

着葉期の落葉広葉樹を対象とした可搬型スキャニング ライダーデータからの非同化器官の抽出

Extraction of Nonphotosynthetic Organs from Portable Scanning Lidar Data for a Deciduous Broadleaf Tree in Leafy Season

根来昇吾、細井文樹、大政謙次*
Shogo Negoro, 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

(2012年2月15日受付、2012年2月29日受理)

ABSTRACT

In the present study, a method was demonstrated to extract nonphotosynthetic organs (branches and stems) from 3-D point cloud data of a leaved tulip tree obtained by measurements with a portable scanning lidar. First, 3D point cloud data of the tulip tree were collected from four ground positions by a portable scanning lidar in leafy season and the data were co-registered. Next, the data were voxelized and several initial voxels corresponding to stems and branches were picked up from the voxelized 3-D tree model. Then, voxels adjacent to the initial voxels were searched and the neighboring voxels were categorized as stems and branches if the voxels were within a certain distance from the initial voxels. The categorized voxels became new initial points and the above searching process was repeated. This process was iterated until no more voxels were categorized as stems and branches. The resultant 3-D model of branches and stems was compared with the leafless model generated by the lidar data taken at leafless season. The error of the volume of the resultant model was -16.5%.

Key words : Deciduous broadleaf tree, Portable scanning lidar, 3-D model, Voxel

1. はじめに

植物のもつ3次元構造はその機能と密接に関連しており、その関連性を検証することは極めて重要な課題である。従来、その構造計測には毎木調査による樹高や胸高直径の計測、層別刈りによる破壊計測 (Monsi and Saeki, 1953)、林床での太陽光透過率の計測 (Gap-fraction 法; Chason et al., 1991; Weiss et al., 2004) といった方法が行われてきたが、計測にかかる労力や、計測データの精度に問題があり、その問題の解決が望まれていた。

近年、可搬型スキャニングライダーにより、植物の3次元構造計測が行われるようになってきた。この装置は、

レーザービームを対象に向けてスキャン照射し、その反射光を検出することで、対象の3次元点群画像を高速で効率よく、かつ高い空間精度で取得可能であり、既往の植物構造計測法の問題点を解決することが可能である。この装置で計測された植物の3次元点群データから、樹高や材積 (Omasa et al., 2002; Hopkinson et al., 2004)、葉面積密度の垂直分布や葉面積指数、葉傾斜角分布 (Lovell et al., 2003; Hosoi and Omasa, 2006, 2007, 2009; Omasa et al., 2007; Takeda et al., 2008; Hosoi et al., 2010) といった植物の詳細な構造パラメータが効率よく、高い精度で算出可能となってきた。

このような既往の研究事例から、可搬型ライダーの3

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

次元点群データには、植物構造に関する有益な情報が多く含まれていることが分かる。そのデータには、機能の異なる同化器官（葉）と非同化器官（幹や枝など）の情報が共に含まれているが、そうした機能の異なる器官を3次元データ内で分離し、解析することができれば、さらに有益な知見が得られるものと考えられる。ライダーデータには対象各点の3次元座標に関する情報は含まれているが、対象の色などの情報は含まれておらず、同化器官と非同化器官の分離は、一般的には困難である。こうした問題に対し、落葉樹の落葉期に非同化器官のみを可搬型ライダーにて計測し、その計測データを着葉期の計測データから差し引くことにより、器官分離を行う方法も報告されている（Hosoi and Omasa, 2007, Hosoi et al., 2010）。しかし、こうした方法は着葉期の計測に加え、落葉期の計測を行わなければならない、計測の労力が増すという問題がある。さらに、常緑樹には用いることができないという問題もある。

そこで本研究では、着葉期に可搬型ライダーによって計測された樹木の3次元点群データのみを使って、非同化器官である幹と枝を抽出し、器官分離を行う方法を検証したので報告する。

2. 計測対象および方法

計測対象は東京都新宿区にある環境省国民公園新宿御苑園内にある樹高30.0 m、胸高直径1.5 mのユリノキ (*Liriodendron tulipifera*) とした。計測に使用した可搬型スキャニングライダー (LPM-25HA, RIEGL社製) は Time of flight 法を測距原理とし、計測範囲は2~60 mで、距離精度は±8 mm、垂直方向、水平方向スキャンの角度精度は0.009°であった。この装置を用い、対象木を取り囲む4地点（対象木から15 m離れた地点）から2005年の2月（落葉期）と6月（着葉期）に計測を行った。各地点から得られた複数のライダーデータはレジストレーション（位置合わせ）され、各データに共通の座標系を付与された。次に、ライダーデータの各点をボクセル座標系に変換し、対象木の3次元ボクセルモデルを作成した。ボクセルとは3次元格子点状の立方体を指し、2次元のピクセルを3次元に拡張したものととらえることができる。ボクセル座標を参照することで、必要な領域を自由に切り出して演算でき、計算効率を向上させることが可能となる。また、各ボクセルに属性値を付与することで、3次元空間の各点に様々な情報を付与することができる。ライダーデータのボクセル化には、以下の式(1)を用いた。

$$i = \text{Int} \left(\frac{X - X_{\min}}{\Delta i} \right), \quad j = \text{Int} \left(\frac{Y - Y_{\min}}{\Delta j} \right), \quad k = \text{Int} \left(\frac{Z - Z_{\min}}{\Delta k} \right) \quad (1)$$

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 (1 cm, 1 cm, 1 cm) を示す。変換後のボクセルには属性値1が与えられる。この属性値はそのボクセルに相当する点に、レーザービームが当たったことを意味している。幹、枝の分離がなされていない最初のモデルでは、葉、幹、枝の区別なく式(1)で変換後の全てのボクセルに属性値1が与えられた。

得られた6月の着葉期のボクセルモデルに対し、目視にて、幹と枝と認識できる部分にある10点を計算の初期ボクセルとして選択し、そのボクセルの属性値を1から2に置き換えた。属性値2を持ったボクセルとは、そのボクセルが幹、枝に属していることを示す。この初期ボクセルについて、その近隣の属性値1をもつボクセルを探索し、その近隣ボクセルと初期ボクセルとの距離（本稿では、ボクセル間距離と呼ぶこととする）がある一定値以下にある場合、その近隣ボクセルを幹、枝と判断し、その属性値を1から2に置き換えた。新しく属性値2を付与された近隣ボクセルに対し、さらにその近隣の属性値1をもつボクセルを探索し、それらのボクセル間距離がある一定値以下の場合に、新たに探索された近隣ボクセルの属性値を1から2に置き換えた。このような過程を探索するボクセルがなくなるまで繰り返していった。この方法により、初期ボクセルを起点として、次々に属性値2を持つボクセルが増加し、幹、枝に相当するボクセルが抽出されていった。ここで近隣ボクセルに属性値2を付与する基準となるボクセル間距離について、その目安を得る必要があった。そこで、ボクセルモデルから目視にて明らかに幹と枝と分かる部分（10点の初期ボクセルの近傍にある領域）を切り出し、そこに含まれる各ボクセルに対し、隣接する最も近いボクセルまでの距離（最近隣ボクセル間距離）を算出し、その距離の平均と標準偏差を求めた。これらの値をもとに、何種類かのボクセル間距離で計算を行った。計算後、属性値2をもつボクセルのみ取り出すことによって、幹、枝が抽出された。ボクセル間距離による幹、枝抽出の程度を比較し、抽出程度の高いボクセル間距離の結果を選択した。ここで、選択された結果には、枝と誤認識されている葉が含

まれていたため、これを除く必要があった。そこで、誤認識している葉の近傍の、枝に相当する部分に初期ボクセルを追加設定し、上述した近傍探索の計算を繰り返し、さらに葉と枝の分離を行った。その際のボクセル間距離は、初めに計算したボクセル間距離よりも小さくし、枝と認識する条件をより厳しくし、葉が分離できるようにした。

得られた幹、枝抽出後のボクセルモデルに対し、幹と枝をその中心軸方向に沿って1 m 間隔で輪切りにし、それを楕円柱と近似して体積を算出し、足し合わせることで、全体の幹、枝の体積を算出した。同様の計算を2005年2月に計測した落葉期のボクセルモデルにも適用し、その体積を算出した。これら両者の体積を比較することで、幹、枝抽出結果の体積の誤差を求め、抽出精度の評価を行った。

3. 結果と考察

Fig. 1A は、器官分離前の着葉期のユリノキ3次元ボクセルモデルである。幹に相当する部分がところどころ目視で確認可能であるが、大部分の幹、枝は葉に覆われていて、確認することは困難であった。白丸は、幹、枝抽出計算のために選択した初期ボクセルの位置（この方向から見える一部のみ）を示す。このモデルから目視で選び出した幹、枝に相当する領域（10点の初期ボクセルの近傍にある領域）のボクセル（56,928個）の最近隣距離の平均（ d_{ave} とおく）は4.27、標準偏差（ σ とおく）は2.11であった。

Fig. 1B ~ D は、本方法で抽出された幹と枝のボクセルモデルであり、それぞれボクセル間距離9、8、6の結果である。ここで、ボクセル間距離6と8はそれぞれ、 $d_{ave} + \sigma$ (=6.38)、 $d_{ave} + 2\sigma$ (=8.49) に近い整数として選択されたものであり、ボクセル間距離9は $d_{ave} + 2\sigma$ よりもさらに距離を大きくとった場合として選択した。ボクセル間距離9では、葉に覆われて目視では認識できなかった幹と枝が抽出されていることがわかる。同時に、誤抽出された葉も多く含まれていることが見て取れた。ボクセル間距離6の場合、葉の誤抽出はなかったが、抽出された枝がボクセル間距離9や8に比べて少なくなっており、幹、枝の抽出力が不十分であることがわかった。ボクセル間距離8では、幹、枝はボクセル間距離9と同程度に抽出されながらも、誤抽出された葉は少ないことが分かった。これより、ボクセル間距離8の Fig. 1C のモデルを最適モデルとして選択した。

Fig. 2A は Fig. 1C のモデルの中の誤認識された葉の近

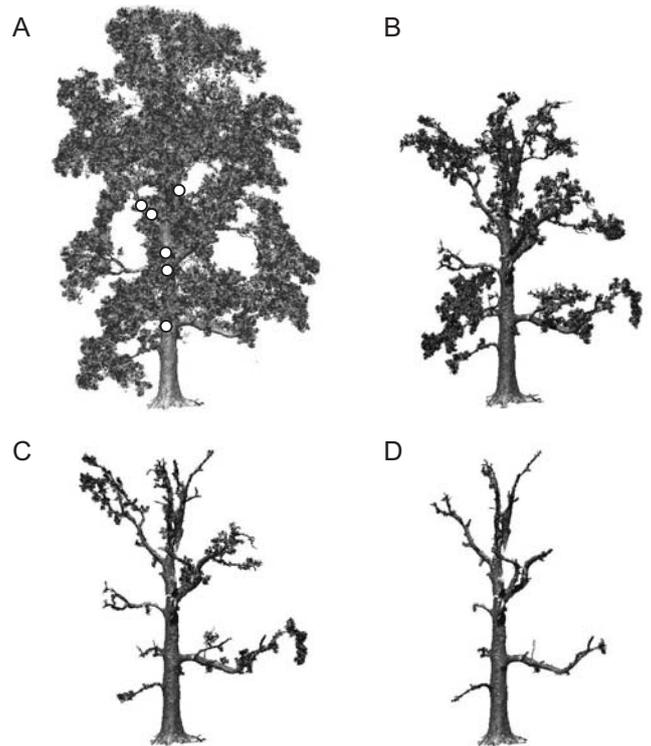


Fig. 1. Lidar-derived 3-D voxel models of a tulip tree. Shading effect was added to these models by changing the brightness of each point. (A) An original leaved model. White circles indicate initial voxels for extracting stems and branches. (B) A model after extracting stems and branches with the distance between voxels of 9. (C) the distance of 8, and (D) 6. The distances between voxels of 9,8,6 correspond to the integers more than $d_{ave} + 2\sigma$ (=8.49), near to $d_{ave} + 2\sigma$ and near to $d_{ave} + \sigma$ (=6.38), respectively, where d_{ave} and σ are respectively the average and standard deviation of the distance of each voxel to nearest neighbor within the region of stems and branches.

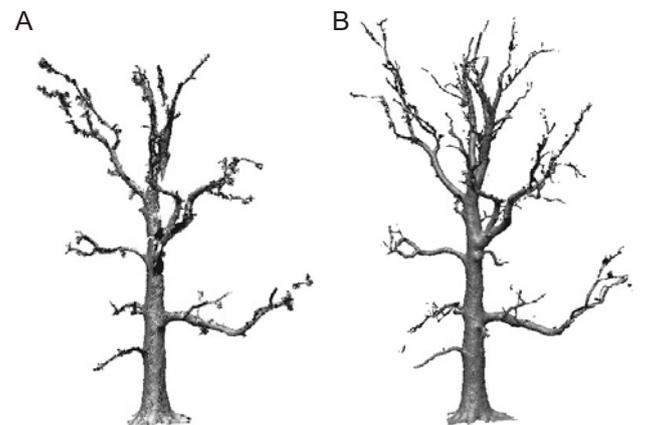


Fig. 2. Comparison of lidar-derived voxel 3-D models of a tulip tree. Shading effect was added to these models by changing the brightness of each point. (A) A resultant 3-D model after extracting branches and stems. This was obtained from the model of Fig.1(C) by setting additional initial voxels and adopting the distance between voxels of 6. (B) A 3-D leafless model generated by the lidar data taken in leafless season.

くの枝に初期ボクセルを追加し (24 個)、ボクセル間距離をより小さく (ここでは 6 に設定) して幹、枝抽出プロセスを再度行った後のボクセルモデルを示す。樹冠上部などに若干葉が残っていたが、大部分の葉はうまく分離されていた。Fig. 2A の幹、枝抽出モデルと Fig. 2B の落葉期の 3 次元ボクセルモデルとを比較すると、樹冠上部や枝の末端部分が Fig. 2A のモデルでは欠落しているものの、比較的太さのある幹や枝は抽出されていることが分かった。

体積計算の結果は、幹、枝抽出モデルで 17.8 m³、落葉期モデルで 21.4 m³ であり、その誤差は -16.7% であった。抽出された幹、枝の点群全て (総数 118,365 個) の最近隣ボクセル間距離の平均値は 4.31、標準偏差は 1.89 であった。これは、計算前に目視により切り出した幹と枝の点群の最近隣ボクセル間距離の平均値 d_{ave} と標準偏差 σ と近い値であった。抽出後に残った葉の点群 (総数 789,459 個) については、その最近隣距離の平均は 5.71、標準偏差は 3.08 であり、いずれも幹、枝の点群の最近隣ボクセル間距離の平均、標準偏差の値より大きかった。

本方法では、幹、枝と葉の点群の空間分布の違いを利用して、器官分離を行っている。幹、枝は柱状であり、その表面は曲面を形成している。そのため、幹、枝の表面にレーザービームが当たって計測された点群は、幹、枝表面の曲面に沿った位置に面的な分布をし、その並び方もライダーのスキャン角度のステップに対応して、比較的規則正しいパターンとなる。こうした点の空間分布は、ボクセル化後も、そのまま維持される (Fig. 3A; ボクセルモデルの幹に相当する部分を拡大した図)。このような分布の場合、各ボクセルの最近隣ボクセルまでの距離は、後述する葉の場合と比較すれば、各ボクセルでそれほど大きく変わらない。従って、幹、枝に相当するボクセルを目視で最初を選び (初期ボクセルに相当)、点の空間分布を加味して適切に設定された距離以下の近傍ボクセルを探索していけば、幹、枝に相当するボクセルが選出される。一方、葉は空間的にランダムに分布しているため、葉にレーザービームが当たって計測された点群も、空間的にランダムに分布し、それを変換したボクセルモデルでもランダムな分布を示す (Fig. 3B: ボクセルモデルの葉に相当する部分を拡大した図)。このような空間分布では、各ボクセルの最近隣ボクセルまでの距離のばらつきが大きくなり、その距離の平均値も幹、枝の場合よりも大きくなる。したがって、幹、枝の探索に適したある一定値以下のボクセル間距離で探索をしても、葉に相当するボクセルは選ばれず、幹、枝のみが抽

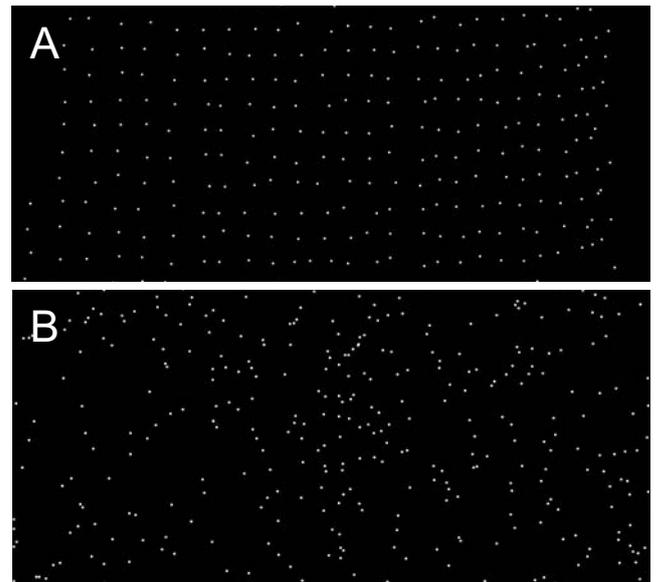


Fig. 3. Close-up views of part of an original leaved voxel 3-D model. (A) Stem; (B) leaves.

出されることになる。このような幹、枝と葉の間で点群空間分布の違いがあるという事実は、最近隣ボクセル間距離の平均、標準偏差がともに、幹、枝よりも葉の方が大きいという結果にも現れている。

幹、枝のうち、葉に遮蔽されてレーザービームが届かない部分は点が欠落し、その部分はボクセル間距離が大きく広がった状態になる。本方法では一定距離以下のボクセル間距離をもとに、初期ボクセルから順に探索して幹、枝のボクセルを選んでいくが、このような欠落部があると、急にボクセル間距離が広がることとなり、それ以上、探索が進まなくなる。本対象でいえば、たとえば幹の下部にのみ初期ボクセルを与えても、欠落部が多い樹幹上部の枝まで探索が進まず、樹幹上部の枝に相当するボクセルは抽出されない結果となる。これを解消する方法を二つとった。一つは、幹の下部だけでなく、樹幹の上部も含め、着葉状態で視認できる幹、枝の部分に積極的に多くの初期ボクセルを設け (計 10 点)、いろいろな初期ボクセルからの探索を行い、一つの初期ボクセルからの探索が欠落部によって途中で止まってしまっても、その他の初期ボクセルからの探索で、残りの幹、枝の部分にも探索がかかり、多くの幹、枝が抽出されるようにした。もう一つは、探索する際のボクセル間距離を最近隣ボクセル間距離の平均値より大きめにとった (本計算では、 $d_{ave} + 2\sigma$ が相当)。これにより、小さな欠落部であれば、ボクセルの探索がそのまま進行していくと考えられる。実際、同じ初期ボクセルでもボクセル間距離 $d_{ave} + \sigma$ (Fig. 1D) と $d_{ave} + 2\sigma$ (Fig. 1C) の場合では、

前者のほうが枝の抽出数が少ないのは、欠落部の影響があるものと思われる。ボクセル間距離を大きめにとると、Fig. 1B, Cで示されているように、枝近傍の葉が誤抽出されてしまうが、この状態では大部分の葉は分離され、個々の枝を目視で識別するのは容易であり、個々の枝に初期ボクセルをさらに追加し、より小さい点間距離で再探索をかければ、葉の誤抽出は除去される (Fig. 2A)。

本方法で得られたボクセルモデルを落葉期のボクセルモデルと比較した場合、特に樹幹上部に幹、枝で抽出しきれていない部分が認められたが、ある程度の太さを有する幹は抽出されていたため、体積の誤差は-16.5%と、全体としては精度よく、幹、枝の抽出が達成できたものと考えられる。

4. まとめ

本研究では、可搬型スキャニングライダーにより取得された着葉期のユリノキの3次元点群データから、幹、枝を抽出する手法について検証した。レジストレーションされたライダーデータをボクセル化した後、幹、枝に相当するボクセルを目視にて初期ボクセルとして複数個選び、それを起点として、ある一定のボクセル間距離以下にあるボクセルを探索して、幹、枝の抽出を行った。本方法では、はじめのボクセル間距離を広めに設定してより多くの幹、枝を抽出できるようにし、次にボクセル間距離を狭め、初期ボクセルを増やすことで、誤認識した葉を取り除く処理を行った。その結果、体積で-16.5%の誤差となり、比較的精度よく、幹と枝を抽出することができた。

本方法では、幹、枝のボクセル間距離の設定が重要となるが、本稿で示したように、最近隣ボクセル間距離の平均値と標準偏差に基づいた設定が有効であると考えられる。初期ボクセルの設定に関しては、手動で複数点選ぶ必要があるが、今後はこのような手動操作を出来る限り減らす工夫が必要である。本方法を適用することで、落葉樹の場合は落葉期の計測が不要になるという利点があるが、落葉期のない常緑樹に適用すれば、その利点はさらに大きなものとなる。そのため、今後は常緑樹も対象に加え、本方法を検証していくことが有益であると考えられる。また、孤立木だけでなく、より複雑な構造を有する群落での検証も行うことで、本方法の適用範囲を広げていくことが望ましい。

引用文献

Chason, J. W., Baldocchi, D. D. and Huston, M. A., 1991: A

comparison of direct and indirect methods for estimating forest canopy leaf area. *Agric. Forest Meteorol.*, **57**, 107-128.

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. and Omasa, K., 2009: Estimating vertical plant area density profile and growth parameters of a wheat canopy at different growth stages using three-dimensional portable lidar imaging. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, **64**, 151-158.

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.

Monsi, M. and Saeki, T., 1953: Über den Lichtfaktor in den Pflanzengesellschaften und seine Bedeutung für die Stoffproduktion. *Jpn. J. Bot.*, **14**, 22-52.

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.

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.