

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 8 日現在

機関番号：82105

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K14763

研究課題名（和文）新たな点群処理技術に基づく森林3次元データ高次利用システムの開発

研究課題名（英文）Development of a new application method for forest 3-D point clouds

研究代表者

平岡 裕一郎（Hiraoka, Yuichiro）

国立研究開発法人森林総合研究所・林木育種センター・室長

研究者番号：50370862

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、地上型レーザスキャナで取得された森林の3次元点群データの新たな解析手法の開発を目的として実施した。森林で取得した点群データについて、自動かつ高速で個体・器官（幹・枝・葉）に分割し、それぞれの器官をモデル化する手法を開発し、構築したモデルから各器官のサイズや形状を推定した。樹木サイズ等の推定パラメータと、試験林における実測値との比較・検証を行った結果、樹高や幹直径の推定精度が実用レベルとして十分高いことが示された。本研究で開発した一連の手法は、森林樹木の形態計測に利用可能であり、従来の森林調査に代わる新たな計測技術となり得る。

研究成果の概要（英文）：In this study, our objective is to develop a new analysis method for 3-D point clouds obtained in forest stands using the terrestrial LiDAR. We developed a rapid and automatic method of dividing point clouds into each individual tree and of subdividing into stem, branch and foliage, and of modeling these organs. We also estimated morphological traits of the organs. We have evaluated several traits such as tree height and stem diameter based on the modeling method and validated the estimation. As a result, the validation showed that our method could accurately estimate those traits. We believe that the developed method in this study is effective for measuring morphological traits and it may be able to replace the traditional forest survey methods.

研究分野：林木育種学、森林生態学

キーワード：3次元点群 地上型レーザスキャナ 樹木モデル 高速処理

1. 研究開始当初の背景

樹木の幹・枝・葉の3次元構造は、樹木個体や森林の一次生産量を規定し、同時に他の生物が息する森林生態系を形成する。これまでに、枝葉の垂直構造など、森林の空間構造を計測し、その生産性や生態系の複雑性を理解するための研究が数多くなされてきた。しかし、従来の測定は、木登りや伐倒等、多大な労力を要する。このように、森林の空間配置を3次元的に捉えることは困難であり、技術的な確立と測定精度の向上が求められていた(加藤ほか 2014)。また、森林生態学、森林計測学あるいは林木育種学等における大面積の林分を対象とした調査では、コストや労力の面からごく限られた形質を測定するにとどまる場合が多かった。このため、こうした従来の測定で得られる情報は限定的にならざるを得ず、計測手法の改善が望まれていた。

近年、測量分野のレーザ計測技術が発展し、地上型レーザスキャナにより、高密度点群の3次元座標が取得できるようになった。これにより、森林内部や樹木の正確な構造を短時間で取得できるとの期待が高まり、多数の森林で3次元データが蓄積されつつある。しかし、一度に得られる点群量は膨大で取り扱いが困難な上、標準的な解析手法が確立しておらず、点群の実用的利用は遅れていた(加藤ほか 2014)。こうした問題を解決することを目指し、本研究を開始した。

2. 研究の目的

本研究では、森林で得られた点群の新たな解析手法を開発することを目的とした。点群のグラフ処理手法をベースとし、樹木の構造を高速かつ自動的に再構成する手法と、樹木器官(幹・枝)を正確にモデル化する手法を開発することを目標とした。

3. 研究の方法

(1) 計測対象林分と計測方法

本研究では、固定式の地上型レーザスキャナで取得した点群データを用いた。用いた地上型レーザスキャナは HDS7000 (Leica-Geosystems) また Focus 3D (FARO) である。計測対象は、スギ、ヒノキ及びアカマツ試験林とした。各試験林について複数のレーザ計測を実施し、得られた点群データを試験地ごとで統合し、グローバル座標へ変換したものをを用いた。

レーザ計測と併せて幹直径及び樹高を現地で実測した。幹直径は輪尺を用い、最大値と、最大値点と直行する方向の直径を平均した。なお地上高 1.3m 地点における直径を胸高直径とした。また樹高の実測には VERTEX III (ハグロフ社) を用いた。

(2) 点群データの解析方法

レーザスキャンで得られた点群について、次のように解析を進めた。解析環境は、OS が

Ubuntu 64bit、CPU が Intel® Core i7-5960X、実装 RAM が 64GB である。まずデータ内の点から地表を除去した。ここでは処理を高速化するため、点群データを距離画像として扱った。次に、大規模環境点群を限られたメモリで処理するために、点群を連結領域に分割した後、個々の連結成分をメッシュモデルに変換した。次に、メッシュモデルを平面で切断した切断線を算出した。得られた切断線集合を用いて、樹木の骨格構造を算出し、樹木形状を再構成した。また幹や枝のモデル化の前にノイズとなる葉成分の除去を試みた。以下にその詳細を示す。

地面成分の除去

前処理として、RANSAC 法による地面成分の除外を行った。ここでは、同一平面上か判定する閾値を定めて平面を求め、その平面から近い距離にある点を、地面を構成する点として除外した。森林内では地面の凹凸が激しく、樹木抽出の際にノイズとなる雑草も生えているため、閾値を大きく設定した。

点群からの葉成分の分離

点群の持つ反射強度を利用し、枝と葉の点群を分離した。反射強度のヒストグラムから枝や葉の分布する反射強度の範囲を特定し、適切な閾値を求めて葉の点群を除去した。

距離画像を用いた連結領域の分割

レーザ計測における方位角と仰角を用いた2次元の距離画像を生成し、距離画像上の隣接点の接続性から連結領域を算出した。この処理を距離画像全体に適用することで、連結領域の集合を生成した。連結領域を構成する点の個数が閾値以下の場合、ノイズとして除去した。ここでは閾値を 100 ピクセルとした。

メッシュによる樹木の切断線の取得

領域分割された点群を、メッシュモデルに変換した。点群データによって2次元の距離画像が生成されているため、その隣接関係を用いて面を構成した。生成されたメッシュモデルを平面で切断し、切断線を生成した。平面は、高さを変えながら一定間隔で切断を繰り返した。全ての連結成分に対して、切断線を生成し、対象林分全体の切断線の集合を取得した。

幹の検出

距離画像から生成したメッシュを等間隔な平面で切断することで、高さごとにエッジと切断面の交点を切断点として算出した。同様に複数のデータから切断点を算出し、同じ高さにある切断点を併合した。次にドロネ分割によって切断点集合を構造化し、閾値より近傍にある頂点をグルーピングし、得られたグループごとに円弧フィッティングを行うことで、幹を構成する断面の候補とした。さらに、得られた各円弧に対して上下の切断面に

存在する類似した円弧と互いに連結し、得られた連結成分のうち、含まれる断面の個数が閾値よりも多かったものを幹の骨格とみなして一般化円筒表現による幹のモデルを得た。得られた幹モデルの根元位置を xyz 座標で記録した。

枝を含む樹木骨格のモデル化

枝の候補となる点群を抽出した後、距離画像から得た連結領域ごとに主成分方向を取得した。次に、得られた主成分パラメータを利用して連結成分を分類し、構成する点群を幹の場合と同様に切断した。ここで得られた切断線より断面の形状を推定することによって枝の部分的なモデルを算出した。その後、得られた幹や枝の局所形状をノードとした最小全域木を構成することにより、骨格構造を推定し、樹木全体をモデル化した。最小全域木の算出にはプリム法を用いた。

形質値の推定

本研究では幹モデルが連続した円弧により表現されているため、各幹モデルについて対象地上高の上下にある円弧を底面とする円錐台において該当する高さでの直径を求める直径とした。

樹木モデルから樹高を算出するために、Digital Surface Model(DSM)を用いた。DSMの正方形グリッド上に存在する点群のうち、最も高い点を各グリッドの高さとし、各幹モデルの根元がどのグリッドに属するのかを判定し、そのグリッドを樹頂点グリッドとした。隣接するグリッドと最高点を比較し、隣接グリッドが自身より高い最高点を持っている場合、隣接グリッドに樹頂点を移動させていた場合、隣接グリッドに樹頂点を移動させ、樹頂点が移動できなくなるまでこの操作を繰り返し、樹木の最高点を推定した。ここでグリッドの一辺の長さを 0.5m とした。

4. 研究成果

(1) 反射強度に基づく葉成分の除去

点群の反射強度を、256 階調の濃淡に対応させた画像から、トリミングにより葉と幹の個別領域を抽出し、反射強度分布をヒストグラムで表した。その結果、葉及び幹・枝の反射強度がおおむね分離しており、葉の反射強度が低い傾向にあることが確認された。そこで、ヒストグラムから読み取った両者の反射強度の閾値以下の点群を葉成分として除去した。図 1 に、葉成分と判定された点群を除去した例を示す。この例に示すように、反射強度を用いることで、枝の部分が明瞭に抽出できた。

(2) 幹モデルの生成

幹の切断面を円弧近似して得られた幹のモデル例を図 2 に示す。このように一定間隔(ここでは 5cm)の切断面ごとに幹断面の近似円弧が得られた。

点群データから幹モデルの生成までを基



(a) 除去前 (b) 除去後
図 1 葉成分を除去した例

本的な森林情報の取得と捉え、ここまでに要する処理時間を検討した。大規模点群データとして、スギ試験林(0.52ha)全体をカバーする 37 のレーザ計測点(約 70 億点群)を用いて試行したところ、約 19 分で終了した(図 3)。これまでの点群データ処理においては数時間以上を要するものが一般的であったが、それと比較して大幅な時間短縮が実現できたと言える。このように、本研究で開発した手法は、通常の森林研究で対象とする規模の林分に対して、点群処理時間の面で十分実用的な性能を有することが確認できた。

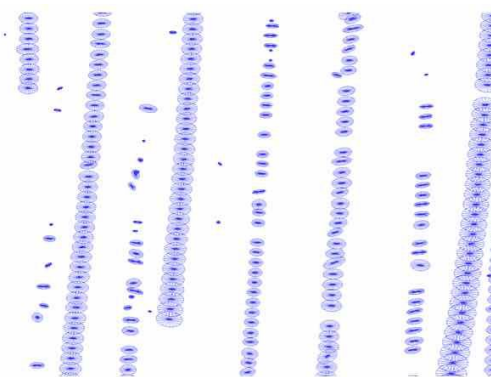


図 2 幹モデルの例

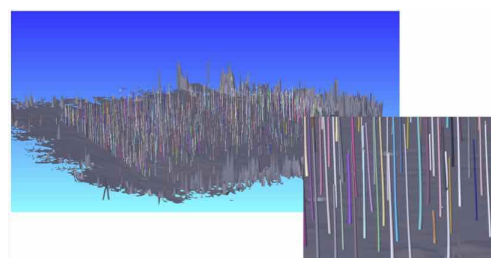


図 3 対象林分全体での幹モデル生成

(3) 樹木骨格モデルの生成

図 4 に、最小全域木でグラフを接続し構成した樹木骨格モデルの例を示す。このように、枝を含めた実際の樹木形状を精密に再現できる可能性が確認できた。Libny et al. (2010)は最小全域木とグラフカット手法を用いて、疎な点群からロバストに樹木の骨格を抽出する手法を示したが、大規模な点群で

は処理時間を多く要するという問題があった。本手法では高密度な点群を用いた手法であり、より正確に枝を含めた樹木構造の再構成が可能であると考えられた。また、上記(1)の葉成分の除去により、その正確性をより高めることができたと考えられた。



図4 枝モデルの例

(4) 実測値との比較

上記(2)と同一のスギ試験林を対象に、樹木個体の位置を含めた検出精度を検討した。対象試験林では636個体が生存していたのに対し、点群データからは618個体が正確に検出できた(検出率97%)。また、試験林内の26本のサンプルについて、点群データを用いて胸高直径及び樹高を推定し、実測値との比較を行った。その結果、胸高直径及び樹高における平均誤差はそれぞれ $\pm 4.9\text{mm}$ と $\pm 0.5\text{m}$ であった。これらの値から、個体検出及び形質値の推定において、ともに実用上十分な精度で行うことが可能であることが確認された。

(5) 結論

本研究では、森林で取得した点群データを処理する新たな手法を開発した。本手法は、これまでに提案されてきた手法と比較し、高速かつ実用上十分な精度で、森林の3次元情報を抽出することを可能にした。また点群データの葉成分を分離することで、枝を含む高精度な樹木骨格モデルの構築を可能にした。本研究の成果は、従来の調査法に代わる、点群データに基づく実用的な森林計測技術として利用が可能と考えられる。

<引用文献>

加藤 顕ほか、レーザーリモートセンシングの森林生態学への応用、日本森林学会誌、96巻、2014、168-181
Livny Y. et al., Automatic reconstruction of tree skeletal structures from point clouds, ACM Transactions on Graphics (TOG), Vol 29, 2010, 151

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計1件)

平岡 裕一郎、高橋 誠、渡辺 敦史、
林木育種における地上LiDAR計測の応用
スギ精英樹F₁家系における樹幹形質の
評価 . 日本森林学会誌、査読有、Vol.97、
2015、pp.290-295
<http://doi.org/10.4005/jjfs.97.290>

[学会発表](計7件)

平岡 裕一郎、齋藤 和人、松下 通也、
高橋 誠、増田 宏、林木育種における
新たな3次元点群処理技術の利用、第128
回日本森林学会大会、2017年3月26日
~3月28日、鹿児島大学(鹿児島県鹿
児島市)

齋藤 和人、平岡 裕一郎、増田 宏、
松下 通也、高橋 誠、大規模点群を用
いた森林の樹木形状生成手法、査読無、
第128回日本森林学会大会、2017年3月
26日~3月28日、鹿児島大学(鹿児島
県鹿児島市)

齋藤 和人、増田 宏、平岡 裕一郎、
松下 通也、高橋 誠、大規模点群に基
づく樹木のパラメータ自動抽出、2017年
度精密工学会春季大会、2017年3月13
日~3月15日、慶應義塾大学(神奈川
県横浜市)

齋藤 和人、増田 宏、平岡 裕一郎、
松下 通也、高橋 誠、三次元計測点群
に基づく樹木の形状再構成第3報、2016
年度精密工学会秋季大会、2016年9月6
日~9月8日、茨城大学(茨城県水戸市)
齋藤 和人・丹羽 健・増田 宏、三次
元大規模点群に基づく樹木の形状再構成
第2報、2016年度精密工学会春季大会、
2016年3月15日~3月17日、東京理
科大学(千葉県野田市)

Saito K, Masuda H: Segmentation and
Reconstruction of Tree Shapes from
Large-Scale Point-Clouds, The 16th
International Conference on Precision
Engineering, 2016年11月14日~11月
16日、アクトシティ浜松(静岡県浜松市)
齋藤 和人・丹羽 健・増田 宏、三次
元大規模点群に基づく樹木の形状再構成、
2015年度精密工学会秋季大会、2015年9
月4日~6日、東北大学(宮城県仙台市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

平岡 裕一郎(HIRAOKA Yuichiro)
国立研究開発法人 森林総合研究所・林木
育種センター・室長
研究者番号: 50370862

(2) 研究分担者

増田 宏(MASUDA Hiroshi)
電気通信大学・情報理工学(系)研究科・
教授
研究者番号: 40302757

(3)連携研究者

松下 通也 (MATSUSHITA Michinari)
国立研究開発法人 森林総合研究所・林木
育種センター・主任研究員
研究者番号：70624899

(4)研究協力者

齋藤 和人 (SAITO Kazuto)