地上型レーザスキャナを用いた 3 次元環境計測における樹高の推定

戸田健太郎¹⁾・中村彰宏¹⁾・大藪崇司²⁾・前中久行¹⁾

1) 大阪府立大学大学院生命環境科学研究科 Grad. Sch. of Life and Envi. Sci.,
Osaka Pref. Univ. ruapehu@envi.osakafu-u.ac.jp

2) 兵庫県立大学／兵庫県立淡路景観園芸学校 Univ. of Hyogo/ALPHA

摘要: 本研究では地上型レーザスキャナを用いて、計測距離の増加に伴う木材および植物体梢端部の検出能力および高さの誤差を検証し、低密度樹林地における樹高実測値と推定値の比較を行った。その結果、木材および植物体の高さはほとんどの計測距離で測器の最高角度ステップで計測した場合は過大評価、実利用域の角度ステップで計測した場合は過小評価となった。樹林地での計測において基部および梢端部の位置を点群データから目視で特定した場合、樹高の誤差は平均-0.02 m と高い精度であった。しかし、樹木の基部の座標から一様にバッファを発生させ、バッファ内の点群データから基部と梢端部の高さの差を抽出し樹高を推定する手法を用いた場合、隣接木を誤認識することによって過大評価される個体があった。

キーワード: 地上型レーザスキャナ, 樹高, 梢端部, 角度ステップ, フットプリント

TODA, Kentaro, NAKAMURA, Akihiro, OYABU, Takashi and MAENAKA, Hisayuki : **Estimation of tree height for three-dimensional environmental measurement using a terrestrial laser scanning system.**

Abstract: We investigated height errors of wooden poles and plant tops at different measurement ranges using a terrestrial laser scanning system. Then tree heights calculated from the laser scanner data were compared with those derived from manual field measures in an open forest. Therefore heights of wooden poles and plant tops were overestimated at the finest angle stepwidth, but underestimated at available angle stepwidth for almost all measurement ranges. Accuracy of tree heights derived from the laser scanner data by manual operation was high and the mean error of those was -0.02m in this forest. But tree heights calculated from the point clouds buffered around locations of tree bases were often overestimated because the points corresponded to neighbor trees were misrecognized as those corresponded to own tree.

Key Words : terrestrial laser scanner, tree height, plant top, angle stepwidth, beam footprint

1. はじめに

近年、地形や建物等の 3 次元形状を短時間で広域かつ高分解能で計測できる測器のひとつとしてレーザスキャナが注目されている。レーザスキャナとは lidar(光検知と測距)技術を用いた測器で、近赤外線レーザパルスを出し物体からの反射光の飛行時間から距離を、射出した方向と垂直角から 3 次元座標を算出することができる。レーザスキャナには主に広範囲のデータを取得することができる航空機スキャナと、航空機スキャナと比較すると計測範囲は狭いものの高分解能、高精度で計測できる地上型スキャナの 2 種類があり、計測対象の面積や必要とするデータの分解能によってどちらを用いるかが決められる。航空機スキャナを用いた研究事例としては、森林のバイオマス評価¹³⁾や土地被覆分類¹¹⁾、林冠の高さの計測¹⁰⁾、ハリケーン後の海浜の移動量¹⁶⁾等があり、地上型スキャナを用いた事例としては氷河における斜面物質の日移

動量⁵⁾や砂丘の移動量の推定⁹⁾、河口域の微地形計測と冠水特性の評価²⁰⁾、排砂時のダムの水位変化¹⁷⁾、森林構造の分析^{4, 21)}、天空率²⁾や葉面積指数の算出⁸⁾等があげられる。特に地上型レーザスキャナはその高い分解能と精度から、従来の航空機スキャナでは計測できなかった微細な環境要素を計測できる測器の一つとして、更なる応用が期待されている。

一方でレーザスキャナは測定原理上、測器が持つ機械誤差に加えて対象物の形状や対象物までの計測距離、さらに計測角度ステップの違いによっても計測結果に違いが生じると考えられる¹¹⁾。センサの仕様により一般的に航空機スキャナでは水平方向に対地高度の 1/2,000 程度、垂直方向に±15 cm 程度、地上型スキャナでもレーザ射出方向に±1 cm 程度の機械誤差が生じるとされているが^{14, 15)}、さらに航空機スキャナでは GPS/IMU システムにより生ずる誤差が¹⁵⁾、地上型スキャナでは複数の計測データを結合するときに生じる誤差があり^{3, 6)}、実際に取得したデータがどの程度の誤差を含むのか十

分に検討する必要がある。既存の研究では実験室レベルで単一視点からの計測による精度の検証を行ったものは存在するが森林内のようなフィールドでの利用を想定して精度を検証した例は少ない。そこで本研究では、森林調査における基礎的な測定項目の一つである樹高計測に着目し、植物体梢端部の検出能力の模擬実験を行い、低密度樹林地における複数点での3次元形状計測から樹高を推定することで、フィールドにおける地上型スキャナの実用性を検証した。

2. 研究方法

2.1 地上型レーザスキャナの概要

本研究における3次元形状の計測には地上型レーザスキャナ(Riegl社 LMS-Z420i, 以下スキャナ)を用いた。本研究で用いたスキャナは水平方向に360°, 垂直方向に80°の範囲について、それぞれ最小0.004°の角度ステップで計測することができる¹⁴⁾。レーザの波長は1,550 nm, ビームの拡散角度は0.25 mradである。ポイントデータには3次元座標のほかに反射率(Intensity)および色情報(RGB:オプション)が与えられるが、反射率が0.03を下回るポイントについては計測できない。なお、測定時のすべての操作は測器とLANで接続されたノートパソコンより専用ソフトウェア(Riegl社 RiSCAN PRO)を用いて行った。

2.2 植物体梢端部の検出能力

スキャナの植物体梢端部の検出能力を検証するため、2008年3月4日に大阪府立大学内において、木製の丸材および植物体を用いた模擬実験を行った。太さの異なる材における検出能力の違いを確認するため、丸材は直径1.8 mm, 3.0 mm, 4.0 mm, 5.0 mm, 6.0 mm, 7.0 mm, 8.0 mm, 10.0 mmの8種類を用意し、長さは25 cmに統一した。植物体はケヤキ、アキニレ、コナラ、ヨシの4種の切った枝先を用意し、高さは32.4 cmから48.5 cmであった。ケヤキ、アキニレ、コナラの枝先の芽の直径の平均値はそれぞれ1.1 mm, 1.7 mm, 3.0 mmであり、ヨシの穂先の直径は計測できなかった。丸材および植物体はお互いの梢端部が干渉しないように中心部から30 cm離して水平に設置された木製の板の上に垂直に設置された。計測距離における検出能力の違いを確認するため、対象を目視でとらえることのできる250 mを最長距離とし、約20 m, 40 m, 80 m, 160 m, 250 m(実際には21 m, 42 m, 82 m, 158 m, 256 m)の5段階設定した。計測に用いた角度ステップは水平角、垂直角ともにスキャナの最高性能である0.004°と、データ取得にかかる時間や解析の効率からフィールドで用いるのに現実的な0.03°の2パターンとし、ファーストパルスおよびラストパルス記録した。各設定における反復はそれぞれ3回とした。

2.3 樹高推定のための精度検証

(1)調査対象地

フィールドにおける樹高推定の精度を検証するために兵庫

県淡路市夢舞台内の花木林苑において3次元計測を行った。対象地は面積約0.5 ha, 南向きの傾斜地であり、午前中は日当たりが良く日射を遮るものはない¹⁸⁾。1999年に造成され、現在オオシマザクラ、ハナミズキ、サルスベリ、ヤブツバキ、エゴノキなどの花木を中心に、クヌギ、コナラ、ケヤキなどの落葉広葉樹も植栽されており、造成当初は25種548本が植栽されていた¹⁸⁾。

(2)調査方法

スキャナを用いた継続的な継続調査を行うことによって成長量の算出を可能にするために落葉期である2008年2月18日に周辺建物屋上部4ヶ所と林苑周辺道路3ヶ所の計7ヶ所から3次元形状計測を行った。計測を屋上部と地表面から行った理由は、樹高推定に必要な樹木の基部と梢端部を確実に捉えるためである。角度ステップは各設置点で0.03°に統一し、ファーストパルスのみを記録した。林苑内に基準点の役割をもつ円筒型の高輝度反射ターゲットを20個設置し、それをスキャナおよびトータルステーション(TOPCON社 GPT-1004F, 測距精度±1 cm)で計測することで、複数点でのデータの結合を可能にした。また林苑内の樹木のうちスキャナからの視認性が良いと思われる118サンプルについては測測を用いて樹高を実測するとともに、トータルステーションを用いて基部の座標を計測した。

(3)データ処理

取得した点群データは図-1の手順で処理した。まず専用ソフトウェアを用いて計測した点群データから歩行者や鳥、太陽光の影響と思われるノイズを目視によって除去した。次に樹高推定に不要な林苑の範囲外およびスキャナから150 m以上離れた点群データを削除し、軽量化および解析の高速化のために1 cm×1 cm×1 cmの立方体を設定し、その立方体内に複数の点が存在する場合、それらの座標値を平均して1点になるようにフィルタリングを行った。その後、反射ターゲットの位置を元に7地点の点群データを結合し、ASCII形式でエクスポートした。エクスポートした点群データをGISソフトウェア(ESRI社 ArcGIS 8.3)にインポートし、25 cm×25 cmメッシュ内の点群データの最高値と最低値を算出し、DSM(Digital Surface Model)およびDTM(Digital Terrain Model)とした。さらにDSMからDTMを差し引き

図-1 データ処理のフローチャート

Fig.1 Flowchart of the data analysis.

たものをDCM(Digital Canopy Model)として定義した。また樹高推定法として、サンプル個体の基部の座標から直径 0.1 m から 5.0 m まで段階的にバッファを発生させバッファ内の点群データの最高値を梢端部、最低値を基部の高さとして抽出し、梢端部と基部の差を樹高として算出した。

3. 結果と考察

3.1 植物体梢端部の検出能力

計測した点群データの一例を図-2 に示す。このようにスキ

図-2 計測した点群データの一例 (計測距離:20 m, 角度ステップ 0.004 °) [左:丸材 5.0 mm, 右:ケヤキ]

Fig.2 A sample of acquired point cloud.

図-3 計測距離と丸材の長さの誤差の関係 (左:角度ステップ 0.03 ° , 右:角度ステップ 0.004 °)

Fig.3 Relationship between measurement ranges and height errors of wooden poles. (left:0.03 ° , right:0.004 °)

図-4 計測距離と植物体の高さの誤差の関係 (左:角度ステップ 0.03 ° , 右:角度ステップ 0.004 °)

Fig.4 Relationship between measurement ranges and height errors of plant tops. (left:0.03 ° , right:0.004 °)

ャナから比較的近い距離では丸材、植物体ともに輪郭が明瞭であるが、計測距離が長くなるにつれて対象を捉えたポイント数は少なくなり輪郭も不明瞭になった。計測距離 160 m 以上ではビームが対象を捉えることができず、6 mm 以下の丸材および梢端部の細い植物体は、3 反復のうち検出できない計測が 1 回以上あった。計測距離の違いによる丸材および植物体の高さの誤差をそれぞれ図-3 および図-4 に示す。丸材と植物体で結果に大きな違いはなかったが、角度ステップおよび太さの違いによってその誤差に異なる傾向があった。角度ステップ 0.03 ° では丸材の長さおよび植物体の高さともに計測距離が長くなるに従って 160 m で最大 10 cm, 250 m で最大 20 cm 程度過小評価されたが、0.004 ° では枝先が最も細いケヤキを除くすべての丸材および植物体で 160 m までは過大評価され、その傾向も計測距離が長くなるほど大きくなった。しかし、計測距離 250 m では過大評価の傾向は小さくなった。これは図-5 に示す計測間隔とビーム径の関係を見ると理解できる。0.03 ° では計測距離 40 m 以上において常に計測間隔がビーム径より大きくなる。これにより梢端部を的確に捉えることができない可能性が高まり、過小評価を引き起こすと考えられる。一方、0.004 ° では常に計測間隔がビーム径よりも小さくなるため確実に梢端部を捉えること

図-5 ビーム径と計測間隔の関係

Fig.5 Relationship between beam diameters and sampling spaces.

図-6 計測距離と最大占有率の関係

Fig.6 Relationship between measurement ranges and the maximum occupation rates of wooden poles in beam footprints.

ができる。本研究で用いたスキャナは十分な反射率が確保されている場合、ビームのフットプリントに対象物が入るとビームの中心をそのポイントの座標として算出するため、丸材や植物体の高さは最大でビーム径の半分まで過大評価される可能性があり、誤差は計測距離が伸びるほど増加する。しかし、フットプリントに入る対象の割合が極端に小さくなると十分な反射率が確保できず、ポイントとして計測できないため 250 m では過大評価の傾向は減少に転じたと考えられる。丸材の中心にビームが当たった場合の計測距離における丸材の最大占有率を図-6 に示す。このように測定距離が長くなるほど占有率は低下するため、梢端部の認識は困難になると考えられる。また、レーザの反射率が 0.03 を下回ると認識できないことから、丸材の反射率を計測距離 20 m で直径 10 mm の丸材を計測した際の中心部の反射率をもとに 0.25 と仮定し、フットプリント中の丸材の占有率と丸材の反射率よりレーザの反射率が 0.03 となる時の丸材の長さの最大誤差を推

定した。図-7 より、フットプリントの面積 S とフットプリント中の丸材の面積 S' の比率および丸材の反射率から、 $0.25S'/S$ が 0.03 となる時の誤差 E が最低占有率時の丸材の長さの最大誤差として算出できる。計測距離と算出した最低占有率時の丸材の最大誤差の関係を図-8 に示す。図-8 から太い丸材はある一定の距離までは過大評価され、さらに計測距離が長くなると過小評価となることがわかる。しかし、実験結果とは差異があり、実際には細い丸材も太い丸材と同様に過大評価される傾向があった。ビームが丸材の中心から最も外れた場所に当たった場合の占有率は、角度ステップ 0.004° では計測距離 300 m までで最大でも 5 % 程度しか最大占有率との差はなかったが、 0.03° では計測距離 60 m で最大 46 % の差があり、70 m 以上では認識できなくなる可能性があることがわかった(図-9)。これは 0.03° では梢端部を捉えられないことによる過小評価が起こりやすいということを示唆しているが、実際には計測距離 160 m までは丸材が認識

図-7 フットプリント中の丸材の占有率と丸材の長さの誤差の算出

Fig.7 Calculation of the occupation rate and height error of wooden pole in the beam footprint.

図-8 計測距離と最低占有率時の丸材の長さの誤差の関係

Fig.8 Relationship between measurement ranges and height errors of wooden poles at the minimum occupation rate.

図-9 角度ステップ 0.03° の時の計測距離における丸材の占有率の最低値

Fig.9 The minimum occupation rates of wooden poles in the beam footprint at the angle stepwidth 0.03° .

図-10 対象地の点群データの鳥瞰図

Fig.10 Birdview of registered point cloud.

図-11 対象地の DSM(左), DTM(中), DCM(右)

Fig.11 DSM(left), DTM(center), DCM(right) of study area.

されなくなることはなかった。図-8および9から推測される誤差と実験結果に差があることは、対象素材の反射率が一樣でないことや、エッジ効果¹⁾、計測距離の増加によるビーム拡散の影響等に起因していると考えられるが、原因の特定には更なる実験が必要である。太さについては、同じ計測距離では細い丸材および梢端部の細い植物体ほど過小評価される傾向があり、その傾向は計測距離が長くなるほど拡大した。これについても距離が長くなるほどビームの中に入る丸材および植物体の割合が減少し認識しにくくなるのが原因であると考えられる。

3.2 樹高推定のための精度検証

7ヶ所から計測した点群データを不要領域の除去、フィルタリングおよび結合し、計測地点の座標を記したものを図-10に示す。視界の悪い一部においてデータの無い領域が存在するもののほぼ全域において良好に計測できた。点群データの結合に使用された反射ターゲットは各地点で5個から12個で、スキャナで計測した座標とトータルステーションで計測した座標の標準偏差は0.007 mから0.011 mであった。この段階での総ポイント数は約1,120万点であった。この点群データをGISソフトウェアにインポートしDSM, DTMおよびDCMを算出したものを図-11に示す。85,734のグリッドが形成され、1グリッドに格納された点群データの数は平均130.6、最多で4,831であった。DSMからDTMを差し引いて算出されたDCMはグリッド平均で1.29 m、最大で10.21 mとなり、樹高1.5 m程度の低木でも樹冠が認識できるが、苑路沿いの側壁等も抽出された。

樹高の実測値と点群データを用いて算出した推定値の比較を図-12に示す。トータルステーションによって計測された基部の座標から段階的にバッファを発生させた結果、基部についてはバッファ直径を0.5 mに、梢端部については1.5 mに設定した場合に、測距を用いて測定した実測値と最も相関

が高くなった($R^2=0.907$)。この条件での誤差は最大4.88 m、最小-0.98 m、平均0.23 mとなり、低木の一部に大きく過大評価された個体があった。これは低木に隣接する高木の樹冠の一部が低木の樹冠として誤認識されたためであった。またケヤキの一部において梢端部が樹幹から大きく離れた位置にあったために梢端部を特定できず、樹高が過小評価された個体があった。そこで、全118サンプルについて実測値と最も誤差の少ない梢端部のバッファ直径を個別に算出した結果、0.1 mから4.5 mとばらつき樹高と関係ないことがわかった(図-13)。バッファ径が大きくなった個体は周囲の高木の陰になって梢端部が過小評価されたケースが多く、林冠の形状や幹の立ち方といった個体に依存する特性に加え、隣接木との関係によって誤差の小さいバッファ直径は異なることが示唆された。この結果をもとに、全118サンプルについて点群データより目視で認識できる樹形と地表面から、基部および梢端部を特定し樹高を算出した結果を図-14に示す。このときの R^2 は0.997で、推定値と実測値の誤差は最大0.32 m、最小-0.49 m、平均-0.02 mと減少した。このことからスキャナを用いることで樹高を良好に推定できることが示されたが、基部の座標から一様にバッファを発生させて基部および梢端部の高さを抽出し、樹高を推定する方法には過大評価が起こる可能性があることがわかった。

以上より、低密度樹林地においてスキャナは高精度で基部および梢端部を計測できることが明らかになった。森林内におけるスキャナを用いた既存研究において、樹高は過小評価される傾向が強いことが報告されている^{4,6)}。これは測距を用いた実測では梢端部を正確に捉えることができるが、スキャナ計測では梢端部を捉え難いことが原因である。本研究でも実測値との平均誤差で1.7 cm過小評価されたが、その誤差は既存研究より小さいものであった。これは既存研究が梢端部の視界が悪い針葉樹林や高密度樹林地での計測であること

図-12 バッファ直径を1.5 mとして求めた樹高推定値と樹高実測値の比較
Fig.12 Comparison of tree heights calculated from the point cloud at the buffer diameter ranged 1.5m versus those derived from manual

図-13 最も誤差の少ないバッファ直径と樹高実測値の関係
Fig.13 Relationship between buffer diameters of the minimum height error and tree heights derived from manual field measures.

図-14 手動により根元と樹冠梢端部の座標を特定した場合の樹高推定値と測距による樹高実測値の比較
Fig.14 Comparison of tree heights corrected by manual operation versus those derived from manual field measures.

6), 地表面からの計測のみで設置点数が少ないこと⁴⁾等に起因すると考えられる。本研究では既存研究よりも対象面積は広がったが, 地表面 3 ヶ所に加え建物屋上部 4 ヶ所から計測したことで基部および梢端部の視界がともに良好であり, 高い精度を実現できた。

4. まとめ

本研究により, 地上型レーザスキャナを用いた樹高計測が高精度で実現できることが確認された。梢端部の検出能力実験では, 計測距離, 丸材や植物体の太さ, 角度ステップによって計測誤差の傾向に違いがあることが示された。低密度樹林地においては高い精度で樹高計測できることを示したが, 点群のバッファリングによる個体識別と樹高推定には課題を残した。樹高推定の精度を上げるためには, 階層ごとに分けて推定を行う等の個体識別の精度を上げることのできる手法^{12, 19)}の開発が必要である。

地上型レーザスキャナを用いた森林における環境計測技術は更なる発展が求められ, 樹高以外にも胸高直径や樹幹の通減率, 樹冠の大きさ等の従来の測器では計測することが難しい因子を計測する手段としても応用が期待される。また, スキャナを用いた継続的なモニタリングを行うことにより, 森林の成長量や炭素固定量といった意義深い因子を導き出せる可能性がある。今後, 様々な樹林地で計測を行うことにより, 効率的な計測手法の検討および計測データから環境因子を抽出する手法の開発に努めていく必要がある。

本研究の実施にあたり財団法人淡路花博記念事業協会には多大なご協力をいただいた。ここに謹んで謝意を表する。

引用文献

- 1) Boehler, W., Vicent, M. and Merbs, A. (2003) Investigating laser scanner accuracy, Proc. CIPA XIXth Int. Symposium Turkey, 696-702.
- 2) Danson, F. M., Hetherington, D., Morsdorf, F., Koetz, B. and Allgöwer, B. (2007) Forest canopy gap fraction from terrestrial laser scanning, Geosci. Rem. Sens. Lett. IEEE, 4(1): 157-160.
- 3) Henning, J. G. and Radtke, P. J. (2006a) Detailed stem measurements of standing trees from ground-based scanning lidar, Forest Science, 52(1): 67-80.
- 4) Henning, J. G. and Radtke, P. J. (2006b) Ground-based laser imaging for assessing three dimensional forest canopy structure, Photogramm. Eng. Rem. Sens., 72(12): 1349-1358.
- 5) Hetherington, D., Heritage, G. and Milan, D. (2005) Daily fine sediment dynamics on an active Alpine glacier outwash plain, Sediment Budgets, 1:278-284.

- 6) Hopkinson, C., Chasmer, L., Young-Pow, C. and Treitz, P. (2004) Assessing forest metrics with a ground-based scanning lidar, Can. J. For. Res., 34(3): 573-583.
- 7) Lichti, D. D. (2004) A resolution measure for terrestrial laser scanners, Int. Arch. Photogram. Rem. Sens. Spatial Inform. Sci., 34: 216-221.
- 8) Moorthy, I., Miller, J. R., Hu, B., Chen, J. and Li, Q. (2008) Retrieving crown leaf area index from an individual tree using ground-based lidar data, Can. J. Rem. Sens., 34(3):320-332.
- 9) Nagihara, S., Mulligan, K. R. and Xiong, W. (2004) Use of a three-dimensional laser scanner to digitally capture the topography of sand dunes in high spatial resolution, Earth Surf. Process. Landforms., 29: 391-398.
- 10) Nelson, R., Keller, C. and Ratnaswamy, M. (2005) Locating and estimating the extent of Delmarva fox squirrel habitat using an airborne LiDAR profiler, Rem. Sens. Environ., 96:292-301.
- 11) Nelson, R., Krabill, W. and Tonelli, J. (1988) Estimating forest biomass and volume using airborne laser data, Rem. Sens. Environ., 24:247-267.
- 12) Pfeifer, N., Gorte, B. and Winterhalder, D. (2004) Automatic reconstruction of single trees from terrestrial laser scanner data, Int. Arch. Photogramm. Rem. Sens., 35: 114-119.
- 13) Popescu, S. C., Wynne R. H., and Scrivani, J. A. (2004) Fusion of small-footprint lidar and multispectral data to estimate plot-level volume and biomass in deciduous and pine forests in Virginia, USA, Forest Science, 50(4):551-565.
- 14) Riegl Japan (2009) <http://www.riegl-japan.co.jp> Accessed March 12, 2009.
- 15) (社)日本写真測量学会・動体計測研究会編 (2004) デジタル写真測量の理論と実践, (社)日本測量協会, 東京, 343pp.
- 16) Shrestha, R. L., Cater, W. E., Sartori, M., Luzum, B. J. and Slatton, K. C. (2005) Airborne laser swath mapping: Quantifying changes in sandy beaches over time scales of weeks to years, J. Photogramm. Rem. Sens. ISPRS, 59:222-232.
- 17) 角哲也・村崎充弘・藤永清和・名倉裕・玉置晴朗 (2004) フラッシング排砂時における貯水池堆砂の侵食・堆積過程計測に関する研究, 水工学論文集, 48: 1147-1152.
- 18) 高梨智子・大藪崇司・藤原道郎・山本聡・小野由紀子・上田博文 (2008) 淡路夢舞台花木林苑でのハナミズキ植栽環境の把握及び土壌改良による樹勢回復の可能性, ランドスケープ研究, 71(5): 873-878.
- 19) Thies, M., Pfeifer, N., Winterhalder, D. and Gorte, B. (2004) Three-dimensional reconstruction of stems for assessment of taper, sweep and lean based on laser scanning of standing trees, Scand. J. Forest Res., 19(6): 571-581.
- 20) 戸田健太郎・中村彰宏・前中久行 (2007) 地上型 3D レーザスキャナを用いた男里川河口の微地形計測と潮間帯の冠水特性の評価, ランドスケープ研究, 70(5):463-466.
- 21) Watt, P. J. and Donoghue, D. N. M. (2005) Measurement forest structure with terrestrial laser scanning, Int. J. Rem. Sens., 26(7): 1437 - 1446.

(2009. 7. 10 受理)