

航空機LiDARを用いた都市空間における樹木の形状情報の抽出精度

誌名	日本リモートセンシング学会誌 = Journal of the Remote Sensing Society of Japan
ISSN	02897911
著者名	押尾, 晴樹 浅輪, 貴史 梅干野, 晁 宮坂, 聡
発行元	日本リモートセンシング学会
巻/号	33巻5号
巻号補足	
掲載ページ	p. 350-359
発行年月	2013年11月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



航空機 LiDAR を用いた都市空間における 樹木の形状情報の抽出精度

押尾晴樹^{*1}・浅輪貴史^{*1}・梅干野晃^{*2}・宮坂 聡^{*3}

Accuracy of the Information on the External Crown Form of Individual Trees
Extracted by Airborne LiDAR in Urban Spaces

Haruki OSHIO^{*1}, Takashi ASAWA^{*1}, Akira HOYANO^{*2} and Satoshi MIYASAKA^{*3}

Abstract

We examined the acquisition accuracy of high-resolution airborne LiDAR for capturing the external forms of individual trees in an urban district. The accuracy of the voxel-based reconstruction of the crown form was verified in anticipation of estimating the leaf area density (LAD) distribution. We calculated the decrease in the number of airborne laser beams incident on a crown in each height bin for 20 Japanese zelkova trees, and then, determined the target tree. Terrestrial LiDAR data of the target tree was used for the verification. We examined the spatial accuracy of the airborne LiDAR points on the crown surface before verifying the accuracy of the voxel-based reconstruction. The results confirmed that airborne LiDAR captured the crown periphery with the spatial accuracy of 0.5 m and 1 m in the upper and lower parts of the crown, respectively. Next, voxels including one or more points were extracted as the areas in which the foliage is distributed. We then verified the distribution accuracy of the extracted voxels, and we found that 60 % of the external voxels derived by the terrestrial LiDAR can be extracted. We also investigated the reasons for voxels not being extracted by the airborne LiDAR, using the LAD in voxels derived from the terrestrial LiDAR data. We observed that 96 % of the external voxels derived by the terrestrial LiDAR was comprised of voxels extracted by airborne LiDAR (the adjacent voxels of which can be extracted) and voxels that had insufficient foliage to trigger a return pulse. Our results quantitatively indicate that high-resolution airborne LiDAR is applicable to the voxel-based reconstruction of external forms of individual trees in urban spaces.

Keywords : Airborne LiDAR, Terrestrial LiDAR, Crown form, Urban district, Thermal environment

1. はじめに

近年、夏季における都市の熱環境悪化の対策として樹木による緑化が注目されている。各地方自治体で緑の基本計画が制定され緑化が推進されており、ヒートアイランドなど熱環境問題への対策もその主な目的となっている。樹木の主要な熱環境調整効果である日射遮蔽や蒸散作用を評価するためには、都市空間に分布する各樹木の樹冠による日射の透過量や吸収量を知る必要があり、それには個々の樹木の葉の密度 (LAD: Leaf Area Density) 分布の情報を整備することが重要である。都市に存在する樹木は樹種、成長段階、生育状況、剪定などにより樹冠形状や葉の密度分布

にバリエーションがある。よってそれらの特徴を表現することができる空間スケールでの情報整備が求められる。しかし、現地調査により個々の樹木の LAD 分布の情報を整備することは困難である。そこで情報を整備する方法として、航空機 LiDAR (Light Detection and Ranging) に注目する。

LiDAR により得られる樹冠の点群から LAD 分布の情報を得るには、voxel を用いた方法が有効である。利用面を考えると、voxel 化することによって CFD (Computational Fluid Dynamics) や熱環境シミュレーション¹⁾²⁾ の樹木領域に適用できる情報となる。地上型 LiDAR を用いた研究では、LAD 分布³⁾⁴⁾ や PAD (Plant Area Density) 分布⁵⁾ の推定方法が提案されている。航空機 LiDAR については、

(2013. 2. 18 受付, 2013. 8. 22 改訂受理)

^{*1} 東京工業大学大学院総合理工学研究科
〒226-8502 横浜市緑区長津田町 4259-G5-2

^{*2} 放送大学
〒261-8586 千葉県美浜区若葉 2-11

^{*3} 中日本航空株式会社
〒480-0202 愛知県西春日井郡豊山町大字豊場若宮 17-1

^{*1} Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology, 4259-G5-2, Nagatsuta-cho, Midori-ku, Yokohama, 226-8502, Japan

^{*2} The Open University of Japan, 2-11, Wakaba, Mihama-ku, Chiba, 261-8586, Japan

^{*3} Nakanihon Air Service CO., LTD., 17-1, Toyobawakamiya, Toyoyama-cho, Nishikasugai, Aichi, 480-0202, Japan

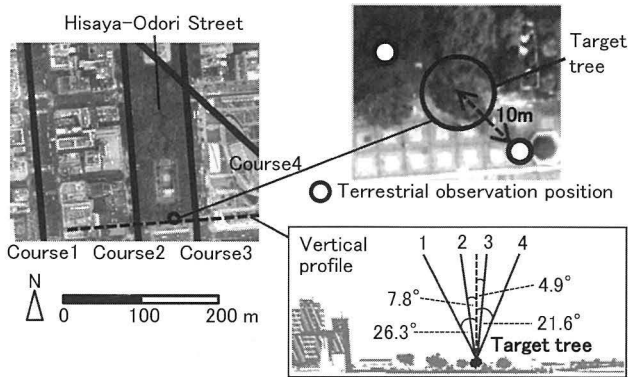


Fig. 1 Airborne LiDAR observation courses, location of the target zelkova tree and terrestrial LiDAR observation positions, laser zenith angle on horizontal plane at the location of the target tree.

Table 1 Airborne LiDAR observation conditions.

Date: 2010.9.6	Observation system: SAKURA
Altitude: 350 m	(Heliborne system, Nakanihon Air Service)
Laser interval on the ground under the flight course:	
0.25 m (scan direction), 0.2 m (flight direction)	
Scanner: LMS-Q560 (RIEGL)	Wave length: 1550 nm
Ranging accuracy: 20 mm	Laser beam divergence: 0.5 mrad
Range resolution: 0.5 m	Number of targets per pulse: unlimited

Wang et al.⁶⁾ がレーザー反射点を含む voxel を抽出することで、単木の 3 次元構造を表現したモデルを作成している。しかし、精度の検証はされていないため、単木の樹冠形状や葉群の分布が再現できているかは明らかにされていない。また、Song et al.⁷⁾ は PAD 分布を推定する手法を提案している。しかし、樹冠上部での遮蔽により樹冠下部にはレーザーが届きにくいいため、中井ら⁸⁾ の報告にもあるように樹冠内の全領域において LAD や PAD の分布を推定するのは難しいと言える。ただし、Song et al.⁷⁾ や中井ら⁸⁾ はファーストパルスとシングルパルスのみを用いているため、ラストパルスや中間パルスの利用については検討が必要である。また、以上のように voxel 内の密度を議論している研究においても、精度の検証が十分でない場合や群落の鉛直構造を対象とする場合が多く、実際の枝葉の分布と点の分布の比較もほとんどされていないため、単木の樹冠領域、すなわち樹冠形状の再現精度は明らかにされていない。

そこで本研究では、都市空間の単木においても LAD 分布の情報を整備するための基礎として、航空機 LiDAR データを用いて voxel により樹冠を再現したときの、樹冠形状の再現精度を明らかにすることを目的とする。航空機 LiDAR により得られる情報の精度を検証するために地上型 LiDAR データを比較に用いる。また、複数の航空機観測コースのデータを用いることで、レーザーの間隔や天頂角の違いが樹冠形状の再現性に与える影響を明らかにする。

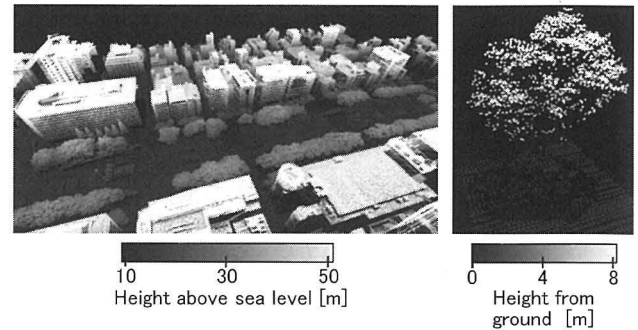


Fig. 2 Airborne LiDAR data (Left : Hisaya-Odori street (course 2 and course 3), Right : *Z. serrate* used in the verification (course 3)).

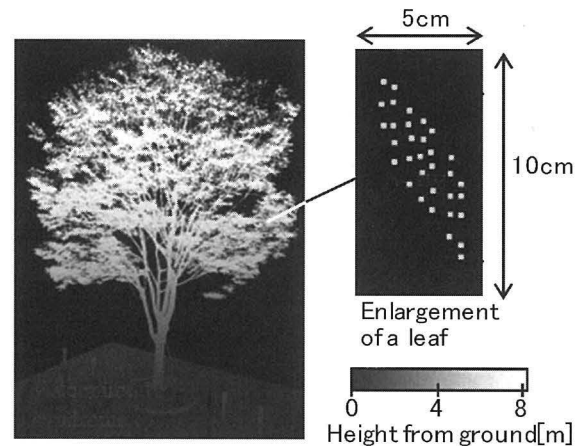


Fig. 3 Terrestrial LiDAR data of the *Z. serrate* used in the verification.

2. 解析に使用したデータ

2.1 航空機 LiDAR データ

本研究では多くの樹種から成る街路樹や都市公園が存在する名古屋市久屋大通を解析対象地区として選定した。Fig. 1 に示す 4 つの飛行コースから観測を行った。Table 1 に観測の概要を示す。観測高度は 350 m であり、地上部において点密度は約 20 点/m²、レーザーのフットプリントの直径は 17.5 cm である。使用した観測システムの特徴として、1 発射パルス当たりを取得できる反射パルスの数が無制限であること、距離方向の分解能が従来よりも大幅に改善されていることが挙げられる。スキャナの実性能として距離分解能は 0.6 m⁹⁾ であり、実際のデータでは 0.5 m 程度ターゲット同士が離れていればそれぞれを識別可能であると報告されている¹⁰⁾。Fig. 2 に取得したデータを示す。高密度な点群により単木を認識することができる。

航空機 LiDAR の観測範囲の中から、検証対象樹木として単木のケヤキを選定した。Fig. 3 の地上型 LiDAR データに示すように樹高 10.5 m、枝張 8.5 m の樹木である。Fig. 1 に対象樹木の位置を示す。また、Table 2 に対象樹木の位

Table 2 Laser interval and laser zenith angle at the location of the target tree.

	Zenith angle (°)	Laser interval (m)
Course 1	26.3	0.31
Course 2	7.8	0.26
Course 3	4.9	0.26
Course 4	21.6	0.30

置における観測コースごとのレーザーの間隔とレーザーの天頂角を示す。都市には樹冠形状や樹冠内部構造が異なる様々な樹種が存在し、剪定のされ方や生育状態などその状態も異なる。本研究では、ケヤキの中から樹冠形状の再現が難しいと予測される個体を選んで検証を行うことにした。対象としたケヤキの位置付けについては3章で詳しく述べる。

2.2 地上型 LiDAR データ

航空機 LiDAR データから抽出した樹冠の形状情報の精度検証に地上型 LiDAR を使用した。地上型 LiDAR を用いれば、10 m 程度の測定距離の場合、1 cm 以下の点間隔で情報が取得できる。既往研究では葉一枚一枚の再現¹¹⁾や樹木の成長モデルと統合したシュートレベルの再現¹²⁾¹³⁾の有効性が確認されている。また、レーザーが十分入射する条件であれば LAD も高精度に推定できる³⁾⁴⁾。レーザーが当たらなくなる樹冠上部の場所を除けば、外周部においては実際の枝葉の分布を把握することができると考え、地上型 LiDAR データを比較用データとして用いることにした。既往研究においても航空機 LiDAR データと地上型 LiDAR データの比較は行われている¹⁴⁾が、25 m 四方の対象領域で点の鉛直分布が比較されており、単木レベルでの詳細な比較は行われていない。Fig. 1 に示す2地点から地上型 LiDAR により対象樹木の測定を行った。Table 3 に測定の概要を示す。10 m 先の鉛直面においても点間隔は7 mm であり、Fig. 3 のように樹冠の外周部では葉の形状を識別できるデータを取得した。

3. 検証対象樹木の選定

本章では、樹冠形状の再現精度を検証する対象樹木を選定する。樹冠下部でレーザーが届きにくくなる部分も含めて評価を行うために、樹種としては、盃型の樹冠形状を有するケヤキを対象とする。次に、ケヤキの樹冠内におけるレーザー数の減少について分析することで、対象とする個体を選定した。

樹冠内でシングルパルスやラストパルスが生じた場合、レーザーが完全に遮蔽される場合だけでなく、その先でセンサの検知レベルを超えるエネルギーが反射されなかったことも考えられる。ここで言うレーザー数の減少とは、樹冠に入射したあるレーザーがシングルパルスまたはラストパルスを生じた場合そのレーザーは消滅したと見なし、樹冠

Table 3 Terrestrial LiDAR observation conditions.

Date: 2010.9.2	Scanner: VZ-400 (RIEGL)
Scan angle range: -40~60° (vertical), 360° (horizontal)	
Interval between consecutive laser shots: 0.04°	
Point interval: 7 mm (vertical plane at 10 m ahead)	
Wave length: 1550 nm	Ranging accuracy: 5 mm
Laser beam divergence: 0.3 mrad	

内を進むレーザー全体の数が減少していくことを表す。樹頂点と地表面の間を厚さ1 m の層に分割し、1 番上の層に入射したレーザー数 (N_I) に対する各層に入射したレーザー数 (N_i) の割合を算出した ($=N_i/N_I$)。 N_I は次式により算出した。

$$N_I = N_{cf} + N_{cs} + N_{gs} \quad (1)$$

N_{cf} : 樹冠内のファーストパルスによる点の数, N_{cs} : 樹冠内のシングルパルスによる点の数, N_{gs} : 樹冠下のシングルパルスによる点の数

また、2 層目以降の i 番目の層への入射数 N_i は (2) 式のように表すことができる。

$$N_i = N_{i-1} - N_{s, i-1} - N_{l, i-1} \quad (2)$$

N_{i-1} : $i-1$ 番目の層に入射したレーザー数, $N_{s, i-1}$: $i-1$ 番目の層に含まれるシングルパルスによる点の数, $N_{l, i-1}$: $i-1$ 番目の層に含まれるラストパルスによる点の数

航空機 LiDAR による観測範囲の中からケヤキの成木を20 本選び解析に用いた。明らかに生育状態が悪い樹木は除いて、葉が密な樹木も粗な樹木も区別せずに選定した。各樹木に対して、最もレーザーの天頂角が小さくなる観測コースのデータを用いた。Fig. 4 に算出結果を示す。Fig. 4 (1) のように葉が密な樹木では、地上部で反射パルスが検知されたレーザーの割合は0.20 である。Fig. 4 (2) のように見目で明らかに葉が少ない樹木では0.57 である。レーザーの透過率が小さい樹木では樹冠の上部で急激にレーザー数が減少している。本研究では葉密度が中間的であり、樹冠長が長いことにより樹冠下部の再現性が問題となる個体を検証対象に選んだ (Fig. 4 (3))。この樹木について2章で述べたように地上型 LiDAR による測定を行い、検証に使用した。

4. 樹冠の外周部におけるレーザー反射点の空間精度

点群を voxel 化する前段階の検討として、まずは点群自身の空間精度を確認した。航空機 LiDAR 点群からポリゴンを作成することで樹冠形状を再現した既往研究では、点群から作成した標高データを用いた再現¹⁵⁾や、凸包により抽出した外周部の点をポリゴンで覆うことによる再現¹⁶⁾が行われている。しかし、検証箇所が樹冠表面上の代表点に限られていることもあり、点群の空間精度は十分に検証されていない。そこで本章では、航空機 LiDAR デー

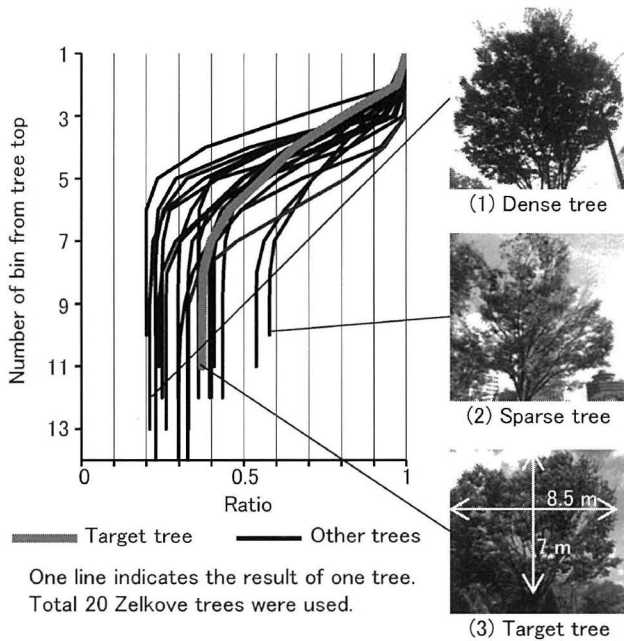


Fig. 4 Ratio of number of the lasers incident on each bin to number of the lasers incident on a crown (Height of a bin : 1 m).

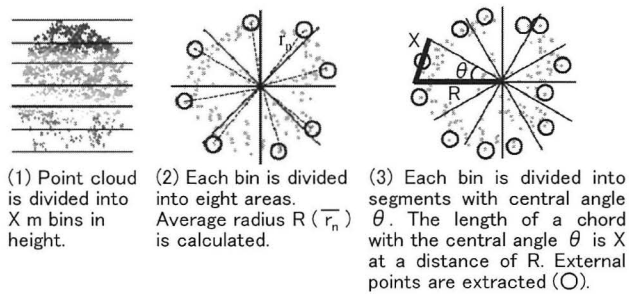


Fig. 5 Extraction of points distributed on crown surface.

タと地上型 LiDAR データから抽出した樹冠の外周部の点を比較した。

4.1 外周部のレーザー反射点の抽出

Fig. 5 に樹冠の外周部の点の抽出方法を示す。 X は分割間隔であり点を抽出する空間スケールを表している。最初に樹冠を構成する点群を厚さ X m の層に分割した (Fig. 5 (1))。そして各層を中心角が θ となるように複数のセグメントに分割し、各セグメントで樹冠中心から最も遠い点を抽出した (Fig. 5 (3))。ここで樹冠中心とは、地上型 LiDAR データから求めた幹の中心である。各層における θ は次のようにして決定した (Fig. 5 (2))。地上型 LiDAR データを基準として航空機 LiDAR 点群の空間精度を検証するために、地上型 LiDAR データにおける各層を 8 つの領域に分割して各領域で最も外側の点と樹冠の中心点との距離を算出し、各領域の距離を平均してその層の平均樹冠半径を算出した。そして平均樹冠半径の距離で弧の長さが X m となるように中心角 θ を決定した。既往研究¹⁵⁾ では

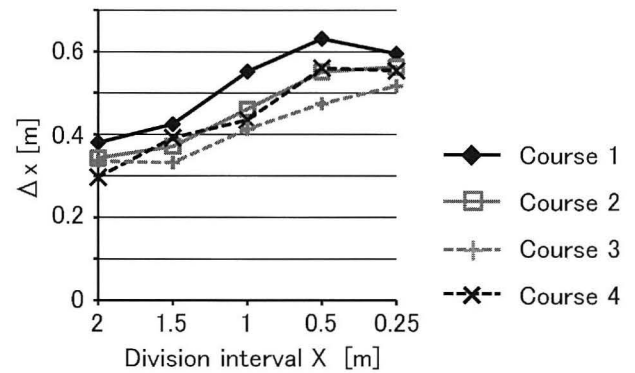


Fig. 6 Average Δx (Difference in distance from the extracted point to the crown center between airborne and terrestrial data) in the entire crown area according to division interval X .

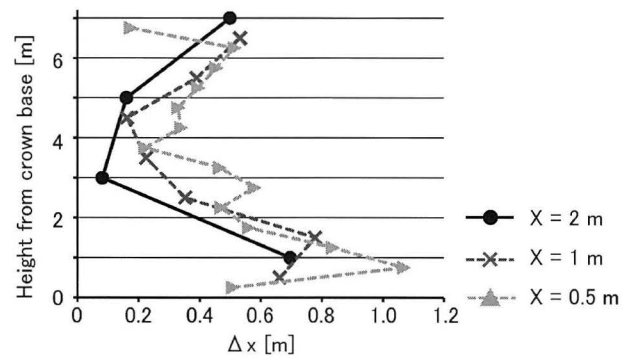


Fig. 7 Variation of Δx (Difference in distance from the extracted point to the crown center between airborne and terrestrial data) according to height derived from course 3 (Δx is averaged in each bin).

層の厚さを 0.5 m, θ を 45° として樹冠形状の再現性が検討されている。本研究では外周部の点の空間精度を調べるために、 $X=2$ m, 1.5 m, 1 m, 0.5 m, 0.25 m の 5 通りの分割間隔で点を抽出した。

4.2 検証結果

4.2.1 樹冠の中心点との距離の精度と点を抽出する空間スケールの関係

4.1 で分割した各セグメントにおいて、航空機 LiDAR データから抽出した点と樹冠の中心点との距離 x_a と、地上型 LiDAR データから抽出した点と中心点との距離 x_t の差 $\Delta x (=|x_a - x_t|)$ を算出した。 Δx と X が小さいほど航空機 LiDAR が高精度に樹冠の外周部の位置情報を取得していることになる。Fig. 6 に航空機 LiDAR データから点が抽出された全てのセグメントにおける Δx を平均した結果を示す。Fig. 7 には Δx の高さによる変化を、3 つの X について示す。実際には Fig. 7 のように樹冠下部ほど精度が低下していくが、Fig. 6 はこれを平均して樹冠全体の精度として示している。大部分のセグメントにおいては $x_a - x_t$ が負であったため、Fig. 6, 7 に示す距離分だけ航空機 LiDAR

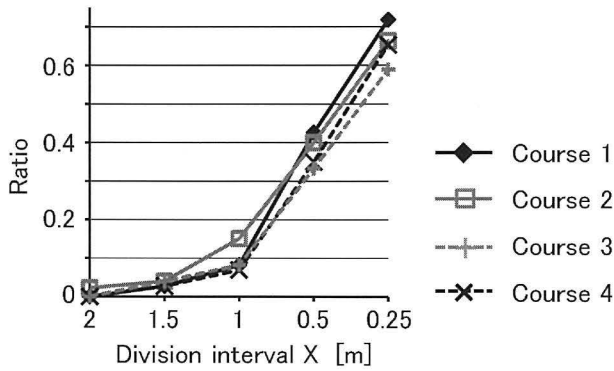


Fig. 8 Average ratio of segments where no point was extracted from the airborne data but a point was extracted from the terrestrial data according to division interval X .

データでは樹冠中心からの距離が過少推定されたことになる。

航空機からのレーザーが樹冠の外周部に当たり、センサが検知できるエネルギーをもつ反射パルス（以下、検知パルス）を返した場合、 x_a は x_t に比べて、レーザーのフットプリントの中心と外周部との距離の範囲内で過少推定になる場合も過大推定になる場合もある。また、フットプリント内に含まれる葉が少なく検知パルスを返さなかった場合、その葉はデータとして記録されず x_a は x_t に比べて小さくなる。樹冠上部では後者の影響で外形が過少推定されるが、地上型 LiDAR による結果との差 Δx は最大でも 0.5m 程である。樹冠下部では上部でのレーザーの遮蔽により、検知パルスを返すほどのエネルギーが樹冠のエッジ部分に到達しなくなるため精度が低下する。空間スケール X が大きいほど Δx は小さいが、 X が小さい場合の Δx も、既往研究における誤差 2m¹⁶⁾や相対誤差 0.4¹⁵⁾と比較すると十分小さい。

4.2.2 天頂付近からレーザーが照射された場合の結果

最もレーザーの天頂角が小さく点密度が大きいコース 3 の結果について詳しく述べる。 X が 0.5m と 0.25m で地上型 LiDAR による結果との差 Δx が 0.5m になる。この 2つの分解能では Δx は変化していないが、地上型 LiDAR データからは点が抽出されたにも関わらず航空機 LiDAR データからは点が抽出されなかったセグメントの割合（以下、未抽出セグメント率）が、 $X=0.5m$ の場合は 0.3 であるのに対し $X=0.25m$ では 0.6 である（Fig. 8）。Fig. 9 の鉛直分布で見て、 $X=0.25m$ の場合は、樹冠上部においても未抽出セグメント率が 0.5 を超える場合もあり、この空間スケールでは点を抽出できていない。 $X=0.5m$ の場合、樹冠上部ではほとんどの層で未抽出セグメント率が 0.1-0.2 である（Fig. 9）。また、Fig. 7 から Δx も 0.5m 以下であることから、天頂付近から高密度にレーザーが照射される条件であれば、航空機 LiDAR は、樹冠上部において 0.5m の空間精度で樹冠の外周部の位置情報を取得している。一方樹

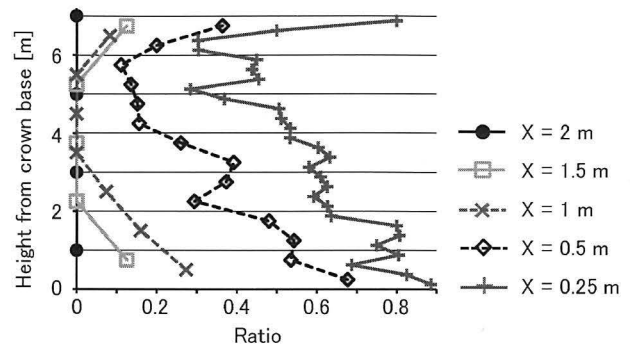


Fig. 9 Variation of ratio of segments where no point was extracted from the airborne data but a point was extracted from the terrestrial data according to height derived from course 3 (The ratio is averaged in each bin).

冠下部では、 $X=0.5m$ では未抽出セグメント率が 0.5 を超える場合があるため、外周部の位置情報を取得する空間精度は 0.5m ではなく、1m 程度となる。

4.2.3 レーザーの天頂角とレーザー間隔が精度に与える影響

次に、レーザーの照射条件が精度に与える影響を見るために、観測コース間の差について述べる。点密度が小さいほど、枝葉による遮蔽の影響を受けない部分であっても遮蔽の影響を受ける部分であっても、樹冠の外周部に当たるレーザー数が減り、 Δx と未抽出セグメント率が大きくなる。また天頂角が大きくなると、レーザーが樹冠を透過するのに必要な距離が長くなるため、レーザー数が減少しやすくなる。最も天頂角が大きく点密度が小さいコース 1 と最も天頂角が小さく点密度が大きいコース 3 では、0.05m のレーザーの間隔の違いと 20° の天頂角の違い（Table 2）があり、それが 0.1-0.15m の精度の差をもたらしている。さらに、点密度が小さいと点が抽出されないセグメントが増えるため、Fig. 8 の未抽出セグメント率において、 X が 0.5m 以下ではコース 1 と 3 の間に 0.1 の差が見られた。コース 4 は天頂角、レーザーの間隔ともにコース 2、3 に比べて大きい、Fig. 6 に示す Δx はコース 2 と同程度、Fig. 8 に示す未抽出セグメント率はコース 3 と同程度である。これは、対象樹木は西側に比べて東側の方が葉密度が大きいため、樹木の東側からレーザーが入射するコース 4 は、コース 2 や 3 からはレーザーが届きにくくなる部分の観測に有利だったことが理由に挙げられる。

天頂付近から高密度にレーザーが照射されれば、樹冠上部において 0.5m、下部においても 1m の空間精度で、航空機 LiDAR により樹冠の外周部の位置情報を取得することができた。樹冠の航空機 LiDAR 点群を voxel 化することで知りたい情報は、葉一枚一枚の空間スケールの情報ではなく、葉群の空間スケール（数 10cm～1m 程度のスケール）の LAD の分布である。これに対し、航空機 LiDAR は上記の精度で樹冠の外周部の位置情報を取得していたため、樹

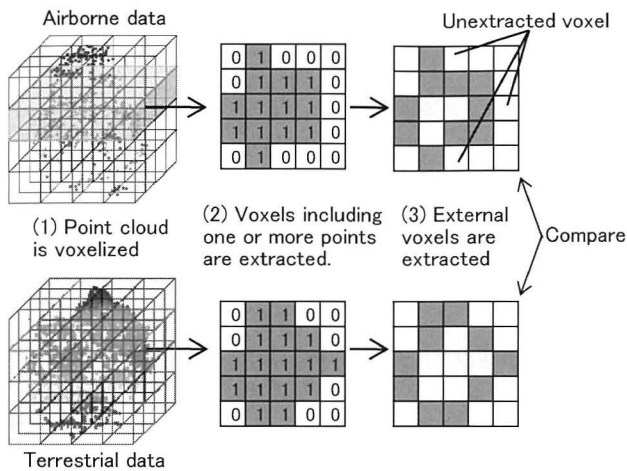


Fig. 10 Procedure of external voxel extraction.

冠の点群は本研究で目指す voxel モデリングに適した空間精度を持っていることが明らかになった。

5. 樹冠の外周部の voxel の抽出精度

5.1 voxel による樹冠外形のモデリング

航空機 LiDAR と地上型 LiDAR による外周部の voxel の分布を比較することで精度検証を行う。Fig. 10 に樹冠の外周部の voxel の抽出方法を示す。最初に点群を voxel に分割し (Fig. 10 (1)), Wang et al.⁶⁾ と同様に、少なくともレーザー反射点を 1 つ以上含む voxel を抽出した (Fig. 10 (2))。そして、Fig. 10 (3) のように外周部の voxel を抽出した。Wang et al.⁶⁾ は、森林において $0.5\text{m} \times 0.5\text{m} \times 1\text{m}$ の voxel を用い樹冠の 3 次元構造を表現したモデルを作成している。しかし、精度の検証はされていないため、使用した 4-7 点 / m^2 のデータで $0.5\text{m} \times 0.5\text{m} \times 1\text{m}$ スケールの葉群分布を推定できるかは示されていない。本研究では voxel サイズと voxel の抽出精度の関係を調べるために、 $0.5\text{m} \times 0.5\text{m} \times 0.5\text{m}$ 、 $1\text{m} \times 1\text{m} \times 0.5\text{m}$ の 2 種類の voxel サイズを使用した。voxel の高さは観測システムの距離方向の分解能を考慮した。前章で航空機 LiDAR 点群自体の精度は確認できたため、ここでは地上型 LiDAR データを航空機 LiDAR の分解能に合わせて分割して比較を行った。

5.2 外周部の voxel の抽出率

Fig. 11 に、抽出した voxel のうち樹冠上部と樹冠下部における 1 層分 (厚さ 0.5m) の水平断面図を、最もレーザーの天頂角が小さく点密度が大きいコース 3 と、天頂角が大きく点密度が小さいコース 1 について示す。地上型 LiDAR による voxel の 3 次元分布は LAD 分布を示している。voxel サイズが 0.5m の場合、航空機 LiDAR データにより抽出できない voxel が多い。voxel サイズが 1m の場合は、樹冠上部において、コース 3 の結果では分布の傾向が再現できているが、コース 1 では抽出できていない voxel もある。また樹冠下部では、コース 3 であっても抽

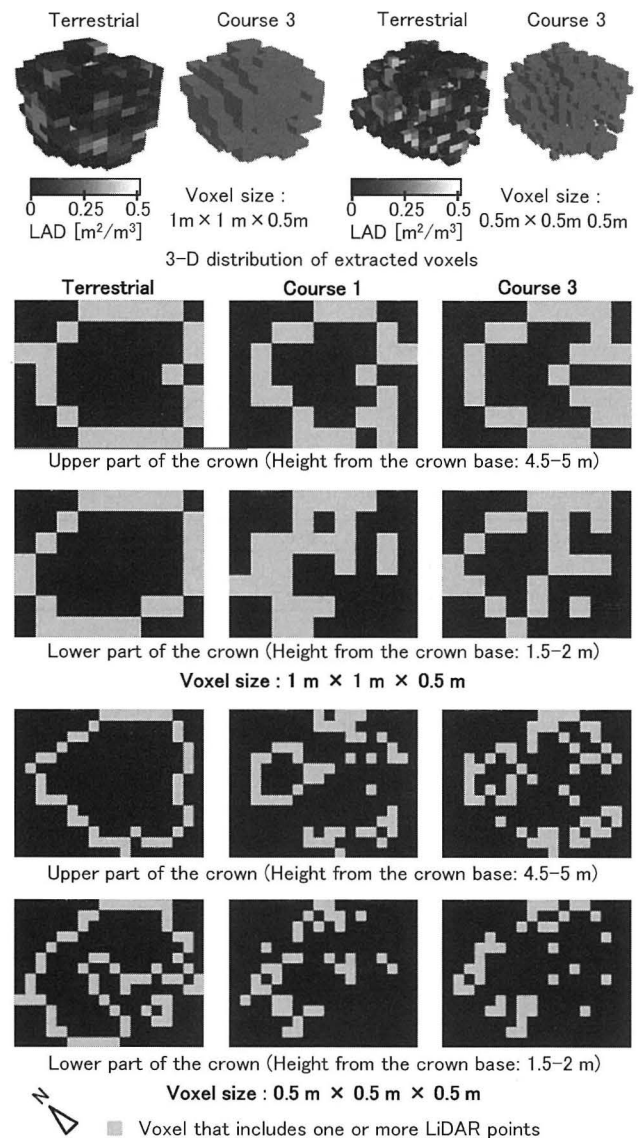


Fig. 11 Distribution of the extracted voxels.

出できない voxel が多い。

次に抽出率 (航空機 LiDAR データと地上型 LiDAR データ両方から抽出された voxel 数 / 地上型 LiDAR データから抽出された voxel 数) により航空機 LiDAR データから抽出した voxel の分布の精度を検証する。例えば Fig. 10 の場合は、外周部の voxel 10 個のうち 7 個が航空機 LiDAR データにより抽出されているため抽出率は 70% である。Table 4 に抽出率の樹冠全体での平均値を示す。まずはコース 3 について考える。voxel サイズが $0.5\text{m} \times 0.5\text{m} \times 0.5\text{m}$ の場合は、抽出率が 35-40% である。これは、地表面の 0.5m 四方の領域には 4-6 個のレーザーが到達するが、樹冠上部におけるレーザーの遮蔽により樹冠下部では抽出精度が低下したためである。voxel サイズが $1\text{m} \times 1\text{m} \times 0.5\text{m}$ のときに、60% 以上の抽出率を得た。Fig. 12 に voxel サイズが $1\text{m} \times 1\text{m} \times 0.5\text{m}$ の場合の抽出率の高さごとの変化を示す。コース 3 では、樹冠上部で 60-80% の voxel を抽出できた。

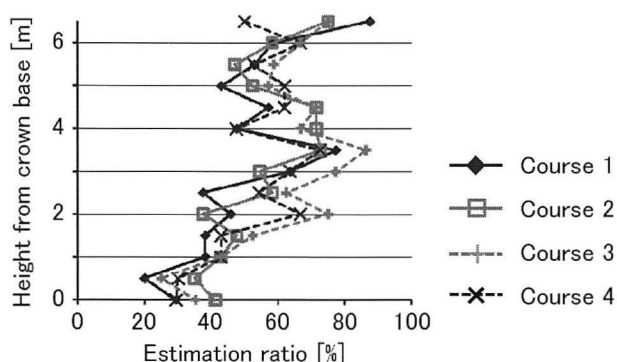


Fig. 12 Variation of estimation ratio according to height.

Table 4 Estimation ratio in the entire crown area [%].

Voxel size	Course1	Course2	Course3	Course 4
0.5×0.5m	26.7	28.9	36.3	30.6
1×1m	48.0	53.9	60.9	53.5

しかし、樹冠下部では抽出率が50%以下に低下している。以上から、voxel サイズが0.5m×0.5m×0.5mでは相対的に抽出精度が低いと判断し、1m×1m×0.5mのvoxelを用いた場合の再現性について6章で詳しく分析を行う。

次に観測コース間の差について述べる。Table 4に示す通り、観測コース間では抽出率に10–15%の差がある。地表面の1m×1mの領域にコース3では約20点、コース1では約15点が含まれる。また、樹冠下部に至るまでの樹冠通過距離もコース1では長くなる。これによりコース1のレーザーの密度がコース3に比べ低くなり、抽出率で10%以上の差をもたらした。コース2、3では地表面におけるレーザーの間隔は同様であるにも関わらず、voxel サイズが1m×1m×0.5mの場合に抽出率に7%の差が見られる。レーザーの天頂角の違いによる影響が表れていることが分かる。

6. 航空機 LiDAR により抽出できなかった voxel の特徴

6.1 分析方法

6.1.1 方法の概要

航空機 LiDAR では特に葉の密度が小さい voxel の抽出精度が悪いと予測されることから、voxel の未抽出が枝葉の分布の再現性に与える影響を考察する必要がある。そこで、voxel サイズが1m×1m×0.5mの場合について、5章で航空機 LiDAR データにより抽出できなかった voxel の原因について分析した。原因として、(1) voxel 内の葉面積が、検知パルスを送すのに十分でない (voxel A)、(2) voxel に航空機からのレーザーが到達していない (voxel B) の2つについて考えた。Fig. 13に示す手順により抽出できなかった voxel を voxel A、voxel B に分類した。voxel A、voxel B の判定のために voxel の LAD を用いた。LAD が閾値より小さければ voxel A (葉が少なく検知パルスを送さ

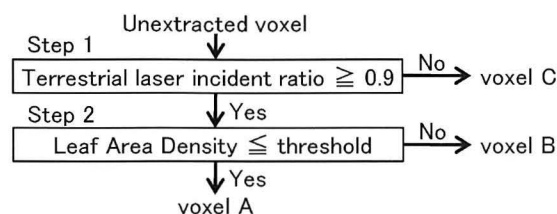


Fig. 13 Procedure of unextracted voxel classification.

ない)、閾値より大きければ voxel B (葉が多いにも関わらず反射していない、つまりレーザーが到達していない)と判断した。閾値の決定には、voxel と航空機の間に葉や枝など遮蔽物が存在しない voxel を用いた。

6.1.2 地上型 LiDAR データによる各 voxel の LAD の算出

各 voxel の LAD は、次の方法により地上型 LiDAR データから算出した。多くのレーザーが入射する条件である外周部の voxel を対象としているため、voxel へ入射するレーザー数が同じであれば voxel 内の点数と葉面積は相関が高くなる。しかし、場所により voxel へ入射するレーザー数は異なる。そこで、voxel へ入射したレーザーが葉に接触する確率をもとに voxel 内の LAD を算出する Hosoi et al.³⁾の方法を用いた。正確な LAD を求めるには、死角が無くなるように複数方向から測定することが有効であるとされている³⁾⁴⁾。しかし、風の影響で複数の測定地点のデータが重ならない場所が発生すること、対象 voxel から遠い測定地点からのレーザーは voxel へ到達する前に葉や枝に遮られ不均一に voxel へ入射するため、場所によって過大推定や過少推定を引き起こし精度にばらつきが出ることが想定される。そこで本研究では Béland et al.¹⁷⁾と同様に、Durrueu et al.¹⁸⁾の方法により各 voxel についてそれぞれの測定地点のデータからの地上レーザー入射率 N_a/N_t を算出し、この値が最も大きい測定地点から求めた結果をその voxel の値として採用した。 N_a は各 voxel への実際の地上レーザー入射数、 N_t は測定装置と対象 voxel の間に葉や枝などの遮蔽物がない場合の入射数である。外周部の voxel であっても、樹冠上部などでは手前の葉による遮蔽でレーザーが入射しにくくなる。レーザーの入射数が少なくなると LAD の推定精度が低下する⁴⁾¹⁹⁾。そこで地上レーザー入射率が0.9より小さい場合は、voxel A、Bには分類せずに、地上測定では密度を推定することが難しい voxel であるとして区別して扱った (voxel C, Fig. 13)。LAD 算出の際の葉の角度は、方位角は一律とし、傾斜角は下條らによるケヤキの実測結果²⁰⁾の平均値を全ての voxel で用いた。外周部の voxel を対象としており枝の影響は小さいと考え、葉の点と枝の点を区別せずに用いた。

6.1.3 voxel A と voxel B を判別する閾値の算出

ステップ2における LAD の閾値は次のように決定した。対象 voxel と航空機の間に葉や枝など障害物が存在せずレーザーが遮られることなく入射する voxel を用い、抽

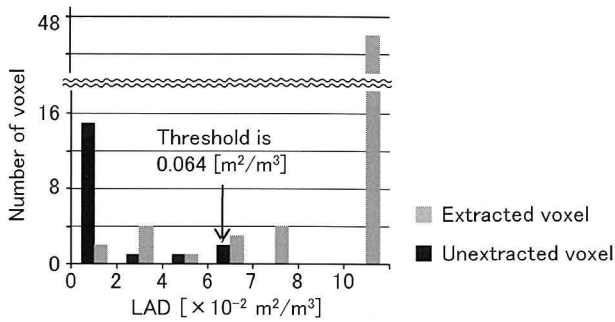


Fig. 14 Histogram of LAD for extracted and unextracted voxel.

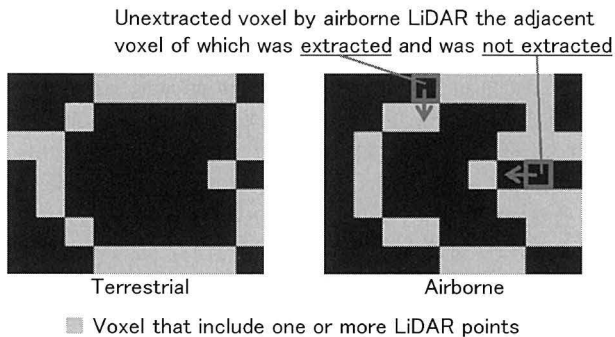


Fig. 15 Classification of unidentified voxels according to the adjacent voxel extraction.

出できた voxel とできなかった voxel について LAD のヒストグラムを作成した。Fig. 14 にコース 3 の結果を示す。抽出できなかった voxel の LAD の最大値を閾値とした。閾値は $0.064 \text{ m}^2/\text{m}^3$ であった。閾値は観測コースにより最大 $0.003 \text{ m}^2/\text{m}^3$ の差が生じたが、それによる分類結果への影響はなかったため、全ての観測コースのデータにコース 3 のデータから算出した閾値を用いた。抽出できなかった voxel が存在しても、隣の voxel が抽出できていれば、樹冠の再現性に対する誤差は voxel 1 つ分に収まる。特に、抽出できなかった voxel が voxel A であれば、上記の閾値からも分かる通り、樹冠の再現性に及ぼす影響は小さい。そこで次に、Fig. 15 に示すように航空機 LiDAR により抽出できなかった voxel について、その隣に点を含む voxel が存在するかを判定した。

6.2 結果と考察

Fig. 16 に地上型 LiDAR により抽出した外周部の voxel を、航空機 LiDAR により抽出できた voxel, voxel A, voxel B, voxel C, 隣の voxel が抽出できたかどうかで分類した結果を示す。樹冠上部へ向けて、地上測定でも密度を推定することが難しい voxel C の割合が増える。しかし、樹冠上部は航空機からのレーザーが入射しやすいため、抽出できなかったということは、voxel A のように葉が少ない voxel が多く存在すると考えられる。Fig. 12 に示すように樹冠下部では抽出率が 50% を下回る場合もあるが、レーザーが到達したとしても、葉が少ないため検知パルスを返さな

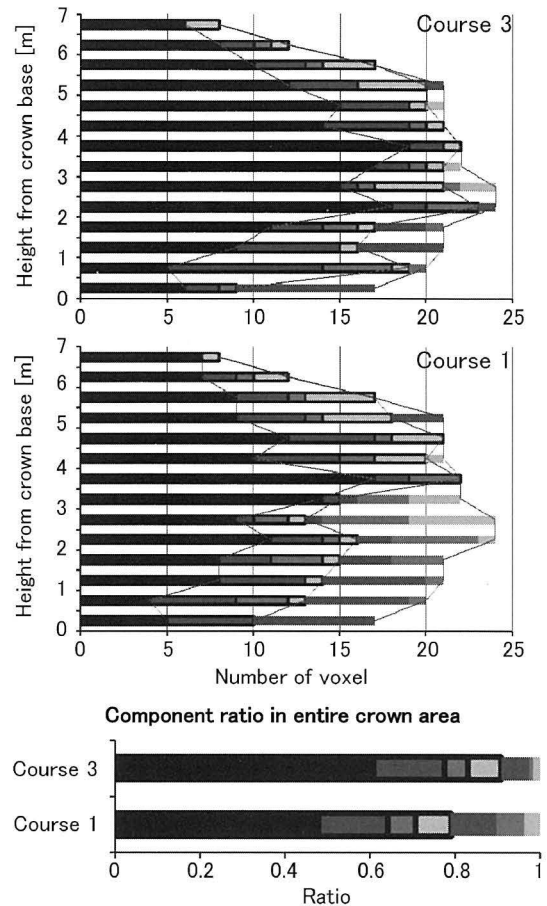


Fig. 16 Component ratio of the voxels extracted by terrestrial LiDAR.

い voxel A の割合が大きい。

最もレーザーの天頂角が小さく点密度が大きいコース 3 では、5.2 で示したように 60% の voxel が抽出可能である (Fig. 16 ■)。そして、葉が少ない voxel A (Fig. 16 ■) または隣の voxel が抽出できた voxel (Fig. 16 ■ ■ ■) を含めると、全体の 96% であった。また、特に樹冠による日射の吸収・透過に影響が大きいと考えられる樹冠中部から上部について見ると、抽出できた voxel と voxel A, voxel C のうち隣の voxel が抽出できたものだけで 92% に達した。以上から、天頂付近から高密度でレーザーが照射される条件であれば、航空機 LiDAR データが、1 m の空間スケールの voxel による樹冠外形の再現に適用できることが明らかになった。

コース 1 はコース 3 に比べて抽出できた voxel は少ないが、Fig. 16 に示すように樹冠上部では、隣の voxel が抽出できた voxel も含めた割合はコース 3 と同程度である。しかし樹冠下部では、コース 3 とは異なり、隣の voxel が抽出できていない割合が増加している。コース 1 では、抽出

できた voxel の割合と、隣の voxel が抽出できた voxel も含めた割合が、ともにコース 3 に比べて 12% 低かったことから、観測コースの直下と両端では精度の差は大きいと言える。

7. ま と め

航空機 LiDAR により都市空間における樹木の LAD 分布の情報を整備するための基礎として、樹冠を voxel で再現したときの樹冠形状の再現精度を検証した。はじめに、voxel 化により情報を得る基となる点群自体の空間精度を確認した。天頂付近から高密度でレーザーが照射される場合には、レーザーの遮蔽の影響が少ない樹冠上部においては、0.5 m の空間精度で樹冠の外周部の位置情報を取得できることが明らかとなった。樹冠下部であっても、1 m の空間精度であった。

樹冠の点群から 1 m × 1 m × 0.5 m の voxel により樹冠を再現した場合、天頂付近から高密度でレーザーが照射される条件であれば、実際の外周部の voxel のうち 60% を抽出することができた。抽出できなかった voxel の多くは、航空機からのレーザーが入射してもセンサが検知できる反射パルスを返さないほど葉密度が小さかった。そのように密度が小さい voxel と航空機 LiDAR により抽出できた voxel、隣の voxel が抽出できた voxel を合わせると、実際の外周部の voxel のうち 96% に達した。以上により、今回用いたデータが、1 m の空間スケールの voxel による樹冠形状の再現に有効であることが示された。ただし、観測コースの直下と両端では抽出精度に 10% 以上もの差が生じたため、1 つの観測コースによるデータ内であっても、樹冠領域の再現精度の差に注意する必要がある。

これらは、航空機 LiDAR による単木の形態情報の取得や林分構造の解析に有用な結果となり得る。今後は、冬季のデータを用いた枝の影響の解析や、樹冠を透過するレーザーに関する解析を通して点分布から樹冠内部構造の情報を抽出する方法について検討し、樹木の形態情報を整備していく予定である。

謝 辞：本研究における地上型 LiDAR 観測にはリーグルジャパンの協力を得た。ここに記して深謝の意を表する。

引用文献

- 1) T. Asawa, A. Hoyano and K. Nakaohkubo : Thermal design tool for outdoor spaces based on heat balance simulation using a 3D-CAD system, *Building and Environment*, 43, pp. 2112–2123, 2008.
- 2) 山村真司, 梅干野晃, 浅輪貴史 : 建築外部空間デザインの設計支援を目的とした熱収支・気流連成シミュレーション手法開発の基礎的検討, *日本建築学会計画系論文集*, 67 (560), pp. 73–80, 2002.

- 3) F. Hosoi and K. Omasa : 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 (12), pp. 3610–3618, 2006.
- 4) F. Hosoi and K. Omasa : 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 (12), pp. 3463–3473, 2007.
- 5) T. Takeda, H. Ogura, T. Sano, Y. Yone and Y. Fujimura : Estimating the plant area density of Japanese larch (*Larix kaempferi* Sarg.) plantation using a ground-based laser scanner, *Agricultural and Forest Meteorology*, 148, pp. 428–438, 2008.
- 6) Y. Wang, H. Weinacker and B. Koch : A LiDAR point cloud based procedure for vertical canopy structure analysis and 3D single tree modeling in forest, *Sensors*, 8, pp. 3938–3951, 2008.
- 7) Y. Song, M. Maki, J. Imanishi and Y. Morimoto : Voxel-based estimation of plant area density from airborne laser scanner data, *Proceedings of the ISPRS Workshop Laser Scanning*, Calgary, Canada, XXXVIII-5/W12, pp. 209–212, Aug. 2011.
- 8) 中井洋平, 細井文樹, 秋山幸秀, 大政謙次 : 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, *Eco-Engineering*, 21 (1), pp. 9–14, 2009.
- 9) W. Wagner, A. Ullrich, V. Ducic and T. Melzer : Gaussian decomposition and calibration of a novel small-footprint full-waveform digitising airborne laser scanner, *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 60, pp. 100–112, 2006.
- 10) 千田良道, 山下 悟, 村手直明, 都竹正志 : ヘリコプター搭載型波形記録式レーザー計測システムによる高品質データ, *日本写真測量学会平成 19 年度秋季学術講演会発表論文集*, pp. 199–202, Oct. 2007.
- 11) F. Hosoi, K. Nakabayashi and K. Omasa : 3-D modeling of tomato canopies using a high-resolution portable scanning lidar for extracting structural information, *Sensors*, 11 (2), pp. 2166–2174, 2011.
- 12) J. Côté, J. Widlowski, R. A. Fournier and M. M. Verstraete : The structural and radiative consistency of three-dimensional tree reconstructions from terrestrial lidar, *Remote Sensing of Environment*, 113, pp. 1067–1081, 2009.
- 13) J. Côté, J. Widlowski, R. A. Fournier and R. Egli : An architectural model of trees to estimate forest structural attributes using terrestrial lidar, *Environmental Modelling & Software*, 26, pp. 761–777, 2011.
- 14) L. Chasmera, C. Hopkinsonb and P. Treitz : Assessing the three-dimensional frequency distribution of airborne and ground-based LiDAR data for red pine and mixed deciduous forest plots, *ISPRS International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Freiburg, Germany, XXXVI-8/W2, pp. 66–70, Oct. 2004.
- 15) 伊藤拓弥, 松英恵吾, 内藤健司 : 航空機 LiDAR による樹冠の再現性, *日本森林学会誌*, 91 (5), pp. 326–334, 2009.
- 16) A. Kato, M. Moskal, P. Schiess, E. Swanson, D. Calhoun and W. Stuetzle : Capturing tree crown formation through implicit surface reconstruction using airborne lidar data, *Remote Sensing of Environment*, 113, pp. 1148–1162, 2009.

- 17) M. Béland, J. Widlowski, R. A. Fournier, J. Côté and M. M. Verstraete : Estimating leaf area distribution in savanna trees from terrestrial LiDAR measurements, *Agricultural and Forest Meteorology*, 151 (9), pp. 1252-1266, 2011.
- 18) S. Durrieu, T. Allouis, R. Fournier, C. Vega and L. Albrech : Spatial quantification of vegetation density from terrestrial laser scanner data for characterization of 3D forest structure at plot level, *Proceedings of SilviLaser 2008*, Edinburgh, UK, pp. 325-334, Sep. 2008.
- 19) F. Hosoi, Y. Nakai and K. Omasa : 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 (5), pp. 2215-2223, 2010.
- 20) 下條正貴, 吉田伸治, 大岡龍三 : 街路樹の樹冠についての工学的深さ, 葉面積密度, 入射角度特性の実測, 日本建築学会 2003 年度大会 (東海) 学術講演梗概集, D-1 環境工学 I, pp. 609-610, Sep. 2003.

〔著者紹介〕

●押尾 晴樹 (オシオ ハルキ)



2009 年東京工業大学理学部地球惑星科学科卒業。2011 年東京工業大学大学院総合理工学研究科環境理工学創造専攻修士課程修了。現在, 同専攻博士後期課程, 日本学術振興会特別研究員 DC。所属学会: 日本リモートセンシング学会, 日本建築学会, 日本赤外線学会, 日本ヒートアイランド学会。

ド学会。

E-mail : oshio.h.aa@m.titech.ac.jp

●浅輪 貴史 (アサワ タカシ)



2003 年東京工業大学大学院博士課程修了, 博士 (工学)。東京工業大学助手, エアランドエー株式会社主任研究員を経て, 現在, 東京工業大学大学院総合理工学研究科環境理工学創造専攻准教授。研究分野及び研究歴: 都市・建築環境工学, ヒートアイランド, 都市・建築の熱環境シミュレーションツールの構築, CAD・GIS, 微気候・住環境評価, LiDAR を用いた都市環境情報の解析等。主な所属学会: 日本リモートセンシング学会, 日本建築学会, 日本ヒートアイランド学会, 空気調和・衛生工学会他。

ド学会。

E-mail : asawa.t.aa@m.titech.ac.jp

●梅干野 晃 (ホヤノ アキラ)



1976 年東京工業大学大学院博士課程修了, 工学博士。九州大学助教授, 東京工業大学助教授, 同教授を経て, 現在, 放送大学教授, 東京工業大学連携教授。専門は都市・建築環境工学, 環境のリモートセンシング, 都市・建築緑化, パッシブソーラーシステムなど。最近, 街並みの CAD を

入力することでヒートアイランドや街中の熱環境が予測・評価できる設計支援のためのシミュレーションツールの開発や屋上緑化, 蒸発冷却舗装, 蒸発冷却壁体, 息をする壁の開発などに取り組んでいる。主な所属学会: 日本リモートセンシング学会元会長, 日本赤外線学会会長, 日本建築学会, 日本ヒートアイランド学会会長他。

E-mail : hoyano@ouj.ac.jp

●宮坂 聡 (ミヤサカ サトシ)

1980 年名古屋大学理学部地球科学科卒業。1982 年同大学院博士前期課程修了。1982 年中日本航空株式会社入社, 現在に至る。主に, 航空機リモートセンシング, 航空 LiDAR 業務に携わる。所属学会: 日本リモートセンシング学会, 日本写真測量学会。