

称号及び氏名	博士(農学) 戸田 健太郎
学位授与の日付	平成22年3月31日
論文名	地上型レーザスキャナを用いた微地形計測とその環境評価への応用に関する研究
論文審査委員	主査 前中 久行 副査 増田 昇 副査 上甫木 昭春

## 論文要旨

### 第一章 研究の背景および目的

近年、緑地環境学分野では研究対象がよりミクロな環境や動態になるに伴い、従来よりも精細な環境計測が望まれ、様々な測器が用いられるようになった。レーザスキャナは lidar (光検知と測距) 技術を用いた測器であり、地形や建物等の 3 次元形状を短時間に広域かつ高分解能で計測することができる。従来用いられてきた航空機レーザスキャナと比較して高精度、高分解能なデータを取得できる地上型レーザスキャナ (Terrestrial Laser Scanning System, 以下 TLS) は微細な環境要素を計測できる測器の一つとして、その応用が期待される。

本研究では、環境計測手法の一つとして TLS を用いた 3 次元計測に着目し、フィールド利用における TLS の実用性を検証するとともに、環境評価への応用の可能性について知見を得ることを目的とした。まず、フィールド利用を想定した計測精度の模擬実験を行い、対象や距離の違いによる計測誤差を明らかにするとともに、低密度樹林地における樹高計測の精度を検証し、樹高算出法について検討した。また、河口部を対象とした微地形計測と冠水特性の解明を行い、計測データから微地形や植生等に関する情報を抽出することで、微細な環境の違いによってその生息域が規定される河口部のカニ類の分布域の予測を行った。

## 第二章 フィールド利用を想定した地上型レーザスキャナの誤差の検証

森林における基礎的な測定項目の一つである樹高に着目し、TLS を用いた植物体梢端部の検出能力を検証するための模擬試験を行った。長さ 0.25m、直径 1.8mm から 10.0mm までの 8 種類の丸材とケヤキ、アキニレ、コナラ、ヨシの 4 種の切枝を用意し、計測角度ステップ 0.004° および 0.03° で計測距離を約 20 m から 250 m まで変化させた際の木材および植物体梢端部の長さを計測し、計測誤差とその発生要因について考察した。

その結果、TLS の最高分解能である角度ステップ 0.004° で計測した場合、計測距離 160m までは最も枝先の細いケヤキを除くすべてサンプルにおいて過大評価され、計測距離の増加に従いその傾向は大きくなった。しかし、計測距離 250m においてその傾向は縮小し、直径の細い丸材や植物体は過小評価に転じた。一方、計測にかかる時間とその計測範囲からフィールドで用いるのに現実的な 0.03° で計測した場合、最も直径の太い丸材を除き全てのサンプルで計測距離が増加するほど過小評価される傾向が強まり、枝先の細い樹木の切枝は計測距離 160m では最大 0.10m 程度、250m では最大 0.20m 程度、過小評価された。角度ステップによる誤差の傾向の違いはレーザのフットプリントと角度ステップの関係、およびレーザのフットプリント内の対象の占有率と反射率から説明することができたが、理論値と実測値の間には差異があった。

## 第三章 地上型レーザスキャナを用いた低密度樹林地における樹高算出

低密度樹林地における複数点での計測から樹高を算出することで、フィールドにおける TLS の実用性を検証した。兵庫県淡路市夢舞台の花木林苑を対象とし、地表面 3 地点および建物屋上部等の高度の高い 4 地点の計 7 地点から計測を行った。林苑内の樹木のうち TLS からの視認性が良いと思われる 118 個体については測程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。計測データから 0.25m メッシュの DSM (Digital Surface Model : 表面図), DTM (Digital Terrain Model : 地形図), DCHM (Digital Canopy Height Model : 樹冠高図)を作成した。樹高は樹木個体の基部の位置を元に水平に直径 0.1m から 5.0m まで段階的にバッファを発生させ、バッファ内の DSM の最高点および DTM の最低点をそれぞれ梢端部および基部と定義し、梢端部の高さから基部の高さを差し引いて算出した。

その結果、樹木の基部および梢端部を手動で特定した場合、実測値との相関は $R^2=0.99$ 、平均誤差は-0.02m、二乗平均平方根誤差は 0.09m と高い精度を示し、TLS を用いた樹高計測が高い精度で実現できることが明らかになった。樹高算出の結果、樹木の基部についてはバッファ直径を 0.5m に設定した際に( $R^2=0.99$ )、梢端部についてはバッファ直径を 1.5m に設定した際に実測値と算出値の相関が最も高くなった( $R^2=0.91$ )。しかし、一部の樹木において隣接する高木の樹冠の影響を受け樹高が過大評価され、その傾向は樹高が低いものほど大きくなった。梢端部が樹幹から離れた位置に存在する形状の樹木個体では、バッファ内に梢端部が含まれず樹高が過小評価されることがあった。樹高算出に最適なバッファ直径を個別に算出した結果、樹高には依存せず、個体の特性に加え群落内の環境の違いによって異なることが示唆され、バッファリングによる個体識別と樹高算出には課題を残した。

#### 第四章 地上型レーザスキャナを用いた河口の微地形計測と冠水特性の評価

生物相が豊かな干潟を含む河口部において TLS を用いた計測を行い、微地形と潮位の関係から冠水特性の評価を行った。大阪府泉南市と阪南市の境に位置する男里川河口部を対象とし、防波堤上 3 地点および河口内の砂嘴状マウンド 4 地点の計 7 地点で計測を行った。計測データから DTM を作成し、淡輪港の毎時潮位データを元に潮位変動に伴う陸域および水域の変化を示した。

その結果、潮間帯のやや上部にあたる標高 0.44m に面積頻度のピークがあることが明らかになり、年間の潮位差から潮間帯の面積は 3.35ha と算出された。砂泥が堆積しやすい潮間帯内における傾斜角 1° 以下の平坦地の面積割合は標高 0.40–0.50m で最も高く 34%であった。標高 0.23m を境に年間干出率が冠水率を上回り、最も頻度の高い標高 0.44m では干出時間が年間 6,364 時間となり、年間 73%が水面上にあることがわかった。最も数多く干出と冠水を繰り返す標高は 0.29m で年間 582 回であった。また、潮位変動の月別変化から最低、最高潮位および潮間帯の幅はそれぞれ 0.52m, 0.46m, 0.40m 変化し、月別に算出した潮間帯面積の平均は 2.73ha と年間の 81.5%に減少した。月別冠水率は標高 0.43m において 36.5%と最も大きく変動し、最も多く干出と冠水を繰り返す標高とは 0.14m のずれがあった。以上より、干出および冠水特性は時間単位の比較的短いスケールと月単位の長いスケールの 2 つの変動があることが明らかになり、潮位変動と平坦地形成の関係が示唆された。

#### 第五章 分類樹モデルを用いた河口部におけるカニ類 3 種の分布予測

河口部において TLS を用いた計測データから抽出された標高、冠水率等の変数と、現地調査から得られた底質環境等の変数から、カニ類 3 種の分布域について分類樹モデルを用いて予測した。男里川河口部を対象とし、防波堤上 4 地点および河口内 8 地点の計 12 地点で計測を行った。現地調査は対象地内でランダムに設定した 367 調査区において実施した。

その結果、ハクセンシオマネキ、ヤマトオサガニ、アシハラガニが確認された調査区数はそれぞれ 78, 35, 75 であり、複数種が共存する地点が多数確認された。カニ類 3 種はほとんどが右岸干潟とそれに隣接するヨシ原内で確認され、平均標高はそれぞれ 0.54m, 0.38m, 0.58m であった。カニ類 3 種が確認された調査区の細粒砂以下の粒径の割合についてはそれぞれ、平均 49.7%, 74.0%, 58.2%であり、細粒砂以下の粒径の割合が 15%以下の調査区でカニ類が確認されたのは 3 調査区のみであった。説明変数に計測データから抽出された変数と現地調査から得られた変数を用いて構築した分類樹モデルの結果、カニ類 3 種のいずれも標高もしくは標高と相関をもつ冠水率、および細粒砂以下の粒径の割合が高い DWS (Deviance Weighted Score: 分離貢献度)を示し、モデルの予測精度を判定する ROC (Receiver Operating Characteristic)解析による予測精度指数 AUC (Area Under the Curve)の値はそれぞれ、0.94, 0.99, 0.97 と良好な値を示した。取得に時間と労力がかかる現地調査から得られた変数を用いず、計測データから抽出された変数だけを用いて構築した分類樹モデルの結果、いずれも標高、平坦地までの距離、植物群落までの距離が DWS を示し、AUC の値も先のモデルと大差がなかった。先のモデルとの合致率がそれぞれ、0.88, 0.93, 0.90 と高い値を示したため、

このモデルを用いてカニ類 3 種の分布適域を示したところ、実際の生息状況に類似していた。以上より、地表面を高精度に計測できる TLS を用いて抽出した変数からカニ類の分布適域を予測することができる可能性を示し、河口部の環境を理解する上での TLS の有用性を示した。

## 第六章 まとめ

本研究により、TLS を用いることにより広範囲、高精度、高分解能な環境計測を実現することができ、計測データから微細な環境要因を抽出することができた。低密度樹林地を対象とした樹高算出においては、樹木の基部および梢端部を正確に捉えるために複数の高度からの計測を行うことにより、既存の研究よりも計測誤差を小さくすることができた。見通しの良い樹林地において TLS を用いて高精度で樹高計測を行うことができたが、樹高算出法には課題を残した。河口部における微地形計測とカニ類 3 種の分布予測では、3 次元計測データから抽出された微地形や植生に関する変数が分布を規定する要素として貢献度を示した。予測精度の高い分布予測モデルを作成することができ、河口部におけるカニ類 3 種の分布域を面的にとらえることができた。TLS を用いることにより、従来の手法では困難であった動植物の生育、生息に影響を与える微細な環境要因を面的に評価できることを示した。

## 審査結果の要旨

近年、森林破壊、砂漠化といった大きなスケール環境問題に加え、動植物の地域個体群およびその生育・生息環境の保全といったマイクロなものまで様々な対象が注目され、従来よりも高精度、高分解能、かつ広範な土地を対象として、環境を計測し生物の動態を把握し、実効性のある保全計画を示すことが要望されている。いっぽう様々な測器も開発され、その一つとして地上型レーザスキャナ(以下 TLS)は、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として、その応用が期待されている。

本研究は、TLS を用いた 3 次元計測に着目し、計測精度の検証、樹林地における樹高計測方法の確立、また、河口部を対象とした微地形計測による冠水特性の把握、カニ類の生息条件も解明およびその分布予測を通じて、フィールド利用における TLS の有効性を示し、環境評価への応用可能性についての知見を得ることを目的としたものである。得られた成果は以下の通りである。

1. TLS による対象物の検出能力を明らかにするため太さが異なる丸材および植物 4

種の切枝を用い、計測角度ステップおよび計測距離を変化させた時の対象物の長さの計測精度を検証し、誤差の発生要因について考察している。その結果、角度ステップ  $0.03^\circ$  で計測した場合でも樹木切枝の長さの計測誤差は距離 160m では最大 0.10m 程度、250m では最大 0.20m 程度の過小評価にとどまることなど、フィールドで TLS を用いる場合に現実に可能でかつ高精度で測定を行うための基礎的条件を明らかにしている。

2. 低密度樹林地を対象に TLS の計測データから 0.25m メッシュの DSM (Digital Surface Model : 表面図), DTM (Digital Terrain Model : 地形図), DCHM (Digital Canopy Height Model : 樹冠高図) を作成したうえで、樹木の基部から水平にバッファを発生させ樹高を算出する手法を確立している。樹木の基部および梢端部を手動で特定した場合には実測値との相関は  $R^2=0.99$ , 平均誤差は  $-0.02\text{m}$  と高い精度が得られること、また、樹木の基部から水平に直径を段階的に変えたバッファを発生させ、バッファ内の DSM の最高点を梢端部とした場合には、バッファ直径 1.5m が最も一致度が高い ( $R^2=0.91$ ) ことを明らかにしている。

3. 生物相が豊かな干潟を含む大阪府の男里川河口部を対象とし、TLS 計測データから DTM を作成し、淡輪港の毎時潮位データを元に潮位変動に伴う陸域および水域の変化を示し、潮間帯の面積、各平坦地の面積とその分布標高、標高別の干出率と冠水率などの干潟の特性を明らかにした。

4. TLS を用いた計測データから抽出された標高、冠水率等の変数と、現地調査による底質環境等の変数およびカニ類 3 種の分布調査から、カニ類の生息地の特性を明らかにし、さらに分類樹モデルを用いて分布可能域を予測している。ランダムに設定した 367 調査区においてハクセンシオマネキ、ヤマトオサガニ、アシハラガニが確認された調査区数はそれぞれ 78, 35, 75 であり、標高平均はそれぞれ 0.54m, 0.38m, 0.58m, 細粒砂以下の粒径の平均割合はそれぞれ 49.7%, 74.0%, 58.2%であった。TLS 計測に由来する変数と現地調査から得られた変数を用いた分類樹モデルでは、カニ類 3 種のいずれも標高もしくは標高と相関をもつ冠水率、および細粒砂以下の粒径の割合が高い DWS (分離貢献度) を示し、AUC (予測精度指数) はそれぞれ、0.94, 0.99, 0.97 と良好な値を示した。取得に時間と労力がかかる現地調査から得られた変数を用いず、TLS 計測に由来する変数だけを用いて構築した分類樹モデルでは標高、平坦地までの距離、植物群落までの距離が高い DWS を示し、AUC の値も先のモデルと大差がなく、先のモデルとの合致率はそれぞれのカニで 0.88, 0.93, 0.90 と高い値であったため、このモデルを用いてカニ類 3 種の分布適域を地図上に表現し、それが実際の生息分布に類似していること明らかにしている。

本研究の成果は非常に有用な基礎的データを提供するものである。これらは今後の緑地環境保全の展開に非常に有用な知見を提供している。また、従来の方法では計測自体が対象地の破壊を招く恐れがある干潟などのデリケートな生態系の環境計測において、調査の影響を最小化することが可能であり、かつマイクロな環境特性や環境動態を詳細に

把握できる TLS による計測とそれにもとづく解析と予測の有用性を示している。

これらの成果は、緑地環境保全学ならびに地域環境科学領域の発展に大きく寄与するものと考えられ、最終試験の結果と併せて、博士(農学)の学位を授与することを適当と認める。