

論文の内容の要旨

生物・環境工学 専攻

平成 17 年度博士課程 入学

氏 名 細井 文樹

指導教員名 大政 謙次

論文題目 可搬型スキャニングライダーを用いた樹木及び作物の垂直構造の計測

植物のもつ 3 次元構造はその機能と密接に関わっており、その生命活動の維持にきわめて重要な役割を果たしている。植物の 3 次元構造を表す指標として、その垂直構造の指標が以前からよく用いられてきた。具体的には葉面積密度 (Leaf Area Density : LAD) の垂直分布がそれに相当し、これは植物を高さ方向に複数の層に分割し、その層の単位体積あたりに含まれる葉の片側面積である LAD を算出し、それを高さ順に並べて垂直分布を得、垂直構造を表現するというものである。また葉だけでなく、葉を含む全ての地上部器官の面積を取り扱う場合、植物面積密度 (Plant area density: PAD) の垂直分布という指標も使われる。現在に至るまで、様々な方法で LAD 垂直分布の計測が行われてきた。層別刈り取り法や Gap-fraction 法、3 次元デジタイザーの使用やポイントクラウド法といった方法があるが、いずれの方法も計測効率の問題や計測精度の問題を有している。一方、可搬型スキャニングライダーによる森林計測が近年活発に行われるようになってきた。可搬型スキャニングライダーとは、レーザービームを対象にスキャン照射し、散乱して戻ってくる光を受光して対象までの距離を算出、対象の 3 次元点群画像を得るという可搬型の装置である。可搬型スキャニングライダーは非破壊であり、アクティブセンサーであるため計測時の光環境に影響を受けない、数 $100 \mu\text{m} \sim \text{cm}$ オーダーの極めて高い距離精度及び空間分解能を有する、自動化されたスピーディーなデータ取得が可能といった利点を有する。この装置を LAD 計測に使用した場合、従来の LAD 計測法の問題点である計測効率及び計測精度の両面にわたってその問題を解決できる可能性があるものと考えられる。そこで本論では、可搬型スキャニングライダーを用い、樹木及び作物の LAD (又は PAD) 垂直分布計測法を考案し、その実効性及び誤差の要因について、実測との比較から検証を行うということを目的として研究を行った。

最初のステップとして、取り扱いが容易でライダーの計測及び実測が行いやすい孤立木 (サザンカ: 樹高約 1.6m) を対象とし、可搬型スキャニングライダーによる LAD 垂直分布計測の基本的な方法の確立を試みた。ここでは三角測量を測距原理とし、距離精度及び空間分解能がそれぞれ

れ 1mm と 2mm (対象との距離 5m で) という高精度可搬型スキャニングライダーを使用した。考案した計測法の要点を列挙すると、(1)対象を取り囲む計測位置の設定 (2)レーザービーム中心入射角の最適化 (3)得られた点群データのボクセル化とレーザービームの葉に対する接触頻度の計算 (4)非同化器官及び葉傾斜角の補正 の 4 点となる。(1)(2)の目的は、樹冠全体にわたってその内部まで十分にレーザービームを照射し、樹冠の正確な 3 次元情報を得ることである。(3)ではライダーデータからレーザービームの光跡に関する情報をボクセル (3 次元格子点上の立方体で、2 次元のピクセルを 3 次元に拡張したものに相当) の属性値として計算機上で表現し、この属性値に基づいて LAD 算出に必要なレーザービームの葉に対する接触頻度の計算を行う。(4)の非同化器官の補正に関しては、葉のある状態のデータから葉のない状態のデータを差し引くことにより行う。また葉傾斜角の補正は、葉傾斜角分布データを取得し、 $G(\theta)$ (θ はレーザービーム入射角、 $G(\theta)$ はレーザービームの方向と直交する平面への葉の投影面積の平均値) を算出する、もしくは $\cos(\theta)/G(\theta) \approx 1.1$ という近似が可能な 57.5° をレーザーの入射角として使用するという方法により行う。こうした方法を適用した結果、レーザービーム中心入射角の最適値は今回用いた対象については 59.8° であることが確認され、この角度のライダーデータより算出された LAD 垂直分布は実測とよく一致していることが確認された (平均絶対誤差率 = 17.2%)。また非同化器官、葉傾斜角の補正も誤差の低減に寄与していることが確認された。さらに最適中心入射角は 57.5° と近い値であり、 $\cos(\theta)/G(\theta) \approx 1.1$ という近似による葉傾斜角の補正も有効であることが確認された。

次に孤立木で検証された LAD 垂直分布計測方法を広葉樹 (ケヤキ: 樹高 10 ~ 13m) 群落に適用し、どのような LAD 垂直分布が得られるか実験を行った。同時に可搬型スキャニングライダーによる LAD 計測方法の誤差要因について、検証を行った。まず林床に計測プロット (4 × 8m) を設置し、このプロットを取り囲む複数の地点をライダーの計測位置とした。各計測位置からレーザー中心入射角を 4 水準設定して計測を行った。その際、レーザー中心入射角 90.0° の計測は高所作業車を用い、地上 10m の位置から行った。非同化器官を補正する目的から落葉期の計測も行い、着葉期のデータから差し引くことでその補正を行った。また孤立木の実験で用いた高精度可搬型スキャニングライダーにて樹冠の計測を行い、そこから得た葉傾斜角分布をもとにその補正を行った。ライダーデータより算出された LAD 垂直分布の精度検証のため、計測プロットを 8 つのコドラートに分割し、さらにコドラート上 5 ~ 13m までの領域を一個当たり $2m \times 2m \times 0.5m$ のセルでトータル 128 個に分割し、樹冠内の葉をセル単位で全てサンプルし、その葉面積を実測データとして計測した。こうして取得された実測及びライダーから算出された LAD 値をもとに、まず非同化器官と葉傾斜角分布に起因する誤差について検証した。非同化器官に起因する計測誤差については、レーザー入射角毎にその値が異なることが分かった。また葉傾斜角分布に起因する誤差については、特に水平に近いレーザー入射角ほどその誤差が大きくなることが分かった。次に、計測プロット全体と各コドラート単位の LAD 垂直分布計測結果について検証した。計測プロット全体の LAD 垂直分布については、樹冠上部でいずれのレーザー中心入射角でも過小評価が見られた。各コドラート単位の LAD 垂直分布については、高い精度で計測ができているコドラートと、樹冠上部で過小評価しているコドラートとがあり、コドラートによってその精度に差があった。また、レーザービーム中心入射角 90° では、他の入射角で過小評価が著しいコドラートにおいても、精度よく LAD が算出できている場合があった。こうした結果を説明する LAD 誤差の要素として、レーザービーム入射数密度 N (単位体積あたりに入射するレーザービーム数) 及び $G(\theta_m)$ (θ_m : レーザービーム中心入射角) があることがわかった。この結果を考慮して群落レベルでの LAD 計測をより高い精度で行う方策として、レーザービーム入射角密度 N を増やす、より小さな $G(\theta_m)$ になるレーザー入射角を選定し、かつ葉傾斜角の分布データを取得する、 57.5° をレーザー中心入射角として選定し、レーザービーム入射数密度 N 大きくする方策をとる、地上計測と高所計測のコンポジットを行うといった方法が考えられ、その提案を行った。

さらに本論の方法を作物の成長ステージ毎の PAD 垂直分布の計測に適用した。計測プロットを取り囲む 4 箇所を計測位置とし、各器官の傾斜角の補正に利便性の高いレーザー中心入射角 57.5° を採用した。その結果、成長ステージ毎の特徴的な PAD 垂直分布を計測することができた。また節間伸張によって高さが増した成長ステージにおいて、畝の方向に対してアジマス方向に関して角度をつけた方向となるようレーザービームの方向を調整し、下層に十分にレーザービームを供給する方法を提案した。また実測から得た穂や葉と茎の乾燥重量と、ライダーデータより計算された PAD を基に得られた穂や葉と茎の面積との相関関係を求め、その回帰式から乾燥重量の推定が可能であることを示した。さらに乾燥重量の推定値をもとに、子実及び地上部残渣に含まれるカーボンストックを算出し、ライダーデータをもとにカーボンストックの推定が可能であることを示した。

以上まとめると、本研究では、可搬型スキャニングライダーを用いた樹木及び作物の葉面積密度 (LAD) 又は植物面積密度 (PAD) の垂直分布を得るための方法を考案した。この方法の要点を列挙すると、(1)対象を取り囲む計測位置の設定 (2) レーザービーム入射角の最適化 (3)得られた点群データのボクセル化とレーザービームの葉に対する接触頻度の計算 (4) 非同化器官、葉傾斜角の補正 となる。この方法をまず孤立木に適用し、正確な LAD 垂直分布を得ることができた。広葉樹群落に本方法を適用した場合、その LAD の精度が設置したコードラート毎に異なり、またレーザー入射角度によっても違いがあることが確認された。これを説明する誤差要因として、レーザービーム入射数密度 N と $G(\theta_m)$ があることが明らかにされた。この結果をもとに、群落計測で精度よく LAD の垂直分布を得るための方法を提案した。さらに本方法を作物 (コムギ) に応用し、作物の各成長ステージ毎の特徴的な PAD プロファイルを計測できることが確認され、また算出された PAD をもとに乾燥重量やカーボンストックの推定も可能であることを示した。