推定精度は LMF のパラメータである WS (Window Size) に依存するため、その適切な設定が重要であることを認めた。

**Key Words:** Individual tree detection, vegetation density, bamboo, UAV, local maximum filtering

## 1. 序論

降雨の激甚化による洪水外力の増大が懸念される昨今、河道内における植生管理の重要性は高まっている。とりわけ、河道内樹木群 (以下、樹林) の繁茂は、洪水時の流下能力の低下や偏流に伴う局所洗掘を引き起こす可能性があり、治水上の課題として広く認識されている。西日本を中心にみられるタケ類 (水理学的な挙動を考慮し、本研究では樹木として扱う。) は、四国、九州地方の1級河川に繁茂する樹木の4割以上を占めることや、旺盛な成長速度を持つことからヤナギ類、ハリエンジュに並び、定期的に伐採が必要な樹木として管理対象になりやすい<sup>1)</sup>。さらには、タケ類のうち南方系のマダケ属は、北日本において気候変動に伴う拡大リスクの増大が見込まれ<sup>2,3)</sup>、繁茂の状況を捉えるモニタリング技術に対するニーズは高まっている。このように、タケ類の拡大は治水上のリスクを時として高めるが、その一方で水害防備林として造成されてきた歴史がある<sup>4)</sup>。水理学的な検討によると、適切に管理された水害防備林には、堤内地の流速低減などの機能が認められている<sup>5)</sup>。また近年では、超過洪水を念頭においた氾濫原対策として、二線堤や輪中堤などと並び、水害防備林への期待が高まっている<sup>6)</sup>。

前述のように、洪水流に与える竹林の影響には長短あ

り、その影響の定量化には、水理解析による検討が不可欠である。一般に樹林は、抗力などとして水理解析に導入されるが、その実行には現地河川に繁茂するタケ類の樹高、胸高直径、密生度などの入力データを揃える必要がある。このようなデータの収集には多大な労力と時間を要する。一方で、林業分野において、資源管理が求められる針葉樹人工林では、リモートセンシング技術により取得された広域な空間データに局所最大値フィルタリング (Local Maximum Filtering ; 以下、LMF) を適用することで樹頂点位置を抽出する技術が開発されている<sup>7)</sup>。樹木を1本ずつ抽出できる当該技術を、河道内に繁茂する竹林に適用することで、対象領域に繁茂する竹林の程本数や、密生度を簡単に捉えることができ、植生管理の効率化へ貢献できるものと考えられる。しかしながら、竹林への LMF の適用例が少ないことに加え、樹頂点の抽出精度は十分ではなく<sup>8)</sup>、また、適用された種が限られるなど課題がある。

そこで本研究では、我が国にみられるタケ類のうち主要な種であるマダケ (*Phyllostachys bambusoides*)、ハチク (*P. nigra* var. *henonis*)、モウソウチク (*P. pubescens*) の竹林を対象に、LMF の適用による樹頂点の抽出、密生度の推定および、それらの精度検証を行い、河道内に繁茂する竹林への樹頂点の抽出技術の適用性について検討することを目的とする。

## 2. 材料と方法

### (1) 概要

本研究では、竹林の樹頂点の抽出と密生度の推定を行うために、UAVによる空撮および検証データの取得を目的とした現地調査と、LMFの適用による空撮画像の解析を実施した。まず、現地調査では、3種の竹林それぞれに調査区を設置し、立竹位置および樹冠形状の記録を行った。また、LMF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 による空撮を実施した。その後の解析では、UAV 空撮画像から SfM-MVS (Structure from Motion-Multi View Stereo) 解析によって高解像度の DSM を作成し、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。それら解析結果と、現地調査で取得したデータを照合することで、パラメータの違いによる樹頂点の抽出精度と、密生度の推定精度について検証した。さらには、樹頂点と密生度の精度について、3種の竹林の比較を行った。

### (2) 現地調査

#### a) 生育状況の記録

ハチクは利根川水系小貝川で2021年11月14日<sup>9)</sup>に、マダケおよびモウソウチクは江の川水系江の川で同年12月21~22日に現地調査を行った。それぞれ単一種で構成され、積極的な管理はされず密生した竹林において、比較的平らな地盤に調査区を設定し、Geo 7 X (Trimble社製) を用いてネットワーク型 RTK-GNSS 測量とオフセット観測により調査区の座標を取得した。既往研究<sup>9)</sup>と同様に、この調査区を基準として、樹冠が調査区に干渉する個体を含め、立竹位置と樹冠形状を記録した。樹冠は1本ごと稈を揺らし、樹冠を構成する個体を特定した。なお、UAVの空撮で捉えられない樹冠下の個体は、本研究の対象から除外した上で、サンプル数は各種とも100本以上とした。樹冠形状は、QGIS ver. 3.22.5<sup>10)</sup>を用いて現地調査の際に記録した樹冠形状と、後述するオルソモザイク画像を調査区を基準に重ね合わせて整合を確認した後、樹冠面積を算出した。密生度は、ほとんど隙間なく樹冠が調査区を覆っていたことから、合計樹冠面積100m<sup>2</sup>あたりの稈本数とした。推定樹高は、DSMより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) (Digital Elevation Model ; 以下, DEM) を減じることで算出した。現地調査で確認した生育状況を表-1に示す。

#### b) UAVによる空撮

機体は光学カメラ一体型のMavic 2 Pro (DJI社製) を使用した。3地点とも同一の条件で撮影を行い、対地高度は約70m (地上画素寸法: 1.45cm) の鉛直下向き撮影と

表-1 生育状況

		マダケ	ハチク	モウソウチク
稈本数	[本]	160	111	142
密生度	[本/100m <sup>2</sup> ]	142.7	121.0	56.8
樹冠面積	中央値 [m <sup>2</sup> ]	0.6	0.7	1.3
	合計 [m <sup>2</sup> ]	112.1	91.7	250.1
胸高直径	中央値 [cm]	6.5	4.8	13.1
推定樹高	中央値 [m]	13.7	11.5	17.6

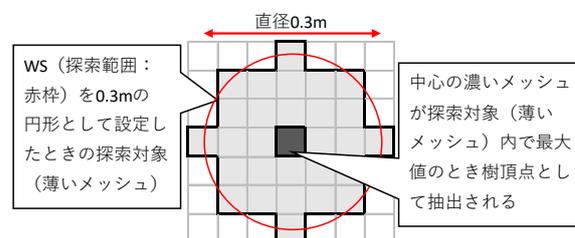


図-1 局所最大値フィルタリング (LMF) による樹頂点の抽出の概念図 (メッシュサイズ 0.05m/pixel の例を示す。手塚ほか (2022) <sup>9)</sup> を一部修正)

し、オーバーラップ率は進行方向 80%、隣接コース間 60%に設定した。また、撮影対象の竹林を囲うように対空標識を6個設置し、5個を標定点、1個を検証点として使用した。対空標識の座標は、前述のネットワーク型 RTK-GNSS 測量により取得した。なお、後述の SfM-MVS 解析における検証点の精度誤差はすべての調査区で 0.09m 以下であった。

### (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 Metashape 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オルソモザイク画像と DSM を作成した。DSM は解像度 0.05m/pixel のラスタデータとして出力した。オルソモザイク画像は、前述のように現地調査との整合を確認の上、1本ごとの樹冠を特定し、検証データとした。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

図-1 に LMF による樹頂点の抽出の概念図<sup>9)</sup>を示す。LMF では、まずパラメータである樹頂点の探索範囲 (Window Size ; 以下, WS) を設定する。次に、円形 WS に応じて探索対象メッシュが選択され、探索対象メッシュの中心メッシュの値が、探索対象内の最大値であったときに、樹頂点として中心メッシュを抽出する<sup>11)</sup>。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<sup>12)</sup>。したがって、対象とする樹種や、その成長段階に応じて適切な WS を検討することが重要である。LMF による解析は、R ver.4.1.2<sup>13)</sup> の lidR パッケージ<sup>14)</sup>を使用した。WS は、直径 2.0m を含む 10 個の定数 (直径 0.2~1.0m (0.1m 間隔), 2.0m) として設定した<sup>9)</sup>。

#### (4) 樹頂点の抽出精度

LMF によって抽出された樹頂点は、現地調査で確認した樹冠との比較に基づき、抽出精度を検証した。まず、樹冠内に樹頂点が抽出された個体を抽出 (True Positive : *TP*)、樹冠内に樹頂点が抽出されなかった個体を未抽出 (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<sup>9,15)</sup>。

さらに、抽出精度は、Li *et al.* (2012)<sup>16)</sup>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* 値を計算し、評価を行った。

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

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

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

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 LMF により抽出された樹頂点の総数 (*TP+FP*) 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和平均であり、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* 値は種ごとの集計値として求め、それら精度について樹冠面積との比較から考察を深めた。なお、本研究における種間の比較は Brunner-Munzel 検定と、Bonferroni 法による多重比較により行った。

#### (5) 密生度の推定

LMF により抽出された樹頂点の総数 (*TP+FP*) を樹冠面積の合計値で除して密生度を推定した。さらに、樹頂点の抽出に基づく推定密生度を現地調査で確認した現地密生度で除し、密生度比を算出した。

### 3. 結果

#### (1) 樹頂点の抽出精度

LMF による樹頂点の抽出精度を、図-2 に示すように *F* 値と再現率、適合率の観点から評価した。*F* 値は、全ての種で一峰性の分布を示したが、種ごとに最大値は異なり、マダケで 0.64、ハチクで 0.63、モウソウチクで 0.59 となった。また、*F* 値が最大となる WS は、マダケ 0.5m、ハチク 0.6m、モウソウチク 0.7m~0.8m であった。

次に、抽出と未抽出の関係を示す再現率は、全ての種で WS が小さいほど高くなった。一方で、抽出と誤抽出の関係を示す適合率は、全ての種で WS が大きいほど高

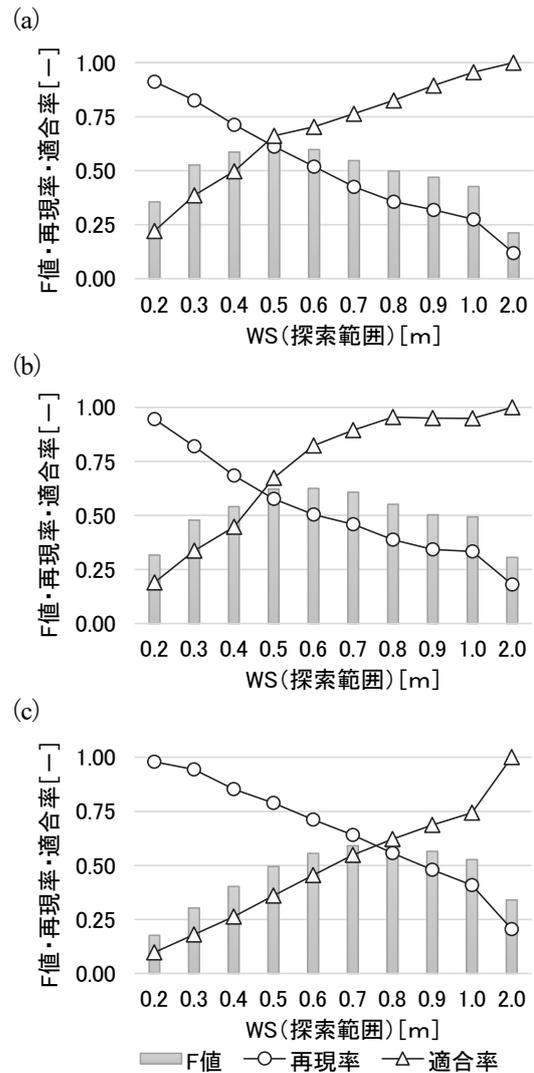


図-2 (a) マダケ、(b) ハチク、(c) モウソウチクの *F* 値と再現率、適合率

いことがわかる。マダケとハチクは、WS の変化に対する適合率の変化を意味する傾きが 0.5~0.6m 以下の WS のときに、それ以上の WS と比べて大きいことがわかる。モウソウチクは WS の変化幅が大きい 1.0m 以上を除くと、適合率の変化は単調であった。

#### (2) 密生度の推定

樹頂点の抽出結果から算出した推定密生度と現地密生度との密生度比を図-3 に示す。推定密生度は全ての種で WS が小さいほど高くなった。

密生度比については、1.0 に近いほど推定密生度が現地密生度に近く推定精度が高いと捉えることができる。マダケとハチクは WS が 0.5m、モウソウチクは WS が 0.8m のときに 1.0 に近い密生度比となった。最も精度が高いのは、マダケの 0.93 であり、次いでモウソウチクの 0.89、ハチクの 0.86 となった。なお、最も高い推定精度の WS であっても、全ての種で 10% ほど過小に推定された。

## 4. 考察

### (1) 樹頂点の抽出精度

#### a) F 値と WS の関係

本研究では、河道内に繁茂する3種の竹林を対象に、LMFによる樹頂点の抽出に基づき、密度の推定を試みた。まず、樹頂点の抽出結果については、マダケとハチクは0.5~0.6m、モウソウチクは0.7~0.8mのWSのときにF値が高まり、F値が0.6前後の精度で樹頂点の抽出が可能であることが確認できた。なお、最大のF値を取るWSには種ごとの違いがみられた。これは、樹冠面積に依存すると考えられる。種ごとの樹冠面積を図4に示すが、その中央値は、マダケ0.6m<sup>2</sup>、ハチク0.7m<sup>2</sup>、モウソウチク1.3m<sup>2</sup>であり、またモウソウチクは、他の2種と比べて有意に樹冠面積が大きい。このように、種ごとの樹冠面積と最大のF値を取ったWSとの大小関係は一致することがわかる。

針葉樹林や広葉樹林を対象とした既往研究では、樹冠直径に応じた適切なWSを設定することの重要性を指摘している<sup>12)</sup>。そこで、樹冠面積のそれぞれの中央値から、樹冠の形状を円と仮定した場合の樹冠直径を求めると、マダケとハチクは0.9m、モウソウチクは1.3mとなり、竹林においても針葉樹林などと同様に樹冠直径とWSに関係があることがわかる。また、この樹冠直径は、最大のF値を取るWSの2倍程度であることがわかる。このWSと樹冠直径との関係をLMFの原理から考察する。LMFでは、WSによって設定される探索範囲内にあるDSMの最大値を求める。針葉樹の樹冠のように円錐形の場合には、DSMの最大値が凸型に明瞭であるため、広葉樹と比較して樹頂点の抽出精度は高まりやすい<sup>17)</sup>。本研究で対象とした竹の樹冠の凹凸形状は針葉樹のように明瞭ではないため、図2に示すようにWSが小さいほど適合率は低下し、1つの樹冠に2点以上の樹頂点が抽出されることがわかる。LMFの原理から考えて、1つの樹冠に2点以上の樹頂点が抽出されるのは、円形WSが1つの樹冠に2つ以上収まる場合なので、単純に考えると樹冠直径の1/2よりも小さいWSを設定したときに誤抽出が多くなると考えられる。とりわけ、マダケとハチクについては、図2の適合率の傾きの変化が、樹冠直径の1/2程度にみられることから、1つの樹冠に2つ以上の樹頂点が抽出されていることを示唆している。

#### b) 最大のF値の種間における比較

次に、樹頂点の抽出精度であるF値の最大値について、種間の比較を行う。樹頂点の抽出精度は、針葉樹林ではF値が0.85以上<sup>18)</sup>、モウソウチクの竹林(約50本/100m<sup>2</sup>)では再現率が0.23程度<sup>9)</sup>と報告されている。本調査地の竹林の最大のF値は、マダケとハチクでは0.63程度であったが、モウソウチクでは0.59と若干低い値であった。

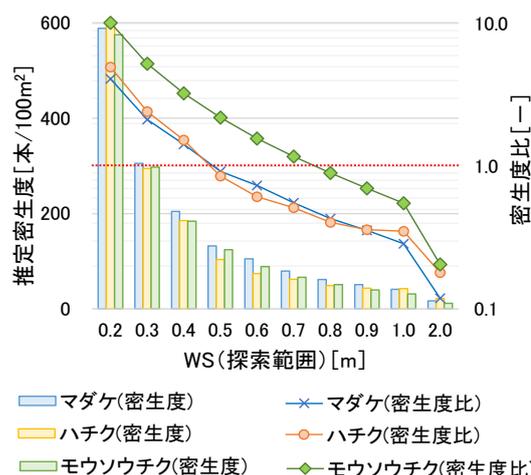


図3 推定密度および密度比 (赤の破線: 密度比 1.0 を示す)

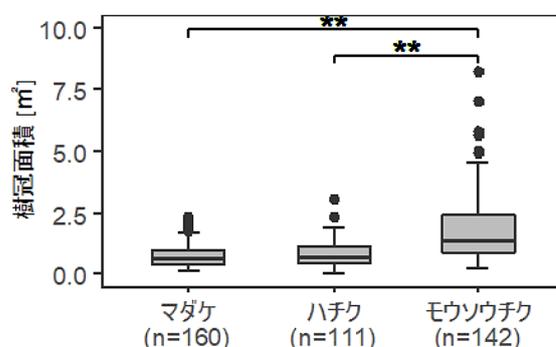


図4 樹冠面積 (\*\* : p-value<0.0033 (Bonferroni 補正後) を示す。)

一方で、F値が最も高いときの再現率は0.50~0.64となり、竹林の既往研究<sup>9)</sup>と比較して抽出精度を高めることができた(図2)。なお、前項では樹冠面積や樹冠直径に応じて適切なWSを設定することが、LMFによる樹頂点の抽出精度を高める上で重要であることを述べた。このことは、本研究のようにWSを定数として扱えば、竹林の樹冠面積のばらつきが大きい場合に、樹頂点の抽出精度が低下することを意味する。図4の樹冠面積について、四分位範囲を比較すると、最大のF値がマダケとハチクよりも低いモウソウチクは、四分位範囲が広く、樹冠面積のばらつきが大きいことがわかる。既往研究では、樹冠の大きさと相関する樹高(DSMとDEMから推定可能)を用いることでWSを変数として扱い、樹頂点の抽出精度の向上を図った例がある<sup>12)</sup>。しかしながら、本研究で対象とした3種の竹林では、樹冠面積と推定樹高間で明瞭な関係を認めることはできず、変数としてWSを扱うことは難しいと考えられる。

また、前項のように、LMFは針葉樹のように樹冠内の最高点(DSMの最大値)が明瞭な樹木に適していることが報告されるなど<sup>12)</sup>、樹冠の凹凸形状はF値を左右する一因である。対象とした3種の竹林のうち、マダケ

およびハチクは稈が垂直に伸びる一方、モウソウチクは梢端が垂れる特徴を持つ。このような樹冠の凹凸形状の違いを定量化するために、樹冠内の最高点と、樹冠の幾何学的な重心の距離を求めた。樹冠が円だと仮定すると、その中心に最高点があれば重心と一致し、距離は0となる。また、その距離は、樹冠の大きさに依存するため、樹冠長径で除すことで図-5のように整理した。その結果には、種間の有意差は認められないものの、中央値に着目すると、マダケやハチクと比較してモウソウチクの値が大きいことがわかる。このように、樹冠面積のばらつきや、樹冠の凹凸形状の特徴のためにマダケおよびハチクと比べてモウソウチクの最大のF値が低くなったものと推察される。

## (2) 密生度の推定

UAV 空撮画像に LMF を適用することで抽出した樹頂点に基づいて密生度を推定した。図-3に示す現地調査で確認した現地密生度に対する推定密生度の比は、マダケとハチクはWSが0.5m、モウソウチクはWSが0.8mのときに最も1.0に近く、推定精度が高いことがわかる。このとき、それぞれの種において最大のF値となったWSと同程度であることから、樹頂点の抽出精度が高いほど密生度の推定精度が高まる傾向をみてとれる。また、3種の竹林の密生度は10%ほど過少に推定されるが、これは最大のF値が0.63程度であることを念頭におくと、比較的精度の高い値だと考えられる。図-2からわかるように、樹頂点の抽出精度と密生度の推定精度が高いWSは、再現率と適合率が交差する付近である。なお、再現率と適合率を意味する式(1)と(2)から、未抽出と誤抽出が等しいときに交差するものと導かれる。このことから、密生度は仮に高いF値が得られなくても、誤抽出(1つの樹冠に2つ以上の樹頂点が抽出)が未抽出(1つの樹冠に樹頂点が抽出されない)を補うために、樹頂点の抽出精度よりも、密生度の推定精度のほうが高まりやすいことがわかる。

前述のように、密生度の推定精度はWSに大きく依存する。そこで、WSと樹冠面積の関係について理解を深めるため、WSを直径とする円の面積(以下、WS面積)と、総樹冠面積をLMFで抽出された樹頂点数で除して算出した樹頂点数あたりの樹冠面積を比較する。図-6には、各WS面積(WS面積×1倍)および、その2から5倍の面積(WS面積×2倍~WS面積×5倍)と、樹頂点総数(抽出と誤抽出の合計)および抽出樹頂点数(抽出のみ)あたりの樹冠面積の関係を示す。ここから、総樹頂点数あたりの樹冠面積は、WSが0.2から1.0mの範囲においてWS面積の3から5倍の範囲であることがわかる。とりわけ、密生度の推定精度が高いとき、マダケは3.9倍(WS=0.5m)、ハチクは4.9倍(WS=0.5m)、モウ

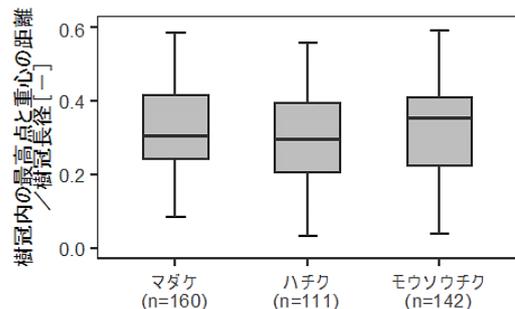


図-5 樹冠内の最高点と樹冠の幾何学的な重心の距離

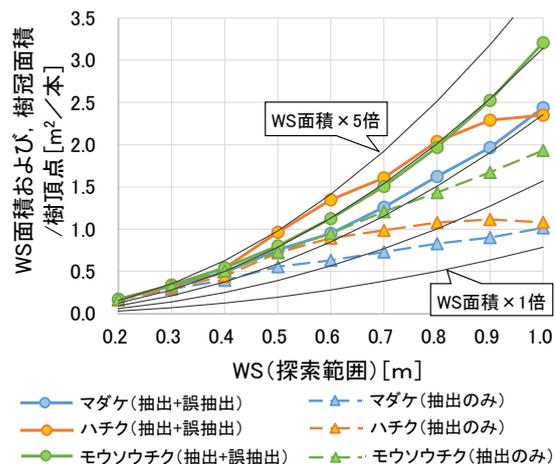


図-6 円形WSと樹頂点総数および抽出樹頂点数あたりの面積(黒線:WS面積を示し、傾きが小さいものから1倍、傾きが最大のものが5倍を示す。)

ソウチクは3.9倍(WS=0.8m)であり、それぞれの種の中央値(マダケ:0.6m<sup>2</sup>, ハチク:0.7m<sup>2</sup>, モウソウチク:1.3m<sup>2</sup>)に近い樹冠面積となった(表-1)。

本研究では、竹林の密生度推定法を構築する第一歩として、UAV空撮画像から捉えられる樹冠を構成する個体に焦点をあてたが、現地調査では空撮画像から捉えられない18~44本/100m<sup>2</sup>程度の樹冠下の個体を確認した。このような樹冠下の個体を考慮する重要性や、樹頂点の抽出から求まる推定密生度(樹頂点抽出)の精度については、それらが水理解析の再現性に与える影響を踏まえて検討する必要がある、今後の課題である。

## 5. 結論

本研究では、河道内に繁茂する3種の竹林の密生度を効率的に推定するため、UAVの空撮画像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を試みた。あわせて、LMFのパラメータである複数の探索範囲(WS)を設定することで、樹頂点の抽出精度および密生度の推定精度とWSの関係を考察した。以下に、本研究で得られた主な知見をまとめる。

- 1) マダケとハチク、モウソウチクにおいて、 $F$  値が 0.6 程度の精度で樹頂点の抽出が可能であることを確認した。
- 2) 最大の  $F$  値となる  $WS$  は樹冠面積や樹冠直径と関係しており、LMF による樹頂点の抽出精度を高める上で、樹冠の大きさに応じた  $WS$  を設定することの重要性が示唆された。
- 3) 種間で最大となった  $F$  値に差がみられたが、樹冠面積のばらつきや、樹冠の凹凸形状の特徴が  $F$  値に影響することが推察された。
- 4) 抽出された樹頂点に基づく密生度は、全ての種で樹頂点の抽出精度が高い  $WS$  ほど密生度の推定精度は高まる傾向がみられたが、最も高い抽出精度の  $WS$  であっても 10%ほど過少に推定された。

**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) 篠原慶規, 久米朋宣, 市橋隆自, 小松光, 大槻恭一: モウソウチク林の拡大が林地の公益的機能に与える影響—総合的理解に向けて—, 日本森林学会誌, Vol.96, pp.351-361, 2014.
- 3) 平田晶子, 高野宏平, 相原隆貴, 中尾勝洋, 津山幾太郎, 唐勉, 松井哲哉, 脇岡靖明: 日本の竹林分布に対する気候変動影響評価: 拡大リスク増大下での適応にむけて, 環境情報科学学術研究論文集, Vol.34, pp.210-215, 2020.
- 4) 上田弘一郎: 水害防備林, 産業図書, 1955.
- 5) 青木健太郎, 藤田正治, 稲若孝治, 松尾至哲: 江の川下流部における水害防備林の課題及び改善策, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.72, No.4, pp.I\_1099-I\_1104, 2016.
- 6) 島谷幸宏: 治水主体の河川管理から包括的流域管理へ, 河川技術論文集, Vol.21, pp.503-508, 2015.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 手塚透吾, 溝口裕太, 中村圭吾: 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, 土木学会論文集 G(環境), Vol.78, 2022, 印刷中.
- 10) QGIS Development Team: QGIS Geographic Information System, QGIS Association, <https://www.qgis.org>, 2022.
- 11) 平田泰雅: 航空機レーザース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.
- 12) Popescu, S. C. and Wynne, R. H.: Seeing the trees in the forest, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol.70, No.5, pp.589-604, 2004.
- 13) R Development Core Team: R: A language and environment for statistical computing, R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2021.
- 14) 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 Sensing of Environment*, Vol.251, 112061, 2020.
- 15) 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.
- 16) Li, W., Guo, Q., Jakubowski, M. K. and Kelly, M.: A new method for segmenting individual trees from the lidar point cloud, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol.78, No.1, pp.75-84, 2012.
- 17) Heurich, M.: Automatic recognition and measurement of single trees based on data from airborne laser scanning over the richly structured natural forests of the Bavarian Forest National Park, *Forest Ecology and Management*, Vol.255, pp.2416-1433, 2008.
- 18) 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 May 31, 2022)  
(Accepted September 1, 2022)

## VEGETATION DENSITY ESTIMATION FOR RIVERINE BAMBOO FORESTS USING UAV IMAGES AND TREETOP DETECTION

Togo TEZUKA, Yuta MIZOGUCHI, Nobuhiro SAITOU and Kazutaka SAKIYA

An estimation method of vegetation density in the forests of three bamboo species was proposed to detect treetops using local maximum filtering (LMF) with a circular window under a high-resolution digital surface model via UAV images. At the highest case of estimation accuracy, the bamboo forest density results revealed that the method underestimated only about 10% in any species. The estimation accuracy depended on the window size ( $WS$ ), a parameter of LMF. Thus, the application of optimal  $WS$  according to the canopy size of bamboo was paramount to obtain highly accurate results.