

常緑樹を対象とした二波長可搬型スキャニングライダーデータ における器官分離手法に関する研究

A study of a Method for Separation of Plant Tissues on Dual Wavelength Portable Scanning Lidar Data for Evergreen Trees

飯田裕太、細井文樹、大政謙次*
Yuta Iida, Fumiki Hosoi and Kenji Omasa*

東京大学大学院農学生命科学研究科 〒113-8657 東京都文京区弥生 1-1-1
The University of Tokyo, Graduate School of Agricultural and Life Sciences,
1-1-1 Yayoi, Bunkyo, Tokyo 113-8657, Japan

(2016年7月14日受付、2016年8月1日受理)

ABSTRACT

In the present study, a method was proposed to separate two plant tissues (photosynthetic and nonphotosynthetic tissues) on 3-D point cloud data of a two evergreen trees obtained by a dual wavelength portable scanning lidar, that allows to get reflection intensity of red and near infrared of a target. First, 3D point cloud data of the trees were collected from ground positions that surrounded the trees. Next, the data were voxelized and training data that correspond to a part of photosynthetic and nonphotosynthetic tissues were picked out from the lidar data. Based on the training data, distributions of the reflection intensity of red and the ratio of the reflection intensity of red and near infrared were investigated and they were used for separation of two tissues in the lidar data based on the maximum likelihood method. As a result, over all accuracy and kappa coefficient values of the two trees for the separation ranged from 81 to 93% and from 0.30 to 0.63.

Key words : Dual wavelength, Evergreen tree, Portable scanning lidar, 3-D model

1. はじめに

近年、スキャニングライダーを用いて植物の3次元構造を測定し、植物の構造特性を効率よく高精度に推定する手法が数多く報告されている。例えば、ライダーデータをもとに樹高や胸高直径を求め、材積を推定する方法や (Omasa et al., 2002; Hopkinson et al., 2004)、ライダーから照射されるレーザービームの葉に対する衝突頻度から、葉面積密度の分布や葉面積指数の推定をする方法 (Lovell et al., 2003; Hosoi and Omasa, 2006, 2007; Takeda et al., 2008)、ライダーの形状データと分光画像や熱画像などをコンポジットし、構造と生理機能の関係を求める方法 (Omasa et al., 2007) などが報告されている。このよ

うにスキャニングライダーにより取得された3次元データから構造特性を推定する場合、機能の異なる同化器官 (葉) と非同化器官 (枝や幹) を3次元データ上で分離せずに解析を行うと、推定誤差が問題となる。例えば樹木の葉面積密度を推定する際、非同化器官を分離せずにそのまま行くと、葉面積密度を過大評価してしまうことが報告されている (Hosoi and Omasa, 2006, 2007)。また、スキャニングライダーにより取得された3次元データから構造と機能との関係を検証したりするためには、機能の異なる同化器官と非同化器官を3次元データ上で分離し、解析することが必要となる。器官分離を行う方法として、着葉期のライダーデータから非同化器官のみとなった落葉期のライダーデータを差し引く方法があ

*Corresponding author : Phone: +81-3-5841-5340, Fax: +81-3-5841-8175, E-mail: aomasa@mail.ecc.u-tokyo.ac.jp

る (Hosoi and Omasa, 2007; Hosoi et al., 2010)。この方法は落葉期と着葉期の2時期計測が必要であり、時間と労力がかかるだけでなく、常緑樹には適用できないという問題がある。別の方法として、ライダー画像内に含まれる3次元点群のうち、同化器官に相当するものと非同化器官に相当するものの空間分布の違いを利用し、非同化器官に相当する点の初期値をもとに、ある距離以下にある点を非同化器官として探索することで両者を分離する方法も提案されている (Negoro et al., 2012)。この方法は上述した2時期測定データを利用する方法の欠点をカバーしているが、樹冠内でビームが届かずデータが欠落した部分があると、初期値からの距離探索がうまくいかず、幹・枝の分離が不完全になるという問題がある。上述した二つの分離方法は対象の分光反射情報を利用しない方法であるが、こうした方法をとるのは、一般的なスキヤニングライダーが近赤外などの単一波長レーザー光源しかもち、分光情報を取得することが難しいためである。一方、複数波長のレーザー光源を搭載したスキヤニングライダーも、研究レベルでは利用されるようになってきた (Morsdorf et al., 2009; Hakala, et al., 2012; Wallace et al., 2012)。このようなライダーを利用すれば、各器官の各波長ごとの反射特性の違いを利用し、器官分離が可能となる可能性がある。そこで本研究では、近赤外と赤の二つの波長のレーザー光源を搭載した可搬型スキヤニングライダーを用い、二つの波長に対する同化器官と非同化器官の反射特性の違いを利用して、両器官の分離を試みたので報告する。

2. 計測対象および方法

計測地はつくばみらい市にある人工林で、林内にはスギやケヤキ、アカマツなどが生育し、低層には常緑低木が生育していた (Hosoi and Omasa, 2007)。この計測地において、対象木として樹高 2.4 m のサザンカ (*Camellia sasanqua* Thunb.) と樹高 2.8 m のツバキ (*Camellia japonica* L.) を選択した。これらの対象木は比較的枝に強度があり、少しの風ではほとんど揺れが生じず、風による3次元ライダー画像内のぶれを防ぐことができるため、対象として選択した。測定には二波長レーザー光源搭載可搬型スキヤニングライダーを使用した (改良型 TDS-130 L、パルステック工業株式会社)。本装置はもともと赤 (波長 656 nm) の光源が一つだけ搭載されていたものを、近赤外 (波長 785 nm) のレーザー光源も搭載し、対象の3次元点群画像と点群各点の赤と近赤外の反射強度 (それぞれ I_r 、 I_n と置く) を同時に得られ

るよう改良されている。この装置の測距原理は三角測量であり、3.5～10.0 m の測距範囲で、空間解像度は 5 m で 1～2 mm である。ガルバノミラーとステッパーモーターにより、垂直と水平スキャンをすることでデータ取得を行う。本装置を用い、対象をもれなくレーザースキャンできるよう、対象を取り囲む3方向からスキャンを行い、データ取得を行った。各スキャン方向は方位角方向で 120° ずつ離れるよう設定された。ライダーから対象までの距離は 5 m とした。なお、測定は最初に着葉状態で行い、その後、検証用データを得るため、対象から葉を全部取り去った状態の測定も行った。得られた着葉状態と葉を取り去った状態での各測定地点からのデータは、同一の座標系になるよう位置合わせ (レジストレーション) された後、ボクセル化された (Hosoi and Omasa, 2006)。

器官分離を行うため、ボクセル化後の点群データから、対象のカラー写真をもとに、目視にて明らかに葉とわかる部分と幹・枝とわかる部分を数箇所選択し、分離のためのトレーニングデータとした。このデータ内の各点の赤と近赤外の反射強度比である I_r/I_n と赤の反射強度単体の I_r についてヒストグラムを作成し、同化器官と非同化器官の分布の違いを確認した。トレーニングデータにおける同化器官と非同化器官それぞれの I_r/I_n の分布をもとに最尤分類法を適用し、二つの器官の分類を行うことで、器官分離を行った。同様に I_r の分布からも最尤分類法で器官分離を行った。

着葉状態で測定したデータにはすべての幹・枝は含まれていない。なぜなら、葉により遮蔽されることで、レーザービームが届かない幹や枝があり、この部分はデータとしては欠落するためである。一方、葉を取り去った状態で測定する場合は、ほぼ全ての幹と枝にビームが当たるため、ほぼ全ての幹と枝がデータ内に含まれる。よって、葉を取り去った状態のデータと上記反射強度により着葉状態のデータから分離したデータとを直接比較して誤差検証することはできない。そこで、葉を取り去った状態の画像と分離する前の着葉状態の画像とを位置あわせし、両状態のボクセルが一致する点を探索し、一致したボクセルを非同化器官とし、それ以外の着葉状態の画像に含まれるボクセルを同化器官として分離を行い、上記反射強度により分離した結果に対する検証用データとした。

3. 結果と考察

ボクセル化されたサザンカとツバキのライダー画像か

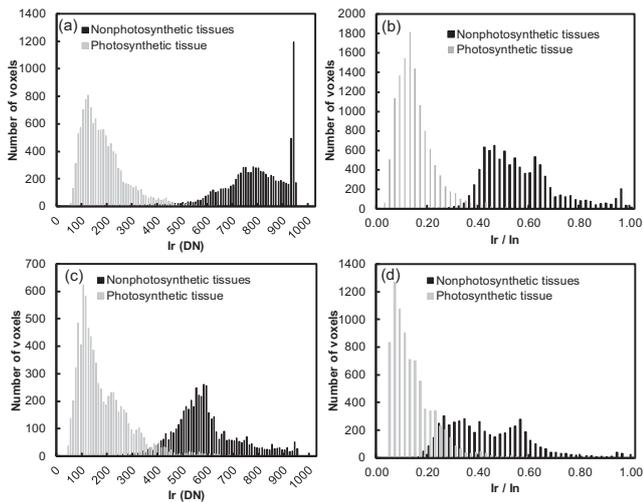


Fig. 1. Distributions of the reflection intensity of red (I_r) and a ratio of the reflection intensity of red and near infrared (I_r/I_n) on two plant tissues based on the training data picked from the lidar data. Figures (a) and (b) correspond to the distributions of a *camellia sasanqua* and (c) and (d) correspond to the ones of *camellia japonica*. DN: digital number.

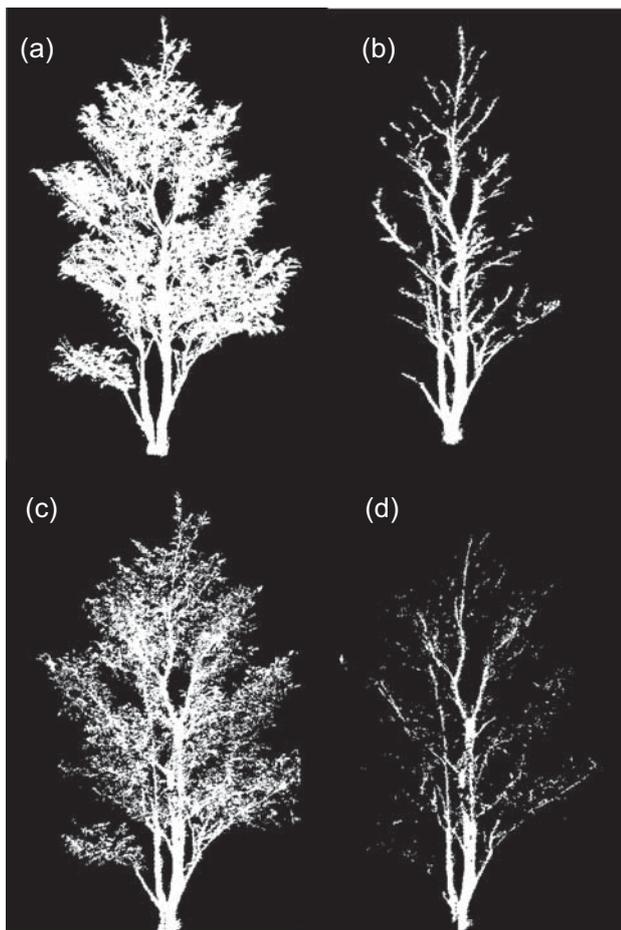


Fig. 2. Comparison of lidar-derived 3D voxel images of a *camellia sasanqua* before and after separation. (a) An image before separation. (b) A validation image of nonphotosynthetic tissues made from an image in which all leaves were removed. (c) An image of nonphotosynthetic tissues after separation based on I_r/I_n . (d) An image of nonphotosynthetic tissues after separation based on I_r .

ら、トレーニングデータとして選択された同化器官と非同化器官に関する I_r/I_n と I_r の分布を Fig. 1 に示す。Fig. 1 より、同化器官のほうが非同化器官よりも低い値の頻度が高くなっていることがわかる。また、両器官の分布の境界で分布に重なり合いが見られ、その度合いはサザンカ (Fig. 1 (a) と (b)) よりもツバキ (Fig. 1 (c) と (d)) のほうが高かった。

Fig. 2 と 3 に分離後のサザンカとツバキのライダー画像を示す。非同化器官の検証画像 (Fig. 2 と 3 の (b)) と比較すると、分離後の非同化器官 (Fig. 2 と 3 の (c) と (d)) の周辺にノイズ上の点群が見られるが、これが同化器官を非同化器官と誤分類した点に相当する。どちらの対象も I_r/I_n (Fig. 2 と 3 の (c)) ほうが I_r (Fig. 2 と 3 の (d)) よりも葉の誤分類が多くみられる。

Fig. 4 はサザンカの検証画像と分離後画像のボクセル数の高さ分布を示す。図中の凡例にある一致 (Correspondence) というのは検証画像と分離画像のボクセル数が一致した数を示しており、この数と検証画像のボクセル数が近づくほど、本来分離されるべき器官がきちんと分離されていることを示す。まず Fig. 4 (a) と (b) の非同化器官について見ていくと、 I_r/I_n (Fig. 4 (b)) にお

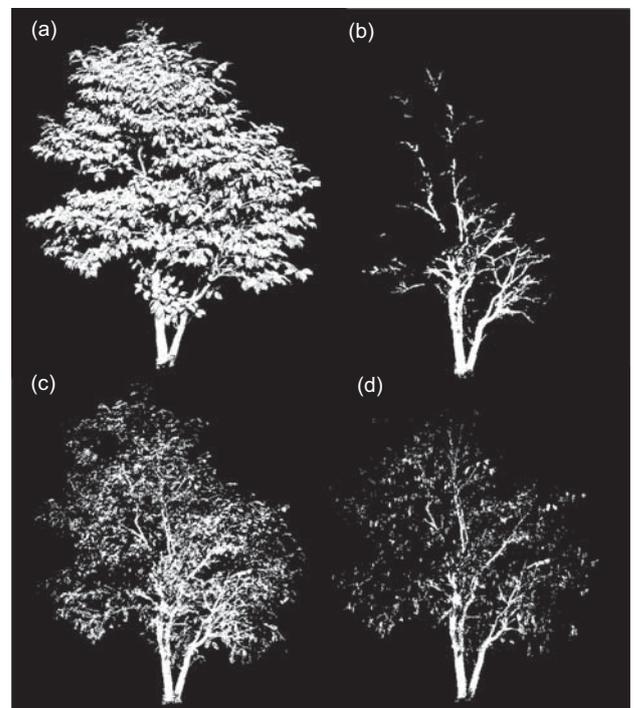


Fig. 3. Comparison of lidar-derived 3D voxel images of a *camellia japonica* before and after separation. (a) An image before separation. (b) A validation image of nonphotosynthetic tissues made from an image in which all leaves were removed. (c) An image of nonphotosynthetic tissues after separation based on I_r/I_n . (d) An image of nonphotosynthetic tissues after separation based on I_r .

いて分離後画像が検証画像よりもボクセル数がかなり多くなっていることがわかる。これは同化器官を非同化器官に誤分類する数が多いことを示している。Ir (Fig. 4 (a)) の分離後画像のボクセル数は Ir/In より少なく、Irの方が Ir/In より同化器官を非同化器官に誤分類する数が少ないと考えられる。一致ボクセル数について見ると、Ir/Inの方が Ir よりも一致ボクセル数が検証画像のボクセル数に近い。これは In/Irの方が Ir よりも同化器官を非同化器官に誤分類する数が多いが、検出されるべき非同化器官が Ir よりも多く分類され、非同化器官の分類精度自体は Ir/Inの方が Ir より高かったことを示す。Fig. 4(c)と(d)のサザンカ同化器官について見ると、Ir/In (Fig. 4(d)) の一致ボクセルの数が検証画像のボクセル数より少ない部分が多く、上述したように同化器官が非同化器官に誤分類された分、同化器官に分類された数が減ったためと考えられる。Fig. 4(c)の Ir では、上述したように同化器官が非同化器官に誤分類される数が少なかったため、一致ボクセルの数と検証画像ボクセルの数がよい一致を見せ、Ir/In よりも精度よく同化器官の分離がなされたことを示している。Fig. 5 はツバキのボクセル数と高さの関係を示す。Fig. 5(a)と(b)の非同化器官について、サザンカ同様に Ir/In (Fig. 5(b))の方が検証画像ボクセル数に対して分離後ボクセル数が多く、Ir よりも同化器官を非同化器官に誤分類している割

合が高いことを示している。ただし非同化器官における Ir をツバキ (Fig. 5(a)) とサザンカ (Fig. 4(a)) と比較すると、サザンカでは分離後ボクセル数がほとんど検証画像ボクセル数を超えていないのに対し、ツバキでは特に高さ約 0.9 m を超えると分離後ボクセル数が検証画像ボクセル数を上回っており、ツバキの方がサザンカより同化器官を非同化器官とする誤分類が多いことが分かる。Fig. 5(c)と(d)の同化器官についてもサザンカ同様に、Ir/In (Fig. 5(d)) では同化器官が非同化器官に誤分類された分、同化器官が同化器官として分離された数が減っており、Ir (Fig. 5(c)) では一致ボクセル数と検証画像ボクセル数のよい一致が見られる。

以上の分離についての結果をまとめたエラーマトリックスが Table 1 である。サザンカの Ir/In では同化器官を非同化器官に誤分類する数が非常に多かったため、非同化器官の UA (User's accuracy) が 35% と低くなっている。一方、非同化器官であるボクセルが非同化器官に分類される数自体は多かったため、非同化器官の PA (Producer's accuracy) は 82% と比較的高い値であった。サザンカの Ir については、非同化器官の UA (User's accuracy) が 73% と Ir/In の場合よりも高く、これは同化器官の非同化器官への誤分類が Ir/In の場合より少なかったためである。一方、非同化器官であるボクセル数を非同化器官に分類した数は Ir/In よりも少なかったため、その PA

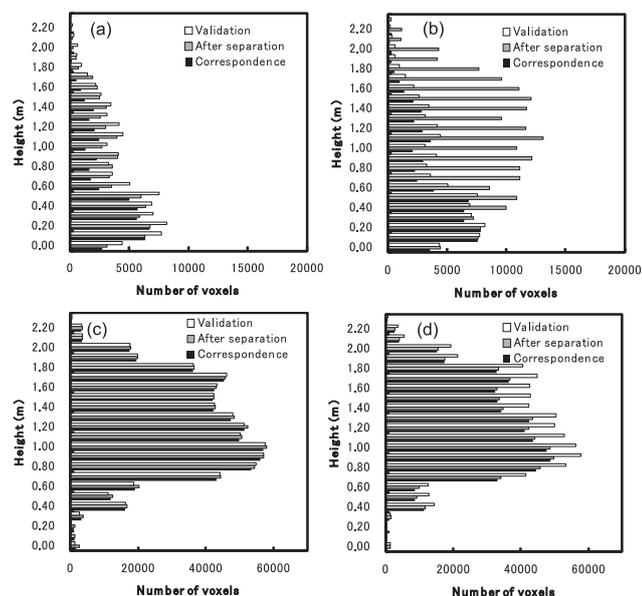


Fig. 4. Height distributions of voxel number on a *camellia sasanqua* after separation. (a) Nonphotosynthetic tissues separated by Ir. (b) Nonphotosynthetic tissues separated by Ir/In. (c) Photosynthetic tissue separated by Ir. (d) Photosynthetic tissue separated by Ir/In. "Correspondence" in the legend means the voxels after separation that corresponded to voxels within a validation image.

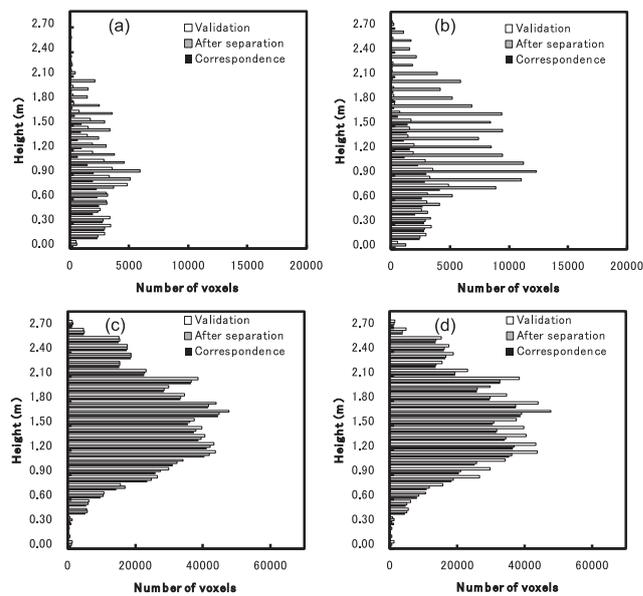


Fig. 5. Height distributions of voxel number on a *camellia japonica* after separation. (a) Nonphotosynthetic tissues separated by Ir. (b) Nonphotosynthetic tissues separated by Ir/In. (c) Photosynthetic tissue separated by Ir. (d) Photosynthetic tissue separated by Ir/In. "Correspondence" in the legend means the voxels after separation that corresponded to voxels within a validation image.

(Producer's accuracy) は 62% にとどまった。同化器官については、Ir の PA が Ir/In の PA よりも高く、同化器官の非同化器官への誤分類の少なさを反映したものとなっている。サザンカの Ir/In と Ir の全体精度と κ 係数はそれぞれ 81%、93% と 0.40、0.63 であり、トータルで見れば Ir のほうが分類結果は良好であったといえる。ツバキの場合も Ir/In と Ir の各器官の PA と UA が得られた要因についてはサザンカと同様な説明となるが、全体精度を見ると Ir/In と Ir の全体精度と κ 係数はそれぞれ 81%、92% と 0.30、0.48 であり、 κ 係数の比較により、分類精度はサザンカよりツバキのほうが低いことが分かる。

本装置により器官分離を行う基本的な考え方は、同化器官ではクロロフィルによる赤色光の吸収により、その反射強度が落ちるが、非同化器官ではそれがなく、この器官による反射特性の違いを利用しようというものである。実際に Ir による分離を見てみると、Fig. 1 にあるように器官による反射特性の違いが強度分布の違いとなって現れていた。その結果は、サザンカのように比較的良好な分類結果が得られたものと、ツバキのように誤分類によりあまり良好な分類精度が得られなかったものがあった。Ir を使用した場合の分類誤差要因としては、レーザービームの距離による広がりがある。本装置搭載のレーザービームは対象までの距離に応じてビーム広がりが生じ、同一の対象でも距離が遠くなると反射強度が小さくなるという現象が起きる。これが同じ葉であってもライダーからの距離が異なる場合に反射強度が変わってしまい、誤分類を生んだ可能性がある。また、葉は光の入射方向と反射方向に依存した方向性反射率を有しており、実際の対象は様々な葉傾斜角を有しており、これにより葉の中でも高い反射率が生じた部分が非同化器官として分類されてしまった可能性がある。その他、ビームが器官のエッジにあたるとビームの一部しか反射されないため、反射強度が低下するという問題もある。葉についてはもともと反射強度の低い部分にその分布が集中し

ているため、このようなエッジの効果で反射強度が低下しても誤分類は生じないが、枝の場合は反射強度が低下する場合にそれを同化器官に誤分類してしまう可能性がある。

このように単一波長の反射強度をそのまま使うと、これが上述したような分類誤差を生む要因となる可能性があったため、Ir/In というように 2 波長の比を取った。二波長の比をとることで、二つのレーザー光源の距離によるビーム広がりなどの特性がほぼ同一であるなら、こうした距離などによる反射強度の影響や器官のエッジによる影響を相殺できるのではと考えた。しかし実際には単一波長の反射強度による分類結果よりも二波長の比による分類結果の方が精度の低い結果となった。これについては、二つの波長の異なる独立した光源において、距離による反射強度の変化や葉の方向性反射率の変化が互いに異なっていた可能性がある。また、二つの光源の光軸に少しでもずれがあると、観測箇所がそれぞれの光源でずれたり、上述した器官のエッジ効果による反射強度の減衰量も二つの間で違った値になってくる可能性がある。このように独立した二つの異なる光源を利用することによる誤差要因により、二波長の比をとっても単一波長の場合に生じる誤差要因を相殺することはできなかったものと考えられる。

サザンカよりもツバキの精度が低かった理由として、同化器官を非同化器官に誤分類したボクセルの数がツバキの場合は多かったものと考えられる。サザンカの非同化器官と同化器官のボクセル数の比は 7.85 に対し、ツバキの場合は 14.05 とツバキのほうが幹・枝の割に葉が多く着いていたため、ツバキの場合は実際の非同化器官に相当するボクセル数に対して、同化器官を非同化器官に誤分類したボクセル数の比率が高くなり、これが非同化器官の UA を低下させ、結果として全体精度が低くなったものと考えられる。

本方法は同化器官と非同化器官の反射特性の差があれば適用可能な方法であるため、本対象以外の常緑樹や落

Table 1. An error matrix for separation results in each method

	<i>Camellia sasanqua</i>								<i>Camellia japonica</i>							
	Ir/In				Ir				Ir/In				Ir			
	UA	PA	OA	κ	UA	PA	OA	κ	UA	PA	OA	κ	UA	PA	OA	κ
Nonphotosynthetic tissues	35%	82%			73%	62%			24%	82%			44%	63%		
Photosynthetic tissue	97%	81%			98%	97%			98%	81%			97%	94%		
	81% 0.40				93% 0.63				81% 0.30				92% 0.48			

UA: User's Accuracy, PA: Producer's Accuracy, OA: Overall Accuracy, κ : kappa coefficient.

葉樹も基本的には適用可能であると考えられる。しかし、上述したように非同化器官と同化器官の量が異なれば精度が変わってくるため、様々な種類や形態をもつ樹種での精度検証が必要になる。また、葉のクロロフィル量が少ない春先や紅葉の時期など、葉の反射特性に変化がある場合については、葉の分光反射特性データを取得して適用可否を検討するとともに、必要に応じて搭載するレーザーの波長を変えるなどの配慮が必要になるものと考えられる。

4. おわりに

本研究では、近赤外と赤の二つの波長のレーザー光源を搭載した可搬型スキャニングライダーを用い、樹木を対象としたライダー3次元点群データ内の同化器官と非同化器官の分離を試みた。対象を取り囲む位置にライダーを設置して得られたデータをボクセル化したのち、そこから同化器官と非同化器官のトレーニングデータを選択した。そのデータをもとに、同化器官と非同化器官の I_r と I_r/I_n に関するボクセル数分布を作成し、これをもとに最尤法にて対象の各ボクセルを同化器官と非同化器官に分類し、器官分離を行っていった。得られた結果は I_r のサザンカがもっとも精度が高く、 I_r/I_n のツバキがもっとも精度が低かった。サザンカについては比較的良好な分類結果が得られたが、ツバキのように枝に対して葉の量が多い対象では誤分類がより問題となり、本方法による器官分離法を活用していくには、この誤分類をさらに減らしていく必要がある。分類誤差を減らすために、 I_r では反射強度の距離補正や方向性反射率の補正、エッジによる影響の補正などが必要となると考えられる。 I_r/I_n の場合は距離によるビーム広がりや方向性反射率に関して、二つの光源における差を評価し、補正を加えていく必要が有ると考えられる。また、二つの光源の光軸調整なども必要に応じて行う必要がある。こうした補正や調整によって、 I_r と I_r/I_n のどちらが様々な対象に対して正確な分類結果を与えることができるか比較検討し、よりよい方法を見出していく必要があると考えられる。

引用文献

Hakala, T., Suomalainen, J., Kaasalainen, S. and Chen, Y., 2012: Full waveform hyperspectral LiDAR for terrestrial laser scanning. *Opt.*

Express, **20**, 7119-7127.

Hopkinson, C., Chasmer, L., Young-Pow, C. and Treitz, P., 2004: Assessing forest metrics with a ground-based scanning lidar. *Can. J. Forest Res.*, **34**, 573-583.

Hosoi, F. and Omasa, K., 2006: Voxel-based 3-D modeling of individual trees for estimating leaf area density using high-resolution portable scanning lidar. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **44**, 3610-3618.

Hosoi, F. and Omasa, K., 2007: Factors contributing to accuracy in the estimation of the woody canopy leaf-area-density profile using 3D portable lidar imaging. *J. Exp. Bot.*, **58**, 3463-3473.

Hosoi, F., Nakai, Y. and 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 Trans. Geosci. Remote Sens.*, **48**, 2215-2223.

Lovell, J.L., Jupp, D.L.B., Culvenor, D.S. and Coops, N.C., 2003: Using airborne and ground-based ranging lidar to measure canopy structure in Australian forests. *Can. J. Remote Sens.*, **29**, 607-622.

Morsdorf, F., Nicol, C., Malthus, T. and Woodhouse, I. H., 2009: Assessing forest structural and physiological information content of multi-spectral LiDAR waveforms by radiative transfer modeling. *Remote Sens. Environ.*, **113**, 2152-2163.

Negoro, S., Hosoi, F. and Omasa, K., 2012: Extraction of nonphotosynthetic organs from portable scanning lidar data for a deciduous broadleaf tree in leafy season. *Eco-engineering*, **24**, 51-55.

Omasa, K., Urano, Y., Oguma, H. and Fujinuma, Y., 2002: Mapping of tree position of *Larix leptolepis* woods and estimation of diameter at breast height (DBH) and biomass of the trees using range data measured by a portable scanning lidar. *J. Remote Sens. Soc. Jpn.*, **22**, 550-557.

Omasa, K., Hosoi, F. and Konishi, A., 2007: 3D lidar imaging for detecting and understanding plant responses and canopy structure. *J. Exp. Bot.*, **58**, 881-898.

Takeda, T., Oguma, H., Sano, T., Yone, Y., Yamagata, Y. and Fujinuma, Y., 2008: Estimating the plant area density of a Japanese larch (*Larix kaempferi* Sarg.) plantation using a ground-based laser scanner. *Agric. For. Meteorol.*, **148**, 428-438.

Wallace, A., Nichol, C. and Woodhouse, I., 2012: Recovery of forest canopy parameters by inversion of multispectral LiDAR data. *Remote Sens.*, **4**, 509-531.