

氏 名	熊 崎 理 仁
学位 (専攻分野の名称)	博 士 (造園学)
学位記番号	甲 第 785 号
学位授与の日付	令和 2 年 3 月 20 日
学位論文題目	TLS 点群データを用いた 3D 樹木モデルの構築と応用
論文審査委員	主査 教 授・博士 (工学) 山 崎 元 也 教 授・博士 (工学) 國 井 洋 一 教 授・博士 (農学) 鈴 木 貢 次 郎 准 教 授・博士 (造園学) 栗 野 隆 農 学 博 士 鈴 木 雅 和*

論文内容の要旨

第 1 章：序論

(1) 研究背景と目的

1982 年 12 月 15 日のイコモスにおいて採択された、歴史的庭園の保護に関する憲章を起草した「フィレンツェ歴史的庭園憲章 (The Florence Charter –Historical Gardens-)」では、「歴史的庭園とは、建造物と植物からなる複合物であり、歴史的・芸術的観点から公衆の関心を引くものであり、「生きている記念物」とみなされる」と記述されている。このことから、文化的価値を有する日本の歴史的庭園においても、後世へ遺産として残していくための保存や、創始期の庭園景観や地割の復元のための調査研究がおこなわれてきた。近年まで、日本庭園の保存への取り組みは、主に近代以前の歴史的庭園が主にその対象であったが、2006 年 9 月 30 日に取りまとめられた「近代ランドスケープ遺産の保存に関する提言」によって、近代以降の日本庭園に対しても、「目録の推進」「調査研究の推進」など保存に向けた検討の包括的指針に関する試案が示された。このことから、今後、歴史的庭園から近代庭園に至るまで、保存や復元のための調査研究の重要性が高まっていると考えられ、日本庭園の構成要素に対して情報を得るための、あらゆる有効的手段を検討する必要性が高まっている。

日本庭園の中でも、特に保存へ向けた調査研究の中で、情報を得る重要性が高い構成要素が、日本庭園に植栽されている樹木 (以下、庭園樹木) である。庭園樹木には景観的構成要素の重要性と、遷移による経年的変化により、庭園景観が創始され始めた頃から変化していくことによる「成長する芸術」としての特質を有している。このことは、文化的価値としての保存の重要性がある日本庭園に植栽されている庭園樹木が、日本庭園の構造的かつ文化的特質に大きく影響していると考えられ、樹木個々にも文化的価値が見出されると考える。さらに、庭園維持に関して主要な庭園材料となる樹木は、長期にわたって周期的に更新するこ

*筑波大学 名誉教授

とが求められており、庭園樹木を保存していくことが、その時代の樹木によって現出される庭園の姿形を保存していくことへと繋がっていくと考えられる。

(2) 研究方法

庭園樹木の情報の記録の中で、これまでの調査研究で記録されてこなかったものとして、正確な樹形情報である。創始期における庭園植栽について、その復元を試みた既往研究は多く存在するが、図面資料や画像資料、文献調査、絵巻による植栽描写などの考察によるもので、当時の樹形までを記録した資料までは存在しない。このことから、過去の日本庭園の植栽による景観への復元は、考察的な試みとなっている。そこで、樹形に対して正確な情報を残す手段として、情報通信技術(ICT : Information and Communication Technology)の利用による有効性を検証する。また本研究では、ICTの中でも地上型 3D レーザスキャナ (Terrestrial Laser Scanner 以下、TLS) による計測を日本庭園で実施し、庭園樹木の樹形情報を取得するための有効性を考察することとした。

さらに、広島市・長崎市に存在する原爆被爆樹木に対しても、本手法による詳細な樹形情報を取得するための手段として TLS による応用をおこなった。原爆被爆樹木は、広義には原爆にさらされたすべての樹木であり、「生きた」被爆遺産として、庭園樹木と同様に文化的価値を有する樹木としての保存への意識が高まっている。しかしながら、被爆樹木が存在する広島市・長崎市の両都市では、老木化や病気による枯死の恐れが出ているため、早急に現在の被爆樹木の姿形を正確に記録する必要性が高い。

以上のことから、TLS による樹形情報を 3 次元的に取得し、庭園樹木および原爆被爆樹木の保存へ向けた調査の中で、TLS を用いた計測で取得されるデータの中でも、樹木の 3 次元点群データ (以下、樹木点群) から、樹形情報の記録と保存に向けた検討をおこなう。

(3) 研究手法

既往研究にて、樹木に対してレーザ計測技術を用いた解析事例は少なく、その中でも、単木の樹形までを詳細に把握する手段を考察した研究事例はさらに少ない。その理由として、樹木は幾何学的形状の複雑さを有しており、データ上にて解析処理の対象とする上で障害が大きいことが挙げられる。そのため、樹木点群から幹・枝などの特定部位の抽出による樹形を把握するための処理および可視化など、必要とされる樹木情報の取得が非常に困難となっていた。

以上のことから、本研究では樹木点群の解析手法を検討する中でも、樹木点群から高精度に樹形の再現性を持つ 3D 樹木モデルを構築する手法を提案する。さらに、3D 樹木モデルの構築には、樹種の特徴と自然な多様性を兼ね備えた樹形の生成を、日本庭園などの多数の樹木を用いる場では必要とされることから、樹木が持つ固有の樹形までを復元することに焦点を当て、日本庭園における庭園樹木および被爆樹木の 3D 樹木モデルの重要性を考察した。

(4) 研究の特色と論文構成

本論文は、第1章から第6章までの章立てで構成される。第1章では、日本庭園に存在する庭園樹木が文化的価値を持つことを背景に、TLSを利用した庭園樹木の保存への有効性の検証が求められることを述べた。さらに、「生きた」被爆遺産としての文化的価値を持つ被爆樹木の枯死への危機感から、早急にTLSによる3次元情報として記録する重要性が高まっていることを述べた。以上のことから、TLSを用いた樹形情報の調査研究を進めることは、日本庭園の樹木によって現出される現代の庭園の姿形と、損失の危険性が高く、生態学的にも重要な被爆樹木の保存に向けた、画期的な研究となると期待される。

第2章 樹木に対する3次元計測手法の整理

数ある3次元計測技術の中でも、本研究で用いるTLSでの計測が、樹木の3次元情報を得る最適な手段であることを考察する。そのために、樹木に対する3次元情報を取得することが可能な計測方法を整理することで、これらの手法を用いた樹木計測から見えてくる欠点を把握し、TLSの樹木計測の適正を明らかにする。

第3章 日本庭園を対象とした3D樹木モデルの構築

本論文の研究内容と考察内容の中心的な位置づけの章であり、清澄庭園（東京都江東区）を対象としたTLSでの取得データを用い、庭園樹木の詳細な3D樹木モデルの構築を試みる。特に、本研究では計測から得られる樹木点群の反射率(Reflectance)および偏差(Deviation)の情報を利用することで、TLS-QSM法を主軸とした3Dモデリングを実施する。さらに、日本庭園の多様な樹種が配植された空間においても、樹種を限定せず本手法を適用させる。

第4章 原爆被爆樹木の3D樹木モデルの構築への応用

第3章で示したTLS-QSM法を主軸とした3D樹木モデルの構築手法を被爆樹木に対して応用をおこなう。特に、被爆樹木にみられる特有の樹形の再現のために、第3章とは異なる3D樹木モデルの構築手法を提案し、さらに、3D樹木モデルより被爆樹木の爆心地への傾斜角度、傾斜方位を効率的に算出するための応用をおこなう。

第5章 樹木点群および3D樹木モデルの精度検証

TLSを用いた樹木計測にて、対象樹木と取得される樹木点群の樹形の精度検証をおこなう。また、TLSによる樹木計測にて取得された樹木点群を、TLS-QSM法へ適用する場合に、処理が可能な範囲の樹高を検証する。さらに、TLS-QSM法にて構築した3D樹木モデルに対しても、構築の基となった樹木点群との精度検証をおこなうことで、精度面においても3D樹木モデルの樹形の再現性が保証されていることを明らかにする。

第6章 本研究の成果

本研究による3D樹木モデルの構築手法による成果を述べるにあたって、「日本庭園の保存と復元に向けた保存手法としての重要性」と「被爆樹木の3D樹木モデルの意義」について考察する。さらに、建築・土木業界での「i-Construction」による生産改革が、造園業界で

は3D 樹木モデルの活用によって貢献が可能となることを考察する。

第2章 樹木に対する3次元計測手法の整理

(1) 日本庭園での測量による記録の背景

日本庭園での測量は、昭和9年(1934)の室戸台風の庭園被害を契機に、庭園の地割構成を平面図で図化し、復旧のための手立てとしたことから普及した。以後、庭園の図化を目的とした測量手法として平板測量が長らく用いられ、庭園での実測による記録は日本庭園の文化的価値の重要性から、その必要性は高いと言える。しかし、平板測量では樹木情報の記録は極めて限定的なものであり、3次元的な測量手法で樹木情報を得ることができれば、記録として残せる樹木情報は各段に多くなると考えられる。このことから、樹木に対して3次元計測をおこなう手段を以下にまとめ、特に樹形情報を得るための最適な測量手段の考察をおこなった。

(2) トータルステーション (TS)

TSを利用した計測では、対象物に対して3次元座標として情報を得ることが可能である。しかしながら、TSは一度の視準にて一点のみの計測となるため、樹木の詳細な形状を得るためには、測点が膨大になり長時間の測量が必要となる。

(3) 写真測量

写真測量とは、写真画像から対象物の幾何学情報を3次元的に推定し、レーザ計測と同様に対象物に対して非接触で3次元情報を得ることができる。これまで、樹木に対して写真測量の有効性を示すための計測を、地上からの写真撮影にて取得した画像データからおこなった。しかしながら、樹冠内部の幹・枝の樹形情報を得ることは不可能であった。

(4) レーザ計測

レーザ計測技術には多様な機種が存在しており、本研究で使用した TLS の他に、車両に搭載するタイプの機種や航空機に搭載する機種なども存在する。そこで、以下に機種ごとの取得データの特徴を述べた上、樹木計測に適したものかを整理する。

(a) 航空レーザ測量 (ALS : Airborne Laser Scanner)

航空レーザ測量は近年、森林への計測事例が多数報告されている。航空レーザ測量では、単木樹形までの把握は、取得される樹木点群が十分でないことから、地上型レーザ計測機器と比較すると、ALSによる単木の形状データを詳細に把握することは適さないと考えられる。

(b) 車載写真レーザ測量 (MMS : Mobile Mapping System)

MMSとは、車両にレーザ計測器を搭載することで、動体的に3次元情報を得る計測技術であり、主に計測の対象は都市空間や舗装路面調査である。そのため近年、街路樹に対する解析事例が存在するが、日本庭園内での計測は、車両による搬入の利便性の悪さから、樹形

情報を多数の視点場からの計測で取得することは困難と考えられる。

(c) バックパック型レーザスキャナ

バックパック型レーザスキャナは、レーザスキャナ装置を背負う形で移動計測をおこなう機器である。航空レーザ測量とは異なり、森林内部からより詳細な情報を得るための手段として利用されている。しかし、樹形情報を単木ごとに詳細に把握する手段として、有効的な計測であるかは明らかとなっていない。

(d) 地上型 3D レーザスキャナ (TLS)

TLS は単木計測において、樹冠構造(Canopy Structure)や葉面積指数(Leaf Area Index) , 細部の樹枝構造までを把握可能な、高密度の樹木点群が取得できることが明らかになっている。このことから、樹木の詳細な形状情報を得るための手段として、TLS を用いた計測は最適であると考えられる。

第3章 日本庭園を対象とした 3D 樹木モデルの構築

(1) TLS による計測可能な樹高の検証

TLS を利用した樹木計測が、樹形情報の取得の観点からその有効性を示したが、本研究で使用したレーザ計測器機 (VZ-400i) の樹高に対する有効な計測範囲を検証する必要がある。そこで、東京農業大学世田谷キャンパス内にて多様な樹高が存在する正門前の広場にて計測をおこない、その有効範囲を検証した。その結果、樹高が 17m までの樹木に対して十分な樹形情報が得られることが確認された。

(2) 清澄庭園における計測

清澄庭園にて、VZ-400i を使用した計測調査を 2019 年 5 月 29 日～31 日、6 月 1 日、2 日、4 日の計 6 日をかけて実施した。園内において、3D 樹木モデルの構築をおこなうエリアを、清澄庭園の主要な建造物である大正記念館周りを対象とした。その理由として、対象エリアでは樹木全体を捉えた詳細な樹形情報を取得できることと、過去の計測調査にて樹高が 17m 以上の樹木が存在していないことも確認できているためである。

(3) TLS-QSM 法による 3D 樹木モデルの構築

本手法で用いた TLS-QSM 法は、TLS によって取得された樹木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、連続した円筒モデルによって再構築するものである。この手法を用いることで、これまで生成が困難であった小枝の細部まで自動的に 3D 樹木モデルの構築が可能となる。しかしながら、本研究で使用する TLS-QSM 法を実施するためのオープンソースである「TreeQSM」では、樹木点群の構成が幹・枝であることを想定した処理であるため、樹木が落葉した状況での計測を推奨している。しかしながら、日本庭園では多様な樹種が存在していることもあり、樹種を限定することなく、葉となる点群と幹・枝となる点群を分類する手法を検討する必要がある。そこで本手

法では、レーザ計測で取得可能な対象物の付属情報である、偏差 (Deviation) および反射率 (Reflectance) に閾値を利用することを主体とした効率的な分離手法を提案した。これにより、限られた樹種 (主に落葉広葉樹) にのみ対応した処理であった TreeQSM に、多様な樹種の適用が可能となり、日本庭園にて早急かつ効率的な 3D 樹木モデルの構築を可能とした。

第 4 章 原爆被爆樹木を対象とした TLS-QSM 法の応用

(1) 原爆被爆樹木の 3D 樹木モデルの構築

原爆被爆樹木とは広義には原爆にさらされたすべての樹木であり、原爆の記憶を今に伝えるものの中で、「生きた」被爆遺産として、その生命力を尊びつつ、原爆の悲惨さを世界や後世に伝える役割を期待されている。被爆樹木には原爆の熱線や爆風による被害を受け、特有の樹形が確認されている。中でも、根元から主幹にかけては、被爆樹木の特徴 (火傷跡、亀裂、根の肥大成長、傾斜など) が顕著に現れ、さらに、原爆被爆樹木は爆心地に向かって傾斜 (湾曲) している傾向があることが明らかされている。

そこで、原爆被爆樹木に対し、本研究で提案した TLS-QSM 法を主軸とした手法を応用することで、原爆被爆樹木が持つ、特有の樹形を捉えた 3D 樹木モデルの構築手法を考案した。さらに、構築された 3D 樹木モデルを 3D プリンタによって出力し、模型としての提供をおこなうことで、爆心地への傾斜という、現地での認識が困難な樹形異常に対し、その視認を可能とすることができた。

(2) 原爆被爆樹木の傾斜算出への応用

従来の手法による傾斜算出では、スマートフォンに内蔵されている姿勢センサによって、被爆樹木の傾斜を算出し、根元から主幹が最も傾いている方向を目視によって決定することで、傾斜方位角を GNSS の位置座標と方位から算出をおこなっていた。しかしながら、この手法は計測を早急に完了できるというメリットがあるが、目視という主観的な要素が計測精度に影響する懸念が存在した。そこで、TreeQSM によって構築される円筒モデルから、円筒ごとの中心座標を抽出し、この中心座標を利用した傾斜と傾斜方位角の算出をおこなうことで、正確かつ効率的な算出を可能とした。

第 5 章 樹木点群および 3D 樹木モデルの精度検証

(1) TLS にて取得される樹木点群の精度検証

TLS を用いた樹木計測の有効性を実証するためには、取得された樹木点群の形状と、計測対象となった樹木との形状を比較する精度検証をおこなう必要があった。そこで、TS を用いた精度検証をおこなうことで、使用した 2 機種 (VZ-400i, LMS-390i) の取得可能な樹形精度を明らかにした。手法として、対象樹木にターゲットを 20 箇所ほど設け、TS によって算出した座標を基準とし、それぞれの TLS によって算出した座標を照合することで

較差精度を得た。結果として、最大風速 2.8m/s、平均風速 1.4m/s の環境下、標準偏差 70mm 以内の誤差にて計測が可能であることが明らかとなった。TLS にて取得される樹木点群の精度検証にて、標準偏差 70 mm以内という数値を、TLS を用いた公共測量作業規程に当てはめると、規定では観測点間隔を 0.5m とし、25m先の標高に対して較差精度 5mm (標準偏差) とされている。このことから、標準偏差 70mm という精度は公共測量の規定では、十分な精度とは言えない。しかしながら、樹木は切土・盛土とは異なり、常に風などの環境条件で動きを伴う動体的な対象物であり、計測で常に誤差が生じることを念頭に置く必要がある。

(2) TLS-QSM 法にて構築される 3D 樹木モデルの精度検証

TLS-QSM 法は樹木点群から細枝までを詳細かつ効率的に 3D モデル化することが可能であるが、基となった樹木点群からどれほどの精度で 3D 樹木モデルの構築がおこなわれているか明らかにしていなかった。そこで、本研究で用いた手法として、構築された 3D 樹木モデルの位置座標を抽出し、その座標と樹木点群の座標を照合することで、樹木点群からモデルが構築されている範囲を明らかにすることで精度検証をおこなった。結果として、樹木点群から標準偏差 0.016m 以内の範囲にて、3D 樹木モデルが構築されることが明らかとなった。これにより、TreeQSM 法による樹形の再現性において、精度面からも有効性を示すことができた。

終章 本研究の成果

(1) 日本庭園の保存と復元に向けた保存手法としての重要性

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、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、庭園樹木の「主景観木」となるものには、マツの緑摘みのように一枝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。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、精度検証の結果からも十分に主幹から幹・枝に至る樹形の再現性を満たしていることから、現存の樹木をそのままの形で記録し、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。

さらに、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がおこなわれているが、植栽の復元においては、これまで日本庭園の創始期の樹形を詳細に記録した資料は少なく、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た。このことから、本手法で提案した 3D 樹木モデルは、その時代に存在した日本庭園の姿形を、特に庭園樹木によって現出された空間の記録として保存していくことにも貢献できる。

以上のことより、日本庭園における庭園樹木は、庭園材料の中での重要性から樹木個々に文化的遺産としての価値を見出され、樹形情報の取得を TLS による 3 次元形状として記録

し、詳細な 3D 樹木モデルとして記録する重要性が高く、今後の保存や復元に向けた取り組みの中でも重要な資料と成りえると考ええる。

(2) 原爆被爆樹木 3D 樹木モデルの意義

TLS を利用した、原爆被爆樹木の 3D 樹木モデル構築の意義は以下の 4 点が考えられる。

- ① 測定時点の正確な樹形を保存でき、その後の各種要因による変化を知る基準となる。
- ② 樹木全体の樹形を一望しテクスチャに触れることで、個体ごとの特徴と被害状況などを体感できる。
- ③ 被爆樹木のテクスチャを模型として写像することで、ハンズオン展示など多くの観察者に対応できる。
- ④ 多くの被爆樹木を併置して一望することで、各樹木の個性を認識できる。

①については、広島市では被爆樹木を 1996 年度にリスト化し、平和行政の一環として保全のための治療や土壌改良の経費を予算計上してきたが、多くが老木化や病気による枯死の不安を抱えている。このことから、被爆樹木の形状の変化を 3D モデルによって蓄積していくことで、樹木医等の専門家による健康状態の判断に貢献することができる。②、③、④については、3D プリンタによって出力された模型は手で触れることができ、被爆樹木の理解を一層深めることができる。そのため、平和教育への活用が考えられ、樹形異常等の実態を把握することに役立つと考えられる。

(3) 3D 樹木モデルがもたらす造園業界への生産性の向上

3D 樹木モデルが造園業界でもたらす貢献として、建築・土木業界にて取り組まれている「i-Construction」によって普及した、BIM (Building Information Modeling) と同様の役割をもたらすと考えられる。BIM とは 3DCAD によって作成される建築モデルに、建物に関する情報 (客室名称・面積, 材料・部材の使用, 仕上げ等) を建築モデルに付属させ、建築情報モデルを構築するモデリング技術である。BIM によって構築された建築モデルは、「形状の見える化」によって専門知識を持たない者に対しても、分かりやすい構造情報を提供することができる。

TLS-QSM 法にて構築される 3D 樹木モデルは、本来、樹木の地上バイオマス量などのパラメータの算出を目的としており、樹形の他に、樹木の全体積・主幹体積・枝体積、樹高、主幹の長さ・枝の長さなどの情報を正確に取得することが可能である。さらに、反射率という付属情報を使用することで、水の欠乏によっておこる樹枝の枯れ枝検出も可能になると推測される。以上のことを踏まえると、建築・土木業界での i-Construction による BIM の活用による生産改革が、造園業界では 3D 樹木モデルの活用によって可能となる。さらに 3D 樹木モデルの付属情報は、日本庭園の樹木管理にとどまらず、庭園の補修から計画、そして定期的な計測による樹木成長のパラメータまで算出が可能と考えられ、造園業界でのあらゆる施工プロセスのシームレス化に貢献することができる。

審査報告概要

本学位請求論文は、庭園などの造園空間における樹木に対する3次元形状を、効率的かつ高精度に取得する手法を開発したものである。開発された手法は、レーザ測量により得られたデータに対する処理の主幹部分において新規性が高く、特に TLS-QSM 法を適用した点は他に類例の無い着眼点である。さらに、レーザ測量データの解析においては樹木に照射されたレーザから得られるパラメータとして反射率と偏差に着目し、幹や枝と葉との正確な分類手法も見いだした。また、本論文においては開発された各手法を日本庭園や原爆被爆樹木といった対象において適用し、その再現性の確認が実施されている。それらの対象は、いずれも遺産的価値の高い樹木であり、高精度な3次元形状把握の必要性が高いものであることから、十分妥当性のある検証も行われていると判断される。以上の研究成果は、今後多くの造園空間における樹木の保存や活用に特に寄与するものと評価し、審査委員一同は博士（造園学）の学位を授与する価値があると判断した。