

植物 3 次元構造の解析・評価手法の開発

細井 文樹

東京大学大学院農学生命科学研究科

Development of methods for the analysis and evaluation of plant 3D structures

Fumiki Hosoi

The University of Tokyo, Graduate School of Agricultural and Life Sciences

1. はじめに

この度は、由緒ある日本農業気象学会学術賞を賜り、光栄に存じます。ご推薦くださった荊木康臣先生、学会賞審査委員の皆様、ならびに富士原和宏会長(当時)をはじめ理事会の皆様には厚く御礼申し上げます。

受賞対象の研究は、レーザースキャナにより植物体の 3 次元点群画像を取得し、そこから光獲得機能や光合成、蒸散などの植物の本質的な機能と密接に関わっている植物の 3 次元構造の解析・評価手法に関するもので、特に葉面積の 3 次元空間分布を表す葉面積密度と、葉の傾きを表す葉傾斜角分布の高精度、高効率推定に関する研究が中心となっています。

私は修士課程は工学系でレーザースシステムの開発をテーマとし、その後、民間企業で光ファイバースシステムの開発に従事するなど、異分野での活動をしてきましたが、一念発起して農学分野を志し、ほぼ業績ゼロから研究活動をスタートしましたが、このような評価を頂き、感慨無量です。本稿では、私がこの研究に取り組むことになった経緯と、これまでの研究の概要について紹介します。

2. 葉面積密度 3 次元空間分布の推定

私は工学系出身でありましたが、民間企業在職中、自分の工学的スキルを、環境や農業の深刻な問題の解決に役立てたいという思いが日増しに強くなり、工学的スキルの生かせるリモートセンシングを主体とした研究室を探し、東京大学大学院農学生命科学研究科の生物環境情報工学研究室の大政謙次先生の部屋を訪れ、企業を退職し、30 代半ばにして博士課程に入学しました。大政先生は異分野で突然会社を辞めてきた私を快く迎えてくださり、研究の仕方から論文作成まで、懇切丁寧な指導をしていただきました。こうした状況のもと、研究室に入ってから、レーザースキャナで樹木の測定を何度も行いました。その際、樹木全体が高精細に 3 次元化され、まるで樹木がまるごとそのまま、コンピュータの中に取り込まれたような驚きと感動を覚えました。そこで、このまるごと取り込んだ樹木の 3 次元データから、有用な構造的情報をなんとか取り出したいという思いに至り、大政先生のご助言を得て、葉面積密度 (Leaf Area Density: LAD) の 3 次元空間分布推定に関するテーマをスタートさせました。葉面積密度は単位体積あたりの空間にどのぐらいの面積の葉

が存在するかを表す量で、葉量の 3 次元空間分布を示す量です。これを高さ方向に積分すると、植物の重要指数である葉面積指数 (Leaf Area Index: LAI) となります。この葉面積密度は植物の光獲得戦略を反映し、光獲得機能や光合成、蒸散などの植物の本質的な機能と密接に関わっている重要な特性となります。LAD はその重要性から推定方法の研究が数多くあります。代表的な方法は、葉を高さごとにサンプリングし、個々の葉の面積を直接求める層別刈り取り法や、葉の空間分布を仮定し、光の吸光度から推定する Gap fraction 法などがあります。前者は刈り取りに要する労力が大きすぎ、かつ破壊計測のため、実際の森林での実施は困難であります。後者は現在でも広く用いられている方法ですが、葉の空間分布をランダムと仮定しているため、実際の樹冠内の葉の重なりや凝集分布などのランダムとは異なる空間分布により、大きな誤差が生じるという問題があります。別の方法としては、樹冠のサイズから LAD を相関式によって出す方法もあります。しかし相関式は樹種やフィールドごとに異なり、それを用意する困難さに加え、個々の樹木の構造は多様であり、個々の樹木に相関式を当てはめた場合、推定誤差が大きくなります。私はコンピュータにまるごと取り込まれた高精細な樹木 3 次元データから LAD を高精度に推定したかったため、このような相関関係をなるべく使いたくありませんでした。当時、相関関係によらないレーザースキャナを使った LAD 算出方法についても報告がされるようになっており、Gap fraction 法の自然光をレーザ光に置き換えたものが見受けられました。この方法では葉のない部分である樹冠内の Gap の量をレーザ照射により得られた点群から算出し、LAD を推定します。レーザ光を使うので環境光の条件に左右されないメリットはありますが、葉の非ランダム空間分布の影響は同じように乗ってしまうため、誤差の問題が依然残りました。こういう方法を見ていくと、そもそも葉の面積密度を推定したいのに、どうして葉のない部分、すなわち Gap の計算をしなればいけないのか？レーザースキャナは葉そのものの 3 次元データを得ることができるのだから、葉の点群そのものから LAD を出せばよいのでは？といった考えに至りました。その後、過去の論文で、金属の長い棒を樹冠に挿入し、その棒の先端に葉が当たる回数と、葉を樹冠に挿入した総数との比である衝突頻度を求め、そこから LAD を求める方法 (Point quadrat 法: Warren-Wilson 1960) があるのを知りました。こちらは葉に金属棒をコンタクトさせるため、葉の空間分布とは関係なく LAD が正確に求まりますが、実際の樹冠に金属棒を挿入するのは困難です。そこで、この金属棒をレーザに置き換えてみては？という着想に至りました。この方法では、コンピュータ上で得られた樹冠の 3 次元点群を 3 次元

格子であるボクセル(画像のピクセルの3次元版)に変換した後、コンピュータ内でレーザーの光跡をトレースする計算を行い、レーザーが葉に当たった点と通過する点に相当するボクセルにそれぞれ異なる属性を付与し、個々のボクセルの属性をもとにレーザーと葉との衝突頻度を求め、葉面積密度の推定を行う方法(Voxel-based Canopy Profiling 法:VCP 法と命名)を開発しました。本方法は従来の Gap fraction 法とは異なり、Gap の計算から間接的にLADを出すのではなく、葉にあたったレーザー数から直接的に LAD を出すため、葉の空間分布に制約はなく、ランダム分布でなくとも高い精度の LAD 推定が原理的には可能となり、実際に全くランダム分布とは異なる葉空間分布をもつ孤立木で本方法を試したところ、高い精度の LAD 推定が可能でした(Hosoi and Omasa, 2006)。

孤立木で方法論の妥当性が確かめられたため、本方法を樹高13mの広葉樹群落にも適用しました。本方法ではレーザービームが樹冠に十分に到達できない場合、誤差が生じるため、群落を取り囲む複数の位置からスキャンを行い、さらにレーザーが樹冠内部に十分到達できるよう、レーザービームの入射角度も最適化されました(Hosoi and Omasa, 2007)。本方法の妥当性を確かめるためには、直接的に葉のサンプリングを行った実測データとの比較が必須でしたが、これが大変な困難を伴う作業でした。13mにも及ぶ樹木群落から葉をサンプリングし、葉面積の実測値をとる必要がありましたが、LADは葉の3次元的な密度を表す指標であるため、その推定値の妥当性を調べるためには、葉のサンプリングも単に高さ別の層ごとのサンプリングでなく、対象木を3次元的なブロックに区切って、ブロックごとにサンプリングを行う3次元層別刈り取りともいうべき作業が必要でした。これは極めて労力のかかる作業で、レーザースキャンは10日程度で終わったところ、こちらの作業はまるまる1か月の時間を要しました。この作業では、地上にコドラートを設置、その上方の28個のブロックに分割された領域内の各ブロックの端と角に相当する樹冠にペイントでスプレーをしてマーキングし、各葉が含まれるブロックを同定しながらサンプリングを行いました。また、13mまでのアクセスには高所作業車を利用しました。こうした検証作業を経て、ビームが十分に到達できた部分では、LADの推定も高精度に行えることがわかり、より大きなスケールの樹木群落でも本方法が有効であることがわかりました。本方法ではより多くのレーザービームを樹冠内部に到達させるため、航空機搭載型レーザースキャナでの測定により主に樹冠上部にレーザーを照射してデータを取得し、地上からのレーザースキャナから得たデータとを結合し、LAD推定を行なったところ、LADの誤差を低減することができました(Hosoi *et al.*, 2010)。このように、本方法の誤差要因としてはレーザービームの樹冠内部への到達数があることがわかり、そうした知見をもとに、推定精度向上の指針となる指標(Ω 指数)の提案も行い、本指標に基づいてレーザービーム照射条件などの測定条件を設定することにより、より正確なLADの推定が可能となることを示しました。本方法はコムギやイネなどの作物群落など、形態の異なる植物にも適用され、木本とは全く異なる構造を有する作物群落においても、本方法が適用可能であり、 Ω 指数についても木本同様に誤差を低減するために利用可能であることが示されました(Hosoi and Omasa, 2012)。

3. 葉傾斜角分布の推定

上述した樹冠のLADの計算においては、ある重要な植物構造特性に関する情報が必要でした。それが葉傾斜角分布です。葉傾斜角は葉の傾きを表すもので、同じ葉の量であっても、葉の傾きによってはレーザービームがより多く樹冠を透過したり、より多く葉に衝突したりと、ビームの衝突頻度が葉傾斜角分布によって変わります。よって、LADを正確に求めるためには、葉傾斜角分布を推定し、その補正を行う必要があります、そのためのアイデアが必要でした。これまでの葉傾斜角分布を求める方法は、コンパスと分度器をセットにしたものの使い、一枚一枚葉の角度を測る方法でしたが、分布を得るために数百枚の葉にこの方法を適用するには、あまりにも労力がかかりすぎでした。そこで、なんとかレーザースキャナで得た3次元点群画像から葉傾斜角分布を得られないかと検討を行いました。群落スケールの3次元点群を得るためのレーザースキャナは空間分解能がセンチメートルオーダーであり、得られた点群から個々の葉の形状までは判別することはできません。一方、孤立木の実験(Hosoi and Omasa 2006)で用いたレーザースキャナは小さな樹木に対応するため、ミリメートルオーダーの空間分解能を持つものが使われ、そこから得られた3次元点群画像では、個々の葉の形状も明確に識別することができました。そこで、上述した13メートルの樹木の樹冠の一部をこの高空間分解能レーザースキャナでスキャンし、一枚一枚の葉が識別可能な3次元点群画像を取得しました。そして、コンピュータ上で葉の一枚一枚に相当する点群に3次元平面をフィッティングし、数百枚の葉の傾斜角を推定し、それをもとに葉傾斜角分布の推定を行う方法を開発しました。この方法の開発もあって、上述したVCP法によるLAD推定も高精度に行うことができました。本方法はもともとはLAD推定とセットで利用されていましたが、単独での適用が可能であることから、様々な植物の葉傾斜角分布の推定が可能となりました。本方法を木本樹木に適用することで、これまでデータ取得が難しかった季節ごとの葉傾斜角分布の変化を解析することを可能としました(Hosoi and Omasa, 2009)。また、同一個体の中で高さ毎に葉傾斜角分布を推定し、樹木の周辺環境と葉傾斜角分布の関係性の考察を可能としました(Hosoi and Omasa, 2015)。さらに本方法はイネ科の作物にも適用され、木本樹木とは形態の異なる作物においても、生育ステージ毎の葉傾斜角分布の推移の解析が可能であることが示されました(Hosoi *et al.*, 2009)。さらに植物の3次元点群画像中の個々の葉に相当する点群を点群クラスターリングによって識別し、葉傾斜角分布を自動的に推定する方法も当時博士課程の学生であった板倉健太さんや郭冠霆さんによって開発され(Itakura and Hosoi 2019, Kuo *et al.*, 2019)、より洗練され、実利用しやすい方法へと改良が重ねられました。

4. その他の植物3次元構造の解析・評価手法

2.と3. に示した方法以外にも、植物3次元解析と評価手法の考案と検討を行ってきました。2. のボクセルを用いる方法の別展開として、樹木の材積を推定する方法の考案も行いました(Hosoi *et al.*, 2013)。レーザースキャナが幹や枝にあたって点

群が生成される場合、幹や枝の内部はレーザーが当たらないので空っぽになります。この空っぽの内部をコンピュータ上でボクセルにて充填し、幹や枝の内部まで詰まったソリッドモデルを作成します。そして、ボクセルはそのサイズから一個当たりの体積を定めることができ、この一個当たりの体積と幹や枝に充填されたボクセルの数を掛け合わせることで、幹と枝の材積を推定することが可能となります。これについても実測（幹に粘土を押し当て、その形状から体積を実測）との比較で高い精度の材積推定が可能であることがわかりました。この実験では、修士の中井洋平さんが実測を含め、ハードなフィールド作業を行ってくれたため、よい方法を開発することに繋がりました。

その他、木本群落点群に深層学習を利用し、個々の樹木を分離し、その 3 次元構造を評価する方法 (Itakura and Hosoi 2018) や、写真測量から得た作物点群情報をもとに、その生育モニタリングを行う方法 (Zhang *et al.*, 2018) など、植物の 3 次元構造情報をベースに、それを様々な形で応用した研究で成果を収めることができました。現在、ここで述べたような深層学習をはじめとした AI による画像やデータの解析手法が急速に発展しておりますが、AI 自体は万能のものではなく、対象である植物に対する知見とその特性を考慮した解析が必要であることはこれまでの解析手法と変わっておらず、研究者は AI ツールの利便性におぼれて道を見失わない研究活動が必要と感じています。

5. おわりに

これまで、測定やデータ解析に対する自分のこだわりもあって、極めて労力のかかる実測を何度も行いましたが、その甲斐あってか様々な重要な知見が得られ、充実した研究活動を行うことができました。こうした研究に挑戦させていただいた私の指導教員であった大政謙次先生、さまざまな助言を与えていただいた清水庸先生や沖一雄先生、吉野邦彦先生、東京大学の先生方、職員の方々、フィールドをご提供いただいた株式会社 川上農場の皆様や圃場の提供とご協力を頂いた永田様には改めて御礼申し上げます。さらに東京大学の生物環境情報工学研究室の学生の皆様には、様々な研究活動への参加を通じて、方法論のさらなる発展にご貢献いただき、深謝致します。

これまで行ってきた研究では、植物構造特性の基本となるものの解析と評価を主として扱ってきましたが、今後はこうした方法論を地球規模の環境変動下の植物応答モニタリングをはじめ、植物機能の理解や食料生産における育種、栽培管理、樹木管理など、農業気象学やその関連分野における課題解決に生かすべく、研究に邁進していきたいと考えております。

引用文献

- Hosoi F, Omasa K. 2006: Voxel-based 3-D modeling of individual trees for estimating leaf area density using high-resolution portable scanning lidar. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **44**, 3610-3618.
- Hosoi F, Omasa K. 2007: Factors contributing to accuracy in the estimation of the woody canopy leaf area density profile using 3D portable lidar imaging. *Journal of Experimental Botany*, **58**, 3463-3473.
- Hosoi F, Omasa K. 2009: Detecting seasonal change of broad-leaved woody canopy leaf area density profile using 3D portable LIDAR imaging. *Functional Plant Biology*, **36**, 998-1005.
- Hosoi F, Omasa K. 2012: Estimation of vertical plant area density profiles in a rice canopy at different growth stages by high-resolution portable scanning lidar with a lightweight mirror. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **74**, 11-19.
- Hosoi F, Omasa K. 2015: Estimating leaf inclination angle distribution of broad-leaved trees in each part of the canopies by a high-resolution portable scanning lidar. *Journal of Agricultural Meteorology*, **71**, 136-141.
- Hosoi F, Nakai Y, Omasa K. 2009: Estimating the leaf inclination angle distribution of the wheat canopy using a portable scanning lidar. *Journal of Agricultural Meteorology*, **65**, 297-301.
- Hosoi F, Nakai Y, Omasa K. 2010: Estimation and error analysis of woody canopy leaf area density profiles using 3-D airborne and ground-based scanning lidar remote-sensing techniques. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **48**, 2215-2223.
- Hosoi F, Nakai Y, Omasa K. 2013: 3-D voxel-based solid modeling of a broad-leaved tree for accurate volume estimation using portable scanning lidar. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **82**, 41-48.
- Itakura K, Hosoi F. 2018: Automatic individual tree detection and canopy segmentation from three-dimensional point cloud images obtained from ground-based lidar. *Journal of Agricultural Meteorology*, **74**, 109-113.
- Itakura K, Hosoi F. 2019: Estimation of leaf inclination angle in three-dimensional plant images obtained lidar. *Remote Sensing*, **11**, 344.
- Kuo K, Itakura K, Hosoi F. 2019: Leaf segmentation based on k-means algorithm to obtain leaf angle distribution using terrestrial LiDAR. *Remote Sensing*, **11**, 2536.
- Warren-Wilson J. 1960: Inclined point quadrats. *New Phytologist*, **59**, 1-8.
- Zhang Y, Teng P, Aono M, Shimizu Y, *et al.*, 2018: 3D monitoring for plant growth parameters in field with a single camera by multi-view approach. *Journal of Agricultural Meteorology*, **74**, 129-139.