

## 可搬型スキャニングライダーによる木本群落を有する 庭園の景観モデリング

### Landscape Modeling for a Garden with Tree Communities Using a Portable Scanning Lidar

細井文樹、大政謙次\*

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-ku, Tokyo 113-8657, Japan

(2014年2月20日受付、2014年4月4日受理)

#### ABSTRACT

In the present study, we confirmed the utility of portable scanning lidar for landscape modeling of a garden with tree communities and quantification of biophysical variables of the trees in the garden. Multiple measurement positions were established between each tree in the garden and laser beams were fully illuminated to the trees. Obtained 3-D point cloud images were registered and shading effect was added to the data corresponding to a building and trees. Through these processes, a 3-D landscape model of the garden was produced. The model allowed to visual assessment of the garden from any viewpoints and it was confirmed that the model faithfully reproduced the complicated form of the trees and the one of the building within the garden. Then, 10 trees were selected from the model and their tree heights, diameters at breast height were estimated. By comparing the estimation and the actual values, the errors of the tree heights and diameters at breast height ranged from -0.48 to 0.28 m and -0.04 to 0.05 m, respectively. Moreover, stem volume was estimated from the lidar-derived tree heights and diameters and a stem volume map was produced.

**Key words :** Garden, Landscape, Portable scanning lidar, Tree community, 3-D model

#### 1. はじめに

公園や庭園は市民の憩いの場として余暇活動や休息など様々な形で利用されている。市民にとって快適で良好な公園や庭園環境を維持していくためには、その景観を適切に評価し、維持・管理していく必要がある。近年、こうした景観評価にコンピューターグラフィックスを利用した景観シミュレーションが行われるようになってきた (Lange, 2001; Bishop and Rohmann, 2003)。公園や庭園の景観シミュレーションでは、人工構造物だけでなく、園内にある樹木を3次元化して表現することが重要となるが、植物は複雑な形状を有しているため、その表現が難しい。そのため、樹木の生長プロセスを考慮した

数値モデルを利用する L-system による方法 (Lindenmayer and Prusinkiewicz, 1988) や、実際の樹木の測定データをベースに樹木の3次元モデリングを行う AMAP (Jaeger and de Reffye, 1992) などが用いられ、より現実に近い形状の樹木モデリングが可能となってきた。しかしこうしたモデリング法では、園内の樹木の種類や構造パラメータを毎木調査する必要があり、労力を要する。また、剪定された樹木などは表現が難しく、現地の樹木の形状を忠実に再現することは難しい。

一方、植物を直接計測することでその3次元形状データを取得可能な装置として、スキャニングライダーと呼ばれる装置が近年注目されている。この装置は、レーザービームを対象にスキャン照射し、その反射光を検出する

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

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る。この装置を用い、実際の庭園にある人工構造物や樹木の形状を3次元点群画像として取得し、得られた画像を景観評価に用いた研究も報告されている (Hayase et al., 2009)。本方法では、既存のモデリング法の場合に必要な樹木の事前調査は必要なく、かつ剪定されたような樹木でも、その形状を忠実に3次元画像として再現することができ、既存のモデリング法の問題点を解決することができる。さらに、スキャニングライダーは樹木の樹高や胸高直径、葉面積密度などの構造パラメータの算出しにしばしば利用されているが (Omasa et al., 2002; Hopkinson et al., 2004; Hosoi and Omasa, 2006, 2007; Hosoi et al., 2013)、公園や庭園の樹木についても、その構造パラメータの抽出に利用可能である (Omasa et al., 2008)。得られる構造パラメータは、公園または庭園内樹木による大気浄化機能やCO<sub>2</sub>吸収機能などの機能評価をする際の基礎的データとして有用と考えられる。筆者らはこうしたスキャニングライダーの利点に着目し、都市の公園を対象とし、航空機搭載型及び可搬型スキャニングライダーから点群画像を取得して景観モデルを作成し、得られたモデルが公園の景観評価および樹木の構造パラメータ推定に利用可能であることを示した (Omasa et al., 2008)。ここで対象とした樹木は孤立木であったが、実際の公園や庭園でしばしば見られる木本群落については、スキャニングライダーによる方法が有効かどうかは未だ評価がなされていない。そこで本研究では、木本群落を有する庭園を対象とし、スキャニングライダー計測により得られた画像から景観モデルを作成し、そのモデルが景観評価に適用可能かどうか、さらにそのモデルから樹木の機能評価に必要な樹木構造パラメータの抽出が可能かどうかを検討を行う。

## 2. 計測対象および方法

計測対象は静岡県熱海市にある新技術開発財団の植物研究園内の40 m × 90 mの領域とした。この園内にはスギ (Japanese cedar) やアカマツ (Japanese red pine) などの針葉樹やイロハモミジ (Japanese maple)、ツバキ (Camellia) といって広葉樹の高低木、110余種が植栽されていた。研究園の西側には、3階建ての研究棟が存在しており、本計測対象エリアにこの研究棟が含まれていた。本対象地は庭園の形態を有しており、研究棟や池などの人工構造物とともに大小様々な樹木の群落が繁茂していた。計測には可搬型スキャニングライダー (LPM-25HA, RIEGL社製) を使用した。本装置の測距原理は

Time of flight法であり、2～60 mの計測範囲と±8 mmの距離精度を有する。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、園内の樹木を十分カバーできるように9か所の測定地点を設定し、2009年9月に主として落葉樹を計測し、2010年2月に常緑樹を主として計測を行った。各地点から得られた複数のライダーデータをレジストレーション(位置合わせ)し、各データに共通の座標系を付与した。その後、画像内にある研究棟と樹木とを分離し、それぞれ別の処理を施した。研究棟については、各点群を三角形の3次元平面で連結し、この三角形をメッシュとするポリゴンモデルを作成した。屋根の上部については平面を追加して補間した。ポリゴンモデルはサーフェス(表面)を有するため、陰影効果を容易に付与できる。そこで、本モデルに陰影を加え、より自然な見え方になるようにした。樹木に関してはその点群がランダムに近い状態で分布していたためポリゴンを生成することはできなかったが、各点に陰影効果を付与し、実際の樹木の見え方に近づけた。これらの処理は可搬型スキャニングライダー付属の画像処理ソフトウェアと自作のプログラムにより行った。これら二つの異なる処理を施したモデルを結合し、対象地の3次元景観モデルとした。得られたモデルを様々な方向から観察し、モデルから景観評価が可能かどうか検討した。さらに樹木が伐採された状態を模擬するため、モデルの中にある樹高8 m以上の樹木をモデルから削除し、先に作成した景観モデルとの比較から、景観がどのように変化するかを確認した。次に樹木の構造パラメータを求めるため、得られたモデル内にある樹木を10本選択し、樹高と胸高直径を算出した。前者は樹木直下の地面と樹木の最も高い点に相当する点の座標から算出した。後者は地面から1.2 mの高さにある幹に相当する点群を切り出し、その点間距離から算出した。精度検証のため、モデルから選択した樹木の樹高と胸高直径を現地で実測した。樹高についてはポータブル型のレーザー距離計 (RIEGL社、LasertapeFG21-HA、精度±5 cm) を使用し、三角測量の原理に基づき測定した。胸高直径は地上から1.2 mの高さの幹にノギスをあてて測定した。実測値とモデル推定値を比較し、誤差を算出した。次に以下の式によって各樹木の幹材積を算出した (The Forest Agency in Japan, 1998)。

$$\log v = a \log d + b \log h + c \quad (1)$$

ここで  $v$  は幹材積 (m<sup>3</sup>)、 $d$  は胸高直径 (cm)、 $h$  は樹高 (m) である。係数  $a$ 、 $b$ 、 $c$  は樹種と胸高直径によって

**Table 1** Coefficients for equations of stem volume estimation (expressed in Eq. (1)) in each tree species (The Forest Agency in Japan, 1998).

Tree species	Diameter at breast height (cm)	Coefficient		
		a	b	c
Japanese cedar	12~30	1.849344	1.008086	-4.219069
	32~40	1.944187	0.894801	-4.211821
	42 and over	1.600066	1.075361	-3.921218
Japanese red pine	4~30	1.863288	1.004738	-4.249808
	32~40	1.895653	0.811988	-4.060353
	42 and over	2.002385	0.888616	-4.347438
Broadleaf tree	4~30	1.834463	1.098828	-4.344385
	62 and over	1.765531	1.073801	-4.174703

異なり、表1の値を用いた。

モデル及び実測から得た樹高と胸高直径に式(1)を適用することで、モデル推定値に基づいた幹材積と実測値に基づいた幹材積とが求められ、この両者を比較し、誤差を算出した。さらに上述した精度検証のために用いた樹木に加え、樹高8m以上の樹木をモデルから抜き出して樹高と胸高直径を算出し、(1)式を用いてそれぞれの樹木の幹材積を算出した。この幹材積推定値と樹木のモデル内での位置をもとに、幹材積マップを作製した。

### 3. 結 果

Fig. 1 A ~ C にライダー計測データから作成された景観モデルによる研究園の景観を示す。人工構造物である研究棟と樹木が明確に識別できる。研究棟については、壁面にある窓や側面の出入り口など、建物の詳細が3次元モデルとして再現されていることがわかる。また、壁面やルーフ等、それぞれの位置関係に応じた陰影効果が加わり、それが視認性を高めていることがわかる。樹木については、各点に施した陰影効果により、葉の茂る様子や幹の状態などを詳細に確認することができる。得られた景観から、園内の樹木の樹高や樹冠の大きさは様々

であり、非常に複雑な形状を有していることがわかる。こうした複雑な形状の木本群落であっても、本方法によってその現況構造を再現でき、任意の方向からの景観を評価できることがわかった。Fig. 1D は Fig. 1A ~ C に示した景観モデルから樹高8m以上の樹木を削除したモデルである。研究棟周辺を囲んでいた樹木がなくなり、Fig. 1A との差が明確に確認できる。削除した樹高8m以上の樹木は21本でそれ以下の樹高をもつ樹木よりはるかに数は少ないものの、それらを削除した後の景観の変化は大きく、本対象地において、こうした樹高の高い樹木が景観に与える影響が大きいことが確認された。

表2は園内にある10本の樹木の樹高と胸高直径、幹材積について、モデルからの推定値と実測値とを比較したものである。スギとアカマツの樹高に関する二乗平均平方根誤差 (Root Mean Square Error: RMSE) はそれぞれ0.22 m と 0.39 m、平均誤差はそれぞれ-0.11 m と -0.29 m であった。平均誤差が示すように、どちらの樹種でも樹高の過小評価が見られた。コジイ (*Castanopsis cuspidata*) とイロハモミジの樹高の誤差はそれぞれ0.08 m と -0.13 m であった。胸高直径については、スギとアカマツのRMSEは0.02 m と 0.03 m、平均誤差はそれぞれ-0.01 m と -0.02 m であった。コジイとイロハモミジではそれぞれ0.03 m と 0.05 m の誤差であった。樹高推定とくらべ、胸高直径の方が推定精度は高かった。表2にある幹材積の誤差は、実測の樹高と胸高直径から算出した値を真値とした場合の誤差を表す。スギとアカマツのRMSEは0.09 m<sup>3</sup> と 0.13 m<sup>3</sup>、平均誤差はそれぞれ-0.06 m<sup>3</sup> と -0.08 m<sup>3</sup> であり、イロハモミジでは0.02 m<sup>3</sup> の誤差であった (コジイについては使用可能な材積式がなかったため、幹材積の算出は行わなかった)。

Fig. 2 は対象エリア内にある樹高8m以上の樹木に関する幹材積の分布マップである。作成した景観モデルか

**Table 2** Biophysical variables of 10 trees obtained from the lidar-derived landscape model and ground-truth measurements.

Tree species	Height (m)			Diameter at breast height (m)			Stem volume (m <sup>3</sup> )		
	Model	Actual	Error	Model	Actual	Error	Model	Actual	Error
Japanese cedar	14.69	14.97	-0.29	0.43	0.47	-0.04	0.88	1.04	-0.16
	11.84	11.92	-0.08	0.34	0.35	-0.01	0.53	0.55	-0.02
	11.84	11.56	0.28	0.23	0.21	0.02	0.25	0.20	0.05
	13.29	13.45	-0.15	0.28	0.28	0.00	0.38	0.40	-0.02
	13.50	13.80	-0.30	0.33	0.37	-0.04	0.57	0.71	-0.14
Japanese red pine	13.18	13.66	-0.48	0.32	0.34	-0.02	0.46	0.52	-0.06
	15.90	15.83	0.07	0.40	0.44	-0.04	0.85	1.06	-0.21
	12.20	12.66	-0.46	0.30	0.28	0.02	0.39	0.36	0.03
Castanopsis cuspidata	9.33	9.25	0.08	0.49	0.46	0.03	-	-	-
Japanese maple	4.76	4.89	-0.13	0.16	0.11	0.05	0.04	0.02	0.02

ら、個々の樹木の幹材積量とその分布を推定可能であることが示された。

#### 4. 考 察

可搬型スキャニングライダーによる景観モデルを作成する場合に問題となるのが、ブラインドエリア、すなわち対象どうしの重なり合いなどでレーザーが届かないエリアの存在である。ブラインドエリアに相当する部分は点群データが欠落してしまうため、そのエリアが大きい場合、現況と景観モデルとの乖離が問題となる。そのため筆者らが以前行った研究では、可搬型と航空機搭載型スキャニングライダーの両方を用いてデータを取得し、両方のデータを結合することでよりブラインドエリアの少ない景観モデルを作成した (Omasa et al., 2008)。本研究の対象地は様々なサイズの樹木が密生していたため、特に樹木どうしの重なり合いによって生じるブラインドエリアが問題であった。そこで本研究では、樹木と樹木の上に複数の計測点を設置し、より多くの領域にレーザーが行き渡るようにした。この方法により、ブラインドエリアを減らすことができたものと考えられる。ブラインドエリアの少ない景観モデルでは、Fig. 1BやCのように真上から見た場合やはるか上空から俯瞰した場合など、人が容易には到達できない地点からの景観についても現況構造を反映したものとなる。こうした景観の評価を実踏調査で行うことは困難であり、このような景観も含め、あらゆる角度から現況をよく反映したモデルをもとに景観の評価が行える点が、本方法の大きな利点と考えられる。本モデルがどの程度現況を再現できているかの精度の目安としては表2に示した樹木構造パラメータの推定精度を参考にすることができる。樹木の上層部はおよそ誤差数10 cm以内 (樹高の推定精度に相当)、樹木の中層から下層に相当する部分としては誤差数cm以内 (胸高直径の推定誤差に相当) で現況を再現できているものと考えられる。本モデルではこのような庭園景観の現状評価に加え、Fig. 1Dが示すように樹木が伐採された場合の景観の変化も評価することができる。構造物の改修や樹木の植え替え、伐採など景観の変化を伴う作業を行う場合、どのように景観が変化するかを予測しながら作業計画を立てることが重要であるが、本モデルはこうした景観変化を評価するためのツールとしても利用可能であると考えられる。

本モデルから得られた樹木の構造パラメータのうち、樹高の過小評価については、地上からの可搬型スキャニングライダー計測の際に樹木の頂点にレーザーが到達しなかったためと考えられる。本方法では多点計測によりブラインドエリアを少なくしているが、樹木の上層

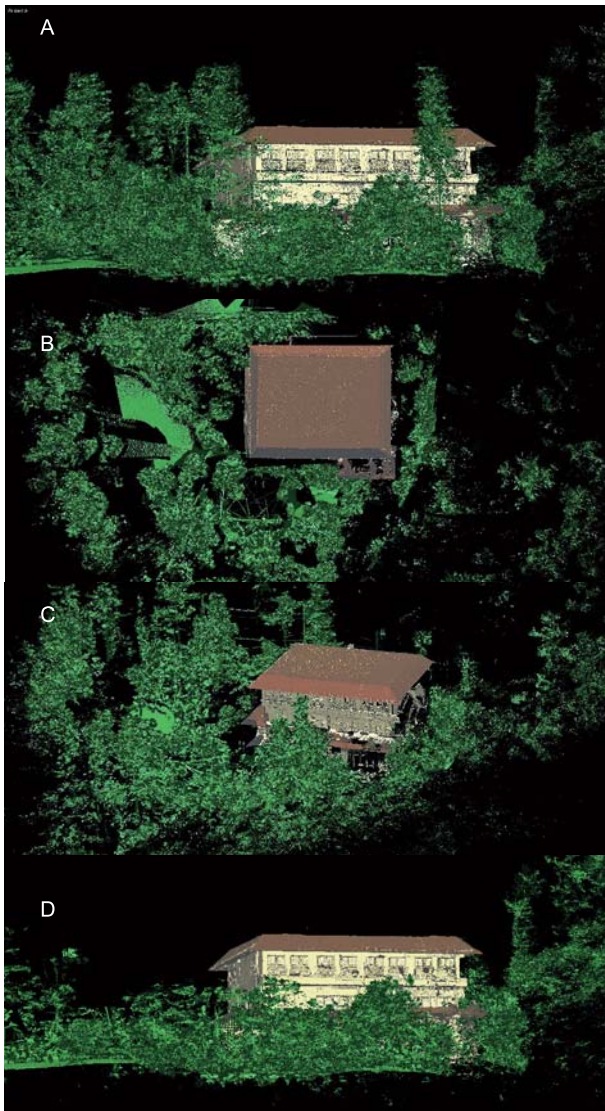


Fig. 1. Landscapes of the targeted garden derived from a 3-D landscape model produced by portable scanning lidar images. (A) Front view (B) Top view (C) Bird's-eye view and (D) Front view after removal of trees with over 8 m height.

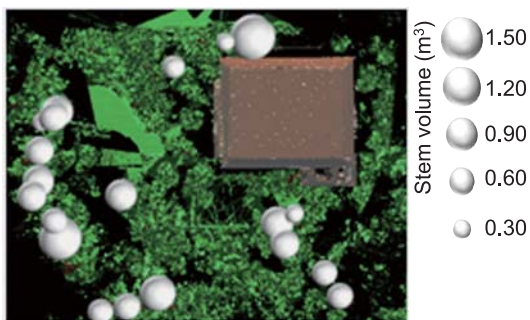


Fig. 2. A stem volume map in the targeted garden derived from a 3-D landscape model produced by portable scanning lidar images.

部は中層部や下層部に遮られ、レーザービームが到達しにくく、この方法で完全にカバーすることは難しい。より高所の計測や上空からの計測を組み合わせることで、このような誤差を小さくしていくことが可能であると考えられる。

本モデルから推定可能な樹高や胸高直径などの樹木構造パラメータや Fig. 2 に示す幹材積量とその分布に関する情報などは、公園や庭園の樹木管理に利用できるとともに、園内にある樹木の二酸化炭素固定機能 (Handa et al., 2005) や大気汚染物質吸収機能 (Environmental restoration and conservation agency of Japan, 2008) などの評価にも利用可能と考えられる。このように本モデルでは、公園や庭園の景観評価と機能に関する評価を併せて行うことが可能で、このことは既往のモデリング法にはない本方法の大きな利点と考えられる。

## 5. おわりに

本研究では木本群落を有する庭園を対象とし、可搬型スキャニングライダーによる計測画像から景観モデルを作成し、そのモデルが景観評価に適用可能かどうか検証した。計測では地上計測点を複数設置し、複雑に入り組んだ樹木のより多くの領域にレーザービームが到達するようにし、ブラインドエリアの削減に努めた。その結果、対象エリアの現況を再現する景観モデルを作成することができた。さらに得られたモデルより樹木の構造パラメータを推定可能であることが示され、本モデルが公園や庭園の機能評価にも利用可能であることが示された。

今後は本モデルに写真から取得した色情報を付与するなど、景観の質をさらに高める改良が望まれる。また、樹高や胸高直径に加え、葉面積密度や樹木全体の材積など、さらに多くの構造パラメータをモデルから抽出する方法を検討し、公園や庭園の機能評価ツールとしての本方法の実用性を高めていくことが必要であると考えられる。

## 謝 辞

本研究は公益財団法人新技術開発財団による植物研究助成を受けて行われたものである。関係各位に深く御礼申し上げる。

## 引用文献

Bishop, I. D. and Rohrmann, B., 2003: Subjective responses to simulated and real environments: A comparison. *Landscape Urban Plan.*, **65**, 261-277.  
Environmental restoration and conservation agency of Japan, 2008: A

manual of air purification and tree planting. Shukodo, Hiroshima, pp. 296. (環境再生保全機構, 2008: 大気浄化植樹マニュアル. 秀功堂, 広島, pp. 296).  
Handa, M., Teshirogi, J., Funahashi, M., Okazaki, R., Kato, J. and Moriguchi, T., 2005: A study on estimating the amount of carbon stocks by trees in a large park. *J. Japan. Inst. Landscape Arch.*, **68**, 889-892.  
Hayase, M., Imanishi, J., Nakamura, A., Toda, K. and Morimoto, Y., 2009: Landscape Simulation for Restoring Borrowed Scenery of a Japanese Garden Using a Terrestrial Laser Scanner. *J. Japan. Inst. Landscape Arch.*, **73**, 812-816.  
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., Nakai, Y. and Omasa, K., 2013: 3-D voxel-based solid modeling of a broad-leaved tree for accurate volume estimation using portable scanning lidar. *ISRPS J. Photogramm.*, **82**, 41-48.  
Jaeger, M. and de Reffye, P., 1992: Basic concepts of computer simulation of plant-growth. *J. Biosci.*, **17**, 275-291.  
Lange, E., 2001: The limits of realism: perceptions of virtual landscapes. *Landscape Urban Plan.*, **54**, 163-182.  
Lindenmayer, A. and Prusinkiewicz, P., 1988: Development models of multicellular organisms: a computer graphics perspective. In: *Artificial Life* (ed. by Langton, E.C.). Addison-Wesley, MA, pp.221-253.  
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., Uenishi, T.M., Shimizu, Y. and Akiyama, Y., 2008: Three-dimensional modelling of an urban park and trees by combined airborne and portable on-ground scanning LIDAR remote sensing. *Environ. Model. Assess.*, **13**, 473-481.  
The Forest Agency in Japan, 1998: *Timber Volume Table - East Japan*. Nihon Ringyo Chousakai, Tokyo. pp. 223-248. (林野庁計画課, 1998: 立木幹材積表 東日本編. 日本林業調査会, 東京 pp. 223-248)