

日本庭園における地上型 3D レーザスキャナ による図化および景観シミュレーション に関する研究

熊崎理仁*・國井洋一*

(平成 27 年 2 月 19 日受付/平成 27 年 6 月 5 日受理)

要約：近年、レーザ計測技術の利用が浸透している。本研究では造園分野におけるレーザ計測技術の利用法について検討した。庭園での地上型レーザスキャナの利用は得られた 3 次元点群データによるアニメーション等、視覚的利用が主流である。そこで、本研究ではレーザ計測された 3 次元点群データから平面図や等高線を作成する場合の手順および省力化の技術や、ポリゴン化による景観シミュレーションを行うといった利用法を検討した。まず、3 次元点群データはオルソ平面へ書き出しを行うことにより、平面図の作成が可能である。さらに、3 次元点群データの持つ位置座標の情報を利用して等高線の抽出を行い、平面図に盛り込むことが可能となる。以上 2 つの作業から、地上型レーザスキャナの庭園での応用においてこれまで多くの労力を必要とした平面図と等高線の作成と、それに費やされた調査の労力やコストを軽減することができる。また、専用ソフトを利用することで 3 次元点群データの編集作業を容易に行うことができるため、3 次元データ上にて樹木の伐採、抽出、ポリゴンモデルの作成が可能となり、具体的な景観シミュレーションを行うことができる。結果として、造園分野でのレーザ計測技術の活用が、庭園の詳細な内部構造をデジタルデータとしてアーカイブ化することや、平面図作成による庭園の現況記録として平面図を作成するなどの応用に期待できる。

キーワード：3 次元点群データ、レーザ測量、図化、景観シミュレーション、等高線抽出

1. はじめに

3D レーザスキャナには、地上に据え置いて地物の計測を行う地上型 3D レーザスキャナおよび、航空機に搭載したレーザスキャナから地上へ向かってレーザ光を掃射する航空機搭載型レーザスキャナ¹⁾がある。このうち地上型 3D レーザスキャナは、比較的近距离の対象物の形状を容易に計測する測量機器として注目されている²⁾。その研究事例をあげてみると、車両に搭載されたデジタルカメラとレーザスキャナによって道路および周辺の連続映像と 3 次元座標データを計測する MMS (Mobile Mapping System) の利用^{3,4)}、歴史的建造物の破損部分の抽出⁵⁾、都市の様子の高精度 3D モデル化⁶⁾、3D プリントを用いた遺構部材の模型作製⁷⁾などがある。現在は、主に都市の経済活動の基盤をなしている道路や下水道、河川などの土木分野において地上型 3D レーザスキャナの利用が進んでいるが、3 次元形状データとして庭園の記録と計測を行う技術は、今後の庭園調査手法の一つとなり、庭園の分野における利用研究が期待される⁸⁾。特に、庭園における 3D レーザスキャナの応答事例では、従来、CG アニメーションのような視覚的利用にとどまっていたことが多かったが、データを加工

し平面図や等高線の描画などといったデータ管理のための利用も可能である。その際、障害となるデータの取扱において省力化の技術手法を検討した。さらに、樹葉など、形状が複雑で取り扱いが困難な物体のポリゴン化手法を検討し、景観シミュレーションにおける利用法を検討した。

2. 調査対象地

本研究の調査対象地とする庭園と調査期間は、以下の表 1 に示す。

以上の各期間における測量調査から、3 次元点群データを取得した。上記の測量調査は、いずれも所有者や自治体からの委託を受けたものであり、その目的は庭園の維持管理や現状把握、過去の平面図消失による新たな平面図作成などである。

3. 3D レーザスキャナの概要

本研究で用いた地上型 3D レーザスキャナは、RIEGL 社製のパルス方式の機種である“LSM-Z390i”であった。各器械点でレーザ掃射 (スキャニング) を行い 3 次元形状データは点群データとして取得される。各器械点にて取得された 3 次元点群データは、それぞれ器械点の位置を座標原点

* 東京農業大学地域環境科学部造園科学科

表 1 調査対象地の概要

横山大観記念館庭園	
調査期間	2013 年 6 月 29 日-7 月 6 日
所在地	東京都台東区池之端 1 丁目 4-24
旧田中光顕邸庭園（現：小田原文学館）	
調査期間	2013 年 8 月 6 日-10 日
所在地	神奈川県小田原市南町 2-3-4
齋藤氏庭園	
調査期間	2014 年 5 月 16 日-18 日, 8 月 6 日-8 日
所在地	宮城県石巻市前谷地字黒沢 73-1
旧松本剛吉邸庭園（現：岡田邸）	
調査期間	2014 年 8 月 25 日-29 日
所在地	神奈川県小田原市

とするデータであるため、座標原点の統一を行う必要がある。本研究では RIEGL 社が提供する点群処理用ソフト RiSCAN PRO を使用し座標原点を統一する。

(1) 実測から得た 3 次元点群データの合成

座標系の統一には、隣接する器械点において共通にデータを取得している範囲の中から共通点を最低 4 点認識させるのが写真 1 に示した反射マーカである。反射マーカは LSM-Z390i の付属品であり、一般的な物体よりもレーザを強く反射する素材で作成されているため、データ上での認識が容易である。

以上の反射マーカをタイポイントとし、以下の手順によりデータ合成が行われることとなる。図 1 はデータ合成のイメージ図であるが、ここに示すタイポイント A に対し、器械点①、②における各スキャンングにより得られた 3 次元データをそれぞれ (X_{a1}, Y_{a1}, Z_{a1}) , (X_{a2}, Y_{a2}, Z_{a2}) とした場合、両者の関係は式(1)にて表される。

$$\begin{pmatrix} X_{a1} \\ Y_{a1} \\ Z_{a1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_{a2} \\ Y_{a2} \\ Z_{a2} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{pmatrix} \quad (1)$$

ここに、

$$a_{11} = \cos\varphi\cos\kappa, a_{12} = -\cos\varphi\sin\kappa, a_{13} = \sin\varphi$$

$$a_{21} = \cos\omega\sin\kappa + \sin\omega\sin\varphi\cos\kappa,$$

$$a_{22} = \cos\omega\cos\kappa - \sin\omega\sin\varphi\sin\kappa,$$

$$a_{23} = \sin\omega\cos\varphi$$

$$a_{31} = \sin\omega\sin\kappa - \cos\omega\sin\varphi\cos\kappa,$$

$$a_{32} = \sin\omega\cos\kappa + \cos\omega\sin\varphi\sin\kappa,$$

$$a_{33} = \cos\omega\cos\varphi$$

$$M_x, M_y, M_z : \text{②から①までの原点平行移動量}$$

$$\omega, \varphi, \kappa : \text{②におけるレーザースキャナの傾き角}$$

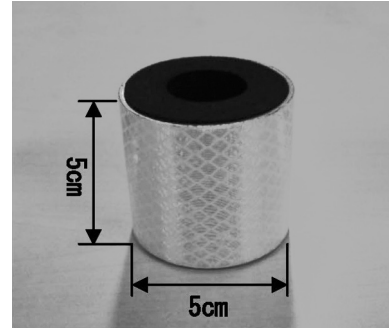


写真 1 レーザースキャナ付属の反射マーカ

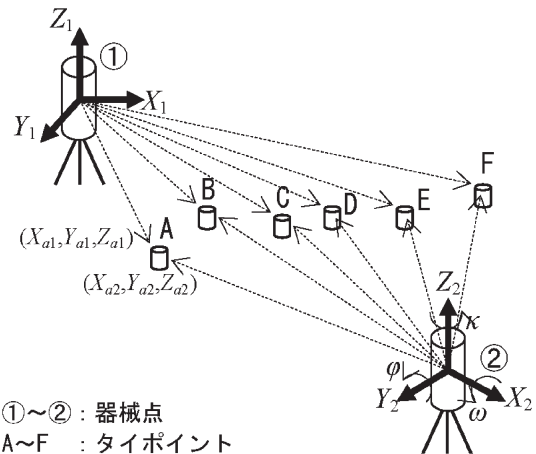


図 1 タイポイントによるデータの合成

なお、本研究で用いたレーザースキャナには自動水平調整機能が搭載されているため、 ω と φ についてはいずれも 0 で一定となる。そのため、式(1)における未知量は κ , M_x , M_y , M_z の 4 個となる。また、式(1)は 1 点のタイポイントにつき 1 個得られることから、4 点以上のタイポイントが得られれば未知量の個数以上の式が得られ、未知量がすべて算出されることとなる。これにより、器械点②において得られた任意の点の 3 次元データを式(1)中の X_{a2} , Y_{a2} , Z_{a2} へそれぞれ代入することにより、器械点①の座標 X_{a1} , Y_{a1} , Z_{a1} として変換されることとなるため、すべての点の 3 次元データを変換することによりデータ合成が完了する。

以上の処理を繰り返し行うことにより、全器械点における点群データがすべて合成されるが、認識される反射マーカの数が不十分な場合は手動にてタイポイントに設定する必要がある。手動の場合は共通点を目視で選点するため、確実な位置座標の認識ができず、合成の誤差が大きくなる可能性が高い。図 2 は手動でタイポイントの選点を行った様子である。

(2) 容量縮減された 3 次元形状データの作成

各器械点で得られた 3 次元点群データをすべて合成する場合、データ容量が膨大であり、コンピュータ処理に多大な負担がかかり作業が困難になる。そこで、図 2 に示すように計測対象地とは無関係な不要な点群を削除し、さらに



(a) 器械点①

(b) 器械点②

図2 手動によるタイポイントの選点

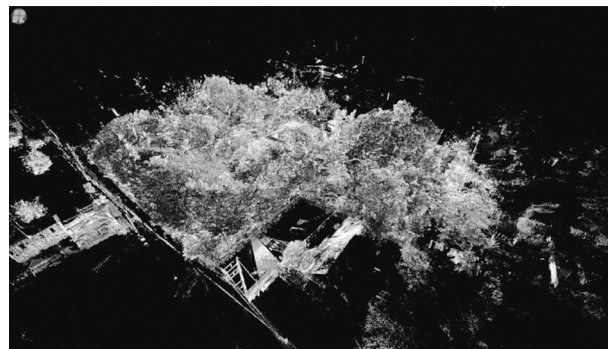
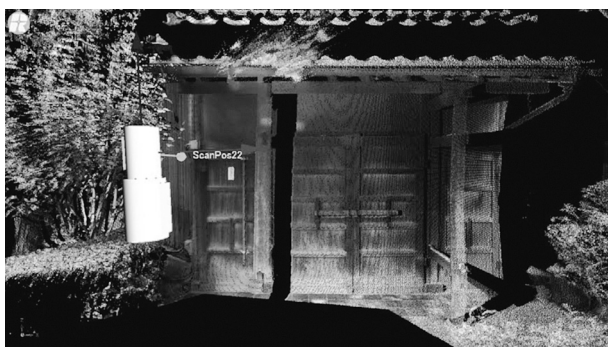
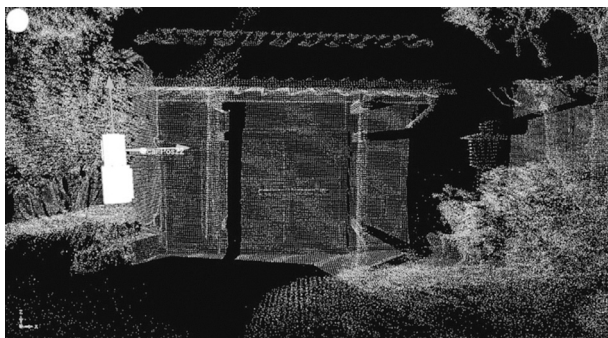


図4 樹木等を含んだ3次元点群データ（旧田中光顕邸庭園）



(a) データ縮減前



(b) データ縮減後

図3 点群データの縮減

点群データにおいて点密度を間引くことによって、点群の数を縮減し、データ容量を軽量化することですべてのデータ合成を可能とし、全体の3次元形状データの作成が可能となる(図3)。なお、図3の例において、DXFで出力を行った場合、データ容量は191MBから33.5MBへ減少した。

以上のデータ合成および容量縮減を行うことにより、図4に示すような計測対象地全域の3次元点群データが作成され、計測対象地の全体像を把握することが可能となる。

4. 3次元点群データからの図化

(1) 点群密度の高い地表面データの作成

3次元点群データからオルソ平面への書き出しを行う際、平面図に近い状態で見ようとするために、地上付近の構造物及び地形の確認が行えるデータの作成が必要となる。しかし、合成された3次元形状データは図4が示すよ

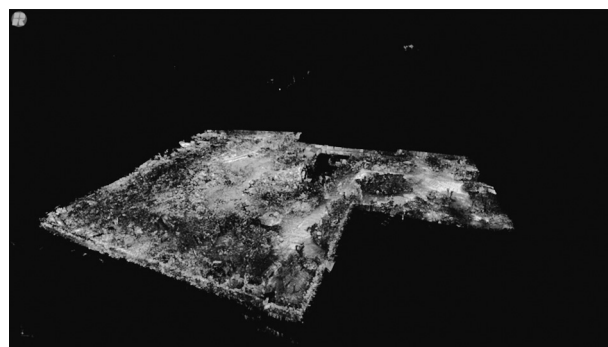


図5 地表面のみの高密度3次元点群データ



図6(a) 横山大観記念館庭園（器械点：44箇所）

うに地表面が樹木により覆われるためオルソ平面に書き出しを行った際、地表面の視認が不可能である。さらに、図4は計測対象地の全体像把握を目的としたものであるため、各器械点の点群データを縮減してから合成して作成されたデータである。しかし、図化を行うためには地表付近

の詳細な点群データが求められる。そこで、各器械点の3次元点群データを数箇所ずつグループに分けてそれぞれ結合させ、各グループの3次元形状データの地表より1m以上の点群の削除を行った。その後、全てのグループのデータを合成させることによって、図5に示す地表面のみの3次元形状データが作成された。すなわち、図5はデータの縮減処理を行わずに地表面のみを表示させたものであるため、このデータを図化作業に用いることで詳細な図面作成

が可能となる。

(2) AutoCAD 使用によるオルソ平面への書き出し

本研究における点群の編集作業で使用したソフトRiSCAN PROで、点群をDXFファイルにて出力を行う。DXF形式でAutoCADに点群データを取り込み2次元で描画することで平面図を容易に作成できる。書き出しを行ったデータを図6に示す。

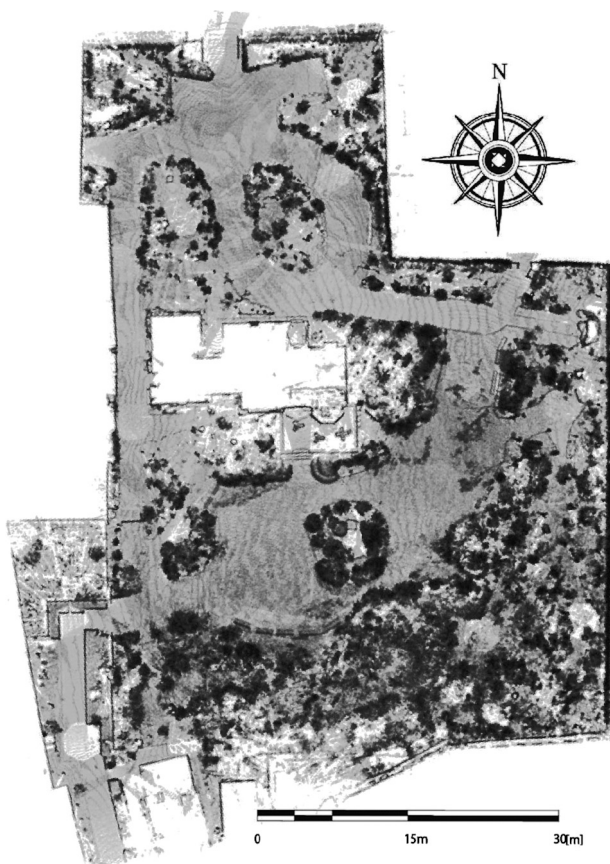


図 6 (b) 旧田中光顯邸庭園（器械点：52 箇所）

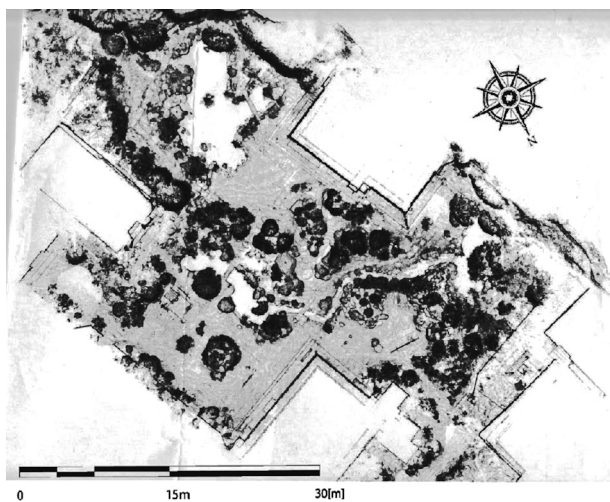


図 6 (c) 齊藤氏庭園（1 回目）（器械点：全 33 箇所）

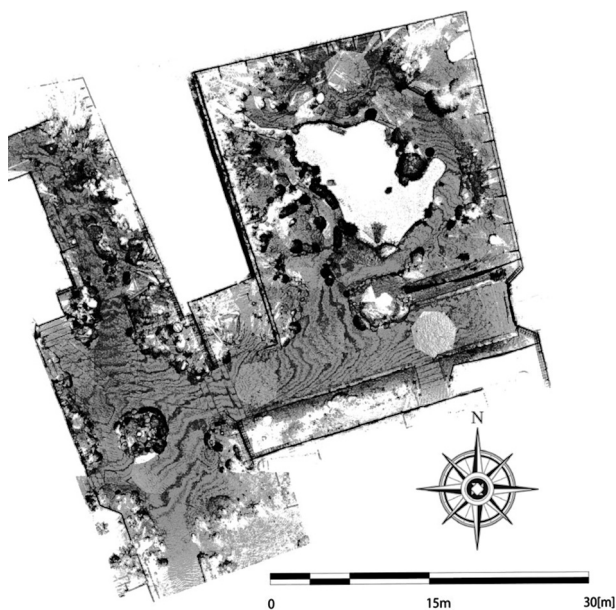


図 6 (d) 齊藤氏庭園（2 回目）（器械点：27 箇所）

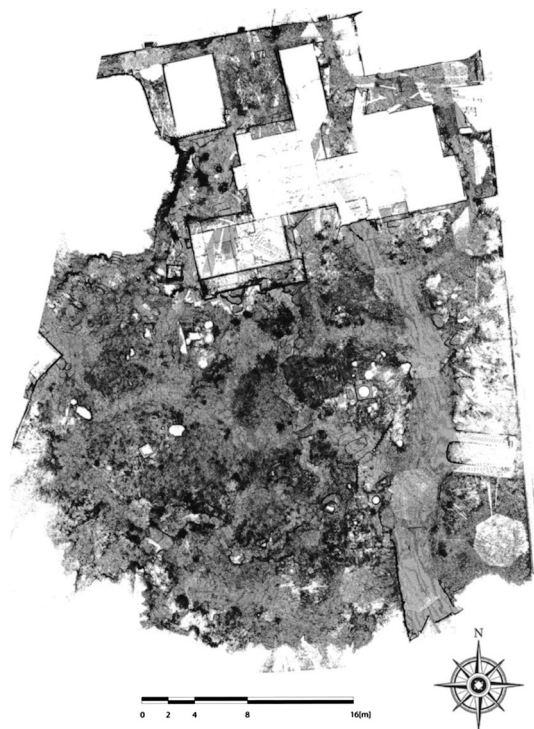


図 6 (e) 旧松本剛吉邸庭園（器械点：42 箇所）

図 6 オルソ平面に出力された点群平面図

(3) 点群密度とスケール

点群密度が高いデータは縮尺を小さくして表示させると点群の量が多すぎるため、平面図が黒く塗りつぶされたように見えることがある。そこで、適切な点群密度とスケールについての考慮が必要となる。例を上げてみると、地表付近の詳細な構図を得たい場合、点群密度をより大きくする必要があり、表示させる範囲に応じて用紙サイズ及びスケールを選択する必要がある。これまでの経験上、A3用紙に本研究における計測対象地程度の規模の全体平面図を出力させる場合、スケールは1/150~1/200となり、点群密度は点群の各点間距離を0.03~0.05mほどに設定するのが適切であるが、図7は石材などの地物が視認できるよう、スケール1/50、点間距離0.01mに設定したものであり、地表付近の構図を知るために点群密度を調整した例である。

(4) 等高線の描画

a) 3次元点群データの標高分類と基準点の選点

3次元点群データには点群の位置情報が含まれているため、高さに応じた点群の抽出が可能である。さらに、DXFにて書き出しを行うことにより、標高に分けたデータの作成が可能である。本研究ではRISCAN PROの機能を使い、3次元点群データを標高ごとに抽出し、横山大観記念館庭園および旧松本剛吉邸庭園のデータより各標高のデータを作成した。ここでは旧松本剛吉邸庭園のデータを例に示す。

最初に等高線を抽出する調査場所内にて地盤高を±0m

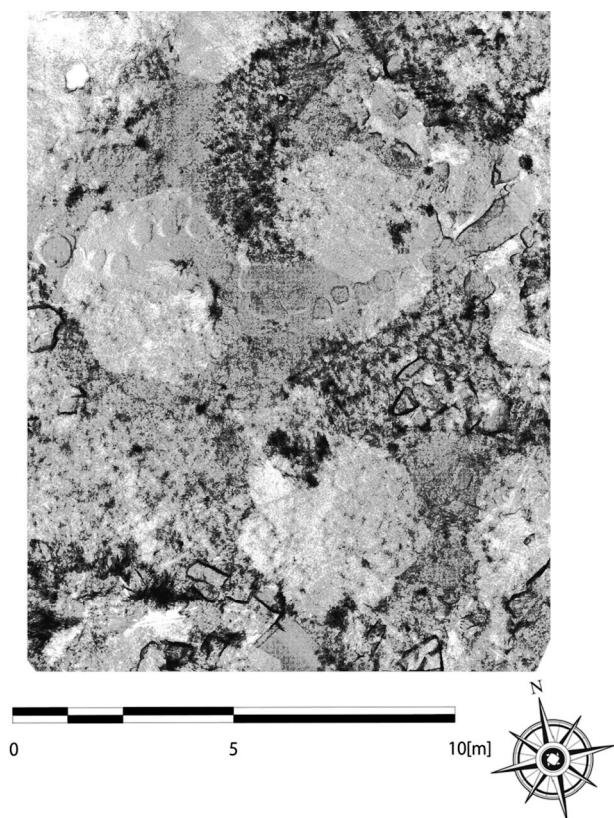


図7 点群密度を調整後、地物確認を可能にした平面図の描画例

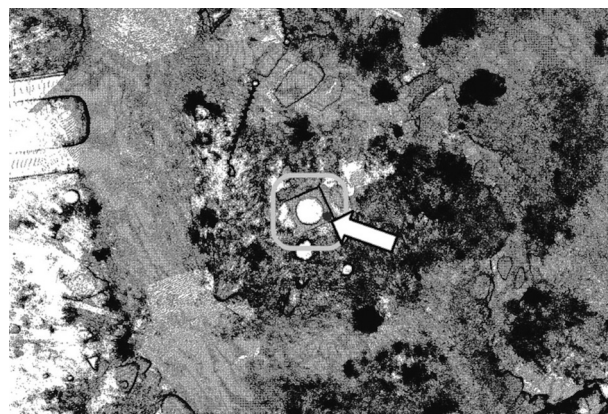


図8 旧松本剛吉邸庭園でのKBMの選点

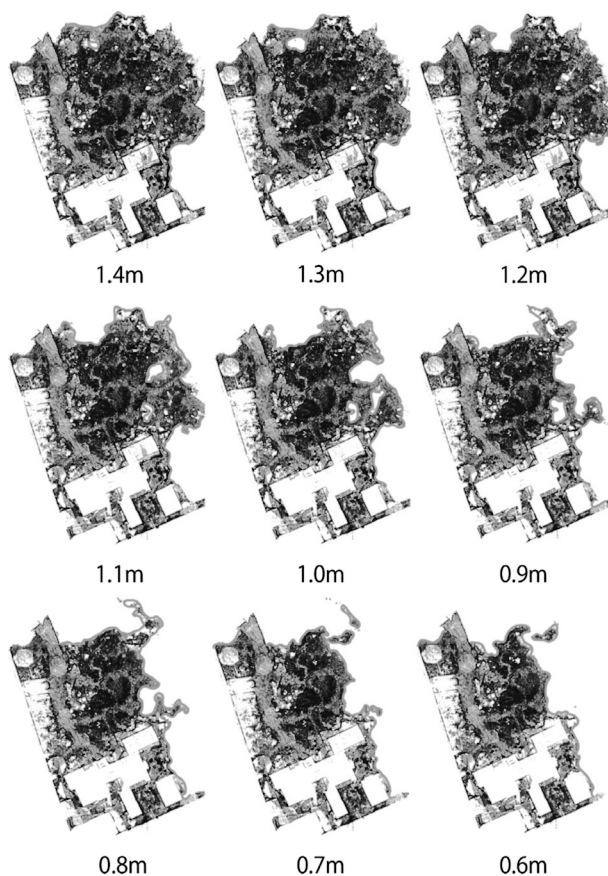


図9 旧松本剛吉邸庭園での標高分類

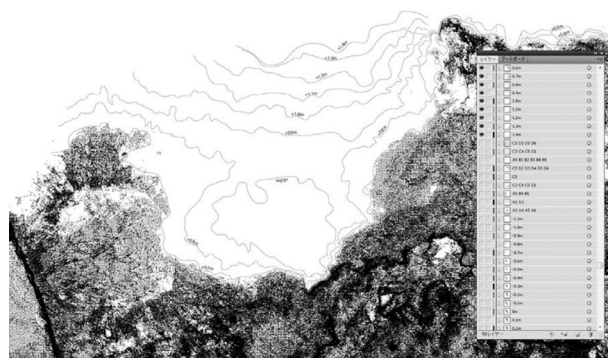


図10 Illustratorでの等高線の描画

とする仮ベンチマーク(以下 KBM)を決める。この例では、旧松本剛吉邸庭園の KBM を図 8 に示した。図 8 はオルソ平面上での手水鉢の様子である。平面上でも視認が容易で

あるということから、矢印が示す手水鉢の天端を KBM として設定した。この KBM を基準として旧松本剛吉邸庭園では 0.1m 毎に標高を区分した(図 9)。



図 11 旧松本剛吉邸庭園平面図

b) Illustrator による等高線のトレース

本研究では、Adobe Illustrator を使用し旧松本剛吉邸庭園の等高線の描画を行った。Adobe Illustrator の使用による等高線のトレースは AutoCAD に取り込んだ DXF ファイルのオルソ平面に対し、各標高データを画像として順次出力する。これにより、図 9 に示す各標高のオルソ平面の境界部を線描画することで等高線が描画される。図 10 は標高毎に分類されたデータを利用し、Adobe Illustrator による等高線トレースの状況である。

さらに、旧松本剛吉邸庭園においては現地にて樹木調査を別途実施したため、樹木調査により得た情報を盛り込むことで平面図に樹冠投影を実施した（図 11）。

5. 景観シミュレーションへの 応用に向けたデータ処理

(1) 木の伐採シミュレーション

実測で得た 3 次元点群データを、RiSCAN PRO の 3 次元点群データの部分抽出機能を利用し、景観の変化を確認するデータの作成を行った。本研究では景観シミュレーションの一例として高木の除去を行った。図 12 は変化を確認するために齋藤氏庭園にて高木のみを切り取った結果である。

(2) 三角メッシュ化とポリゴンモデルの作成

実測によって得られた 3 次元形状データは点群データとして取得されるが、庭園データの中にある建築物の外壁や樹木の幹の部分などはポリゴンデータ化することで、物体の存在を明確に表すことが出来る。そこで本研究では、点群データから面を構成するために、三角メッシュ化の処理を行った。三角メッシュ化とは、点群における最近隣の 3 点を順次結び三角形を作り、面を形成する処理である。この処理を行うことで、より現実に近い 3 次元モデル（ポリゴンモデル）の作成が可能となる。図 13 は三角メッシュ化を行った 3 次元モデルである。

次に、部分抽出機能を使い抽出された樹木の 3 次元点群データを、三角メッシュ化によって処理した。建物の場合、外壁の点群はほぼ鉛直に存在するため、三角メッシュによる面の形成が比較的容易である。しかし、樹木の形状は複雑で規則性がなく、自動で三角メッシュ化することが困難である。しかし、図 13 自動で三角メッシュ化を行った例であるが、樹葉部分は形状が複雑なため自動で三角メッシュ化を行えないこともある。自動メッシュ化に失敗した部分が青色で示されている。

そこで、樹冠の部分は点群の状態にし、幹の部分のみを三角メッシュ化で表現したポリゴンモデルを作成した（図 14）。樹木をモデル化したことによって、容易に景観を変更することができ、モデルを景観シミュレーションに反映することができた。図 15 はモデルを使用した景観シミュレーションの一例である。

6. 考 察

本研究における考察は以下の通りである。

(1) 点群データの容量

各器械点のデータの合成時、グループに分け不要な点群処理を行い、それらを再度合成することで、点群密度の高い詳細な点群平面図の作成ができた。この一連の処理により点群密度の高いデータの合成を行う際もデータ容量を抑えることができるため、効率的な処理が可能となった。以上の手順を組み合わせることで、詳細な地表付近の構造の確認と平面図の作成が可能となった。

(2) 等高線の抽出

等高線の描画を行う際、従来は各標高に分けた合成データをそれぞれプリントアウトし、トレーシングペーパーによりトレースすることで等高線を描画していた。しかし、デジタル媒体としてそのまま処理を行うことより、標高 0.1 m 区切りの等高線も綿密にトレースを行うことができ、詳細な地形の把握ができた。以上から、3 次元点群データの使用による等高線抽出の一手法を提案できた。

(3) 景観シミュレーション

RiSCAN PRO 上での 3 次元点群データの操作により樹木伐採のシミュレーションが容易である。その際、囲いの塀や灯籠、石垣、置き石、低木を任意に残すこともできる。また、部分抽出によって得られた 3 次元点群データを、RiSCAN PRO ソフト上にて三角メッシュ化を行い、より現実に近いモデルを必要に応じて追加作成することで、詳細な景観シミュレーションが可能である。

以上により、日本庭園における 3D レーザスキャナを使用して得られたデータについては、本研究で検討した工夫や技法で処理することが有用であると考えられる。

7. ま と め

本研究では、地上型 3D レーザスキャナの有用性を探るため、4 箇所の庭園での実測を行った。得られた 3 次元点群データの活用として、図化までの手順を検討したが、3D 点群データの合成と編集、出力に伴う容量の削減、CAD ソフトへの取り込みによる図化作成の簡素化、3D 点群データの標高に分けたレイヤーの作成による精密な等高線の抽出など、段階に分けた検討を行ったことにより、図化に至るまでの効率的な手順を提案できたと考える。

本研究では景観シミュレーションとして、樹木の伐採を行ったが、伐採後の大様な景観把握が可能であり、3D 点群データの活用が見込めると考えられる。しかしながら、前述のとおり庭園は非常に構造的に複雑である。3D 点群化された庭園の 3D モデルは大様な確認はできるが、樹木の幹や枝張りの大きさ等の詳細を確認することは不可能であった。そこで、3D 点群データとなった樹木の部分抽出を行い、RiSCAN PRO 上にて三角メッシュ化による 3D モデルの作成を行うと確認が容易となるため、ポリゴンモデルの作成は精密な樹木モデルの活用へとつながると推測される。



(a) 高木の除去前



(b) 高木の除去後

図 12 高木の除去による景観シミュレーション (齋藤氏庭園)

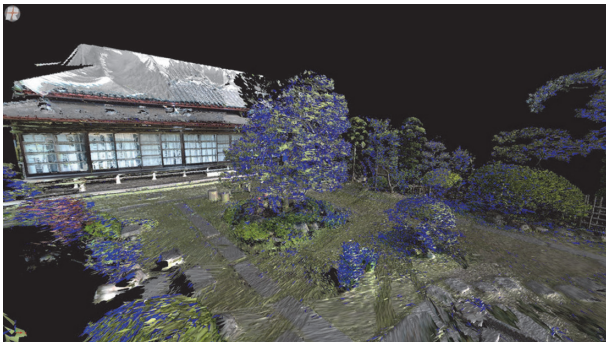


(a) アカマツ



(b) ケヤキ

図 14 樹木の 3D モデル



(a) 3D モデル①



(b) 3D モデル②

図 13 三角メッシュ後の 3D モデル (齋藤氏庭園)



(a) アカマツの挿入前



(b) アカマツの挿入後

図 15 樹木モデルを使用した景観シミュレーション

謝辞：本研究における各庭園の調査では，東京農業大学地域環境科学部造園科学科ガーデンデザイン研究室の鈴木誠教授，栗野隆准教授にご尽力いただきました。また，現地計測調査においては横山大観記念館，特定非営利活動法人小田原まちづくり応援団，石巻市，小田原市の皆様に大変お世話いただきました。心より御礼申し上げます。

引用文献

- 1) 横尾泰広 (2014)：航空レーザ測量の概説と最新動向，フォレストコンサル 9 月号 (137 号)：3029-3037.
- 2) 國井洋一，柳 達弥，山崎元也 (2010)：地上型 3 次元レーザスキャナによるキャンパス内の景観把握とその応用について，東京農業大学農学集報 55 (2)：199-204.
- 3) 片岡恒之輔，中川雅史 (2014)：街路空間で取得されたランダム点群の投影モデルの自動選択，日本写真測量学会平成 26 年度年次学術講演会発表論文集：33-36.
- 4) 石川貴一郎，天野嘉春，橋詰 匠，瀧口純一，清水 聡 (2009)：モバイルマッピングシステムによる都市空間モデリング，計測自動制御学会産業論文集 8 (17)：132-139.
- 5) 味岡 収，渡邊弘行 (2013)：点群データの稜線抽出技術を用いた文化財建造物の破損図作成の適用可能性について，一般社団法人日本建築学会学術講演梗概集 2013 (建築歴史・意匠)：639-640.
- 6) 馬河紘子，浦本洋市 (2014)：3 次元都市モデルからのオブジェクト抽出，日本写真測量学会平成 26 年度年次学術講演会発表論文集：43-44.
- 7) 中村裕文，林田義伸 (2013)：アテネのアクロポリスにあるローマとアウグストゥス神殿に関する研究 3D プリンタを用いた遺構部材の模型作製，日本建築学会報告会，九州支部 3，計画系 (52)：633-636.
- 8) 栗野 隆，國井洋一 (2013)：清閑亭庭園を対象とした 3 次元測量と直接測量との併用による歴史的庭園の調査技術，ランドスケープ研究 76 増刊，造園技術報告集 7，126-129.
- 9) RIEGL 社 (2008)：作動ソフト RiSCAN PRO 取扱説明書 Ver.1.4.3：RIEGL 社 390 pp

Drawing and Landscape Simulation for Japanese Garden by Using Terrestrial Laser Scanner

By

Rihito KUMAZAKI* and Yoichi KUNII*

(Received February 19, 2015/Accepted June 5, 2015)

Summary : Recently, many laser scanners have been applied in various fields of measurement. This paper investigates the utilization of a terrestrial laser scanner in landscape architecture. The terrestrial laser scanner, which is applied in landscape animation and some visual applications, can be utilized for the Japanese garden as an acquisition tool of 3D point cloud data. Therefore, other kinds of applications (ground plan creation, contour line extraction, and landscape simulation by polygon model), were investigated. The ground plan could be created by using 3D point cloud data, which was outputted to the ortho plane. In addition, the contour lines of the Japanese garden could be extracted by using 3D point cloud data, and drawing the ground plan became possible. Consequently, drawing and extraction of contour lines of the Japanese garden could be achieved more efficiently. Furthermore, 3D point cloud data could be edited by using special software, and some landscape simulations, which were for extraction and placement of trees or some objects, therefor became possible. As a result, it is expected that the application of the terrestrial laser scanner will be useful for visualizing detailed structures and recording them by as-built drawing.

Key words : 3D point cloud data, terrestrial laser survey, drawing of ground plan, landscape simulation, contour line extraction

* Department of Landscape Architecture Science, Faculty of Regional Environment Science, Tokyo University of Agriculture