

## 航空機 LiDAR を用いて取得した点群に基づいた樹木モデルの構築と検証 Development and validation of tree models based on point-clouds obtained by airborne LiDAR

呉浦 優輝<sup>†</sup>  
Yuki Kureura

曽我 真人<sup>‡</sup>  
Masato Soga

### 概要

近年、センサを用いて樹木の点群データを取得し、そのデータをパラメータ計測や VR 剪定学習支援などに活用する機会が増加しつつある。しかし、航空機 LiDAR を用いて取得した点群データは、点群密度が低く、樹木内部の点群が取得困難であるために、枝構造を忠実に再現したモデル構築を行えないという問題点が存在した。そこで本研究では、樹木を切断面に分割してから、枝中心点の推定と接続を行うことで、点群密度の低い点群データから枝構造を再現できる 3D 樹木モデル構築手法を提案した。加えて、樹木モデルの枝構造が樹木点群の構造を再現できているか精度検証実験を行った。

### 1. はじめに

近年、点群計測を用いた技術について、盛んに研究が行われている。点群計測とは、LiDAR センサから対象物にレーザー光を照射し、その反射光をセンサで検出することで、対象物の形を表現する点群を生成する手法である。この点群計測を利用する分野として、リバースエンジニアリングや、物体検出、地形測量、そして、樹木のパラメータ計測が挙げられる。

昨今、樹木計測について、樹高や胸高直径などのパラメータ計測を行う際に、手作業による計測から、レーザースキャナなどを用いて取得した点群データを利用しようとする動きがある。このような樹木を計測した点群データや点群データを用いた分析・構築結果は、VR を用いた剪定支援学習支援システムや、ロボットを用いた果実の自動収穫など、未だ発展途上な分野において活用の機会が存在する。そのため、現実の樹木から点群データを取得する機会は、今後も増加すると考えられる。

樹木計測において、点群データの取得を行うための主な手法を 2 つ挙げる。それは、「地上型レーザースキャナによる計測」と「ドローンなどの航空機に取り付けたカメラなどによる計測」である。以下、前者を TLS 計測、後者を空撮計測と呼称する。

2 つの計測手法を比較すると、TLS 計測は、空間計測よりも取得した点群の密度が高く、樹冠内部にある細かな枝などの複雑な構造を点群データとして取得することに長けている。しかし、樹冠上部のデータ計測は、TLS 計測では困難である。その点、空撮計測では、TLS 計測よりも実施時の手間が少ない、樹冠上部のデータを撮影することが可能である、などのメリットが存在し、樹木の全体像を計測することができる。ただし、空撮計測においては、風によるドローンの揺れや枝葉のブレ、TLS 計測よりも低い点群密度、などの欠点も存在する。それゆえに、空撮計測によって得た点群データから、枝構造（枝の本数、向き、長さ）を正確に再現した 3D モデルを構築する手法の需要が高まっている。

以上のことから、本研究では、ドローンを用いた LiDAR センサによる計測で得た落葉済みの樹木点群データから、樹木の枝構造を再現した 3D 樹木モデルを構築すること、を目的として研究を行った。

### 2. 関連研究

本研究に関連する先行研究として、2 つの先行研究を挙げる。

1 つ目の研究としては、斎藤和人らによる、三次元大規模点群に基づく樹木の形状再構成[1][2][3]である。この研究は、森林を TLS 計測でスキャンした点群データから樹木を抽出し、現実の樹木がもつ幹や枝の形状を再構成する手法を検討している。

2 つ目の研究としては、Shaojun Hu らによる、Efficient Tree Modeling from Airborne LiDAR Point Clouds [4]である。この研究では、空撮計測による低密度な点群データから、元の点群の特徴を保持した樹木モデルを高速に構築する手法を提案している。

### 3. 提案手法

#### 3.1 提案手法概要

本提案手法では、「航空機 LiDAR を用いて取得した点群データ」を入力データとして、「樹木点群の枝構造を再現した 3D 樹木モデル」の生成を行う。具体的には、樹木点群を空間分割して各枝の中心を示す中心点を推定した後、各中心点を主成分に従って接続、再探索条件に基づいて適宜中心点を再接続することで、枝構造を再現する。この構

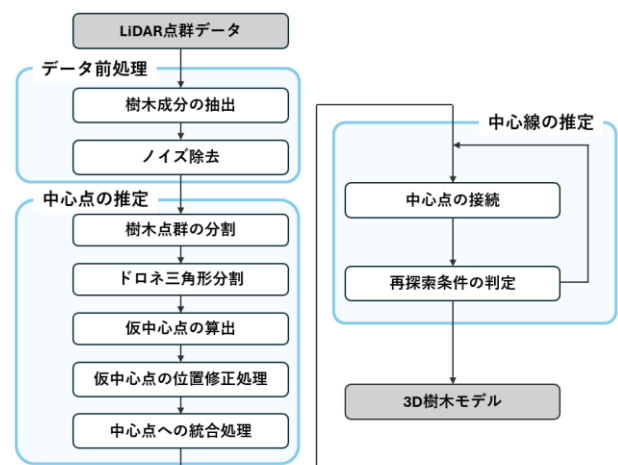


図 1 提案手法における構築手順

<sup>†</sup> 和歌山大学大学院システム工学研究科 Wakayama University Graduate School of Systems Engineering

<sup>‡</sup> 和歌山大学システム工学部 Wakayama University Faculty of Systems Engineering



図 2 入力データの点群全域

構築過程は、データ前処理、中心点の推定、中心線の推定、の 3 つの工程によって実現される。図 1 に、本提案手法における樹木モデルの構築手順を示す。また、図 2 に、入力データとなる点群の全景を示す。

### 3.2 データ前処理

#### 3.2.1 樹木成分の抽出

樹木モデルの構築処理を行う前に、入力データから地面成分となる点群と構築対象以外の樹木を全て除外し、構築対象となる樹木を抽出する必要がある。ただし、本研究で用いた入力データを撮影した圃場は、地面の勾配と隆起が非常に複雑であり、機械的な手法による抽出が困難であった。そのため、Meshlab を用いることで、構築対象となる樹木を手動抽出した。

構築対象の抽出に際して、今後の処理のために、新規の座標設定を行った。まず、座標軸について、東経方向を  $x$  軸正方向、北緯方向を  $y$  軸正方向、鉛直上向きを  $z$  軸正方向とする。そして、抽出した樹木点群における全ての点について、 $x$  座標、 $y$  座標、 $z$  座標ごとに最大値と最小値を算出し、2 値の平均値をとって一つの座標を算出する。本手法では、この座標を「点群の座標中心」と呼称し、この「点群の座標中心」が樹木点群の原点となるように点群の位置座標を修正する。

#### 3.2.2 ノイズ除去

抽出した個々の樹木点群について、幹・枝周りの点群と比較して低密度な点群をノイズとし、そのノイズを DBSCAN[5]によって除去した。DBSCAN とは、Martin Ester らによって提案されたアルゴリズムであり、点群の密度情報のある程度反映したクラスタリングを行える技術である。この DBSCAN を活用して、ノイズを除去した樹木点群を図 3(b)に示す。

### 3.3 中心点の推定

本節では、樹木点群から各枝の中心に連続的に位置する中心点を推定して、枝構造を表現する点群を算出する。その手法としては、初めに、樹木点群を切断し、ドロネ三角形分割による仮中心点の算出を実施する。その後、仮中心点に位置修正処理と統合処理を実施することで、中心点を推定する。

以降の副節では、「中心点の推定」について詳述する。

#### 3.3.1 樹木点群の分割

樹木点群について、 $x$  軸に垂直な境界となる平面を 0.05m 間隔で設定し、連続する 2 つの境界平面の間に存在する点群を含む空間を抽出する。以降、この抽出された厚さ 0.05m の空間を分割空間と呼び、それぞれの分割空間に

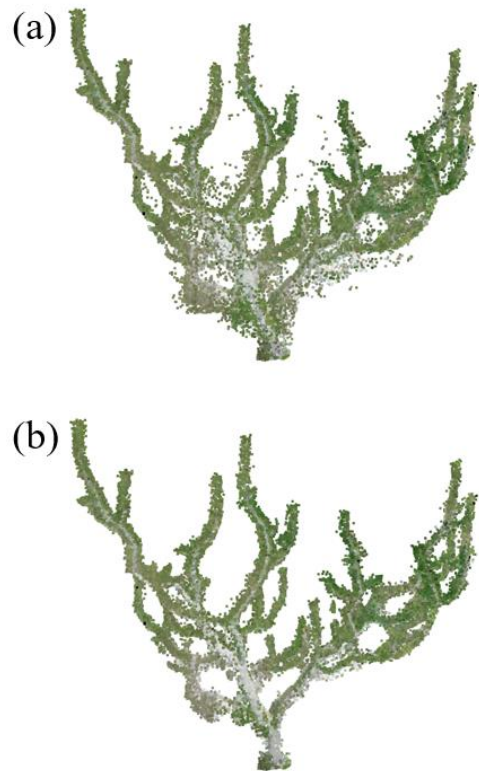


図 3 ノイズ除去前の樹木点群(a)とノイズ除去後の点群(b)の比較

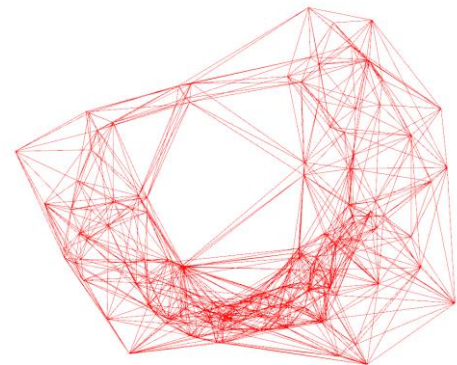


図 4 分割空間におけるドロネ図

次副節にて紹介する「仮中心点の算出」を適用することで、仮中心点を算出する。

#### 3.3.2 仮中心点の算出

ある分割空間において、その空間中に含まれる樹木点群にドロネ三角形分割を適用することで、ドロネ図（点群内の各点の隣接関係を示すグラフ）を生成する。続いて、生成したドロネ図において、閾値以上の長さのエッジを削除することで、分割空間内の点群を枝ごとのグループに分割する。その後、各グループに所属している点群の平均座標を算出し、その座標に仮中心点を生成する。このような仮中心点の算出処理を、前副節で抽出した分割空間すべてに実施する。ここで、分割空間においてドロネ三角形分割に

よって生成されるドロネ図を図 4 に示し、仮中心点のみで構成される仮中心点の点群を図 5(a)に示す。

また、これまでの樹木点群の分割および仮中心点の算出は、x 軸のみならず、y 軸と z 軸に対しても同様に実行する。これは、x 軸、y 軸、z 軸の 3 つの軸に対して実施することで、あらゆる方向に成長する樹木の枝をすべて検出するためである。

### 3.3.3 仮中心点の位置修正処理

まず、位置修正処理について記述する前に、本提案手法における近傍点探索について先に示しておく。本提案手法では、点群から kd-tree によって作成したデータ構造を基にして、RNN 検索によって、任意の点から指定した半径をもつ球状の空間内に存在する点を抽出することができる。以降の記述では、点群における近傍点探索は全て kd-tree と RNN 検索によって実施される。

以降は、位置修正処理について示す。全ての仮中心点において、周囲のノイズ除去後の樹木点群を対象として半径  $r_p$  の近傍点探索を行って、その探索によって抽出された領域で主成分分析を実施する。この半径  $r_p$  とは、以下の式(1)から算出される。

$$r_p = \max(0.60 - (0.08d_x + 0.08d_y + 0.04d_z), 0.05) + d_{roop} \quad (1)$$

ここで、 $d_x$ 、 $d_y$ 、 $d_z$ は中心とする仮中心点の樹木根本からの x 座標、y 座標、z 座標それぞれの距離の絶対値を表す。ただし、樹木根本とは、仮中心点の点群を 3.3.1 節と同様に z 軸に垂直な平面を用いて 0.1m 間隔で分割した際に、z 座標の小さい空間から走査して、仮中心点が初めて 1 つ以上含まれる空間に存在する仮中心点の座標中心を指す。また、 $d_{roop}$ は上記の近傍点探索で 2 つ以上の近傍点が見つ

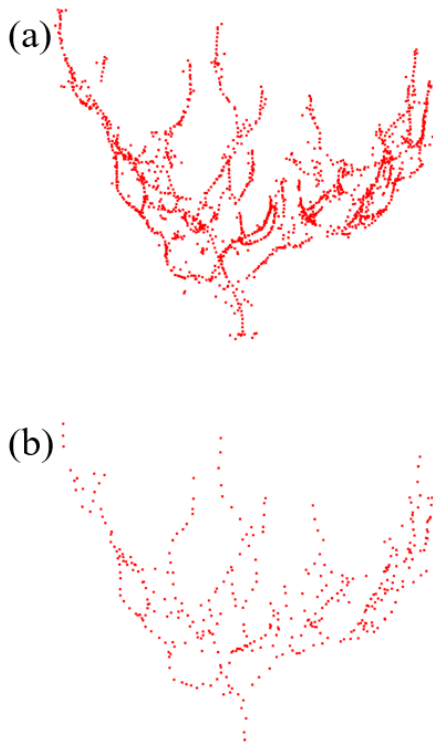


図 5 仮中心点の点群(a)と中心点の点群(b)の比較

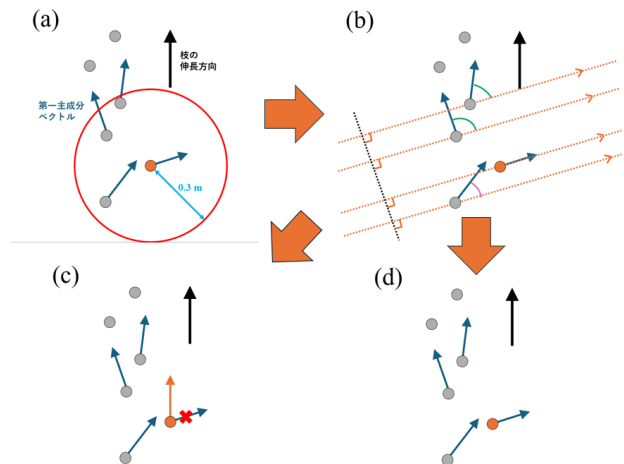


図 6 第一主成分の差し替え手順

らなかった場合、近傍点探索の半径を 0.01 増加させるためのパラメータである。

このように、半径  $r_p$  とは、以下に示す根元に近いほど大きく、枝先に向かうほど小さくなるパラメータである。このパラメータを利用することで、幹や枝の太さの違いに対応した近傍点探索を行う。そして、近傍点探索の結果、得られた点群を基にして主成分分析を行うことで、全ての仮中心点の第一主成分を求める。

次に、主成分分析によって得られた第一主成分  $c$  が、枝の伸長方向を向いているか確認する。これは、ある第一主成分  $c$  について、近傍の第一主成分となす角を求めて算出された角度のうち、45 度～135 度の範囲内である角がどれほど存在するかを判定することで実現する(図 6(a)(b))。このとき、算出された角度の 50%以上が 45 度～135 度の範囲内にある場合、第一主成分  $c$  は枝の伸長方向を指していないとみなし、 $c$  を近傍の第一主成分ベクトルの平均値に差し替える(図 6(c))。この操作によって、算出した第一主成分が枝の伸長方向を向いていない状態を排除する。また、50%未満が 45 度～135 度の範囲内である場合、第一主成分は枝の伸長方向を向いているとみなす(図 6(d))。

その後、樹木点群において、ある仮中心点  $n$  を中心とした 0.3m 以内に存在する点を探索する。そして、探索された点  $p$  と仮中心点  $n$  を結ぶ直線と、仮中心点  $n$  がもつ第一主成分ベクトル  $c$  がなす角を算出する。ここで算出される角度が、70 度～110 度(90 度 $\pm$ 20 度)の範囲内であれば、探索された点  $p$  は仮中心点  $n$  から見て、仮中心点  $n$  を内包する枝の伸長方向と垂直な方向(以下、半径方向という)に存在するとみなす。このようにして、角度の算出と判定を探索された全ての点に対して実行することで、仮中心点  $n$  の半径方向に存在する点群を明らかにする。そして、その点群の平均座標および平均座標から点群までの平均距離  $d$  を算出し、算出した平均座標に仮中心点を移動させる。

以上の処理を全ての仮中心点に対して施すことで、仮中心点が枝の中心を示す点となるよう調整する。

### 3.3.4 中心点への統合処理

まず、位置修正処理を実施した仮中心点で構成された点群に対して、1 つの仮中心点を中心とした近傍点探索を行う。ただし、近傍点探索の半径は、前副節で算出された平

均距離  $d$  に 0.01 を加算した値とする。この近傍点探索はすべての仮中心点において実施する。

次に、近傍点探索で発見された点の数が多い仮中心点から、統合処理を行う。仮中心点とその点を中心とした近傍点探索で発見されたすべての仮中心点について、平均座標を算出し、その座標に中心点を生成して、算出に利用した仮中心点はすべて削除する。この統合処理を、すべての仮中心点が削除されるまで行うことで、仮中心点への統合を実現し、中心点の点群を生成する。ここで生成される中心点の点群を図 5(b) に示す。

### 3.4 中心線の推定

樹木の枝や幹について、その分岐構造を捉えるために、枝や幹の太さを無視した直線によって枝や幹を表現する。この直線を本手法では中心線と呼ぶ。本節では、前節で推定した中心点を接続し、接続した中心線について再探索条件の判定を行う。その後、判定結果に応じて、接続処理を終了するか、設定を変更して再度中心点の接続処理を実施するか決定する。

#### 3.4.1 中心点の接続

初めに、接続処理前の準備として、樹木点群に対して、中心点を中心とした半径 0.3m の近傍点探索を行う。そして、この際に探索した領域に対して、主成分分析を適用して第一主成分を求める。また、各中心点に対して探索距離  $r$  を定義したリスト  $R$  を作成し、すべての  $r$  には初期値 0.2m を設定しておく。続いて、中心点の接続処理において、接続先の探索を行う基準となる中心点（以下、接続基準点と呼ぶ）を格納するリスト  $A$  を作成する。さらに、中心線によって接続基準点と接続される候補である中心点（以下、

接続候補点と呼ぶ）の判定角度  $\theta$  を定義しておく。なお、 $\theta$  には初期値 60 を設定しておく。

以降は、中心点の接続処理を詳述する。また、接続手順の図解を図 7 に示す。

中心点の接続処理は、リスト  $A$  の先頭の接続基準点を取り出し、取り出した接続基準点の周辺に存在する中心点への接続可能性を検討し、接続処理を行うことで実現する。しかし、初回の接続処理では、リスト  $A$  には何も格納されていないために、すべての中心点のうち最も  $z$  座標が小さい中心点を接続基準点として、接続処理を開始する。

接続処理の初めに、リスト  $A$  から  $p_n$  ( $n$  とは、リスト  $A$  に格納される要素順) を取り出して削除する。次に、中心点の点群において、接続基準点  $p_n$  を中心とした近傍点探索を行う。ここで、この近傍点探索の探索半径は、リスト  $R$  に格納された  $p_n$  に対応する探索距離  $r_n$  である(図 7(b))。

次に、 $p_n$  と近傍点探索によって発見された近傍点を結ぶ直線と、発見された近傍点周辺の第一主成分のなす角を算出する。この際に算出された角度が  $0$  度  $\sim \theta$  度もしくは  $(180 - \theta)$  度  $\sim 180$  度の範囲内であれば、発見された近傍点を接続候補点として扱う(図 7(c))。

近傍点探索で発見されたすべての近傍点が接続候補点であるか判別した後、 $p_n$  と接続候補点を接続した際に中心線に閉路が生じることがないように、閉路検出を行う(図 7(d)(e))。この閉路検出は Union-Find アルゴリズムを利用することで実現する。そして、閉路検出において、接続した場合に閉路を生じないと判断された接続候補点を  $p_n$  と接続し、さらに、その接続候補点をリスト  $A$  に格納する(図 7(f))。

以上の接続処理をリスト  $A$  が空になるまで実施し、リスト  $A$  が空になったとき、再探索条件の判定に移る。この接続処理によって、中心点の接続処理を幅優先探索の要領で行い、中心点を接続基準点から枝先へ向けて連鎖的に実行する。

#### 3.4.2 再探索条件の判定

再探索条件として、すべての中心点が中心線によって接続されているか、判定を行う。ここで、すべての中心点が接続されている場合、接続処理を終了する。すべての中心点が接続されていない場合、リスト  $R$  のうち中心線で接続されている中心点の探索距離  $r$  を 0.01m 増加させて、接続されている中心点すべてをリスト  $A$  に格納し、中心点の接続処理を再度実行する。この探索距離  $r$  を増加させる処理は、 $r$  が 0.80m に達するまで、再探索条件を判定する度に増加される。さらに、リスト  $R$  に格納された探索距離  $r$  の半数以上が 0.50m を超えた場合は、再探索条件の判定を行う度に、 $\theta$  を 0.05 増加させる。ただし、次回以降の接続処理においても、それ以前の接続処理で既に得た中心点の接続関係は保持し続ける。

このように、 $r$  と  $\theta$  を増加させることで、中心点が接続されず、枝が存在する位置に中心線が接続されない問題を防ぐ。また、最終的に生成される中心線による 3D モデルを図 8(b) に示す。

## 4. 検証実験

本章では、本提案手法によって構築された樹木モデルの枝構造が、航空機 LiDAR による空撮によって取得した樹木点群の枝構造とどれほど一致しているのか、検証する実

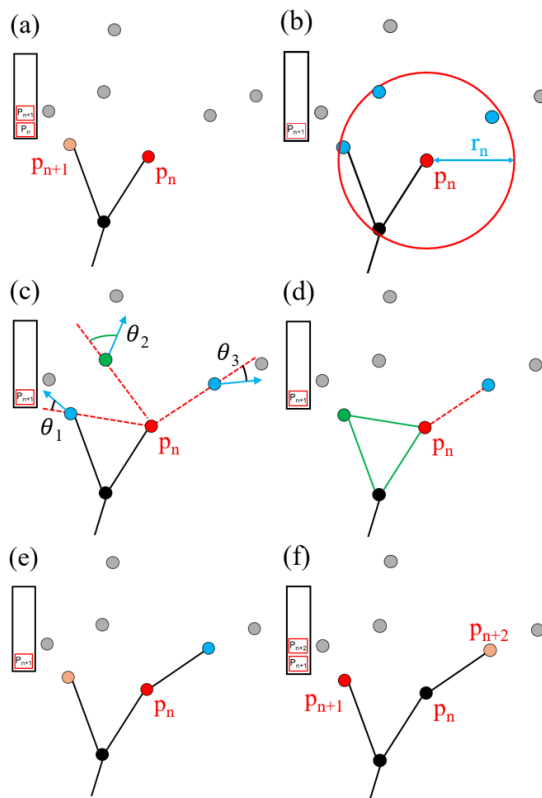


図 7 中心点の接続手順

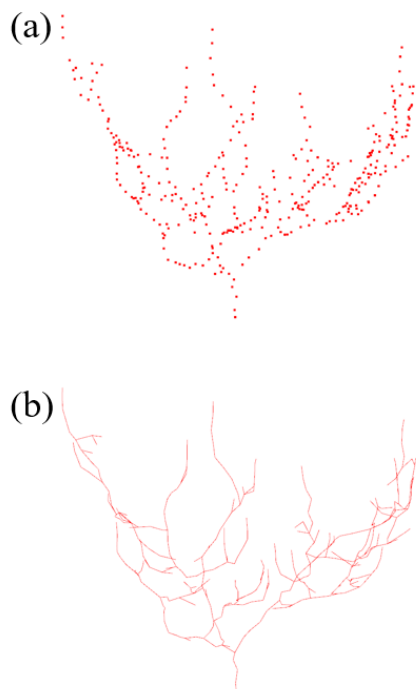


図 8 中心点の点群(a)と中心線(b)の比較

験手法とその結果について示す。また、検証実験では明らかにできなかった点についての検討も実施した。

#### 4.1 実験手法

本研究が提案する手法を用いて推定した中心線を、その入力データとして利用した樹木点群と比較することで、樹木モデルの構築精度検証を行う。

樹木点群に対して、本提案手法を用いることで、中心線モデルを生成する。その後、中心線モデルの 1 本の中心線につき、100 個の点群を中心線上において等間隔に生成することで中心線を点群に変換する(以下、中心線点群という)。この変換した中心線点群のそれぞれの点を中心として、入力データとして利用した樹木点群に近傍点探索を行うことで、中心線点群がもつ全ての点について、樹木点群に所属する点から最近傍点を突きとめる(以下、この最近傍点を樹木最近傍点という)。そして、中心線点群上の点と、その点の樹木最近傍点との間の距離を求める。その結果、求められる距離を、1cm 未満、1cm 以上 2cm 未満、…、9cm 以上 10cm 未満、10cm 以上、の 11 項目に分類し、各項目に所属する中心線点群の点数の割合を算出する。

以上の方法によって、構築した中心線が、現実の樹木から得た樹木点群と比較して、どれほど一致しているか検証する。

#### 4.2 入力データ

本研究において、入力データとして使用する点群データの全景は、前章の図 2 において示した。この使用する点群データは、Matrice 300 RTK に搭載された Zenmuse L1 で取得した。取得したデータは DJI Terra を用いて、点群データとして出力した。この点群データの総点数は、81130559 点

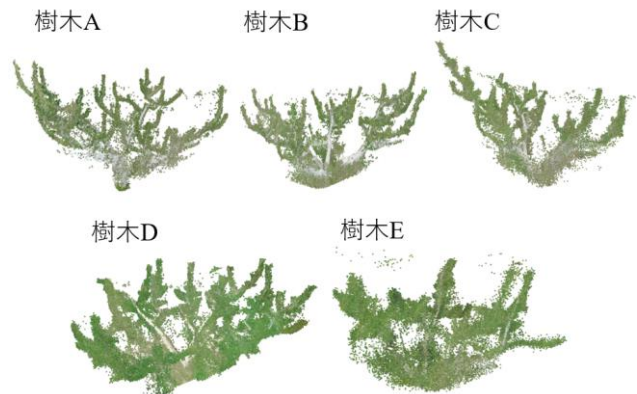


図 9 入力データから抽出した 5 つの樹木点群

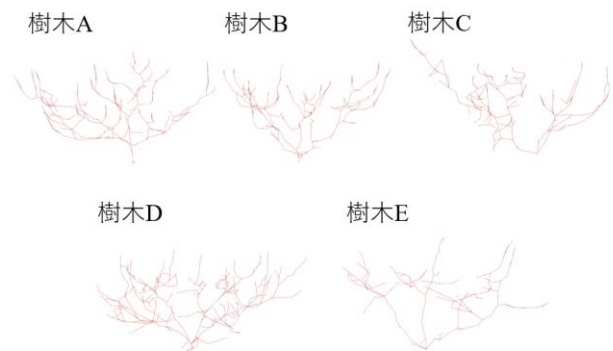


図 10 各樹木点群から構築した中心線モデル

表 1 各樹木点群から構築した樹木モデルの点数

樹木点群の状態	樹木 A	樹木 B	樹木 C	樹木 D	樹木 E
提案手法適用前	66695	106408	103103	299943	62940
ノイズ除去後	62673	100532	97988	285456	56627
仮中心点	1440	1256	1039	2210	833
中心点	373	316	245	482	168

である。また、本データの取得は、和歌山果樹試験場かき・もも研究所[6]が所有する柿の圃場で実施した。

また、検証実験に用いるための樹木点群として、入力データから 5 種類の樹木点群を選定した。それらの剪定した樹木点群を図 9 に示す。続けて、この選定された 5 種類の樹木点群に本提案手法を適用し、それぞれの中心点モデルを構築した。これらの中心線モデルを図 10 に示す。さらに、この 5 種類の樹木点群から中心線モデルを構築する過程において得られた、提案手法適用前の樹木点群、ノイズ除去後の樹木点群、仮中心点の点群、中心点の点群、それぞれの点数を表 1 に示す。

#### 4.3 各距離ゾーンにおいて点数の割合を示す有用性

本節では、検証実験において示す点数の割合という指標について、その指標が枝構造の再現性を評価するにおいて、どの程度有用であるか示す。

初めに、樹木点群上で、中心線点群と樹木最近傍点がどのような位置関係にあるかを明確にする。その具体的な方法として、樹木 A の樹木点群と中心線点群を 5cm 間隔で z 軸に垂直な平面で分割した際に、中心線点群に所属する点と、その点の樹木最近傍点を算出する。この際に、中心線点群に所属する点を赤色、樹木最近傍点を青色、その他の樹木点群を緑色とした。以上の方法で作成した点群について、スクリーンショットを撮影し、中心線点群と樹木最近傍点が存在する付近をトリミングおよび拡大したものを図 11 に示す。また、図 11 に示された 6 つの図は、中心線点群と樹木最近傍点との距離がそれぞれ異なる。表 2 では、図 11 の各図における、中心線点群と樹木最近傍点の距離を示す。

図 11 および表 2 から、中心線点群の点と樹木点群の距離が 1cm や 3cm である場合、中心線点群は樹木点群に重なっており、最近傍点も同じ樹木点群の内部に存在することが分かる。逆に、距離が 5cm 以上である場合は、最近傍点は樹木点群の外縁部分に存在し、中心線点群が樹木点群から独立していることが分かる。

このことから、2 点の距離が 3cm 未満ならば、中心点

表 2 図 10 の各図における中心線点群と樹木最近傍点の距離

項目	中心線点群と樹木最近傍点の距離(cm)
図 5.3(a)	1.192
図 5.3(b)	3.044
図 5.3(c)	5.022
図 5.3(d)	7.026
図 5.3(e)	9.181
図 5.3(f)	11.131

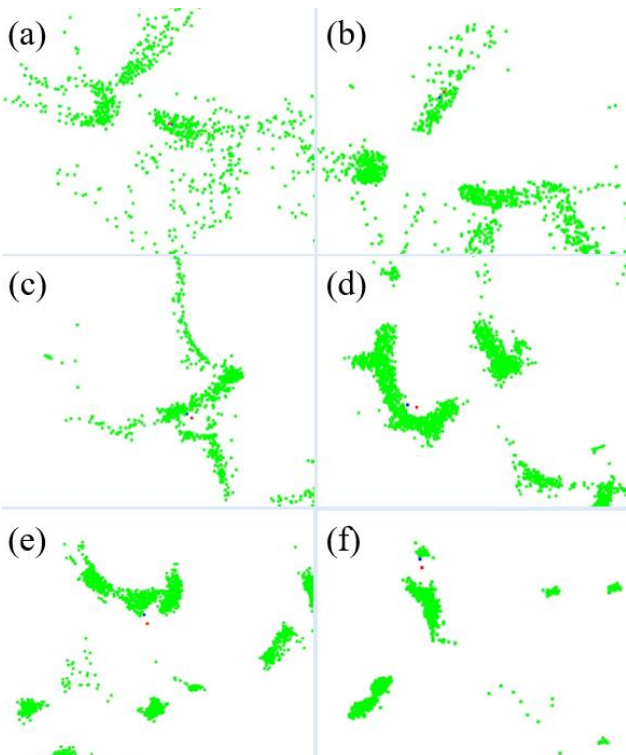


図 11 各ゾーンに含まれる中心点の点数の割合を示すグラフ

群が樹木点群内部に存在しており、3cm 以上では、中心線点群が樹木点群外部に存在する可能性が高いと考えられる。したがって、本研究では、中心線点群の各距離ゾーンのうち 3cm 未満である割合を、中心線点群が樹木点群内部に存在する割合であるとみなす。

#### 4.4 実験結果

実験結果について、表 3 に示す。これは、各樹木点群における中心線点群と樹木最近傍点との距離について、中心線点群の点数を 100% とした場合、その距離を 1cm ごとにゾーン分けし、各距離ゾーンに含まれる中心線点群の点数割合を示している。図 12 では、この表 3 を折れ線グラフとして表現している。

中心線点群の点数割合を算出したところ、すべての樹木において、中心線点群の 85% 以上の点が、樹木点群の最近傍点から 3cm 未満の距離に位置していることが判明した。また、樹木 A, D, E では 1cm 以上 2cm 未満が最も割合が大きくなり、樹木 B, C では 1cm 未満が最も割合が大きくなった。5 つの中心線モデルの中でも樹木 C の結果は特徴的であり、1cm 未満に属する中心線点群の点数割合と、10cm 以上に属する中心線点群の点数割合が、共に 5 つの中心線モデルにおいて最大であった。

さらに、表 3 で示した各樹木モデルの点数において、提案手法適用前の点数が、樹木 A, E は約 6 万 5 千前後であり、樹木 D は約 30 万であった。しかし、本実験において、それら 3 つの中心線モデルにおける、中心線点群の各ゾーンの割合には大きな差異は存在しなかった。

表 3 検証実験における各ゾーンに含まれる中心点の点数の割合表

樹木最近傍点からの距離 (cm)	樹木 A (%)	樹木 B (%)	樹木 C (%)	樹木 D (%)	樹木 E (%)
1 未満	34.280	40.406	43.672	36.256	29.778
1 以上 2 未満	41.556	34.851	31.311	43.291	42.982
2 以上 3 未満	12.462	11.663	11.701	12.694	16.910
3 以上 4 未満	5.417	5.533	5.279	4.044	5.479
4 以上 5 未満	3.159	2.886	3.033	1.956	1.713
5 以上 6 未満	1.298	1.994	1.693	0.753	1.144
6 以上 7 未満	0.755	1.022	0.906	0.389	0.587
7 以上 8 未満	0.419	0.775	0.615	0.272	0.473
8 以上 9 未満	0.272	0.429	0.439	0.152	0.299
9 以上 10 未満	0.185	0.152	0.336	0.067	0.186
10 以上	0.196	0.289	1.016	0.127	0.449

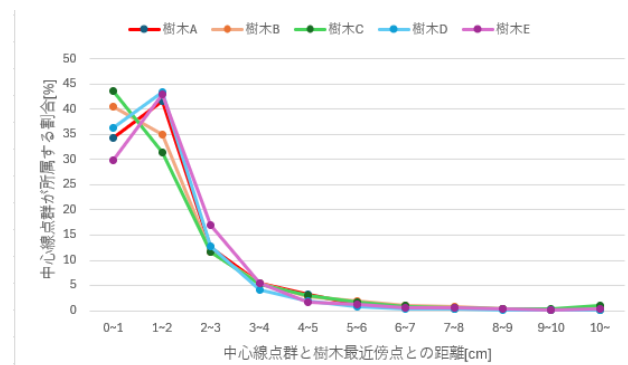


図 12 各ゾーンに含まれる中心点の点数の割合を示すグラフ

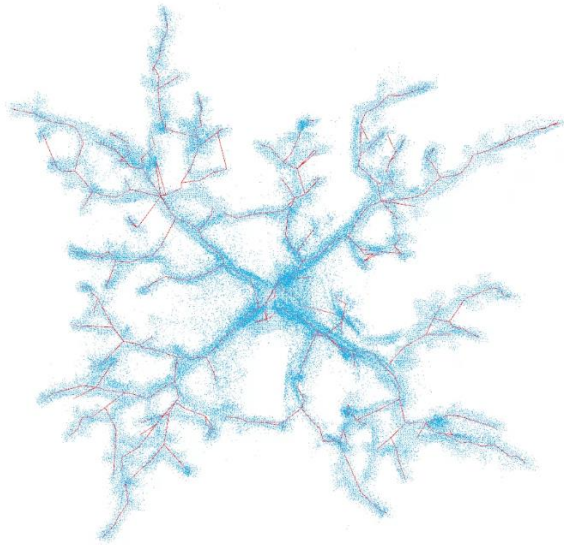


図 13 樹木 D における樹木点群と中心線モデル

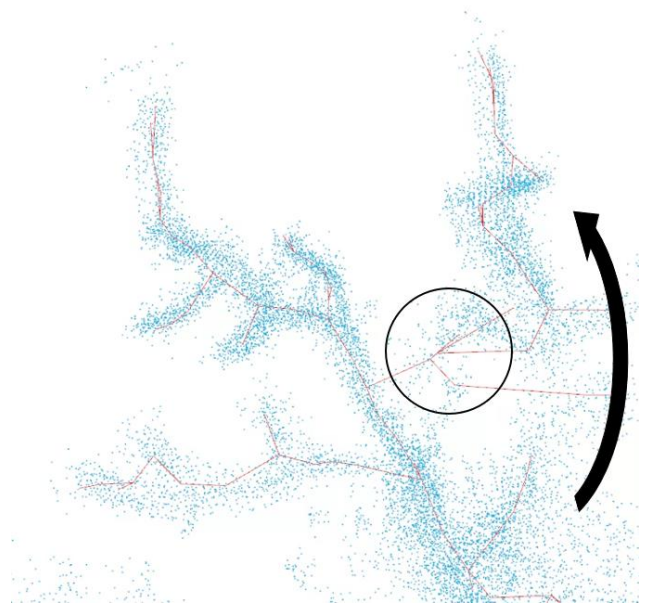


図 14 樹木 E におけるノイズに影響された中心線モデル

#### 4.5 構築した中心線モデルに対する検討

本節では、検証実験で用いた 5 つの樹木点群と、それらの点群に本提案手法を適用して構築した中心線モデルについて、検証実験では明らかにできなかった枝構造の差異に対する検討を実施する。検討を行うにあたって、樹木点群と中心線モデルを同時表示した図を作成した。これらの図では、樹木点群にダウンサンプリングをかけて点群密度を一定以下にしたのち、一つ一つの点の大きさを小さくしている。さらに、中心線モデルは赤色、樹木点群は淡い青色に着色されている。以上の処理を行うことで中心線モデルと樹木点群を同時に表示した際に、中心線モデルが見やすくなるように調整した。

図 13 に示している図は、樹木 D の樹木点群および中心線モデルを真上 (z 軸正方向) から見た図である。この図において、中心線モデルの大部分は樹木点群に重なるように構築されていることが分かる。このことから、中心線モデルと樹木点群では細かな枝構造の違いはあるものの、樹木の大まかな枝構造を再現できていると考えられる。これは、中心点が枝の構造に従って生成されており、複数の枝が近接していない場合において、樹木点群を再現した中心線の生成ができていないことを示している。

図 14 に示した図は、樹木 E においてノイズとなる点が中心線モデルに影響を及ぼしている様子である。中心線モデルが樹木点群を正確に再現したならば、図中の黒い矢印に沿って、図 14 下部から右上に向かう 1 本の中心線が接続される。しかし、実際に構築された中心線モデルは、図 14 中央の枝から右上の枝に向かって接続してしまっている。これは、図 14 の黒い丸で囲まれた空間に存在するノイズが、ノイズ除去の工程において除去されなかったために発生したと考えられる。

図 15 では、4 つの樹木点群と中心線モデルについて、枝の分岐構造の一部を抜粋して掲載した。ここで、(a)は樹木 B、(b)は樹木 E、(c)は樹木 A、(d)は樹木 C を用いて作成した図である。図 15(a)においては、中心線モデルは樹木点群の枝構造を過不足なく再現できている。しかし、図

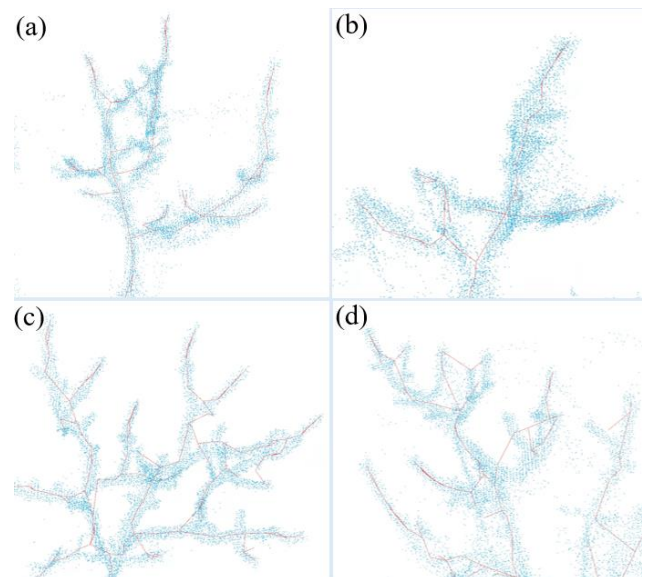


図 15 各樹木点群および中心線モデルにおける分岐構造の差異

15(b)では、ノイズが存在する位置に中心点が生成されてしまったために、本来の分岐構造と異なる枝構造を生成してしまっている。さらに、図 15(c)および図 15(d)は、複数の枝が近接している様子であるが、樹木点群の分岐構造と中心線モデルに多くの差異が見受けられる。これは、中心点の誤生成や、中心点の誤接続など、複数の要因が影響して発生している。中でも特に、枝の伸長方向となる第一主成分や接続候補点の判定角度 $\theta$ が、樹木 C の複雑な枝構造に対して適切な値でなかったために、複数の枝の間で間違った接続をしてしまったと考えられる。

また、以上の検討において、樹木点群と中心線モデルとの間で枝構造に違いが見られたが、どの図においても枝自体は検出され、全ての枝に仮中心点および中心点を生成で

きていた。しかし、ノイズに対して中心点が生成されてしまう例も、複数のパターンが見受けられた。

## 5. 考察

検証実験の結果および樹木モデルに対する検討は、本提案手法を用いて構築した樹木モデルは、多くの中心線が樹木点群の内部および外縁に生成できていることを示した。

さらに、樹木 A、E と樹木 D には樹木点群の点数に 4 倍近い差があったが、実験結果には殆ど差が無く、本提案手法による樹木モデルの生成は入力データとなる樹木点群の枝の密度には左右されず、一定以上の精度をもった樹木モデルの構築ができることを示している。しかし、中心線モデルの細部の枝構造は、樹木点群と異なる構造をしている箇所が存在することも示された。

さらに、実験結果において、樹木 C は特徴的な値を示した。この樹木 C は検討において図 15(d)のように樹木点群と異なる枝構造を、中心線モデルが多く生成していた。特に、他の入力データとした樹木よりも、離れた枝の間で中心線が間違った接続をしている場合が多く、その誤接続が 10cm 以上の割合が 5 つの樹木モデルの中でも最大であった要因だと考えられる。樹木 C の誤接続が引き起こされる原因は、検討で示したように、中心線の接続直前に実施した主成分分析や、接続候補点の判定角度 $\theta$ である可能性が高い。本提案手法では、主成分分析を行うことで枝の伸長方向を推定しようとしたが、主成分分析を行う球状空間の半径が少しでも異なると周囲の枝に影響されてしまい、第一主成分が枝の伸長方向を正確に向いていなかったのではないかと考えられる。また、曲線を描く枝を再現するために、中心線の接続において $\theta$ を 60 度と設定したことが、複数の枝の間における中心線の誤接続を発生させている可能性がある。この誤接続が生じないように対応するためには、主成分分析を行う前に、枝を分岐点ごとに切断して、樹木点群を分岐の無い枝点群に分割し、分割後の枝点群それぞれに主成分分析を行う必要があると考えられる。この手法であれば、正確な第一主成分が得られる可能性が高いと考えられる。その際に、主成分分析の処理を変更することに合わせて、 $\theta$ を再設定する必要もある。

また、検討において示したように、ノイズ除去の工程で樹木点群のノイズを除去しきれなかったために、樹木モデルを構築した際に、樹木点群では枝が存在しない位置に中心点が生成されてしまう点も本提案手法の課題として挙げられる。本提案手法では DBSCAN によって密度の小さい点の集合をノイズとして除去している。そのために、枝を構成する点群と同等以上に密度の大きいノイズの点群を除去することができず、この課題を引き起こしてしまうと考えられる。この課題を生じさせないためには、点群密度とは異なる基準を用いて、樹木点群からノイズの点群を除去する必要があると考える。

以上のように、実験結果、検討、および、その 2 つから導かれる課題点を吟味すると、本提案手法を用いて作成した樹木モデルは、大まかな枝構造こそ再現できているものの、細部においては枝構造を再現できていない場合もあった。

## 6. おわりに

本研究では、ドローンに搭載された LiDAR センサを用いて取得した樹木点群から、樹木点群の枝構造を再現した

樹木モデルを生成する手法を提案した。検証実験および樹木モデルに対する検討の結果、生成した樹木モデルはおおよそその枝構造を再現できたが、複数の枝が近接する場合などでは樹木点群の枝構造を再現できなかった。したがって、本提案手法は、今後、複雑な枝構造を再現するために、各工程において使用技術や演算処理を見直す必要がある。

## 謝辞

本研究の遂行にあたって、和歌山果樹試験場かき・もも研究所様には、ドローンを用いた入力データの取得を保有する圃場においてご許可頂きましたこと、心より感謝いたします。

## 参考文献

- [1] 斎藤和人, 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学術講演会講演論文集, pp.65-66 (2015)
- [2] 斎藤和人, 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”, [https://www.jstage.jst.go.jp/article/pscjspe/2016S/0/2016S\\_771/\\_pdf-char/ja](https://www.jstage.jst.go.jp/article/pscjspe/2016S/0/2016S_771/_pdf-char/ja)
- [3] 斎藤和人, 増田宏, 平岡裕一郎, 松下通也, 高橋誠, “三次元大規模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学術講演会講演論文集, pp.489-490 (2016)
- [4] Shaojun Hu, Zhengrong Li, Zhiyi Zhang, Dongjian He, Michael Wimmer, “Efficient Tree Modeling from Airborne LiDAR Point Clouds”, *Computers&Graphics*, Vol.67, pp.1-13 (2017)
- [5] Martin Ester, Hans-Peter Kriegel, Jörg Sander, Xiaowei Xu, “A Density-Based Algorithm for Discovering Clusters in Large Spatial Databases with Noise”, *KDD'96: Proceedings of the Second International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining Pages*, pp.226-231 (1996)
- [6] 和歌山県, 果樹試験場かき・もも研究所 | 和歌山県, [https://www.pref.wakayama.lg.jp/prefg/070100/070109/gaiyou/kakimomo/index\\_1.html](https://www.pref.wakayama.lg.jp/prefg/070100/070109/gaiyou/kakimomo/index_1.html)