

## TLS 点群データを用いた 3D 樹木モデルの構築と応用

Application of 3D tree modeling using point cloud data by terrestrial laser scanner

熊崎 理仁\*

Rihito KUMAZAKI

**Abstract:** Constructing 3D models for trees such as those found in Japanese gardens, in which many species exist, requires the generation of tree shapes that combine the characteristics of the tree's species and natural diversity. Therefore, this study proposes a method for constructing a 3D tree model with highly-accurate tree shape reproducibility from tree point cloud data acquired by TLS. As a method, we attempted to construct a 3D tree model using the TreeQSM, which is open source for TLS-QSM method. However, in TreeQSM, since processing is based on the assumption that the tree point cloud consists of data related to trunks and branches, measuring trees in which leaves have fallen is recommended. To solve this problem, we proposed an efficient classification process that mainly uses thresholds for deviation and reflectance, which are the adjunct data of the object that can be acquired by laser measurement. Furthermore, to verify accuracy of the model, position coordinates from the constructed 3D tree model were extracted. The extracted coordinates were compared with the those of the tree point cloud data to clarify the extent to which the 3D tree model was constructed from the tree point cloud data. As a result, the 3D tree model was constructed within the standard deviation of 0.016 m from the tree point cloud data. Therefore, the reproducibility of the tree shape by the TLS-QSM method was also effective in terms of accuracy.

**Keywords:** Japanese Garden, tree point cloud data, 3D tree model, TLS-QSM method, reproducibility

**キーワード:** 日本庭園, 樹木点群, 3D 樹木モデル, TLS-QSM 法, 再現性

## 1. はじめに

日本庭園をはじめとする造園空間には様々な空間構成要素が存在する。それらの中でも庭園樹木は環境のおよび景観的な側面からも必要不可欠な要素であり、多くの意匠等を有する重要な要素として扱われる。さらに、庭園樹木は街路樹や公園樹木などの造園空間の樹木とは異なり、観賞上の価値としての重要性があることから<sup>1)2)</sup>、庭園樹木に対して樹形を正確に記録する手段が確立すれば、庭園の維持管理のための重要な手段となると考えられる。

近年、レーザ計測技術を使用した樹木計測の有効性を検証した事例が数多く存在する。中でも、地上型 3D レーザスキャナ (Terrestrial Laser Scanner: 以下, TLS) は、近年の軽量化に伴う可搬性から、自然空間での計測が容易である。このことから、樹木が乱立する自然空間においても、TLS の計測からは、単木に対して詳細な樹形情報を取得することが有効的である<sup>3)</sup>。本研究では、庭園樹木の形状情報の記録を残すため、樹木を構成する点群データ (以下, 樹木点群) から詳細な 3D モデリングを行う手法を提案し、TLS-QSM 法を主軸とした検討を行った。TLS-QSM 法は TLS によって取得された樹木点群から、Quantitative Structural Model (以下, QSM) を構築することで、計測された樹木の体積、森林バイオマス量を推定する有効な手法として確立されている<sup>4)</sup>。また、樹木構造を精密に推定するための有効なツールであることが実証されていることから<sup>5)</sup>、樹形の再現性の高い 3D 樹木モデルの作成に応用できると考えた。しかし、TLS-QSM 法による処理は、葉となる点群が完全に削除されていない場合、体積推定の用途では適用可能であるが、樹形再現の用途では精度的な問題がある。このことから、樹形再現性を目的とした場合、樹木に葉のない状況での計測が必要となり、特に、落葉しない常緑樹に対しては本手法を用いた精度の担保が困難である。

日本庭園では落葉樹のみならず常緑樹を含む樹木が混植されていることが多く、庭園樹木の樹形記録に際して樹種を限定することなく、葉点群を抽出する手法を提案し、より精度を高める手法

表-1 3D 樹木モデル構築までの工程

	処理時間
(1) 計測調査	
① 清澄庭園でのデータ取得	14.0 時間
② 取得データの合成	0.5 時間
(2) 葉点群, 幹・枝点群の分離	
③ 偏差の閾値による分離	1.5 時間
④ 反射率の閾値による分離	1.0 時間
(3) 樹木点群を単木ごとに分類抽出	
⑤ 「Computree」を用いたセグメンテーション処理	3.0 時間
(4) 分離しきれなかった葉点群 (ノイズ) の処理	
⑥ Statistical Outlier Removal (SOR)・Moving Least Square Smoothing (MLS) によるノイズ処理	1.5 時間
(5) 3D 樹木モデルの構築	
⑦ TreeQSM による処理	5.0 時間

改善が求められる。そこで、計測から得られる点群の付属情報の反射率 (Reflectance) および波形の偏差 (Deviation) を利用することにより、葉点群の削除のための手法を提案する。その後、これまで樹形再現の用途では、樹種が限定されていた TLS-QSM 法に適用させ、日本庭園における庭園樹木の 3D モデリング化と精度検証による再現性を確認することで、重要な記録として残していく手段となることを示す。

## 2. 方法

計測から 3D 樹木モデルの構築までの工程と処理時間を表-1 に示す。表-1 の処理時間であるが、「②取得データの合成」以降は PC 上での処理工程となるが、3.20GHz (8 コア 16 スレッド) の CPU、256GB の RAM を搭載した PC 環境で処理を行った計測時間である。本研究では、清澄庭園 (東京都江東区) での計測調査 (2019 年 5 月 29 日~5 月 31 日) によって得られたデータか

\*公益社団法人 日本造園学会

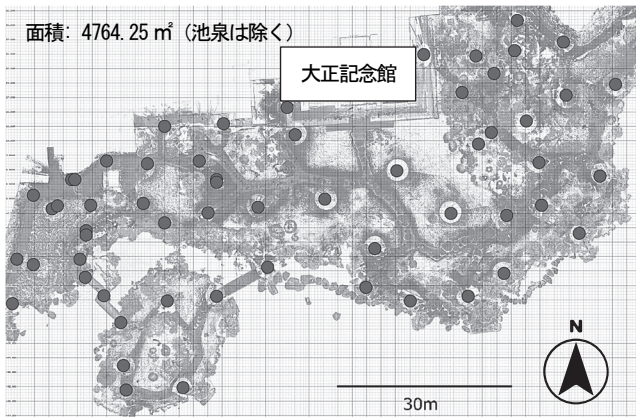


図-1 TLS の設置箇所および対象エリア

ら、3D 樹木モデルの構築方法を提案する。なお、3D 樹木モデルの構築対象エリアは大正記念館付近とした。使用した TLS は RIEGL 社製の VZ-400i であるが、計測設定として、最長測定距離が 250m となるパルス繰り返しレート (PRR) 1.2MHz、有効測定レート 500,000 (測定/秒) とした。また、測定分解能の設定値を縦横共に 0.04° としたが、同仕様の機器を用いた樹木の計測実験にて、対角 2 地点 (樹木距離 10m) からの計測を行うことで、樹高 10m のケヤキに対し、80-90% の形態情報が得られていることから本設定値とした。なお、本器機は 5mm 以内の測定精度が担保されている。本器機を使用した計測調査は、1 箇所の計測 (スキヤニング) を 35~40 秒で完了でき、移動を含め全 59 箇所の計測をおよそ 14 時間で完了した。取得した対象エリアの地表データおよび TLS の設置箇所を図-1 に示す。

表-1 に示した工程において、もっとも重要となるのが、「(2) 葉点群、幹・枝点群の分離」である。本研究では、波形の偏差 (以下、偏差) と反射率 (単位 dB: デシベル) を利用することが両点群の分離に有効と考えた。まず、TLS によって掃射されたレーザの波形は、レーザが当たる対象物によって受信される波形 (エコーパルス) が著しく変化する。これらの波形の状態を偏差として数値化された概念が、パルス波形偏差 (Pulse Shape Deviation) である<sup>8)</sup>。偏差はレーザの入射角が浅いほど値が大きくなる傾向があり、樹木の葉の並びは複雑な凹凸形状を持つため、幹・枝点群と比較し、相対的に葉点群は値が高い傾向がある。そこで、一般的にノイズ処理に用いる偏差の設定値は 20~30 であるが、樹木点群に対し、より 0 の値に近い極めて高い精度のエコーパルスのみを抽出することで、葉点群を削除する。次に、レーザ計測によって得られる付随情報の受光強度値 (Amplitude)<sup>9)</sup> には、葉点群と幹・枝点群では差異があることが分かっており、分離処理への利用が有効である<sup>9)</sup>。しかし、受光強度は同対象物に対し、距離が遠くなるにつれ値が減少する性質を持ち、より正確な分離処理を行うため、受光強度を距離に応じて校正を加えた反射率<sup>8)</sup> (単位 dB: デシベル) を利用することが有効と考えた。そこで、樹木点群から葉点群と幹・枝点群を手動で抽出し、両点群の偏差および反射率の傾向を把握することで、分離に有効的な閾値を算出する。その後、閾値によって抽出された幹・枝点群に対し、セグメンテーション処理による単木ごとのデータ化および、閾値によって取り除けなかった葉点群に対するノイズ処理を経て、TLS-QSM 法による 3D 樹木モデルの構築をおこなう。

さらに本研究では、構築された 3D 樹木モデルに対し精度検証をおこなうが、QSM を構成するのは、樹木点群の根元から枝の先端まで各部分に生成される円筒状モデル (Cylindrical Tree Model) である。その仕組みとして、幹・枝点群を各セグメントに分割し、各セグメントの半径および方向を局所的に近似していくことで、

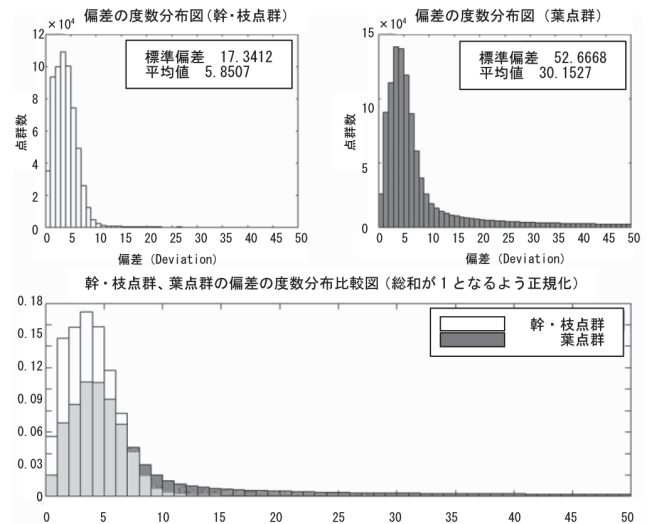


図-2 偏差 (Deviation) の度数分布図

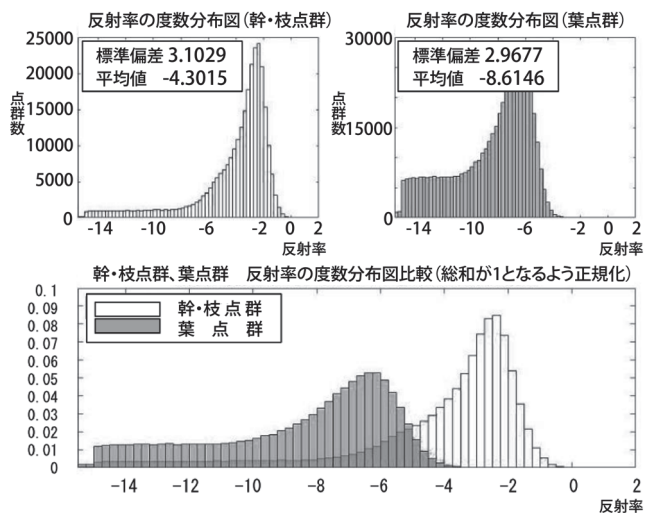


図-3 反射率 (Reflectance) の度数分布図 (樹種: クスノキ)

幹および枝の形状を、連続したシリンダとして再構築するものである。よって、TLS-QSM 法は樹木点群から推定的な手法によって構築される 3D 樹木モデルであるため、どれほどの再現性を有しているかを把握する必要がある。そこで、樹木点群と構築される 3D 樹木モデルとの両距離を算出する精度検証を行うことで、再現性においても有効性を示す。

### 3. 結果

#### (1) 偏差および反射率の閾値による分離処理

偏差における幹・枝点群と葉点群をそれぞれ抽出し偏差の値を解析した結果、幹・枝点群の偏差は 0~6 あたりに分布していることが判明した (図-2)。このことから、偏差では 5 以下の値を持つ点群が検出されるように閾値を設け抽出をおこなう。次に、反射率にて葉点群と幹・枝点群をそれぞれ抽出し度数分布による比較を行う。澄庭園内には、樹木調査より合計 40 科目 88 種類の樹木が存在し、対象エリアでは、12 科目 15 種の樹木が取得データより確認された。そこで、各樹種に解析をした結果、ほぼ全ての樹木にて -7dB ~ -5dB 辺りで両点群の反射率が分岐していることが判明した。図-3 に分岐を示す代表例として、クスノキの反射率の度数分布図を、表-2 に、葉が計測時に確認されなかったサルスベリを除き、各樹木の葉点群と幹点群の反射率値の平均値を示す。この解析結果から、全ての庭木から幹・枝点群を抽出されるように -5.5dB 以上の点群が抽出されるように閾値を設定した。偏差お

表-2 各樹木の葉点群、幹・枝点群の反射率の平均値

樹種	(単位: dB)	幹点群	葉点群
ウメ		-5.89	-8.23
キンモクセイ		-5.99	-8.44
クスノキ		-4.30	-8.61
クロマツ		-4.61	-10.52
クロガネモチ		-4.54	-8.56
ザクロ		-5.11	-8.45
スダジイ		-5.76	-7.86
タブノキ		-4.53	-9.04
イロハカエデ		-6.12	-9.61
ハゼノキ		-4.13	-9.06
ハナミズキ		-4.33	-6.18
モチノキ		-6.04	-7.97
モッコク		-5.70	-8.84
ヤブツバキ		-4.43	-9.50

※ 偏差の閾値(設定値5)による処理後のデータ



図-4 偏差および反射率による処理結果

よび反射率の閾値による幹・枝点群の抽出結果を図-4に示す。

### (2) TLS-QSM 法による 3D 樹木モデルの構築

本研究では、TLS-QSM 法のツールとして、タンペレ工科大学が公開しているオープンソース「TreeQSM」を用いた<sup>10)11)</sup>。しかしながら、TreeQSM は入力する樹木点群が単木として構成されていること想定しているため、樹木点群を単木ごとに識別(ラベル化)するセグメンテーション処理を実行する必要がある。そこで、樹木点群の処理に特化したオープンソースである「Computree」<sup>12)</sup>を使用した。また、偏差と反射率の閾値処理では、葉点群の取りこぼしが確認されており、このような状態で TreeQSM による構築処理を行った場合、形状精度に影響が懸念される。そこで、Statistical Outlier Removal (SOR)<sup>13)</sup>と Moving Least Square Smoothing (MLS)<sup>13)</sup>による葉点群に対するノイズ処理を試みた。

以上の処理を経て、葉点群が取り除かれた単木データに対し、TLS-QSM 法を実施した。単木に対する結果の一部を図-5に、対象エリア全体を図-6に示す。

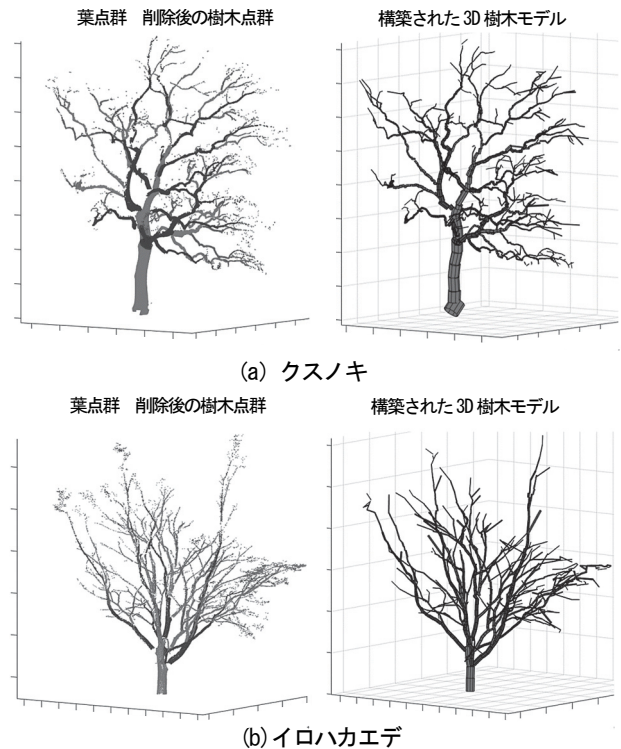


図-5 TreeQSM によって構築された 3D 樹木モデル

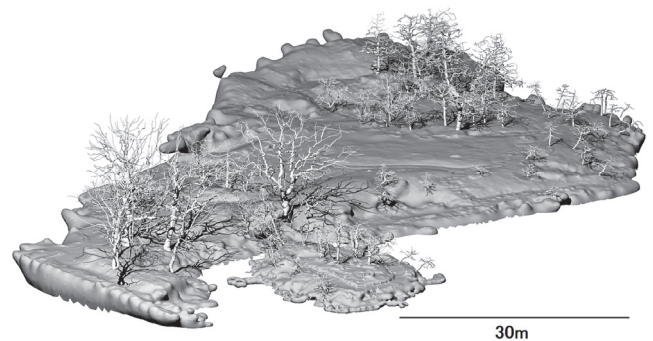


図-6 対象エリア全体の 3D 樹木モデルの構築図

### (3) 3D 樹木モデルの精度検証

構築された 3D 樹木モデル(QSM)と、基となった樹木点群との再現性の検証をおこなった。手法として、TreeQSM によって構築された 3D 樹木モデルから、3次元座標のみを抽出する。その後、構築の基となった樹木点群と照合し、3D 樹木モデルの座標を検索質間点(クエリ点)<sup>14)</sup>とし、クエリ点から、基となった樹木点群に対し指定した近隣点を検出することで(Knn:最近傍隣接点探索)<sup>14)</sup>、樹木点群から構築される 3D 樹木モデルとの距離を明らかにした。なお、クエリ点からの最近傍探索値は5とした。

精度検証の対象とする樹木は、樹高 17.66m のクスノキである。クスノキを対象とした理由として、本手法による精度検証は、樹高と幹周が大きい樹木ほど、樹高と幹周が小さい樹木の樹木点群と比較し、樹木点群から構築された円筒モデルは相対的に点群からの距離が大きくなる。そのため、精度が悪くなる傾向があり、対象エリア内で最も樹高が大きいクスノキに対し、正確な樹形の記録を行う手段として有効性を示すため、精度検証が必要である。

結果、樹木全体で標準偏差 0.016m、樹枝部で標準偏差 0.007m の範囲にて 3D 樹木モデルが構築されることが明らかとなった(図-7)。この結果に対し、同じく樹木点群から推定的な手法で 3D 樹木モデルを構築する AdTree 法<sup>15)</sup>による精度検証では、枝部の樹

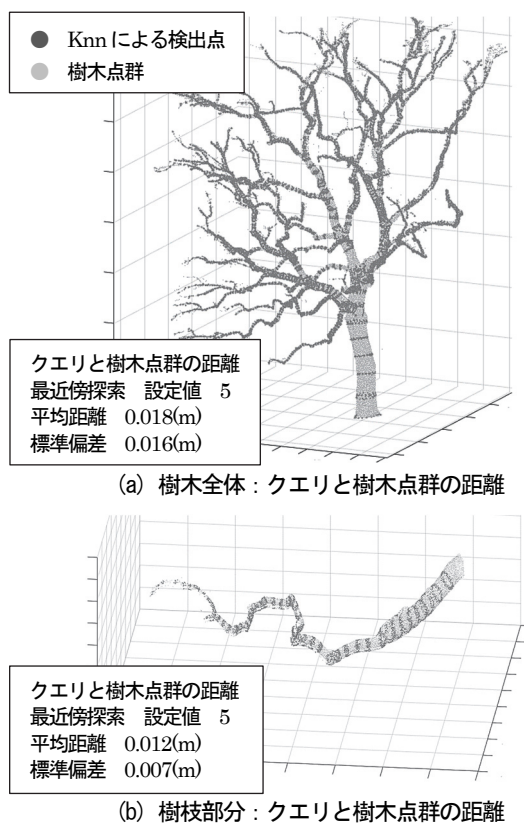


図-7 3D 樹木モデルの再現性の精度検証

木点群と 3D 樹木モデルとの平均距離が 0.1m、標準偏差が 0.08m と算出されている<sup>16)</sup>。AdTree 法が TLS-QSM 法と比較し、より樹形再現性に特化した手法<sup>16)</sup>であることを考慮に入れると、本研究で構築された 3D 樹木モデルは十分な精度を有していると考えられる。

#### (4) 総括

本研究では、TLS-QSM 法による 3D 樹木モデルの構築を試みたが、正確な樹形構築のために、取得された樹木点群に対し、幹・枝点群の抽出が必要であった。この問題に対し、偏差および反射率の解析により閾値を設け、両点群の分離を可能としたことで、葉のある状態の樹木に対しても樹形再現性を担保した 3D 樹木モデルの構築が可能となった。また、図-6 の結果より、普段は葉の繁茂によって確認できない樹形を視覚的に提供することも可能とした。これにより、日本庭園における正確な樹形の記録を行う手段として有効性を示すことができたと思われる。

#### 4. 考察

日本庭園は、成長変化する植物を主たる構成要素としている空間であり、庭園樹木は日本庭園の特質を決定づける重要な景観構成要素でありながら、庭園内の植物要素の保存が最も困難であり、日本庭園の文化的価値としての側面を樹木管理の不備によって喪失される問題があった。特に、庭園樹木には主庭や池畔(ちはん)など注視密度の高い空間における景観木となるものには、マツの緑摘みのように一葉一葉のレベルで手入れの精度や樹形の保存が工夫される必要性が求められている<sup>3)</sup>。また、歴史的庭園や近代庭園において、失われた本来の日本庭園の姿形を復元する取り組みにて、植栽の復元では原始古代から近代にいたるまで、日本庭園の樹形を記録した資料というものは少なく、古写真や絵図などから当時の植栽のありかたを考察している。このことを踏まえると、本研究で提案した 3D 樹木モデルは、AdTree 法によって算出され

た枝部の標準偏差 0.08m の構築精度と比較し、標準偏差 0.007m という精度結果から、十分な樹形再現性を可能とした。さらに、樹高 17.66m の樹木に対しても、本手法の 3D 樹木モデル構築を行うことで、標準偏差 0.016m の構築精度も明らかとした。よって、現存の樹木を原形で記録し、樹形を維持していくことへの重要な資料としての役割に十分期待することができる。

最後に、TreeQSM 法で構築される 3D 樹木モデルは、単に樹形再現という側面に留まることなく、樹木の全体積・主幹体積・枝体積、樹高、主幹の長さ・枝の長さなどの付属情報を得ることが可能である。これは、「i-Construction」<sup>17)</sup>による、建設情報基盤として設計から施工に至る全プロセスのシームレス化に貢献し、「形状の見える化」によって生産性の向上に大きな役割を果たしている BIM・CIM<sup>18)</sup>と同様の働きが可能と考えられる。このことから、今後、本手法にて構築した 3D 樹木モデルは、造園業界にて樹木の維持管理における生産性向上に大いに期待することができる。

#### 補注及び引用文献

- 1) ICOMOS-International Federation of Library Associations and Institutions (IFLA) International Committee for Historic Gardens (1981): Florence Charter on Historic Gardens, 1-3
- 2) 林レイ子 (1954): 庭園の芸術性について: 造園雑誌 19, 1-3
- 3) 東京都建設局公園緑地部 社団法人日本造園学会 (1989): 東京都における文化財庭園の保存・復元・管理等に関する調査報告書, 21-22
- 4) Bienert, A., Georgi, L., Kunz, M., Maas, H., Oheimb, V.G. (2018): Comparison and combination of mobile and terrestrial laser scanning for natural forest inventories: Forest, 9, 395
- 5) Tanago, J. G., Lau, A., Bartholomeus, H., Herold, M., Avitabile, V., Raunonen, P., Martius, C., Goodman, R. C., Disney, M., Manuri, S., Burt, A., Calters, K. (2018): Estimation of above-ground biomass of large tropical trees with terrestrial LiDAR: MEE, 9(2), 223-234
- 6) Markku, Å., Raunonen, P., Kaasalainen, M., Casella, E. (2015): Analysis of geometric primitives in quantitative structure models of tree stem: Remote Sensing, 7(4), 4581-4603
- 7) 本田友里香・浅輪貴史・梅干野晃・押野晴樹 (2011): 地上型近赤外線レーザー・スキャナによる樹木の三次元形態情報の取得と分析: 第 21 回 日本赤外線学会研究発表会 (ポスター発表)
- 8) RIEGL Laser Measurement Systems GmbH (2017): LAS Extrabytes Implementation in RIEGL Software, 4-7
- 9) 斎藤和人・増田宏・平岡裕一郎・松下通也・高橋誠 (2016): 三次元大規模点群に基づく樹木の形状再構成 第 3 報: 精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, 489-490.
- 10) Tampere University: InverseTampere TreeQSM ホームページ: <<https://github.com/InverseTampere/TreeQSM>>, 更新日不明, 2019.1.8 参照
- 11) Raunonen, P. (2017): TreeQSM Quantitative Structure Models of Single Trees from Laser Scanner Data
- 12) Computree group: Computree Forest inventory with Lidar ホームページ: <<http://computree.onf.fr/?lang=en>>, 更新日不明, 2018.11.7 参照
- 13) Khawaldeh, S., Aleef, T.A., Pervaiz, U., Minh, V.H., Hagos, Y.B. (2017): Complete End-to-End Low Cost Solution to a 3D Scanning System with Integrated Turntable: International Journal of Computer Science & Information Technology (IJCSIT) 9, 39-55
- 14) 和田俊和 (2009): 最近傍探索の理論とアルゴリズム: 情報処理学会研究報告 13, 1-12
- 15) Du, S., Lindenbergh, R., Ledoux, H., Stoter, J., Nan, L. (2019): AdTree: Accurate, Detailed, and Automatic Modelling of Laser-Scanned Trees: Remote Sensing, 11(18), 2074
- 16) Fan, G., Nan, L., Chen, F., Dong, Y., Wang, Z., Li, H., Chen, D. (2020): A New Quantitative Approach to Tree Attributes Estimation Based on LiDAR Point Clouds: Remote Sensing, 12(11), 1779
- 17) 国土交通省:i-Construction 委員会 報告書 ホームページ: <<http://www.mlit.go.jp/tec/i-construction/index.html>>, 更新日不明, 2019.10.11 参照
- 18) 高橋暁 (2016): 建築ストック活用に向けた建築物の情報マネジメント 技術に関する研究と課題: BRI-H28 テキスト, 21-28

(2020.9.26受付, 2021.3.30受理)