

原著論文

航空機及び可搬型スキャニングライダーを用いたケヤキ群落の 葉面積密度分布の推定

Estimation of Leaf Area Density of Zelkova Trees Using Airborne and Portable Scanning Lidar Systems

中井洋平¹、細井文樹¹、秋山幸秀²、大政謙次^{1*}Yohei Nakai¹, Fumiki Hosoi¹, Yukihide Akiyama² and Kenji Omasa^{1*}

¹ 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
Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo
1-1-1 Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8657, Japan

² 朝日航洋株式会社 〒350-1165 埼玉県川越市南台 3-1-1
Aero Asahi Corporation
3-1-1 Minami-dai, Kawagoe-shi, Saitama 350-1165, Japan

(2008年7月2日受付、2008年11月12日受理)

ABSTRACT

Leaf area density (LAD) profile of zelkova trees was estimated by combining helicopter-borne and portable lidar data based on voxel-based canopy profiling (VCP) method. In this VCP-method, 3-D point cloud data of the trees in the measurement plot were collected from airborne and portable scanning lidar. These data were registered into a single-point cloud data set with a common coordinate system, and then converted into a voxel-based 3-D model that reproduced the tree precisely, including within the canopy. This precise voxel model allowed the LAD of these trees to be computed by direct counting of the beam-contact frequency in each layer. Afterwards, linear interpolation was applied to the underestimated parts of the LAD profile. Root mean square error of the best LAD estimations was $0.20 \text{ m}^2\text{m}^{-3}$.

Key words : Airborne scanning lidar, Leaf area density, Portable scanning lidar, Tree, VCP-method

1. はじめに

今日、地球観測における生物圏、特に陸域生態系の機能解明やモデリングのために森林の構造やバイオマスを精度よく推定することが必要とされている (Hobbs and Mooney, 1990 ; Omasa and Harasawa, 2003)。また、京都議定書における炭素吸収源の問題に関連して、植林活動や森林破壊などによる森林のバイオマスの変化を正確に評価するための手法の確立が求められている。これら森林

構造やバイオマス量を捉えるには森林の3次元構造を計測する必要がある (Lefsky et al., 2002 ; Omasa et al., 2000 ; 2002 ; 2007a)。LAD (Leaf Area Density : 葉面積密度) の垂直分布は植物の3次元構造を表す代表的な指標として有用であり、またLADの積分値を計算することで容易にLAI (Leaf Area Index : 葉面積指数) を算出することが可能である。既往の手法である層別刈り取り法やポイントクラウド法は多大な労力を要するため計測効率の面で問題があり、またGap-fraction法を利用して市販の計

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

測装置を用いた方法では計測精度の面で問題を有している (Jonckheere et al., 2004 ; Norman and Campbell, 1989 ; Warren-Wilson, 1960 ; 1963 ; Weiss et al., 2004)。

これらの問題を解決する可能性のあるツールとして、近年、航空機搭載型や地上で使用される可搬型スキャニングライダー (Light detection and ranging : LIDAR) による森林 LAD 計測が注目されるようになってきた (Hosoi et al., 2005 ; Hosoi and Omasa, 2006 ; 2007 ; Lovell et al., 2003 ; Omasa et al., 2003b ; 2007a)。しかし、既往の研究では、樹木が密に繁茂している場合、樹木によってビームが遮蔽される領域、すなわち航空機搭載型スキャニングライダーの場合では樹冠下層部、可搬型スキャニングライダーでは樹冠上層部において測定誤差が大きくなる問題があった。そこで本研究では、航空機ライダーと可搬型ライダーの両方を用いることで各々のライダーの死角を補い、より高精度な LAD の分布が得られる方法の開発と検証を行った。

2. 計測対象および実測データ

本研究では、茨城県つくばみらい市にある人工林を計測対象とした (Fig. 1 (A))。地形は、ほぼ平坦で、この林地には、スギ (*Cryptomeria japonica* [L.f.] D. Don)、アカマツ (*Pinus densiflora* Siebold & Zuccarini)、イチョウ (*Ginkgo biloba* Linnaeus)、ケヤキ (*Zelkova serrata* [Thunberg] Makino) が生育していた。その他、低層にはヤブツバ

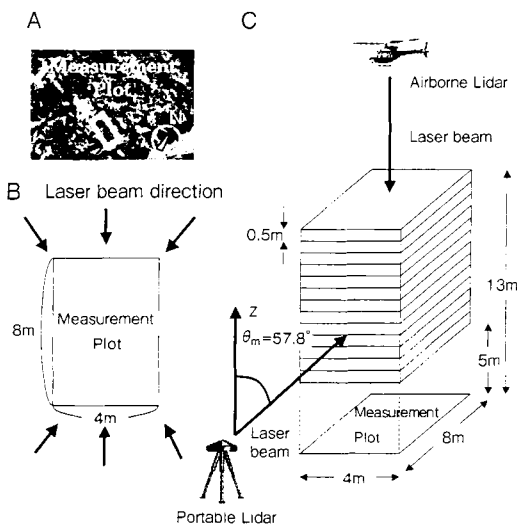


Fig. 1 Illustration of lidar measurements. (A) Aerial photograph of study area. (B) Scanning directions of portable scanning lidar (C) Laser beam scanning to zelkova canopy within a measurement plot by airborne lidar and portable lidar. θ_m represents the central incident angle of laser beam.

Table 1 Actual measured descriptive variables for the Japanese zelkova canopy within the measurement plot

Tree name	Height (m)	LAI ($m^2 m^{-2}$)	LAD ($m^3 m^{-2}$)		Specific leaf area ($m^2 kg^{-1}$)	
			Mean	Maximum	Mean	S.D.
<i>Zelkova serrata</i> (Thunberg) Makino	12.5	4.59	0.57	1.51	11.9	2.5

¹S.D.=Standard deviation

キ (*Camellia japonica* Linnaeus) やモッコク (*Ternstroemia gymnanthera* Sprague) といった常緑樹が生息していた。この林地内の樹高 10 ~ 13 m のケヤキ群落を対象として、林床に 4 x 8 m² の計測プロットを設置した (Fig. 1 (B))。また、LAD の実測データは層別別取りによって得られたデータを用いた (Table 1 : Hosoi and Omasa, 2007)。

3. LAD の算出

計測および解析のフローチャートを以下に示す (Fig. 2)。本研究では VCP-method (Voxel-based Canopy Profiling Method : Hosoi and Omasa, 2006 ; 2007, Omasa et al., 2007a) を用いて LAD を算出した。VCP-method とは樹冠を取り囲む複数の測定ポジションから樹冠全体に十分にレーザーを照射し、その後ライダーのレーザービームの光跡及び葉の位置情報をボクセルの中に属性として付与することで、樹木に入射するビームの各高さにおける葉に対する衝突頻度を求め、そこから LAD を算出する方法である。

3.1 スキャニングライダーによる計測

本研究で使用した航空機搭載型および可搬型スキャニングライダーでは Time of flight 法を測距原理としている。航空機搭載型スキャニングライダー (ALTM3100DC) では、ヘリコプターから飛行方向に対して直角なレーザー

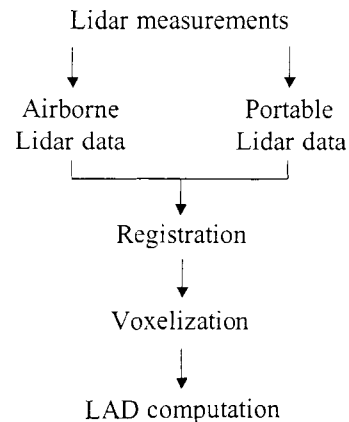


Fig. 2 Schematic diagram of the lidar-measurements and computation for LAD estimation.

ビームスキャンを行い、地形や樹冠の3次元データを得た。このライダーは地上におけるレーザービーム径が小さい Small footprint 航空機スキャニングライダーで、地上でのビーム径は約 30 cm ϕ 、地上でのビーム間隔は約 30 cm であった。また、各ビームの絶対位置の誤差は、20 ~ 30 cm 程度であるが、基準点からの相対座標での誤差で見ると、距離計測の精度である 15 cm 以内である (Omasa et al., 2000)。また、使用した可搬型スキャニングライダー (LPM-25HA、RIEGL 社製) の精度は、距離精度が計測範囲 2 ~ 60 m で ± 8 mm、垂直方向、水平方向のスキャンが角度精度 0.009 $^\circ$ であった。

上記のシステムを用い、データ取得を行った。航空機スキャニングライダーのデータとしては 2005 年 7 月にヘリコプター搭載のスキャニングライダーの FP-mode (First pulse mode: レーザービームが反射して最初に戻ってくるパルスを受信するモード) によって得られたデータを用いた。可搬型スキャニングライダーのデータとしては、2005 年の 8 月に計測プロットを取り囲む 6 地点から、 $\theta_m=57.8^\circ$ (ここで θ_m はレーザービームの中心入射角であり、レーザービームの天頂角方向スキャンの中心角に相当する) で計測したデータを用いた (Fig. 1 B, C)。これは、レーザービームの入射角が 57.5° の場合に LAD 算出の際の葉傾斜角補正項を葉傾斜角分布によらず一定の値で近似でき (Jonckheere et al., 2004; Warren-Wilson, 1963; Weiss et al., 2004)、LAD の算出が容易になるという利便性を活用したためである。

3.2 レジストレーション

ライダーデータのレジストレーションは ICP アルゴリズム (Besl and McKay, 1992) をもとに行なった。航空機搭載型スキャニングライダーデータと可搬型スキャニングライダーデータのレジストレーションを行うにあたって、群落に相当する点群データのみから対応点を見出すことは困難であった。そこでレジストレーション時に両者のライダーデータからはっきりと認識できる大きさで対応点のとりやすい人工物 (計測プロットから西に約 40 m の地点にある 5 m 四方、高さ 5 m ほどの建造物) を航空機搭載型スキャニングライダーデータと可搬型スキャニングライダーデータ両者の対応点とすることとした。

3.3 ライダーデータのボクセル化

航空機ライダーデータのボクセル化にあたり、一つのボクセルのサイズを 10 cm \times 10 cm \times 10 cm に設定した。これは航空機ライダーの分解能をもとに決定したものである。このボクセルサイズと対象木の実際のサイズから、200 \times 200 \times 200 個 (それぞれ x, y, z 方向のボクセルの数)

で構成されるボクセルアレイをコンピューターメモリ内の配列として用意した。次にレジストレーション後の航空機ライダーデータを用いて、以下の式にてライダーデータの座標系からボクセル座標系への変換を行った。

$$i = \text{Int} \left(\frac{X - X_{\min}}{\Delta i} \right) + 1 \quad (3-1)$$

$$j = \text{Int} \left(\frac{Y - Y_{\min}}{\Delta j} \right) + 1 \quad (3-2)$$

$$k = \text{Int} \left(\frac{Z - Z_{\min}}{\Delta k} \right) + 1 \quad (3-3)$$

ここで (i, j, k) はボクセルアレイ内のボクセル座標を表し、 Int は最も近い整数値に値を丸める関数を示す。 (X, Y, Z) はライダーデータ内の座標系でのその点の座標を示し、 $(X_{\min}, Y_{\min}, Z_{\min})$ は (X, Y, Z) の最小値を示す。 $(\Delta i, \Delta j, \Delta k)$ はボクセルエレメントの各辺のサイズ (10 cm, 10 cm, 10 cm) を示す。

次に航空機ライダーデータの点をもとにレーザービームの全光跡をトレースする計算を行い、レーザービームが対象木にあたったボクセルに属性値 1、レーザービームが対象木に当たらず少なくとも 1 本以上通過したボクセルに属性値 2、レーザービームがその位置を通過しても当たってもいないボクセルに属性値 3 を与える。こうして、計測プロット内の全てのボクセルには 1 ~ 3 いずれかの属性が与えられることになる。

同様な計算をボクセルサイズ 5 mm \times 5 mm \times 5 mm で可搬型スキャニングライダーデータについても適用し、ボクセル化を行った (Hosoi and Omasa, 2007)。

3.4 葉面積密度の算出

ボクセルアレイに与えられた属性値をもとに、層の厚み ΔH 、高さ h における LAD を以下の式を用いて算出した (Hosoi and Omasa, 2006)。

$$LAD(h, \Delta H) = \frac{\cos(\theta)}{G(\theta)} \frac{1}{\Delta H} \sum_{k=n_1}^{n_2} \frac{n_1(k)}{n_1(k) + n_p(k)} \quad (3-4)$$

ここで $n_1(k)$ 及び $n_p(k)$ はボクセルアレイ内で k の高さにある層のうち、それぞれ属性値 1 及び属性値 2 をもつボクセルの数を示す。 θ は樹冠中央部におけるレーザービーム入射角である。 $\cos(\theta)/G(\theta)$ は葉傾斜角とレーザービームの軌跡長を補正する項である。 $G(\theta)$ はレーザービームの方向と直行する平面への葉の投影面積の平均値である (Norman and Campbell 1989; Warren-Wilson, 1960; Weiss et al., 2004)。 $n_1(k)/(n_1(k) + n_p(k))$ の項は、レーザービームが k の高さの層において対象木に衝突した頻度を表している。

航空機搭載型スキャニングライダーデータの場合、 $\theta=0^\circ$ とし実測した葉傾斜角分布から $\cos(\theta)/G(\theta)$ を算出した。

また可搬型スキャニングライダーデータでは θ を $\theta_m = 57.8^\circ$ とした。これは前述したようにこの角度が、補正項 $\cos(\theta)/G(\theta)$ を葉傾斜角によらず1.1と近似することのできる角度である 57.5° に近いためであり、LAD算出において利便性が高かったためである。(Jonckheere et al., 2004; Warren-Wilson, 1963; Weiss et al., 2004; Hosoi and Omasa, 2007)。

式(3-4)に基づき、LAD算出について、(1)航空機搭載型スキャニングライダーデータのみから算出した場合、(2)可搬型スキャニングライダーデータのみから算出した場合、(3)航空機のデータと可搬型のデータを樹高10 m以上、以下を境に合成することにより算出した場合、(4)(3)により算出されたLAD分布に対し、LADの分布が最も密な部分で単峰性を持つと仮定し、航空機と可搬型それぞれのピークである高さ11 mおよび9.5 mの2点を線形補間で結び補正を行い算出した場合の計4パターンの計算を行い、実測との比較から誤差評価を行った。

4. 結果および考察

Fig. 3にレジストレーション後の点群画像を示す。これは研究対象である 4×8 mの計測プロット部分およびその周囲を真横から見た画像である。葉や枝などの樹木の詳細な構造が計測されていることが確認できる。航空機搭載型スキャニングライダーから得た樹冠上層部の点群と、可搬型スキャニングライダーから得た点群とで構成されている。これにより、計測プロット部分にあたる航空機搭載型スキャニングライダーデータの場所が特定され、LADの算出が可能となった。

Fig. 4にLADの実測値、および航空機ライダーデータと可搬型ライダーデータのそれぞれから算出したLAD分布、線形補間後のLAD分布を示す。航空機ライダーデータと可搬型ライダーデータから得られたLAD垂直分布計算結果から次のようなことがわかった。航空機ライダーから算出したLADは12.5 mから11 mの高さまでは実測値に近い高精度の結果となったが、11 m以下からは急激に精度が低くなった。同様に、可搬型ライダーでは5 mか



Fig. 3 Co-registered airborne and portable lidar image of the Japanese zelkova canopy within the measurement plot.

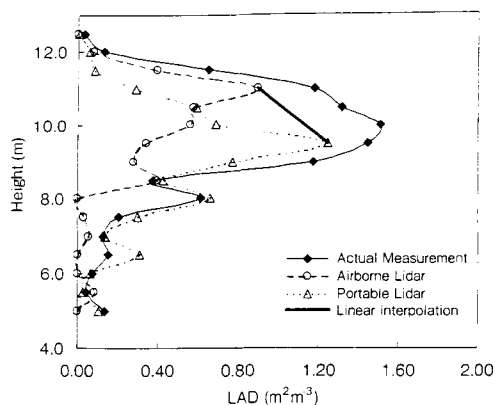


Fig. 4 Comparison of LAD profiles of the zelkova canopy between the lidar-derived estimates obtained with each lidar, linear interpolation and the actual measurement.

ら9.5 mの高さまでは高精度であったが、9.5 m以上では精度は低い結果となった。このようにどちらのライダーデータからもよりライダーに近い部分、つまり航空機ライダーデータでは樹冠上層部、可搬型ライダーデータでは樹冠下層部では実測値に近いLADの値が算出されたが、10 m付近の層では両者とも過小評価が見られた。

また、算出したLADと実測値のLADとの誤差をRMSE (Root Mean Square Error: 平均二乗誤差)で算出したものをFig. 5に示す。航空機ライダーのみ、可搬型ライダーのみのRMSEは、それぞれ0.51、0.40 (m²m⁻³)であった。二つのライダーデータを合成した場合のRMSEはライダー単独の場合よりも改善され、0.32 (m²m⁻³)であった。さらにLADの垂直分布が単峰性であると仮定した

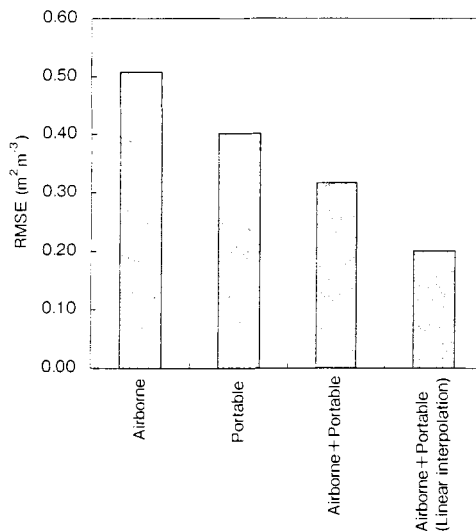


Fig. 5 RMSE obtained with each lidar, combined airborne and portable lidar and linear interpolation.

線形補間では、 $0.20 \text{ (m}^2\text{m}^{-3})$ となり最も高精度となった。

Fig. 4において、ライダーを単独で使った場合、10 m 付近の層では過小評価が見られたが、これは可搬型スキヤニングライダーの場合、対象木の下方からレーザーを照射するため、下層の一部にしかレーザーが十分に当たらず、樹冠により上層へのレーザービームの入射が遮られ、対象木上層にはレーザービームが十分に供給されなかったためと考えられる (Hosoi and Omasa, 2007)。同様に航空機搭載型スキヤニングライダーにおいても、対象木の垂直真上方向からレーザーを照射するため、下層にいくにしたがってレーザービームの入射量が減少し、LADの過小評価が生じたものと思われる。

次に航空機搭載型スキヤニングライダーと可搬型ライダーを組み合わせた場合、10 m 付近ではLADの過小評価が見られるものの、各々のライダーデータの測定誤差が小さい部分、つまり航空機ライダーでの樹冠上層部、可搬型ライダーでの樹冠下層部のライダーデータを組み合わせているため、ライダーを単独で使った場合よりも高精度の計測結果になっている。また既往の研究として、航空機搭載型スキヤニングライダーと可搬型スキヤニングライダーを組み合わせて樹木の高さや胸高直径を測定したものがあつたが (Omasa et al., 2007b)、この手法はLADの測定にも応用できることが検証された。またレジストレーションを行った際に本研究では人工物を対応点としたが、このような人工物が近隣にない場合にはGPSを用いて両者の対応点をとる方法が有効であると思われる。

上記と比べて、線形補間を行った場合にはLADの測定誤差は最も小さくなった。これを行う際にLADの分布が最も密な部分で単峰性を持つという仮定をしたが、これは既往の研究におけるLADの実測値からもわかるように広葉樹の場合にはこういった傾向があるといえる (Strachan and McCaughey, 1996 ; Wang et al., 1992)。どちらのライダーからも死角になる10 m 近傍の補間を行うことで、ライダーを組み合わせるよりもさらに正確にLADを推定することができた。

Fig. 5からわかるように、結果として航空機搭載型スキヤニングライダーと可搬型ライダーを組み合わせることで、またさらにそこから線形補間を行うことによってレーザービームが届きにくい樹冠内部のLADを推定することができ、全体としてライダーを単独で使った際よりも高精度な測定が可能であることが示された。

本研究の対象地にはケヤキ以外の様々な植生が見られたが、ライダーの設置点を適切に選択したため、これら

の植生がレーザービームの対象プロット内への入射を妨げることはなく、LADの推定結果にはほとんど影響を与えなかったものと考えられる。本方法を異なるフィールドの群落に適用した場合、レーザービームの到達範囲の観点から、単独のライダー計測よりも高い精度でLADを推定することが可能であると考えられる。ただし、樹高やLAD分布、樹種等の対象の状態によってはレーザービームの到達範囲が影響を受け、本実験のようにLADの過小評価が生じる可能性がある。この過小評価の部分については本方法で示した線形補間を用いる以外に、様々なLADプロファイルに対応するよう、異なるフィッティング関数も検討していく必要がある。特に針葉樹については個々の葉の面積が小さく形状も広葉樹とは異なるため、こうした影響を考慮した検証が必要であると考えられる。

5. おわりに

本研究では航空機および可搬型ライダーを用いて、ケヤキ群落内のLAD分布を推定する方法について検討した。そして同時期に行われた直接計測との比較による精度の検討を行った。この方法の特徴は、VCP-methodをもとに、単独の使用では樹木にレーザービームが遮られ計測精度に問題のある航空機搭載型および可搬型スキヤニングライダーの両方を用いてそれぞれの死角を補いながらLADを算出すること、そこからさらにレーザービームの入射量が不足しLADが過小評価されたと思われる部分について単峰性の仮定のもとに線形補間を行うことである。

最終的に、航空機のデータと可搬型のデータを合成したものの、線形補間を行ったもののLADは、RMSEでそれぞれ0.32、 $0.20 \text{ (m}^2\text{m}^{-3})$ の計測誤差であった。この結果よりライダーを組み合わせ、またさらにそこから線形補間を行うことにより、高精度な測定が可能であることが示された。

今回はLADの過小評価部分の補間を行う際に線形補間を行ったが、線形以外の他の関数による補間についても検討することにより、精度向上の余地があるものと考えられる。計測対象の問題としては、より広範囲の群落や異なる樹種での本方法の適用の可否を検証する必要があると思われる。

引用文献

- Besl, P. J. and McKay, N. D., 1992 : A method for registration of 3-D shapes. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, **14**, 239-256.
- Hobbs, R. J. and Mooney, H. A. (eds.), 1990 : *Remote sensing of biosphere functioning*. Springer-Verlag, 312pp.

- 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.* **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**, 3464-3473.
- Hosoi, F., Yoshimi, K., Shimizu, Y. and Omasa, K., 2005 : 3-D measurement of trees using a portable scanning lidar. *Phyton-Ann. Rei. Bot.*, **45**, 497-500.
- Jonckheere, I., Fleck, S., Nackaerts, K., Muys, B., Coppin, P., Weiss, M. and Baret, F., 2004 : Review of methods for in situ leaf area index determination Part I. Theories, sensors and hemispherical photography. *Agric. For. Meteorol.*, **121**, 19-35.
- Lefsky, M. A., Cohen, W. B., Parker, G. G. and Harding, D. J., 2002 : Lidar remote sensing for ecosystem studies. *Bioscience*, **52**, 19-30.
- 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. Rem. Sens.*, **29**, 607-622.
- Norman, J. M. and Campbell, G. S., 1989 : Plant physiological ecology. In : *Field methods and instrumentation* (eds. by Pearcy, R. W., Ehleringer, J., Mooney, H. A. and Rundel, P. W.). Chapman and Hall, London, pp. 301-325.
- Omasa, K. and Harasawa, H. (eds.), 2003 : *Global warming. Trend of the recent studies and technical solutions. Biological science. Inheritance. Special edition 17*. Syoukabou, Tokyo, 172pp.
- Omasa, K., Hosoi, F. and Konishi, A., 2007a : 3D lidar imaging for detecting and understanding plant responses and canopy structure. *J. Exp. Bot.*, **58**, 881-898.
- Omasa, K., Akiyama, Y., Ishigami, Y. and Yoshimi, K., 2000 : 3-D remote sensing of woody canopy heights using a scanning helicopter-borne lidar system with high spatial resolution. *J. Remote Sens. Soc. Jpn.*, **20**, 394-406.
- 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., Uenishi, T. M., Shimizu, Y. and Akiyama, Y., 2007b : Three-dimensional modeling of an urban park and trees by combined airborne and portable on-ground scanning LIDAR remote sensing. *Environ. Model. Assess.*, doi : 10.1007/s10666-007-9115-5.
- Omasa, K., Qiu, G. Y., Watanuki, K., Yoshimi, K. and Akiyama, Y., 2003b : Accurate estimating of forest carbon stocks by 3-D remote sensing of individual trees. *Environ. Sci. Technol.*, **37**, 1198-1201.
- Strachan, I. B. and McCaughey, J. H., 1996 : Spatial and vertical leaf area index of a deciduous forest resolved using the LAI-2000 plant canopy analyzer. *For. Sci.*, **42**, 176-181.
- Wang, Y. S., Miller, D. R., Welles, J. M. and Heisler, G. M., 1992 : Spatial variability of canopy foliage in an oak forest estimated with fisheye sensors. *For. Sci.*, **38**, 854-865.
- Warren, W. J., 1960 : Inclined point quadrats. *New Phytol.*, **59**, 1-8.
- Warren, W. J., 1963 : Estimation of foliage denseness and foliage angle by inclined point quadrats. *Aust. J. Bot.*, **11**, 95-105.
- Weiss, M., Baret, F., Smith, G. J., Jonckheere, I. and Coppin, P., 2004 : Review of methods for in situ leaf area index (LAI) determination Part II. Estimation of LAI, errors and sampling. *Agric. For. Meteorol.*, **121**, 37-53.