

森林環境における
可搬型 3 次元レーザスキャナを用いた
立木計測に関する研究

2018年 9月

関 才門

森林環境における可搬型 3 次元レーザスキャナを用いた
立木計測に関する研究

関 才門
システム情報工学研究科
筑波大学

2018 年 9 月

論文概要

背景と目的

日本の国土の 2/3 は森林でおおわれており，森林全体の 4 割に相当する 1029 万 ha が人工林である．この人工林は，終戦直後や高度経済成長期に伐採跡地に造林されたものが多く占められている [1]．造林から数十年が経過し，成長した有用樹種の伐採と木質資源の活用ならびに森林の健全な維持管理による水土保全・地球環境保全が社会的課題となっている．

一方で，この人工資源林の利活用には人手が必要であるが，人口減少や林業家の高齢化などの諸事情によって，これが思うにまかせられない状況にもなっている．バイオマス量の推定や植樹した樹木の成長にともなう伐採計画のためにも，人工林内の代表エリア中の立木 1 本毎に対し胸高直径，立木位置，樹高など必要なパラメータを計測して資源量を把握し集積する必要がある．ここで，胸高直径とは地面から約 1.2 m の高さ（胸高）におけるその立木の直径をいう．これらの作業は従来人手により行われてきた [2]．これには，多大な労力と時間を要するため，おりからの林業者の担い手不足によりこれら資源量の把握も社会的な必要性に比して遅滞気味と言われて久しい．

そこで著者は，ロボット分野の環境認識技術をこの計測に応用し，資源量の定量的かつ効率的な把握ができないか，と考えている．例えば，3 次元レーザスキャナを林内で用いれば，立木の 3 次元形状を点群データとして極めて短時間で取得することができる．さらに，この点群データから胸高直径や立木位置などのパラメータを自動で算出することができれば，従来の手作業による森林計測に比べて効率的である．従来研究においても同様の試みはあるが，林内における地上計測では定点ごとの静止計測を対象としたものが大半であり，より簡便で時間短縮可能な連続移動計測については，その技術的な難しさのために，研究や試作段階のものはあるが森林計測における実用例はまだ無い．以上より，本研究の目的を，森林環境における連続移動計測による立木計測，特に連続移動計測を実現するための技術的課題への対処とする．技術的課題への対処のための工夫を行うことで，3 次元レーザスキャナを人が運びながら，林内を連続的に歩行することで，歩行した林内領域での立木の状況を計測できるようにする．

著者は，森林環境での使用を想定した広視野の可搬型 3 次元レーザスキャナ装置を開発した [3]．この装置を用いて，林内を連続歩行しながら立木群の 3 次元点群を取得する．取得した 3 次元点群は，2 次元スキャンを 6 自由度でマッチングする手法 [4] により重ね合わせられ，3 次元森林地図が生成される．本論文においては，生成した平地林または傾斜林の 3 次元森林地図から，樹幹や地面の点群が持つ特徴を利用して胸高直径や立木位置などを計測する手法について論じる．

従来研究と本研究の位置づけ

森林計測にレーザスキャナを応用した例として，航空機スキャナ [5–9] や地上型スキャナ [10–19] によるものが挙げられる．航空機スキャナは，上空から広範囲を短時間に計測することができるが，森林内の詳細な情報を計測することは困難がともなう．本研究のように立木の直径などを推

定したい場合は、地上での計測の方が適する。地上型スキャナによる計測は、少数地点における大型装置による静止計測 [10–14]、多数地点における小型装置による静止計測 [15–17]、可搬型装置による連続移動計測 [18, 19] に大別される。

センサの測距距離が 100 m オーダーの大型装置を用いれば、林内における静止計測地点の数が少なくても、その測距可能距離の長さを活かして広範囲の森林情報を取得することができる。しかし、装置の重量が重く林内での移動や設置に困難がともなう。また、背後にある物体が隠れて認識できないオクルージョンの問題により、得られる森林情報に欠損が生じる難点がある。

測距距離が 30 m オーダーの小型軽量の装置で静止計測を行えば、計測地点は多数必要となるが、上述のオクルージョンの問題は著しく軽減され、また林内における持ち運びもきわめて容易になる利点がある。一方で、多数の計測地点においてレーザスキャナにより得られた点群を適切に重ね合わせる必要がある。これは、移動ロボットの技術分野では自己位置と地図の同時推定問題 (SLAM: Simultaneous Localization and Mapping) と呼ばれ、現在も盛んに研究されている分野である。この SLAM 技術を森林計測へ応用した例として、OWL (Optical Woods Ledger) [15, 16] がある。OWL は 3 kg 程度の小型装置であり、多地点における静止計測によって林内の立木の位置や胸高直径などの計測を行う。この装置の実用化では、立木の胸高直径の誤差を 2 cm 程度におさめており、林業関係者への普及が大いに期待できるレベルとなっている。

しかし、OWL はまだ林内で 10 m 程度おきに移動し、計測を行うときは静止している必要がある。これを静止せず連続的に移動するだけで同様な計測ができれば、さらに計測時間を短縮することが可能である。また連続的な移動によりオクルージョンの問題をさらに軽減することもできる。比較的軽量で森林の計測用途にも向く 3 次元レーザスキャナの例としては、手持ちのハンドヘルド型と背負い式のバックパック型がある。ハンドヘルド型の例としては、Bosse らによる Zebedee [20] がある。これは、2 次元レーザスキャナをばね機構により揺動させており、実際にこの装置を用いた連続移動による森林計測も報告がある [18, 19]。しかし、森林のように上下左右に広い視野を計測するためには意識して装置を振らなければならず、斜度の大きい傾斜林では不便となる可能性がある。他にも、既存の 3 次元レーザスキャナを用いたハンドヘルド型の装置が存在するが、立木の計測に必要な垂直視野 $\pm 70 \sim 80 \text{ deg}$ を満たしていないものがほとんどである。バックパック型の例としては、3 次元レーザスキャナ VLP-16 [23] 2 個とカメラ 5 個からなる Leica Pegasus [24] や (株) Woodinfo の 3D Walker [25] がある。これは、前者は重量 13 kg であり、斜度の大きい傾斜林での計測が困難となる可能性がある。後者は、2017 年 10 月にプレスリリースされたものであり、VLP-16 [23] を用いていると推察されるが、森林環境における連続移動計測という方向性は同じである。

以上より、既存の計測装置には、本研究の目的に合ったものが存在しなかったため、著者は連続移動計測に適した可搬型で広視野の 3 次元レーザスキャナを開発した [3]。開発した装置は、傾斜林での計測を考慮し、安全性と利便性の観点から両手に物を持つことを避けたいため、バックパック型とした。

一方、森林内での 3 次元地図生成に関して、少数地点における大型装置による静止計測では、森林環境にマーカーを設置し、これを目印にして点群をつなぎ合わせるスキャンマッチングの例が多く見られる。あるいは、位置が既知の地点でスキャンデータを取得してつなぎ合わせを行う例

も多い。一方で、小型装置による多数地点における静止計測の OWL [15] は、立木が離散的に林立している状況を利用して、複数の立木の中心位置を特徴点として抽出している。それらの点を繋いだ形状を重ね合わせるにより計測地点を推定した上で、複数地点の 3 次元スキャンデータをつなぎ合わせて 3 次元地図を生成している [16, 17]。

本研究においては、連続移動計測に適した手法として、逐次得られる 2 次元スキャンを 6 自由度でマッチングする LOAM [4] に基づいて 3 次元地図を生成する。本手法もマーカの設置や位置が既知の地点を必要とせず、立木が林立した森林環境を対象としてスキャンマッチングを行うことができる。

計測装置

本研究で使用する可搬型 3 次元レーザスキャナ装置 [3] は、2 次元レーザスキャナのスキャン面を 60 deg 傾けて無限回転させる機構である。回転・揺動の種類としては、他にもジンバル機構やスキャン面を鉛直にする回転機構などが考えられるが、前者は上下に死角が多く、後者は上部と左右で疎密の差でてしまうことから、本研究における使用目的に適さない。これに対して本装置の回転方式は、垂直方向 ± 60 deg および周囲 360 deg の広い視野角が得られスキャンデータの疎密の差が出にくいことから、本研究における使用目的に適している。本装置の重量は 870 g と軽量であり、バックパックに取り付けて使用できるため、計測者への負担が少ない。

バックパックに取り付けているため、特に傾斜林における計測時に装置の姿勢変化が大きくなることが想定される。誤差の小さいマッチングを行うためには、装置の姿勢が鉛直方向に対してどれだけずれているかを検出し、取得した点群をマッチングの前処理として鉛直方向に補正する必要がある。装置の姿勢検出には、IMU（慣性計測装置）を使用している。予備実験において、実際の計測時に想定される動作、すなわち平面の歩行、斜面や段差の上り下り、バックパックの背負い直し等に伴う姿勢変化に対して、十分な補正が可能であることを確認した。

2 次元スキャンの 6 自由度マッチングによる 3 次元地図生成

本研究における森林内の 3 次元地図生成は、LOAM [4] の手法に基づく。LOAM は、回転する 2 次元スキャンを 1 スキャンずつ入力し、蓄積した 3 次元点群に対して 6 自由度でマッチングすることにより 3 次元地図を生成する。

まず、レーザスキャナから入力した 1 スキャン分の各点に対して、局所的な滑らかさを表す指標である c 値を算出する。この c 値により、入力スキャンからエッジ点と局所平面点を特徴点として抽出する。次に、この特徴点を用いて、2 次元の入力スキャンをそれまである一定時間蓄積した 3 次元の参照スキャンに対して、点对線および点对面でマッチングする。これらの点对線および点对面の距離を最小化するように、非線形最小二乗法である Levenberg-Marquardt 法により収束計算を行い、計測装置の 6 自由度の移動量を求める。この移動量により、入力スキャンをつなぎ合わせ、3 次元の蓄積点群とする。さらに、特徴点を用いて、3 次元蓄積点群を既に生成されている 3 次元地図に対して、点对線および点对面でマッチングする。これらの点对線および点对面

の距離から，Levenberg-Marquardt 法により収束計算を行い，計測装置の 6 自由度の移動量を求める．この移動量により，3 次元蓄積点群を 3 次元地図につなぎ合わせている．

本研究においては，装置をバックパックに取り付けて使用するため，装置の姿勢変化が大きくなることが想定される．大きな姿勢変化が生じた際に取得した点群をそのまま LOAM に入力すると，マッチング誤差の原因となる．そこで，LOAM によるマッチングの前処理として，取得した点群をその姿勢変化に応じて補正する必要がある．本研究では，IMU を用いてその姿勢変化を検出し，鉛直方向に補正する．実験により，実際の森林計測において想定される姿勢変化に対して，IMU による姿勢補正を十分に行えることを確認した．

予備実験として，屋内および屋外環境における 3 次元地図生成実験を行った．屋内環境として廊下と階段を，屋外環境として街路樹脇の歩道を選定した．いずれの環境においても，計測装置が通過した経路中の周囲の形状を 3 次元復元できていることを確認した．

予備実験により歩道における街路樹の形状がほどよく検出できたので，本格的な実験として，平地人工林，傾斜自然林および傾斜人工林において 3 次元地図生成実験を行った．いずれの環境においても，計測装置が通過した経路中の周囲の形状を 3 次元復元できていることを確認した．地図生成実験の結果より，本来屋内環境を想定して考案された LOAM が森林環境にも適用可能であり，生成した 3 次元地図が森林計測においても利用可能であることを確認できた．

平地林における立木計測

平地人工林において生成した 3 次元地図より，胸高直径および立木位置を推定する手法について説明する．まず，計測開始地点の高さを基準として高さ 1.0~2.0 m の点群をすべて抜き出す．抜き出した点群に対して RANSAC による円柱フィッティングを行い，複数の立木のそれぞれに対応する円柱状の点群を抽出する．円柱フィッティングによりあてはめた，最もあてはめの良い円柱をモデル円柱と呼ぶことにする．この時，モデル円柱の中心軸と半径に関するパラメータが得られている．ここで，胸高直径および立木位置の推定方法として以下の 2 つを提案する．

1) モデル円柱のパラメータを利用した胸高直径および立木位置の推定

上記の円柱フィッティングにより得られたモデル円柱のパラメータより，その半径を 2 倍にしたものを胸高直径とし，中心軸上の高さ 1.2 m の点を立木位置とする．

2) 1 スキャンへの円柱フィッティングによる胸高直径および立木位置の推定

ある立木の樹幹点群を，上記の円柱フィッティングにより得られたモデル円柱の中心軸方向に射影し，その 1 スキャンごとに最小二乗法による円柱フィッティングを行い，直径と中心点を求める．これらを同一立木の複数スキャンで平均をとり，平均直径を胸高直径とする．立木位置は，平均中心点を通りモデル円柱の中心軸に平行な線上の高さ 1.2 m の点とする．

上記 2 つの提案手法により，胸高直径と立木位置（評価は立木間距離で行う）の推定を行いその結果について比較したところ，1) の手法では LOAM によって推定される計測装置の移動量の誤差の影響を受けて，特に胸高直径の誤差が大きくなることがわかった．2) の手法では，計測装置の移動量の誤差の影響は排除されており，より小さい誤差で胸高直径を求めることができた．

また、計測時の移動経路のとり方の違いにより、胸高直径と立木間距離の推定結果に違いが出ることがわかった。この実験では、森林内に 30×10 m のサンプル領域を定め、その中を直進する経路、この領域を取り囲むように U ターンする経路、およびこの領域を縫うように歩く経路の 3 通りの経路でそれぞれ 10 回の計測を行い、取得した各 3 次元地図に対して 2) の手法により胸高直径と立木位置を推定し、その平均値をもって計測値とした。各経路における計測値を比較した結果、対象領域を取り囲むように U ターンする経路において、林業の現場において許容できるとされる胸高直径の誤差 2 cm 以下を達成した立木の本数が最も多く、14 本中 12 本（約 85%）であった。立木位置について、立木間距離をもって評価をしたところ、立木位置図を作成した際に立木の対応付けを誤らない程度の誤差であり、実用上十分な計測ができた。また、作業量に関して、他地点での従来の手動計測と比べても、提案手法は少ない作業量で同程度の範囲を計測することができた。以上より、提案手法による計測結果はまだ実用の水準には至らないものの、作業量を短縮する見通しができた。

傾斜林における立木計測

傾斜林において生成した 3 次元森林地図を用いて、胸高直径と立木位置を推定する手法について説明する。平地林においては、胸高付近の樹幹点群を抜き出す際に、ある基準点からの一定の高さで指定することができた。しかし、傾斜林においては胸高点群を各立木の根元を基準とした高さで抽出しなければならない。また、立木位置を斜面の最大傾斜方向とそれに直交する座標系で表す必要がある。よって、この問題に対処するために、各立木の根元の基準点を推定する方法と、地面を一枚の平面に近似する方法を考案し、胸高直径および立木位置を推定することにした。まず、傾斜自然林を対象として手法 a を提案した。

1) 手法 a

- 高さ 1 m 幅に分割した 3 次元地図に対し RANSAC による円柱フィッティングを行い、樹幹点群を検出する。
- 樹幹点群が検出された周辺において、最も低い 10 点を立木の根元の地面点群とみなし、その高さの平均値を根元の基準の高さとして、そこから 1.0 ~ 2.0 m の高さの点群を胸高点群として抽出する。
- その胸高点群に対し、再度 RANSAC による円柱フィッティングを行い、そのモデル円柱の直径を胸高直径とする。
- 各立木の根元の基準点を結び、斜面をドロネー三角形分割する。
- 分割した各領域の法線を求め、すべての領域の法線の平均をとる。この平均法線を法線に持ち、ある立木の胸高を通る平面を計測対象地域の近似斜面とする。
- この近似斜面と各立木のモデル円柱の中心軸との交点を立木位置とする。

この手法により傾斜自然林で計測実験を 1 回行ったところ、胸高直径に関して、対象立木 7 本中 6 本において許容誤差の範囲内で計測することができた。立木位置について、立木間距離をもって評価をしたところ、立木位置図を作成した際に立木の対応付けを誤らない程

度の誤差であり，実用上十分な計測ができた．

次に，傾斜人工林を対象とした手法 b を提案した．この手法では，斜度が一定であり地面の凹凸や下草も少ないという傾斜人工林の特徴を利用して，法線の特徴とした点群判別を行う．

2) 手法 b

- 3次元地図中の各点群に対し，法線算出時の k 近傍点の選択範囲を複数サイズの局所領域にして，各局所領域における法線を算出し，各法線の向きを特徴ベクトルとするクラスタリングを行い，「樹幹」「地面」「その他」に判別する．
- 「地面」と判別された点群に対し RANSAC による平面フィッティングを行い，モデル平面（最もあてはめの良い平面）を計測対象地域の近似斜面とする．
- 「樹幹」と判別された点群に対し RANSAC による円柱フィッティングを行う．
- モデル円柱の中心軸と近似斜面との交点を各立木の根元の基準点とし，これを立木位置とする．
- この基準点から 1.0 ~ 2.0 m の高さの点群を胸高点群として抽出する．
- その胸高点群の 1 スキャンずつに対して円フィッティングを行い直径を求め，同一立木の複数スキャンでの平均値を胸高直径とする（平地林の手法）．

傾斜人工林において，手法 b により計測実験を行った． 30×10 m のサンプル領域を定め，その中央を最大傾斜方向に上りながら直進する経路，最大傾斜方向に立木の間を縫うように歩く経路，および最大傾斜方向と直交する方向に立木の間を縫うように歩く経路の 3 通りの経路でそれぞれ 10 回の計測を行い，取得した各 3 次元地図に対して b) の手法により胸高直径と立木位置を推定し，その平均値をもって計測値とした．各経路における計測値を比較した結果，最大傾斜方向と直交する方向に立木の間を縫うように歩く経路において，林業の現場における胸高直径の許容誤差 2 cm 以下を達成した立木の本数が最も多く，72 本中 50 本（約 70%）であった．立木位置について，立木間距離をもって評価をしたところ，立木位置図を作成した際に立木の対応付けを誤らない程度の誤差であり，実用上十分な計測ができた．作業量に関して，同領域を実際に手で計測して比較したところ，提案手法は 4 分の 1 の作業量で計測することができた．以上より，提案手法による計測結果はまだ実用の水準には至らないものの，作業量を短縮することができるといえる．

結論

本論文では，著者らが開発した可搬型 3 次元レーザスキャナを用いて連続移動計測を行い，2 次元スキャンを 6 自由度でマッチングする LOAM の手法に基づいて平地林および傾斜林の 3 次元地図を生成した．この 3 次元森林地図から，樹幹や地面の点群が持つ特徴を利用して胸高直径や立木位置などを計測する手法について提案した．

平地林においては，LOAM による点群の重ね合わせの誤差が推定値に及ぼす影響を軽減するように，樹幹の 1 スキャンの点群に対して最小二乗法により円をあてはめて直径と中心点を求め，同一立木における複数スキャンの平均をとることで，胸高直径と立木位置を推定した．この手法

により、定めた矩形領域の3種類の各移動経路により、胸高直径と立木間距離を10回ずつ計測して平均値を比較したところ、立木を取り囲むようにUターンする経路が最も誤差の小さい結果となった。胸高直径の推定値は、約85%の立木において林業の現場における許容誤差の範囲内であった。立木位置については、実用上十分な計測ができた。また、作業量に関して、他地点での従来の手動計測と比べても、提案手法は少ない作業量で同程度の範囲を計測することができた。以上より、提案手法による計測結果はまだ実用の水準には至らないものの、作業量を短縮する見通しがあった。

傾斜林においては、法線の特徴とした点群判別を行うことにより、地図中の点群を「樹幹」、「地面」および「その他」に分類し、その判別結果を利用した胸高直径と立木位置の推定方法を提案した。この手法では、傾斜林特有の問題である、胸高点群を各立木の根元を基準とした高さで抽出することと、対象地域の斜面を平面近似することにも対応した。傾斜人工林において、定めた矩形領域の3種類の各移動経路により、提案手法を用いて胸高直径と立木間距離を10回ずつ計測して平均値を比較したところ、最大傾斜方向と直交する方向に立木の間を縫うように歩く経路が最も誤差の小さい結果となった。胸高直径の推定値は、約70%の立木において林業の現場における許容誤差の範囲内であった。立木位置については、実用上十分な計測ができた。また、作業量に関して、同領域を実際に手動で計測して比較したところ、提案手法は4分の1の作業量で計測することができた。以上より、提案手法による計測結果はまだ実用の水準には至らないものの、作業量を短縮することができるといえる。

本研究では、技術的課題に対処することで連続移動計測を実現するとともに、学術的な知見を得ることができた。特に、従来の手動計測に比べて提案手法による計測が作業量を短縮できた点は、林業における大きな貢献であると考えられる。今後は、1回の計測で十分な計測結果が得られるように、提案手法及び3次元地図生成手法を改良するとともに、枝下高や樹高の推定などを試みる予定である。

目次

1	序論	1
1.1	研究背景	1
1.2	研究目的	1
1.3	本論文の構成	4
2	従来研究と本研究の位置づけ	6
2.1	レーザスキャナの森林計測への応用例	6
2.2	3次元レーザスキャナ	7
2.3	3次元地図生成手法	7
3	計測手順と計測装置	8
3.1	計測手順	8
3.2	計測装置	8
4	2次元スキャンの6自由度マッチングによる3次元地図生成	11
4.1	LOAMの概要	11
4.2	IMUによる装置の姿勢補正	12
4.3	屋内および屋外環境における地図生成予備実験	20
4.4	森林環境における地図生成実験	20
4.5	まとめ	23
5	平地林における立木計測	26
5.1	胸高直径および立木位置の推定手法	26
5.2	評価方法	28
5.3	実験結果	30
5.4	考察	37
5.5	まとめ	39
6	傾斜林における立木計測	40
6.1	点群判別を行わない胸高直径と立木位置の推定手法	40
6.2	傾斜自然林における評価方法	43
6.3	傾斜自然林における実験結果	43
6.4	法線による点群判別に基づく胸高直径と立木位置の推定手法	45
6.5	傾斜人工林における評価方法	49
6.6	傾斜人工林における実験結果	51
6.7	考察	55
6.8	まとめ	60

7	結論	62
	謝辭	63
	参考文献	64

目次

1.1	Parameters to be measured in forest measurement.	2
1.2	State of manual forest measurement(measurements of trunk location).	2
1.3	State of manual forest measurement(left:measurements of tree height, right:measurements of diameter at breast height).	3
3.1	Procedure of measurements conducted on forest slope.	9
3.2	Developed mobile 3D-LIDAR: scanning section (left), total setup (right).	9
3.3	Positions of mobile 3D-LIDAR when rotating by 90 degrees.	10
3.4	Signal processing flow of 3D-LIDAR.	10
4.1	Flowchart of 3D forest measurements.	12
4.2	Point-to-line matching and point-to-plane matching in LOAM.	13
4.3	Experiment environment.	15
4.4	Experiment environment(target walls and measurement point).	16
4.5	How to vibration (roll direction and pitch direction)	16
4.6	3D point cloud seen from directly above (stop).	17
4.7	3D point cloud seen from directly above (not corrected at pitch 20 deg, 0.5 Hz)	17
4.8	3D point cloud seen from directly above (corrected at roll 5 deg, 2 Hz).	18
4.9	3D point cloud seen from directly above (corrected at pitch 5 deg, 2 Hz).	18
4.10	3D point cloud seen from directly above (corrected at roll 20 deg, 0.5 Hz).	19
4.11	3D point cloud seen from directly above (corrected at pitch 20 deg, 0.5 Hz).	19
4.12	The 3D indoor map (the vertical view towards the corridor)	20
4.13	The 3D indoor map (the parallel view towards the corridor)	21
4.14	Experiment environment.	21
4.15	The 3D outdoor map at the flats (the vertical view towards the direction of movement)	21
4.16	The 3D outdoor map at the flats (the parallel view towards the direction of movement)	22
4.17	The 3D outdoor map at the slope (the vertical view towards the direction of movement)	22
4.18	The 3D outdoor map at the slope (the parallel view towards the direction of movement)	22
4.19	Experiment environment.	23
4.20	3D forest map.	23
4.21	Experiment environment.	23
4.22	Experiment environment.	24
4.23	3D map of forest slope.	24

4.24	3D map of forest slope.	25
5.1	Flowchart of 3D forest measurements.	26
5.2	Central axis obtained by cylinder fitting and plane to project trunk points.	28
5.3	An example of projection of trunk points onto a plane.	28
5.4	An example of projection of one scan for trunk k onto plane L_k and fitted circle to the points.	29
5.5	Trunk location calculated by circle fitting to one scan for trunk k	29
5.6	Measurement area and Delaunay triangulation for evaluation of distances between standing trees.	29
5.7	Trunk caliper.	30
5.8	Measuring diameter at breast height by the trunk caliper.	31
5.9	Measurement path 1, 2, and 3.	31
5.10	Means of diameters at breast height for ten times measurements.	33
5.11	Correlation between scanned perimeter rates and errors of diameter at breast height at one scan.	34
5.12	Evaluation of errors of mean diameters at breast height to means of scan num ratios whose scanned perimeter rates are 0.3 or more.	35
5.13	Means of distances between standing trees for ten times measurements.	36
6.1	Flowchart of 3D forest measurements.	41
6.2	Flowchart of 3D forest measurements.	41
6.3	Method of extracting point clouds at around breast height and calculation of DBH.	42
6.4	Method used to calculate trunk location.	43
6.5	Extracted point cloud of breast height (vertical axis is x, horizontal axis is y).	44
6.6	Extracted point cloud of breast height (vertical axis is z, horizontal axis is y).	44
6.7	Delaunay triangulation of measurement area (vertical axis is x, horizontal axis is y).	45
6.8	Approximate plane of measurement area (vertical axis is z, horizontal axis is y).	46
6.9	Classification based on eigenvalues obtained from covariance matrix.	47
6.10	Classification of point clouds by clustering with feature as normal.	48
6.11	Proposed method based on classification result.	49
6.12	Measurement area and number of standing trees.	50
6.13	Pairs of trees for evaluation of distances between standing trees.	50
6.14	Measurement path 1.	51
6.15	Measurement path 2.	51
6.16	Measurement path 3.	52
6.17	Result of classification (single scale $r = 0.1\text{m}$).	52
6.18	Result of classification (single scale $r = 0.2\text{m}$).	53
6.19	Result of classification (single scale $r = 0.4\text{m}$).	53
6.20	Result of classification (multi-scale $r = 0.1, 0.2, 0.4\text{m}$).	53

6.21	Result of classification (multi-scale $r = 0.2, 0.3, 0.4\text{m}$).	54
6.22	Extracted point clouds at breast height (single scale $r = 0.4\text{m}$).	54
6.23	Extracted point clouds at breast height (multi-scale $r = 0.2, 0.3, 0.4\text{m}$).	54
6.24	Means of diameters at breast height for ten times measurements.	56
6.25	Means of distances between standing trees for ten times measurements.	57

表目次

3.1	Specifications of mobile 3D-LIDAR.	9
4.1	The motion of the 3D-LIDAR in the supposed scene (the average frequency and the maximum amplitude)	13
4.2	Experimental results (wall A, B)	14
4.3	Experimental results (wall C, D)	15
5.1	Means of diameters at breast height, their errors, and means of scan num ratios whose scanned perimeter rates are 0.3 or more in each path.	32
5.2	Means of diameters at breast height and their standard deviations in each path.	37
5.3	Means of distances between standing trees and their errors in each path.	38
6.1	Diameter of breast height calculated by cylinder fitting and measured by manual.	44
6.2	Trunk location indicated with coordinates of plane coordinates system.	45
6.3	Distance between a tree and a tree calculated by proposed method and measured by manual.	45
6.4	Means of diameters at breast height, their errors, and the index in each path (tree 1 ~ 40).	58
6.5	Means of diameters at breast height, their errors, and the index in each path (tree 41 ~ 72).	59
6.6	Means of distances between standing trees and their errors in each path.	60

第1章 序論

1.1 研究背景

日本の国土の2/3は森林でおおわれており、森林全体の4割に相当する1029万haが人工林である。この人工林は、終戦直後や高度経済成長期に伐採跡地に造林されたものが多く占められている[1]。造林から数十年が経過し、成長した有用樹種の伐採と木質資源の活用ならびに森林の健全な維持管理による水土保全・地球環境保全が社会的課題となっている。

樹木を伐採または維持管理するにあたって、伐採計画の作成やバイオマス量の推定を行う必要がある。そのためには、森林計測により樹木のパラメータを計測して、樹木の状態を把握しなければならない。森林計測において計測すべきパラメータは、立木位置、胸高直径、樹高、密度、樹冠直径、樹冠長および樹冠開放度などが挙げられる(Fig. 1.1)。ここで、胸高直径とは地面から約1.2mの高さ(胸高)におけるその立木の直径をいう。これらのパラメータから、2次元樹冠投影図や3次元樹木図などを作り、伐採計画の作成やバイオマス量の推定に利用している。

従来この森林計測は、人工林内の代表エリア中の立木1本毎に対して人手により行われてきた[2]。Fig. 1.2は立木位置の計測、Fig. 1.3の左は樹高の計測、右は胸高直径の計測の様子である。しかし、この人手による計測は多大な労力と時間を必要とする。例えば、30×10mの調査プロット内の計測を行うのに、4人で1時間程度の時間がかかる。その内訳は、巻尺等による計測や野帳への記入などの現地調査が3人で約30~60分、データ入力、計算作業および図や報告書の作成といった内業が1人で約60分である。計測ミスや入力ミスなどが発生することもあり、その確認に手間取ればさらに時間を費やすこととなる。また、人手による計測では、測定者の技量により計測値のバラつきが生じるという問題もある。

上で述べた通り、森林計測を通じた資源量の把握には人手が必要であるが、人口減少、若者の林業離れおよび林業家の高齢化や経済的理由などの諸事情によって、人手不足の状況となっている。このように、資源量の把握が社会的な必要性に比して遅滞することによって資源林の利活用がなされず、多くの森林が荒廃するという結果を招いている。よって、森林計測を促進することによって、いかに森林を再生するかが喫緊の課題となっている。

1.2 研究目的

上記の問題の解決策の一案として、ロボット分野の環境認識技術を森林計測に応用し、資源量の定量的かつ効率的な把握ができないかと著者らは考えた。例えば、森林環境において周囲の形状を点群データ(座標)として取得できる3次元レーザスキャナを用いれば、立木の形状や配置を復元した3次元森林地図を生成することができる。この地図中の点群データを処理することによって、胸高直径や立木位置などのパラメータを自動的に推定できれば、従来の森林計測を大きく時間短縮することが可能となる。地図を生成して必要なパラメータを記録することでより定量的な管理ができるようになり、定期的な計測によるデータを蓄積することも容易になる。蓄積したデータを参照すれば樹木の成長に合わせた資源量の把握も可能となる。また、人間によるデー

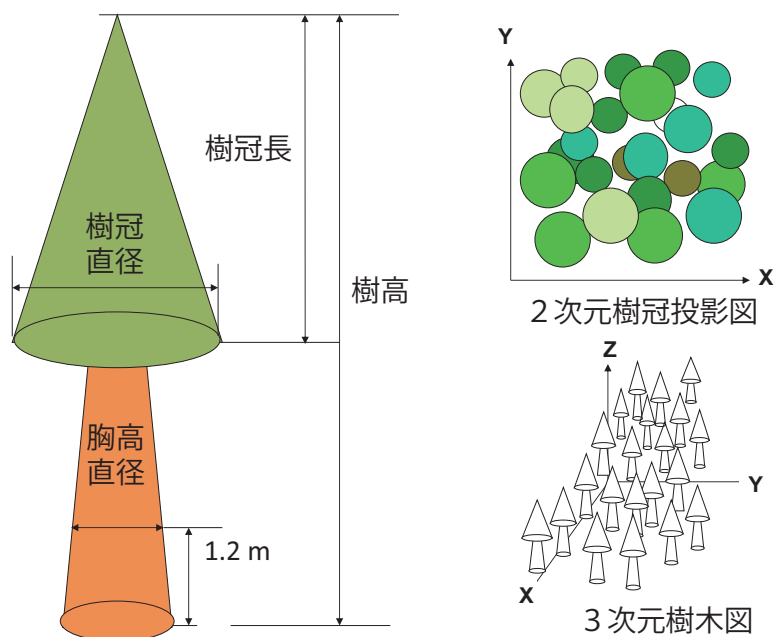


Fig. 1.1 Parameters to be measured in forest measurement.



Fig. 1.2 State of manual forest measurement(measurements of trunk location).

タの入力間違いを防ぐことができるといった利点もある。

3次元レーザスキャナを森林計測に応用する方法としては、

- 1) 航空機にこのスキャナを搭載して山林の上空から計測するもの
- 2) 地上の林内の1地点にスキャナを固定して定点計測するもの
- 3) 林内の調査領域内の何点かの地点を選び、その各点で静止して計測したスキャナからのデータを統合するもの
- 4) 調査領域内で人がスキャナを運びながら静止することなく連続的に移動して計測するもの

などに分類できる。このうち、森林内の詳細な情報を取得でき、かつ最も効率的な計測を行える



Fig. 1.3 State of manual forest measurement(left:measurements of tree height, right:measurements of diameter at breast height).

のは、この4番目の連続移動計測による方法であると考えられる。しかし、森林は不整地であり、斜度の大きい傾斜林もあることから、ロボットなどの機械が林内斜面を走行することは困難であることが多い。そのため、人が3次元レーザスキャナを持ち運ぶことが適当である。

連続移動計測は、研究や試作段階のものはあるが、森林計測における実用例はまだ無い。その理由として、3次元地図生成や3次元点群処理の過程において、技術的な難しさがあることが挙げられる。3次元地図生成に関して、定点計測におけるスキャンマッチングでは、静止間に蓄積した3次元点群を用いた3D-3Dマッチングを行うことができるため、特徴点がわかりやすく安定したマッチングが可能であるといえる。これに対し、連続移動計測におけるスキャンマッチングでは、蓄積した点群を用いることができないため、最新の2Dスキャンを用いた2D-3Dマッチングを行うこととなる。そのため、特徴点がわかりにくく、粗いマッチングになりやすいという技術的課題がある。また、そのような粗い点群に対して、フィッティング等の3次元点群処理を行わなければならないという技術的課題もある。

以上より、本研究の目的を、森林環境における連続移動計測による立木計測、特に連続移動計測を実現するための技術的課題への対処とする。技術的課題への対処のための工夫を行うことで、3次元レーザスキャナを人が運びながら、林内を連続的に歩行することで、歩行した林内領域での立木の状況を計測できるようにする。本研究では、立木パラメータの中でも特に重要な胸高直径と立木位置を従来手法と同程度の正確さで推定することを目指す。対象とする森林環境は平地林および傾斜林であり、斜度の大きい傾斜林も想定し、それぞれの特質に応じたデータ処理手法を提案する。林業への普及という観点から、3次元レーザスキャナは可能な限り小型で軽量であることが望ましい。本研究では、重量が200g程度と軽量小型の2次元レーザスキャナを用い、これをさらに回転させて3次元のスキャンを行う装置[3]を用いる。安全上の観点から3次元レーザスキャナは手持ちのハンドヘルド型ではなく、両手両腕を開放できる背負い式のバックパック型を選択した。装置自体は1kg程度であり、それを制御するノート型のPCと合わせても2.5kg程

度と軽量であり，林内で背負って移動するのに困難なほどの重量ではない．また，バックパック型の場合，計測者の姿勢変化の影響を受けやすいのでこれを補正する必要がある．第 2 章で述べるように，装置を背中に背負い連続的な移動で林内の立木に関する情報を得る例も皆無ではないものの，まだそれほど多くの例を見るものではない．本研究は，林業界において待望されてきながらまだ実用にはなっていない，林内の連続移動における計測手法の開発に挑んだ実装例として位置づけることができる．

なお，本研究で使用した広視野の可搬型 3 次元レーザスキャナ装置は [3] にて既に報告したものである．また，本研究では，レーザスキャナから逐次得られる 3 次元点群の重ね合わせ処理は LOAM [4] に基づいて行い，これにより 3 次元地図を生成している．さらに，3 次元地図中の点群を処理することで，平地林および傾斜林の特質に応じた胸高直径と立木位置の推定手法を提案し，その計測精度の評価を行った．

1.3 本論文の構成

第 2 章では，まずレーザスキャナを森林計測に応用した例を紹介し，各方法における長所と短所を説明する．その上で，本研究において連続移動計測を採用した理由について明らかにする．次に，2 次元レーザスキャナを回転または揺動させる 3 次元レーザスキャナについて紹介し，本研究においてスキャン面を傾斜させた無限回転機構を採用した理由を説明する．さらに，森林内において 3 次元地図を生成する従来手法について紹介し，本研究で LOAM を利用する理由を説明する．

第 3 章では，まず本研究において 3 次元レーザスキャナを用いて森林計測を行う際の計測手順について説明する．次に，本研究で使用する可搬型 3 次元レーザスキャナについて説明する．

第 4 章では，まず利用する LOAM の手法の概要について説明する．また，本装置をバックパックに取り付けて使用した際に生じる装置の姿勢変化を，IMU により十分に補正することができるか確認する．ここで，IMU による姿勢補正を行いながら，LOAM による 3 次元地図生成が行えるかを確認するための予備実験を，屋内環境と街路樹のある屋外環境において行い，その結果を示す．その上で，実際に平地林や傾斜林などの森林環境において行った 3 次元地図生成実験の結果について示す．

第 5 章では，平地林において生成した 3 次元森林地図を用いて，胸高直径と立木位置を推定する手法について説明する．当初，樹幹点群に対して円柱フィッティングを行うことにより，そのモデル円柱の直径を胸高直径としていたが，LOAM による重ね合わせ誤差の影響により胸高直径の誤差が大きくなった．そこで，LOAM によるマッチングを行う前の樹幹点群について，1 スキャンごとに円フィッティングを行うことでその直径と中心点を算出し，それを複数スキャンでの平均をとることで胸高直径と立木位置とした．実験では，平地林内に定めた矩形領域において 3 通りの経路を定めて計測を行い，各経路における計測結果の評価を行った．また，作業量についても考察を行った．

第 6 章では，傾斜林において生成した 3 次元森林地図を用いて，胸高直径と立木位置を推定する手法について説明する．当初，傾斜自然林を対象として，3 次元地図中の立木周辺の最下点を立

木の根元の基準点とする手法を提案する．次に，傾斜人工林を対象として，法線を特徴とした点群判別を行う手法を提案する．実験では，傾斜人工林内に定めた矩形領域において3通りの経路を定めて計測を行い，各経路における計測結果の評価を行った．また，作業量についても考察を行った．

第 2 章 従来研究と本研究の位置づけ

2.1 レーザスキャナの森林計測への応用例

森林計測にレーザスキャナを応用した例として、航空機スキャナ [5–9] や地上型スキャナ [10–19] によるものが挙げられる。航空機スキャナは、上空から広範囲を短時間に計測することができるが、森林内の詳細な情報を計測することは困難がともなう。本研究のように立木の直径などを推定したい場合は、地上での計測の方が適する。地上型スキャナによる計測は、少数地点における大型装置による静止計測 [10–14]、多数地点における小型装置による静止計測 [15–17]、可搬型装置による連続移動計測 [18, 19] に大別される。

センサの測距距離が 100 m オーダーの大型装置を用いれば、林内における静止計測地点の数が少なくても、その測距可能距離の長さを活かして広範囲の森林情報を取得することができる。しかし、装置の重量が重く林内での移動や設置に困難がともなう。また、手前の樹木によって遠方の樹木がかけになりレーザ光があたらずに計測できないオクルージョンの問題により、得られる森林情報に欠損が生じる難点がある。

測距距離が 30 m オーダーの小型軽量の装置で静止計測を行えば、計測地点は多数必要となるが、上述のオクルージョンの問題は著しく軽減され、また林内における持ち運びもきわめて容易になる利点がある。一方で、多数の計測地点においてレーザスキャナにより得られた点群を適切に重ね合わせる必要がある。これは、移動ロボットの技術分野では自己位置と地図の同時推定問題 (SLAM: Simultaneous Localization and Mapping) と呼ばれ、現在も盛んに研究されている分野である。著者が所属する研究室では、この SLAM 技術の森林計測への応用を試み、2009 年ごろから (株) アドイン研究所、(株) 森林再生システム、森林総合研究所と共同で開発を行った。その結果、多地点の静止計測によって林内の立木の位置や胸高直径などの計測を行う、3 kg 程度の小型装置 OWL (Optical Woods Ledger) [15, 16] を実用化した。この実用化では立木の胸高直径の誤差を 2 cm 程度におさめており、林業関係者への普及が大いに期待できるレベルとなっている。しかし、OWL はまだ林内で 10 m 程度おきに移動し、計測を行うときは静止している必要がある。これを静止せず連続的に移動するだけで同様な計測ができれば、さらに計測時間を短縮できる可能性がある。また連続的な移動によりオクルージョンの問題をさらに軽減することもできる。

比較的軽量で森林内での連続移動計測にも向く 3 次元レーザスキャナには、手持ちのハンドヘルド型と背負い式のバックパック型がある。ハンドヘルド型の例としては、Bosse らによる Zebedee [20] や大里らによる手法 [21] がある。前者は、2 次元レーザスキャナ UTM-30LX [22] をばね機構により揺動させるものであり、後者は、3 次元レーザスキャナ HDL-32E [23] を使用したものである。バックパック型の例としては、3 次元レーザスキャナ VLP-16 [23] 2 個とカメラ 5 個からなる Leica Pegasus [24] や VLP-16 [23] を使用していると推察される (株) Woodinfo の 3D Walker [25] がある。このうち、Zebedee [20] については文献 [18, 19] のように、連続移動による森林計測の報告がある。(株) Woodinfo の 3D Walker [25] も森林での連続移動計測用に製品化された装置である。また、VIRB 360 という周囲 360 deg を撮影できるカメラをヘルメットに装着し

て森林環境を歩行し、林内の様子を 3 次元復元した試みもある [26] .

本研究においても連続移動による森林計測を行うこととする . 著者らの開発した可搬型の 3 次元レーザスキャナ [3] は、傾斜林での計測も想定しており、安全上の観点から両手に物を持つことを避けたいため、バックパック型とした . 連続移動計測における技術的課題に対処し、OWL と同程度の誤差で胸高直径と立木位置を推定することを目指す .

2.2 3 次元レーザスキャナ

3 次元レーザスキャナには、レーザを 3 次元的に照射する既製品もあるが、2 次元レーザスキャナを回転または揺動させることにより 3 次元の視野角を得るものもある . 後者について回転・揺動の種類で分けると、ジンバル機構 [27,28] , スキャン面を鉛直にする回転機構 [29,30] , スキャン面を $0 < \theta < 90 \text{ deg}$ 傾ける回転機構 [31,32] に大別できる . 他にも、片持自転軸を有する回転揺動機構 [33] がある . 文献 [27,28,33] の機構は上下に死角が多く、文献 [29,30] の機構は上部と左右で疎密の差でてしまうことから、本研究における使用目的に適さない . これに対して文献 [31,32] の機構は、広い視野角が得られスキャンデータの疎密の差が出にくいことから、本研究における使用目的に適している . よって、本研究において使用する装置 [3] は、スキャン面を傾ける回転機構としている .

2.3 3 次元地図生成手法

森林内での 3 次元地図生成に関して、少数地点における大型装置による静止計測では、森林環境にマーカーを設置し、これを目印にして点群をつなぎ合わせるスキャンマッチングの例が多く見られる . あるいは、位置が既知の地点でスキャンデータを取得してつなぎ合わせを行う例も多い . これらの方法では、マーカーの設置や位置の計測などの前準備が必要となる . 森林計測の時間短縮の観点から、このような前準備は可能な限り必要でないほうが望ましい .

一方で、小型装置による多数地点における静止計測の OWL [15] は、立木が離散的に林立している状況を利用して、複数の立木の中心位置を特徴点として抽出している . それらの点を繋いだ形状を重ね合わせるにより計測地点を推定した上で、複数地点の 3 次元スキャンデータをつなぎ合わせて 3 次元地図を生成している [16,17] . これは、前準備を必要としない地図生成の例である .

本研究においては 1.2 節で述べたように、LOAM [4] に基づいて 3 次元地図を生成する . LOAM は環境中のエッジや局所平面を特徴点として利用するため、マーカーの設置などの前準備を必要としない . また、一般的な SLAM ではロボットや車両のタイヤの回転角から取得した累積移動量 (オドメトリ) を初期値として地図生成を行うものが多く存在するが、本研究で使用する装置はオドメトリを取得する手段を有していない . これに対し、入力した 2 次元スキャンを 6 自由度でマッチングする LOAM は、オドメトリフリーな手法であり、人間が歩いて持ち運ぶ装置においてスキャンマッチングを行うことができる . よって、本研究における連続移動計測に適した手法であるため、LOAM を採用している .

第3章 計測手順と計測装置

3.1 計測手順

本研究では、一般的に林業で行われている方法に従い、林内であらかじめ定めた矩形の調査領域内にある立木の胸高直径とその位置の計測を目的としている。林内における調査領域は、それが傾斜林であればその斜面の尾根 - 谷方向に 30 m、水平方向に 10 m 程度、あるいは各々 20 m 程度ずつの範囲にとられることが多い。平地林の場合は適宜その領域をとる。立木の断面は真円ではないので、従来の人手による計測ではその胸高に巻尺をまきつけ、周長を円周率で除したものを胸高直径とするのが通例である。立木位置は、その中心の位置をあらかじめ定めた調査領域内において直交座標系で表す。従来は、これらの計測をすべて巻尺などにより人手で行っていた。

本研究では、次の手順および Fig. 3.1 により計測を行う。

- 1) 林内で定めた矩形の調査領域内においてあらかじめ定めた経路に沿って、3.2 節で説明する計測装置を背負い、これを稼働させながらゆっくり徒歩で移動する。
- 2) 移動中、装置に搭載したセンサからの測定データを、装置に付随する PC に連続して保存する。
- 3) 調査領域内に定めた経路上の移動が終了したら、保存したデータを用いて 4.1 節で述べる LOAM [4] に基づき林内の 3 次元地図を生成する。
- 4) 得られた 3 次元点群から円柱状の樹幹を探索し、見つかった樹幹の候補に対し、胸高直径と立木位置を第 5 章と第 6 章で提案する手法により推定する。
- 5) さらに 1) から 4) を N 回繰り返す、同一の樹幹に対して得られる N 個の胸高直径および立木位置の平均をとり、これらをその計測値とする（本論文では $N = 10$ とした）。

なお、林内において定めた矩形領域内を移動する経路のとり方について、平地林では、立木の間を概ね直進する経路、立木を取り囲むように U ターンする経路、および立木の間を縫うように歩く経路の 3 通りで計測値の比較を行っている。傾斜林では、立木の間を最大傾斜方向に上りながら直進する経路、最大傾斜方向に立木の間を縫うように歩く経路、および最大傾斜方向と直交する方向に立木の間を縫うように歩く経路の 3 通りで計測値の比較を行った。

3.2 計測装置

本研究においては、広い視野角を計測できる可搬型 3 次元レーザスキャナ装置 [3] を用いる。Table 3.1 に開発した装置の仕様を示す。Fig. 3.2 は開発した装置の外観とバックパックへの取り付け例である。この装置は Fig. 3.3 に示すように無限回転する。

装置の回転には、マイコン、ドライバおよびモータが一体となっている Dynamixel MX-28R [34] を選定し、装置の小型軽量化を実現している。このモータは、無負荷回転数 67 rpm (14.8 V 時) であるため、減速比 1:2 のタイミングプーリーとタイミングベルトを用いて、2 倍の回転数を得る

Table 3.1 Specifications of mobile 3D-LIDAR.

Size [mm]	90 (W) × 125 (D) × 225 (H)
Weight [g]	870 (Scanning section only)
Measurement range [deg]	± 60 (pitch), 360 (yaw)
Rotational speed [rpm]	max 120

ことにした．これによりレーザスキャナの回転台に約 120 rpm の回転数が得られ，計測に適した回転速度を実現している．

2次元レーザスキャナとして，UTM-30LX [22] を用いる．これは，距離 30 m，周囲 270 deg の範囲を 40 Hz でスキャンすることができる．これをスキャン面が 60 deg 傾くように取り付けて無限回転させることで，森林計測に適した広い 3次元の視野角を得ている．装置を無限回転させるにあたって，静止した土台と回転する 2次元レーザスキャナとの間で電気信号と電力を伝達するため，スリッピング SRG-1-5/6GC [35] を使用した．

装置はバックパックに取り付けて使用するため，装置の姿勢変化が大きくなることが想定される．誤差の小さいマッチングを行うためには，装置の姿勢が鉛直方向に対してどれだけずれてい

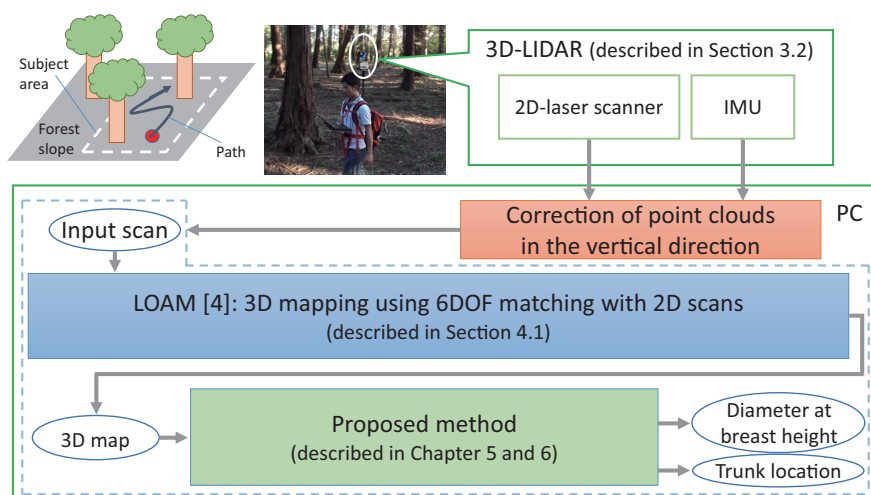


Fig. 3.1 Procedure of measurements conducted on forest slope.

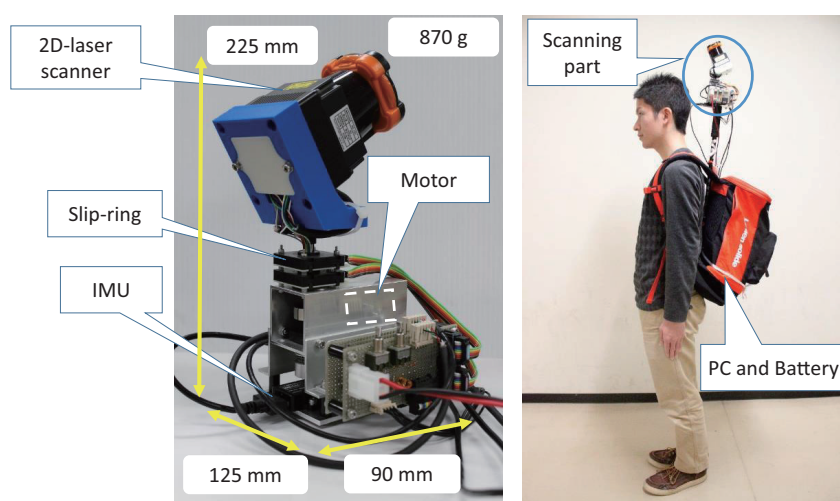


Fig. 3.2 Developed mobile 3D-LIDAR: scanning section (left), total setup (right).

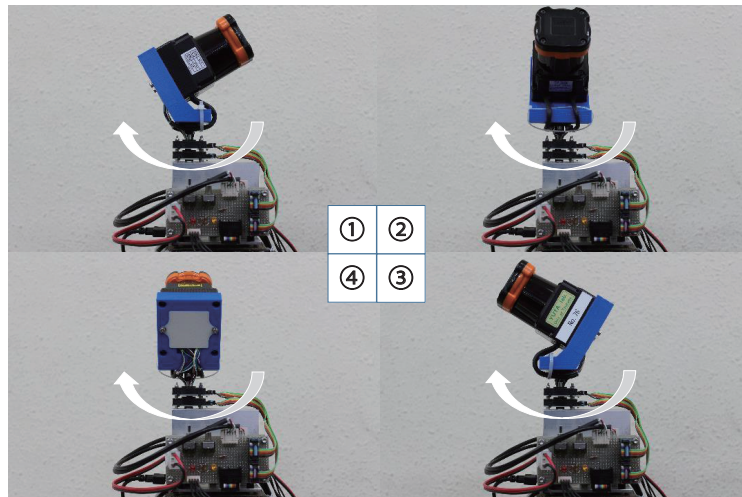


Fig. 3.3 Positions of mobile 3D-LIDAR when rotating by 90 degrees.

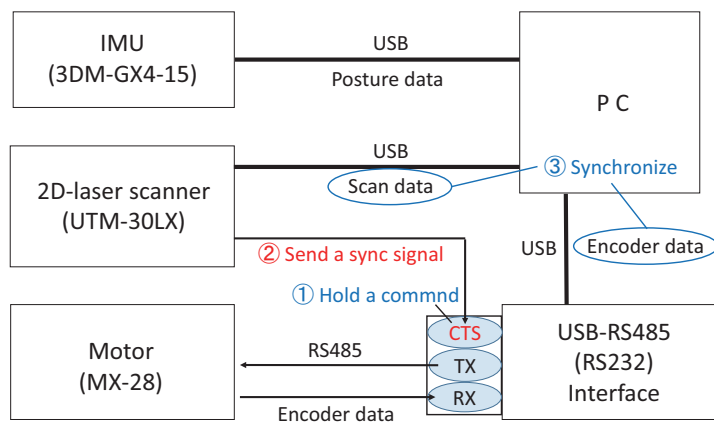


Fig. 3.4 Signal processing flow of 3D-LIDAR.

るかを検出し，取得した点群をマッチングの前処理として鉛直方向に補正する必要がある．装置の姿勢検出には，IMU（Inertial Measurement Unit）3DM-GX4-15 [36] を使用した．

Fig. 3.4 に，本装置のシステム構成を示す．3次元形状の取得のためには，モータのエンコーダ値とスキャンデータの取得時刻を同期する必要がある．そこで，レーザスキャナが発する同期信号を利用したハードウェアフロー制御を行う手法 [27, 37] を踏襲した．

第 4 章 2 次元スキャンの 6 自由度マッチングによる 3 次元地図生成

本章においては、まず利用する LOAM の手法について、特徴点の抽出方法とマッチング方法の概要を説明する。次に、本装置をバックパックに取り付けて使用した際に生じる装置の姿勢変化を、IMU により十分に補正することができるか確認する。そのために、実際の森林計測において想定される振動を把握するため、大学内のスロープや階段を歩行し、装置の姿勢変化を計測した。この計測結果に基づいて、想定される振動を三脚に取り付けた装置に擬似的に加え、その際に計測した壁までの距離の平均と標準偏差より、IMU による装置の姿勢補正を評価した。次に、IMU による姿勢補正を行いながら、LOAM による 3 次元地図生成が行えるかを確認するための予備実験を行った。LOAM はもともと屋内環境での使用を想定した手法であるので、屋外環境においても適用可能であるかを確認するため、屋内環境に加えて街路樹のある屋外環境において地図生成を行った。最終的に、実際の平地林や傾斜林などの森林環境において 3 次元地図生成実験を行い、生成した 3 次元地図が森林計測において利用可能であるか確認した。

4.1 LOAM の概要

本研究における森林内の 3 次元地図生成は、LOAM [4] の手法に基づく。LOAM は、回転する 2 次元スキャンを 1 スキャンずつ入力し、蓄積した 3 次元点群に対して 6 自由度でマッチングすることにより 3 次元地図を生成する。著者らは、ROS (Robot Operating System) 上の実装である loam_continuous [38] を使用し、さらに胸高直径と立木位置を推定する実装を新たに行った。Fig. 4.1 にそのフローチャートを示す。

LOAM の概要は以下のとおりである [4]。まず、レーザスキャナから入力した 1 スキャン (入力スキャン) 分の各点に対して、局所的な滑らかさを表す指標である c 値を算出する。各点はレーザスキャナのスキャン平面内に分布する。 c 値は、入力スキャンの i 番目の点とその前後 S 個の各点との距離の差から、式 (4.1) により求める。

$$c = \frac{1}{|S| \cdot \|X_i\|} \left\| \sum_{j \in S, j \neq i} (X_i - X_j) \right\| \quad (4.1)$$

ここで、 X_i, X_j はそれぞれ i 番目、 j 番目のスキャン点の座標を表す。入力スキャンを 4 等分し、各領域の中で c 値の大きい 2 点をエッジ点、 c 値の小さい 4 点を局所平面点として抽出し、これを特徴点とする。

次に、この特徴点を用いて、2 次元の入力スキャンをそれまである一定時間蓄積した 3 次元の参照スキャンに対してマッチングする (Fig. 4.2)。入力スキャン中のエッジ点と参照スキャン中のエッジ点 2 点から構成される線との間で、点对線マッチングを行う。同様に、入力スキャン中の局所平面点と参照スキャン中の局所平面点 3 点から構成される面との間で、点对面マッチング

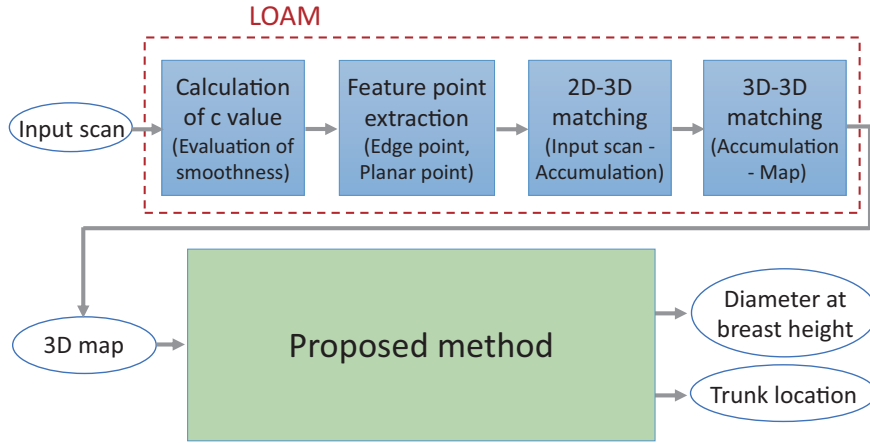


Fig. 4.1 Flowchart of 3D forest measurements.

を行う。式 (4.2) は、マッチングの評価関数である。

$$F(x_t) = \frac{1}{E} \sum_{e=1}^E \|T(x_t)z_{t,e} - m_{c_t,e}\|^2 + \frac{1}{H} \sum_{h=1}^H \|T(x_t)z_{t,h} - m_{c_t,h}\|^2 \quad (4.2)$$

右辺第 1 項がエッジ点，第 2 項が局所平面点に関するものである。右辺のそれぞれは，時刻 t の e (または h) 番目のスキャン点 z がその時刻の移動量 $T(x)$ によって，参照スキャン中の線や面 m_c とどのくらいずれているかを距離の二乗平均によって求めている。これを最小化するように，非線形最小二乗法である Levenberg-Marquardt 法により収束計算を行い，計測装置の 6 自由度の移動量を求める。この移動量により，入力スキャンをつなぎ合わせ，3 次元の蓄積点群とする。

さらに，エッジ点と局所平面点を用いて，3 次元蓄積点群を既に生成されている 3 次元地図に対してマッチングする。蓄積点群中のエッジ点と地図中のエッジ点 2 点から構成される線との間で，点对線マッチングを行う。同様に，蓄積点群中の局所平面点と地図中の局所平面点 3 点から構成される面との間で，点对面マッチングを行う。これらの点对線と点对面の距離から，非線形最小二乗法である Levenberg-Marquardt 法により収束計算を行い，6 自由度の計測装置の移動量を求める。この移動量により，3 次元蓄積点群を 3 次元地図につなぎ合わせている。以上が LOAM の概要である。

4.2 IMU による装置の姿勢補正

本研究においては，装置をバックパックに取り付けて使用するため，装置の姿勢変化が大きくなることが想定される。大きな姿勢変化が生じた際に取得した点群をそのまま LOAM に入力すると，マッチング誤差の原因となる。そこで，LOAM によるマッチングの前処理として，取得した点群をその姿勢変化に応じて補正する必要がある。本研究では，IMU を用いてその姿勢変化を検出し，鉛直方向に補正する。また，IMU が鉛直方向を検出できることにより，鉛直方向と地図座標系の z 軸を一致させた地図を生成できるという利点もある。以下，IMU による姿勢補正を十分に行うことができるか確認する。

まず，実際の森林計測において想定される地形や動作において生じる姿勢変化を計測する。想定される地形としては，平面・スロープ・段差が挙げられ，想定される測定者の動作としては，リュック

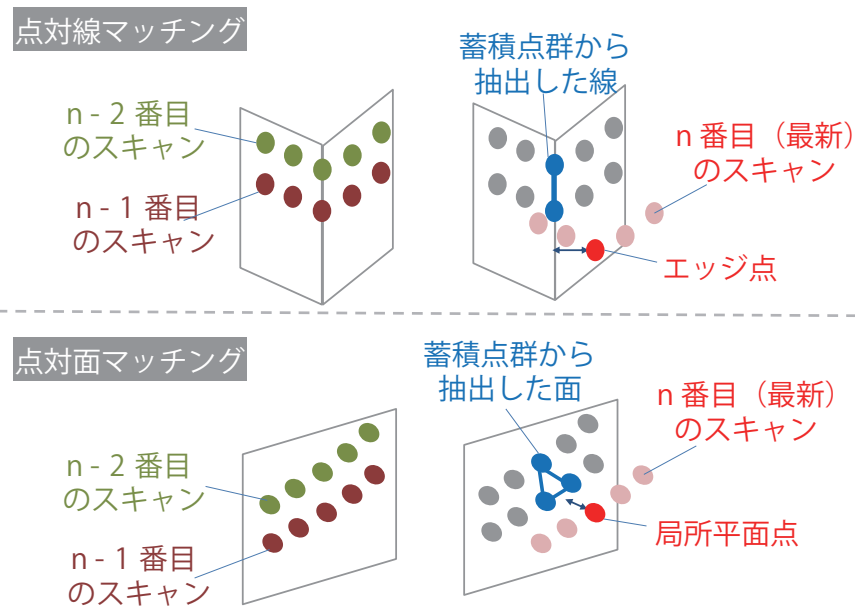


Fig. 4.2 Point-to-line matching and point-to-plane matching in LOAM.

Table 4.1 The motion of the 3D-LIDAR in the supposed scene (the average frequency and the maximum amplitude)

	Roll [Hz]	Pitch [Hz]	Roll [deg]	Pitch [deg]
静止	2	2	1	1
背負直し	0.5	0.5	6	20
平面 (歩行)	1.7	1.7	2	3
スロープ (上り)	0.5	0.5	10	6
スロープ (下り)	1	1	4	6
階段 (上り)	0.7	1.7	3	4
階段 (下り)	0.7	1.7	5	4

クの背負直し (短時間に装置を上下動させるような動き) が挙げられる . そこで , 装置を背負いながら大学内の平地・スロープ・階段を歩行したり , リュックの背負直し動作を行ったりした場合の装置の姿勢変化を IMU により計測した . **Table 4.1** はその計測結果であり , roll 方向と pitch 方向について平均周波数と最大振幅を示している . ただし , 装置の座標系は進行方向に x 軸 , 鉛直方向に z 軸 , この 2 軸により右手直行系をなす方向に y 軸をとっている .

この結果より , 装置の動きはゆっくり大きく動く場合と , 速く小さく動く場合の 2 種類に分けられる . そこで , 比較的平面の多い **Fig. 4.3** および **Fig. 4.4** のような環境において , 上記の計測結果に基づいて , 想定される振動を三脚に取り付けた装置に **Fig. 4.5** に示すような方向に手動で擬似的に加え , 座標軸とそれに平行な壁の点群までの垂直距離の平均と標準偏差を評価した . 廊下の長手方向と装置の座標系の x 軸を合わせている . 具体的に与える振動は , roll 方向と pitch 方向のそれぞれに対し , 0.5 Hz で振幅 20 deg の振動 (ゆっくり大きく) と 2 Hz で振幅 5 deg の振動 (速く小さく) の 2 種類である . 対象とする壁は 4 箇所であり ,

Table 4.2 Experimental results (wall A, B) .

与えた振動	補正	A 平均 [m]	A σ [m]	B 平均 [m]	B σ [m]
stop	前	-2.962	0.023	-2.985	0.038
stop	後	-2.959	0.023	-2.975	0.038
roll 5 deg, 2 Hz	前	-2.968	0.024	-2.994	0.041
roll 5 deg, 2 Hz	後	-2.960	0.023	-2.973	0.038
pitch 5 deg, 2 Hz	前	-2.940	0.047	-2.928	0.095
pitch 5 deg, 2 Hz	後	-2.945	0.026	-2.946	0.040
roll 20 deg, 0.5 Hz	前	-2.960	0.023	-2.974	0.039
roll 20 deg, 0.5 Hz	後	-2.962	0.023	-2.982	0.041
pitch 20 deg, 0.5 Hz	前	-2.955	0.144	-2.958	0.282
pitch 20 deg, 0.5 Hz	後	-2.963	0.039	-2.982	0.052
真値		-2.93		-2.93	

A. y 軸に並行な壁

B. y 軸に並行な壁 (軸と壁までの垂直距離は A と同じだが , A より遠くにある)

C. x 軸に並行な壁

D. x 軸に並行な壁 (軸と壁までの垂直距離は C と同じだが , C より遠くにある)

となる . A , B の壁により pitch 方向の補正を , C , D の壁により roll 方向の補正を評価することができる . 計測された 3 次元点群は , IMU により roll, pitch, yaw 方向の補正がなされ , 2 次元の地図生成を行う ROS のパッケージ hector mapping [39] のスキャンマッチングにより x, y, yaw 方向の補正がなされる .

Table 4.2, Table 4.3 は , 静止時および各振動を与えた際の , 測定点から各壁までの垂直距離の平均と標準偏差をまとめたものである . この表より , 各壁までの垂直距離の平均はメジャーで測定した真値と大きな差が無いことがわかる . 各加振時において補正後の標準偏差は補正前の標準偏差に比べて大きく改善されており , 静止時の標準偏差と大きな差はないことがわかる . また , 測域センサの測距精度は 10 m 以内で ± 0.03 m であるのに対し , 各壁はいずれも 10 m 以内にあり , 補正後の標準偏差はすべて 0.06 m 以下である . **Fig. 4.6** は振動を与えていない時の点群を真上から見たものである . **Fig. 4.7** は , 振動を与えたが IMU による補正をしていない時の点群を真上から見たものである . **Fig. 4.8 ~ Fig. 4.11** は , 各加振時における補正後の点群を真上から見たものである . 加振時において , 点群の大きなぶれが無いことが目視でも確認できる . よって , 以上の結果より , 想定される装置の姿勢変化に対して , 十分な補正が可能であるということがわかる .

Table 4.3 Experimental results (wall C, D).

与えた振動	補正	C 平均 [m]	C σ [m]	D 平均 [m]	D σ [m]
stop	前	1.467	0.007	1.478	0.049
stop	後	1.472	0.008	1.485	0.049
roll 5 deg, 2 Hz	前	1.491	0.047	1.514	0.070
roll 5 deg, 2 Hz	後	1.477	0.013	1.498	0.050
pitch 5 deg, 2 Hz	前	1.463	0.007	1.462	0.050
pitch 5 deg, 2 Hz	後	1.468	0.008	1.466	0.051
roll 20 deg, 0.5 Hz	前	1.480	0.072	1.511	0.088
roll 20 deg, 0.5 Hz	後	1.474	0.020	1.498	0.053
pitch 20 deg, 0.5 Hz	前	1.462	0.007	1.471	0.057
pitch 20 deg, 0.5 Hz	後	1.472	0.009	1.498	0.052
真値		1.48		1.48	



Fig. 4.3 Experiment environment.

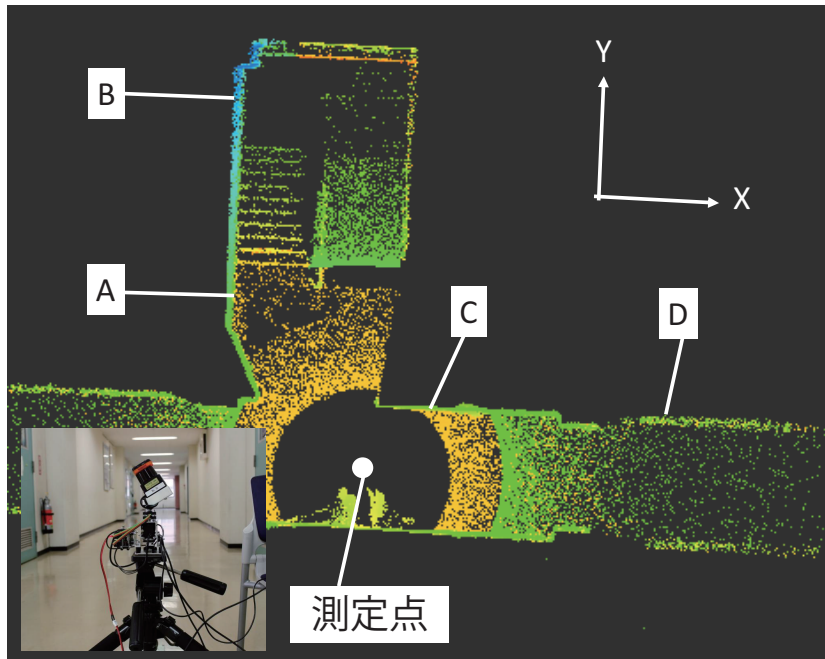


Fig. 4.4 Experiment environment(target walls and measurement point).

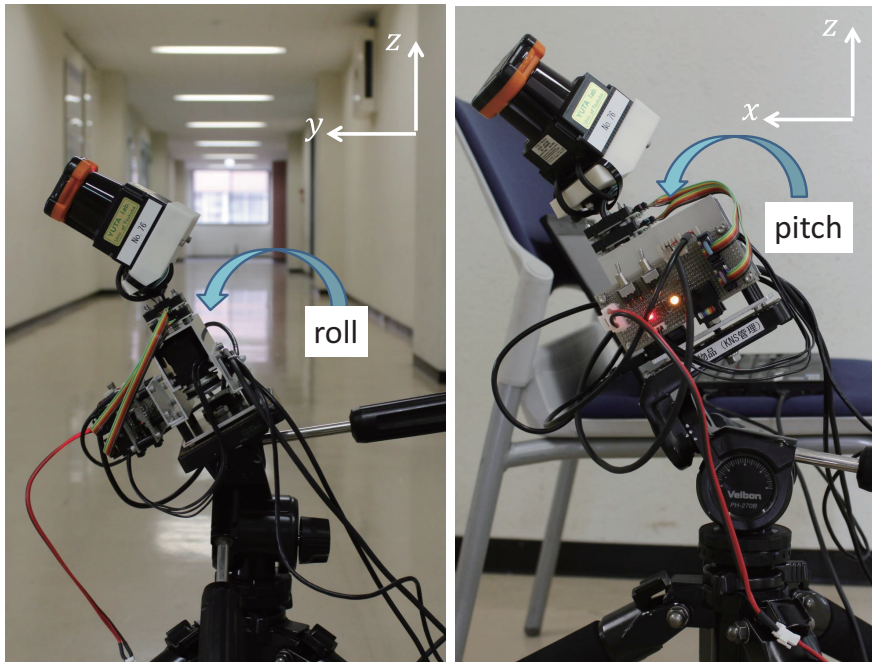


Fig. 4.5 How to vibration (roll direction and pitch direction) .

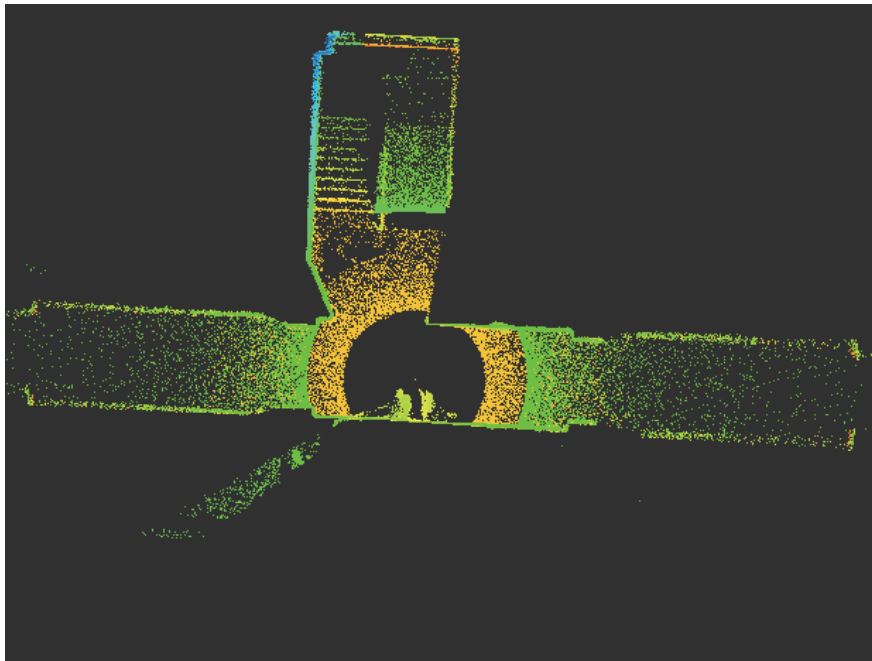


Fig. 4.6 3D point cloud seen from directly above (stop).

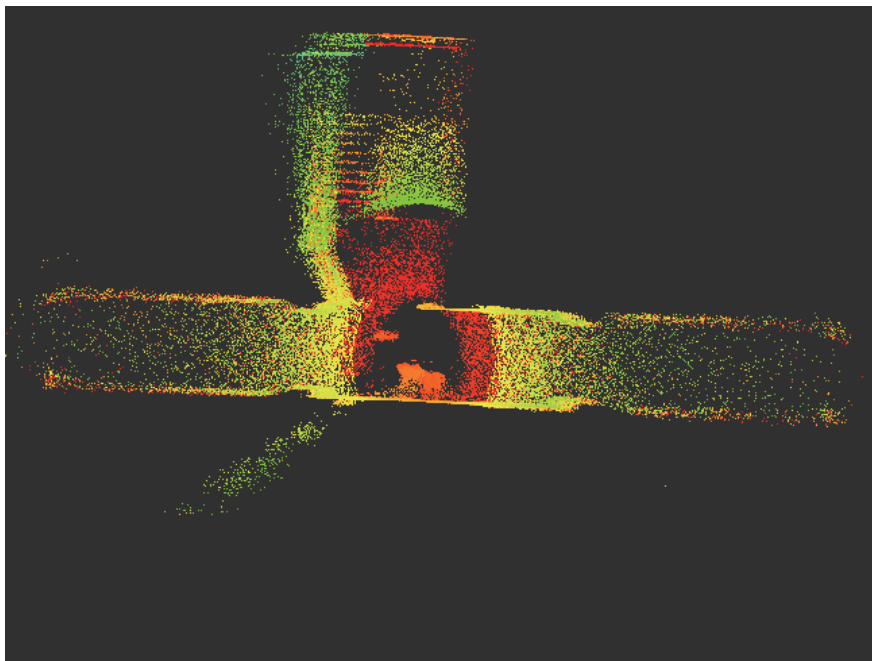


Fig. 4.7 3D point cloud seen from directly above (not corrected at pitch 20 deg, 0.5 Hz)

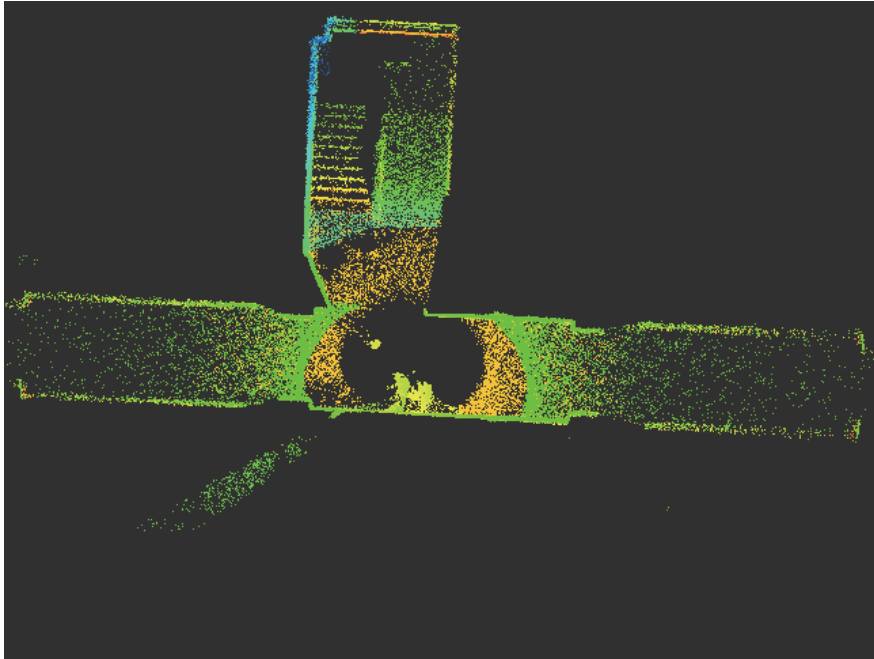


Fig. 4.8 3D point cloud seen from directly above (corrected at roll 5 deg, 2 Hz).

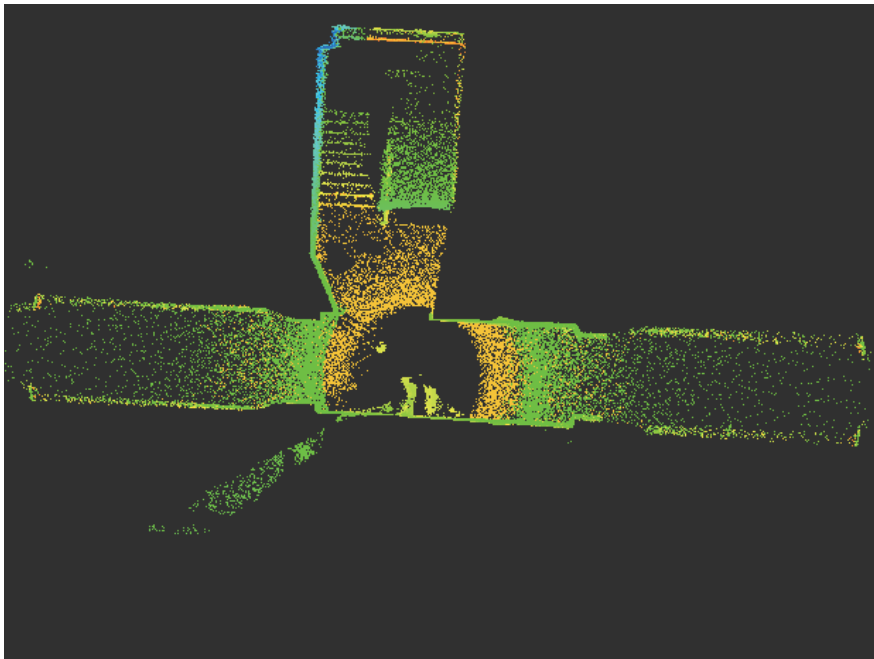


Fig. 4.9 3D point cloud seen from directly above (corrected at pitch 5 deg, 2 Hz).

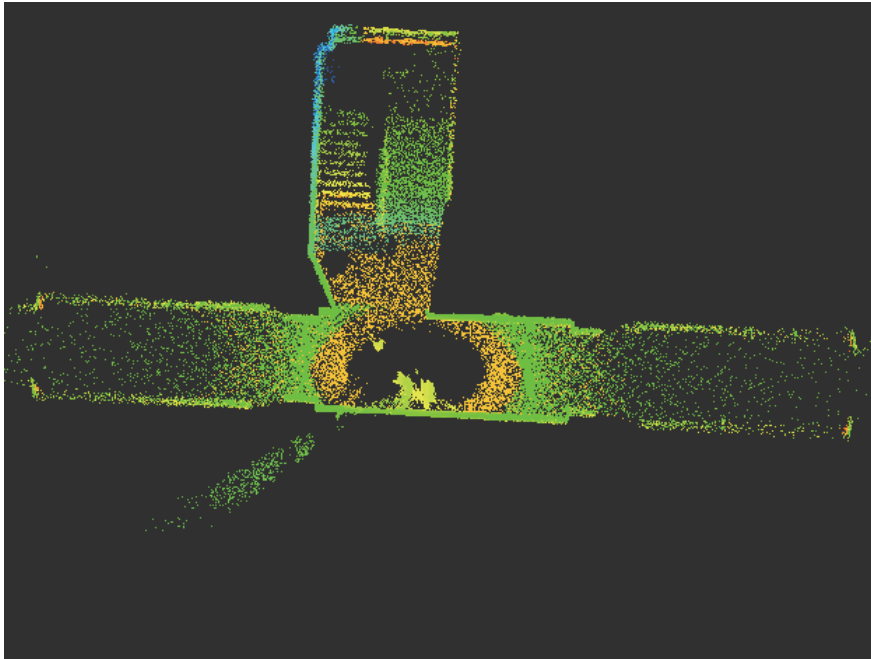


Fig. 4.10 3D point cloud seen from directly above (corrected at roll 20 deg, 0.5 Hz).

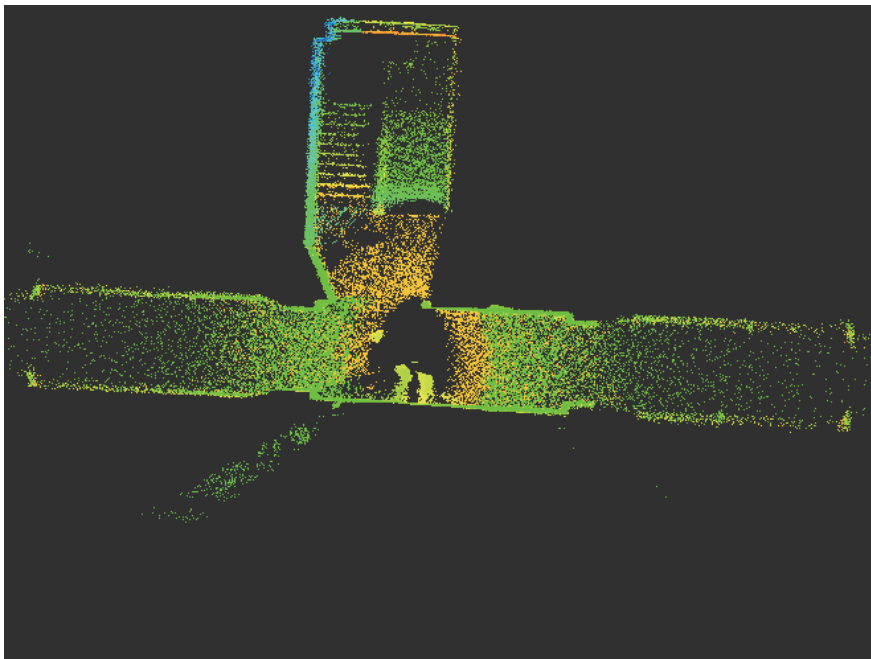


Fig. 4.11 3D point cloud seen from directly above (corrected at pitch 20 deg, 0.5 Hz).

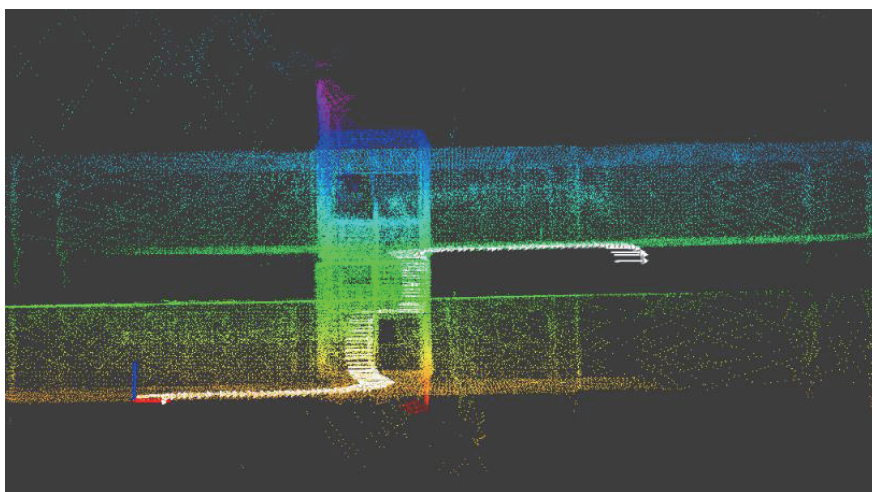


Fig. 4.12 The 3D indoor map (the vertical view towards the corridor)

4.3 屋内および屋外環境における地図生成予備実験

前項において、IMU による装置の姿勢補正が十分に行えることが確認できた。そこで、IMU による姿勢補正を行った計測点群を入力として LOAM による 3 次元地図生成が行えるか、森林環境での 3 次元地図生成を行う前に、まず身近な環境で予備実験を行った。LOAM はもともと屋内での使用を想定した手法であるため、屋外環境に適用できるかを確認する必要がある。よって、地図生成の予備実験は、階段を経由する屋内環境と街路樹のある屋外環境（平地，斜面）において行った。装置はバックパックに取り付け、連続的にゆっくりと歩きながら計測を行った。

Fig. 4.3 は、屋内の実験環境であり、廊下（3 階） 階段 廊下（4 階）という経路で計測を行った。Fig. 4.12, Fig. 4.13 は、屋内における 3 次元地図生成結果である。

Fig. 4.14 は、学内の第 3 エリア周辺における屋外の実験環境（左：平地，右：斜面）であり、まっすぐ歩きながら計測を行った。斜面は下から上に上っている。Fig. 4.15, Fig. 4.16 は、屋外（平地）における 3 次元地図生成結果である。Fig. 4.17, Fig. 4.18 は、屋外（斜面）における 3 次元地図生成結果である。

白矢印は出力された装置の移動軌跡である（向きは計測開始時の計測装置の正面方向）。3 次元地図は高低差によって色分けされている。計測装置が通過した経路中の周囲の形状を 3 次元復元できていることを確認した。また、屋外環境において、地面や樹幹を特徴点としてマッチングしていることも確認した。この結果より、LOAM が屋外環境においても適用可能であることが確認できた。

4.4 森林環境における地図生成実験

前項において、街路樹のある屋外環境において 3 次元地図を生成できることを確認した。そこで、本項では実際の森林環境において 3 次元地図を生成し、その地図が森林計測において利用可能であるかを確認する実験を行った。

Fig. 4.19 のような平地人工林（つくば市柴崎）において地図生成実験を行った。Fig. 4.20 に、3

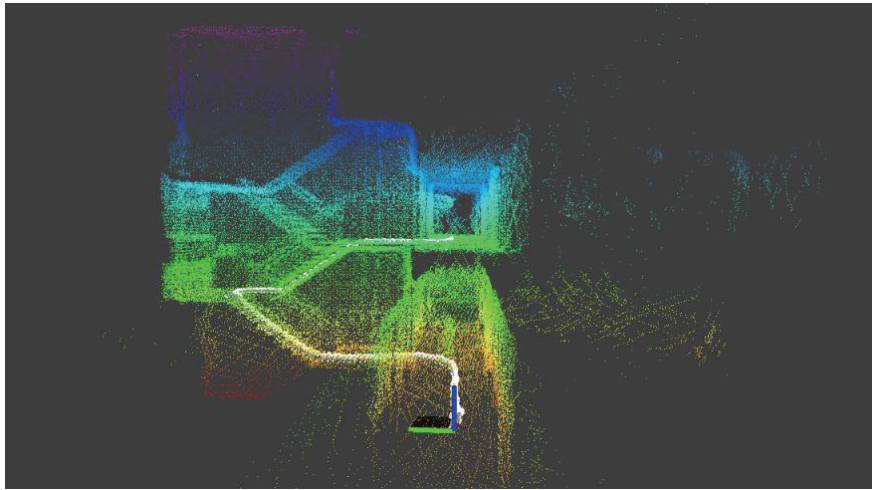


Fig. 4.13 The 3D indoor map (the parallel view towards the corridor)



Fig. 4.14 Experiment environment.

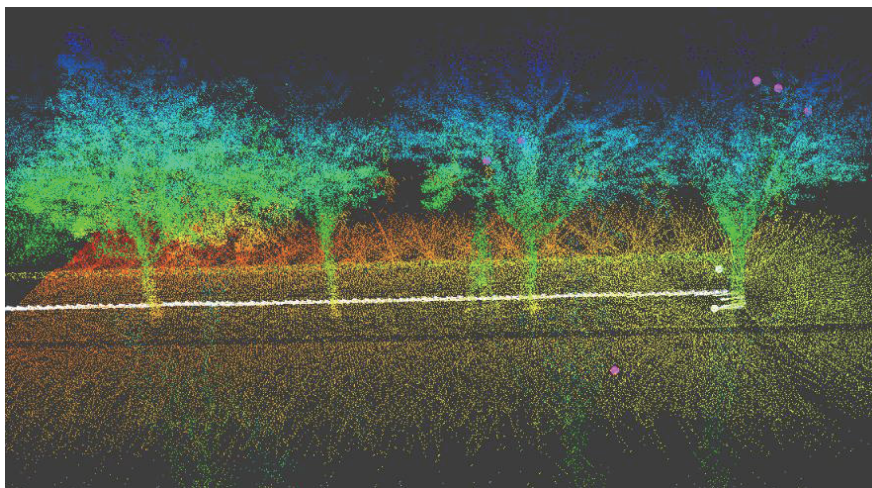


Fig. 4.15 The 3D outdoor map at the flats (the vertical view towards the direction of movement)

次元森林地図の生成結果を示す．また，**Fig. 4.21** のような傾斜自然林(つくば市小田)と **Fig. 4.22** のような傾斜人工林(つくば市上大島)において地図生成実験を行った．**Fig. 4.23** および **Fig. 4.24** に，それぞれの3次元森林地図の生成結果を示す．

白矢印は出力された装置の移動軌跡である(向きは計測開始時の計測装置の正面方向)．また，3次元地図は高低差によって色分けされている．計測装置が通過した経路中の周囲の形状を3次

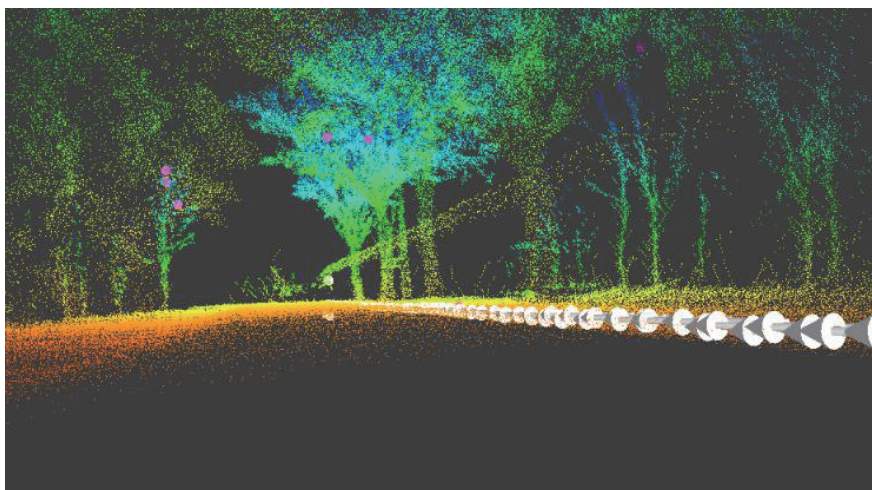


Fig. 4.16 The 3D outdoor map at the flats (the parallel view towards the direction of movement)

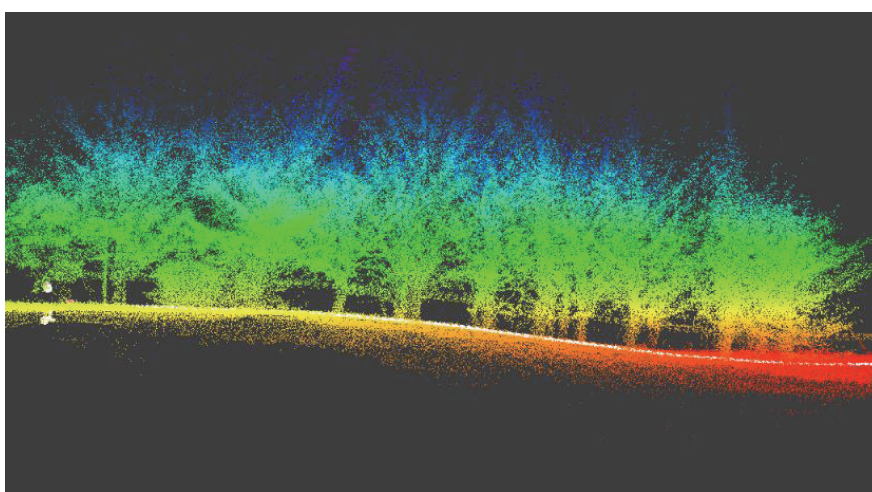


Fig. 4.17 The 3D outdoor map at the slope (the vertical view towards the direction of movement)

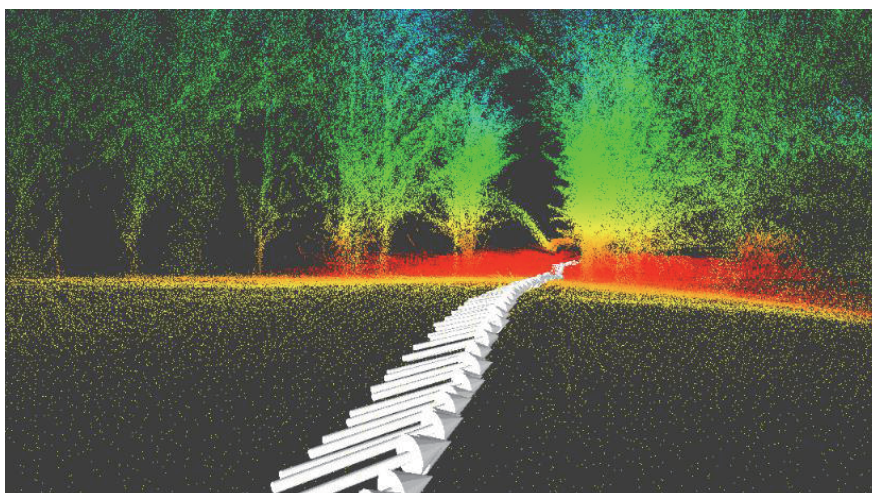


Fig. 4.18 The 3D outdoor map at the slope (the parallel view towards the direction of movement)

元復元できていることを確認した．地図中の樹幹の点群が円柱状をなしているかどうかを目視にて確認したところ，立木計測のための3次元点群処理（円柱フィッティング）を行うのに十分な円柱状を形成していた．この結果より，実際の森林環境においてLOAMにより生成した地図は，森林計測において利用可能であることが確認できた．



Fig. 4.19 Experiment environment.

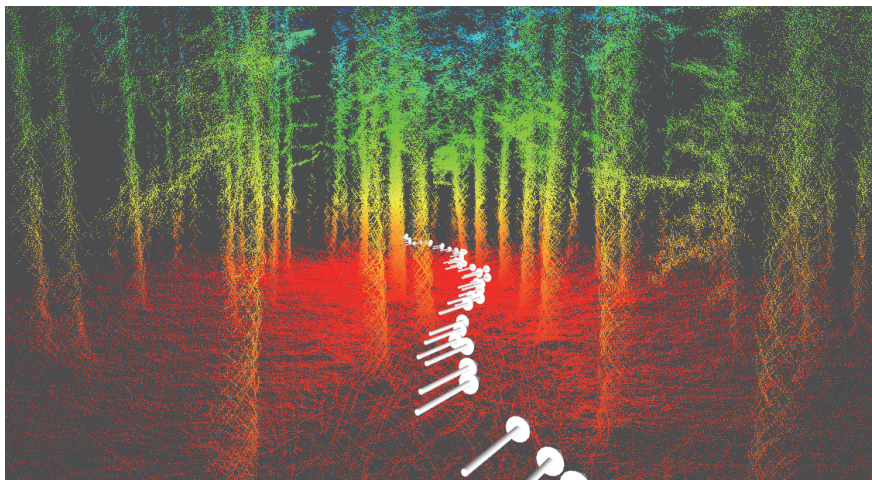


Fig. 4.20 3D forest map.

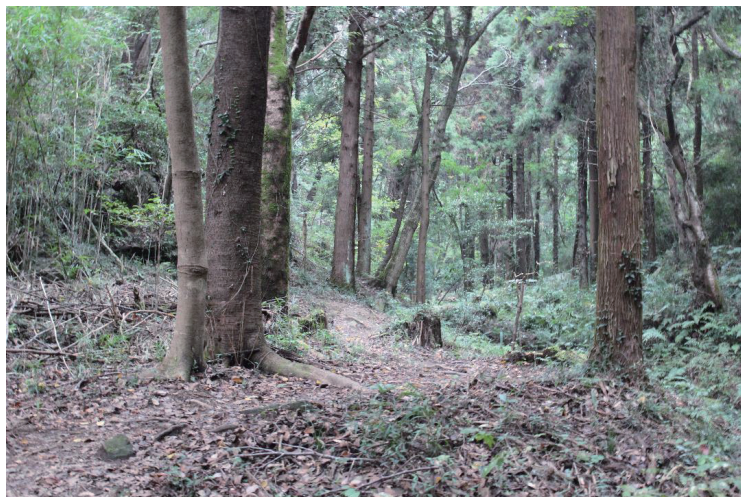


Fig. 4.21 Experiment environment.

4.5 まとめ

本章では、まず利用する LOAM の手法について、その概要を説明した。次に、本装置をバックパックに取り付けて使用した際に生じる装置の姿勢変化を、IMU により十分に補正できるか実験



Fig. 4.22 Experiment environment.

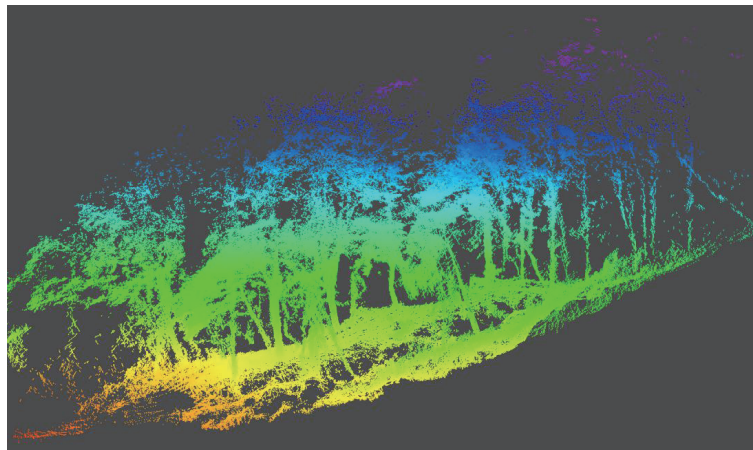


Fig. 4.23 3D map of forest slope.

を行った．その結果，実際の森林計測において想定される装置の姿勢変化に対して，十分な補正が可能であることを確認できた．次に，IMU による姿勢補正を行いながら，LOAM による 3 次元地図生成が行えるかを確認するための予備実験を行った．その結果，屋内環境と街路樹のある屋外環境において周囲の環境と整合性のとれた 3 次元地図を生成できることを確認できた．最後に，実際の平地林や傾斜林などの森林環境において 3 次元地図生成実験を行ったところ，周囲の環境形状を復元でき，樹幹の点群も円柱状を形成していることを確認した．以上の地図生成実験の結果より，もともと屋内環境での使用を想定した手法である LOAM が森林環境においても適用可能であり，生成した地図は森林計測においても利用可能であることを確認できた．

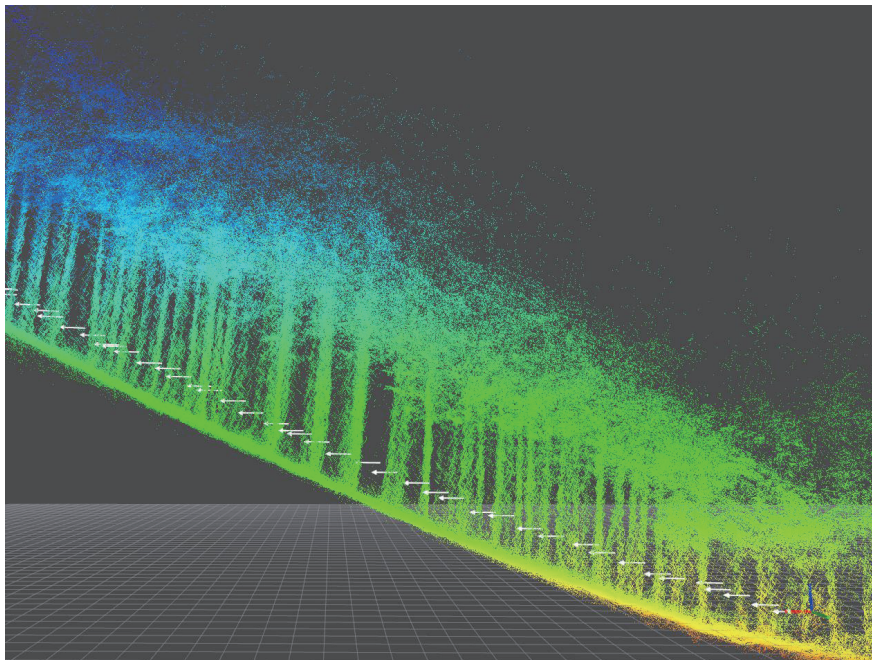


Fig. 4.24 3D map of forest slope.

第 5 章 平地林における立木計測

本章では、平地林において生成した 3 次元森林地図を用いて、胸高直径と立木位置を推定する手法について説明する。まず、3 次元森林地図より胸高付近の点群を抽出し、その中から円柱フィッティングにより円柱状の点群を検出して樹幹の胸高点群とする。円柱フィッティングによりあてはめた、最もあてはめの良い円柱をモデル円柱と呼ぶことにする。円柱フィッティングは、斜めに生えている立木にも適用することができる。OWL などの従来手法は、直立の針葉樹林には対応していたが、斜めに生える広葉樹林には対応できていなかったため、円柱フィッティングは本手法の大きな利点であるといえる。当初、この時のモデル円柱の直径を胸高直径としていたが、LOAM による重ね合わせ誤差の影響により胸高直径の誤差が大きくなることがわかった。そこで、LOAM によるマッチングを行う前の胸高点群をモデル円柱の中心軸方向に射影し、1 スキャンごとに円柱フィッティングを行うことでその直径と中心点を算出し、それを複数スキャンでの平均をとることで胸高直径と立木位置とした。Fig. 5.1 に提案手法のフローチャートを示す。

実験では、平地林内に定めた矩形領域において、3 通りの経路を定めて計測を行い、各経路における計測結果の評価を行った。計測は各経路において 10 回ずつ実施し、その平均値をもって計測値としている。胸高直径に関して、樹幹の周長に対してスキャンのあたった割合を指標とし、評価の参考としている。また、立木の断面は真円ではないことを考慮して、立木の最大径と最小径を輪尺を用いて測定し、評価を行っている。立木位置については、立木間距離を評価することにした。作業量についても考察を行い、従来の人手による計測と比較した。

5.1 胸高直径および立木位置の推定手法

5.1.1 モデル円柱のパラメータを利用した推定

第 4 章で紹介した手法によって得られた 3 次元地図を用いて、各立木の胸高直径の推定値を得る。まず、計測開始地点の高さを基準として高さ 1.0~2.0 m の点群をすべて抜き出す。この点群は円柱状の立木の樹幹の胸高付近や下層植生の一部を含む。したがって、この中から立木の

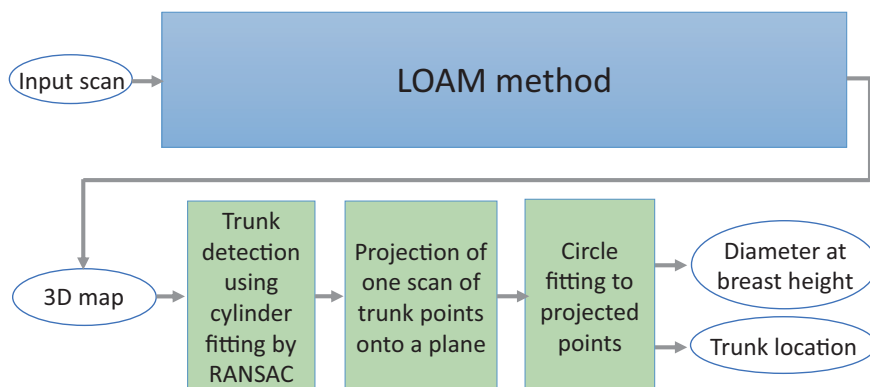


Fig. 5.1 Flowchart of 3D forest measurements.

樹幹点群をそれぞれ独立に抽出してラベル付けをし、さらにそれらを表すパラメータを抽出する必要がある。ここで、抜き出した点群に対して PCL (PointCloudLibrary) [40] 上の実装である SACSegmentationFromNormals() を用いて RANSAC による円柱検出を行い、複数の立木のそれぞれに対応する円柱状の点群を抽出する。抽出した n 本の各々の円柱状の点群に対し、対応する立木のラベル k ($k = 1, \dots, n$) が付けられる。また、Fig. 5.2 に示すように、樹幹点群にあてはめたモデル円柱のパラメータとして、中心軸に平行な単位方向ベクトル $\mathbf{u}_k = (u_{x_k}, u_{y_k}, u_{z_k})$ 、中心軸上のある 1 点 $\mathbf{b}_k = (b_{x_k}, b_{y_k}, b_{z_k})$ 、半径 r_k が得られる。そこで、 \mathbf{u}_k に平行で \mathbf{b}_k を通る直線を立木 k の「仮の」中心軸 l_k とする。

この時、モデル円柱の半径 r_k も求まっているので $2r_k$ を胸高直径とすることも考えられる。しかし、予備実験の結果、LOAM によって推定される計測装置の移動量の誤差の影響を受けて、3次元点群の各立木毎の重なりにはばらつきが生じ、モデル円柱の直径をそのまま胸高直径の推定値として用いると、誤差が大きくなることがわかった。例えば Fig. 5.3 は、ある樹幹の 3次元点群を仮の中心軸を法線とする平面に射影したものである。さまざまな方向からの樹幹に対するスキャンがこの平面に射影されているが、10 cm 程度の広がりがあることがわかる。

5.1.2 1 スキャンへの円フィッティングによる推定

そこで、次のような工夫を行った。

- 1) 5.1.1 節で求めた立木の仮の中心軸 l_k を法線とし、 l_k 上で胸高に相当する地面から 1.2 m の高さの点を通る平面 L_k に 1 スキャンを射影し (Fig. 5.2), その点群へ最小二乗法により円をあてはめる。
- 2) ひとつの立木 k にかかわる 1 スキャンごとに最小二乗法により円をあてはめて、その直径を求める。ただし、1 スキャンのうち点群が 30 個以上のものに対してのみこれを行う。以降、点群数がこの条件を満たすスキャンを有効スキャンと呼ぶ。これにより、重ねあわせた点群の広がりによる誤差の影響を排除する。Fig. 5.4 に、平面 L_k 上への 1 スキャンの射影とあてはめた円の例を示す。
- 3) 立木 k に関係する前項 1) で求めた直径の平均をとり、これを胸高直径 R_k とする。複数スキャンの平均をとることで、より小さい誤差で直径が求まることを期待する。

上記において示したように、平面 L_k 上に 1 スキャンの点群を射影し最小二乗法により円をあてはめたが、直径と同時にその円の中心座標も平面 L_k 上で求まる。Fig. 5.5 に示すように、同一立木 k に当たった各スキャンから求めた中心座標の平均を、立木の平面 L_k 上での中心点 \mathbf{c}_{l_k} とする。この中心点 \mathbf{c}_{l_k} を通り、円柱検出により得られた仮の中心軸 l_k に平行な直線をあらためて立木 k の中心軸 l'_k とする。 l'_k 上の地面から 1.2 m の高さにある点を、立木 k の位置 $\mathbf{p}_k = (p_{x_k}, p_{y_k})$ とする。また、立木 j と k の立木間距離 d_{jk} を $d_{jk} = \|\mathbf{p}_j - \mathbf{p}_k\|$ とする。

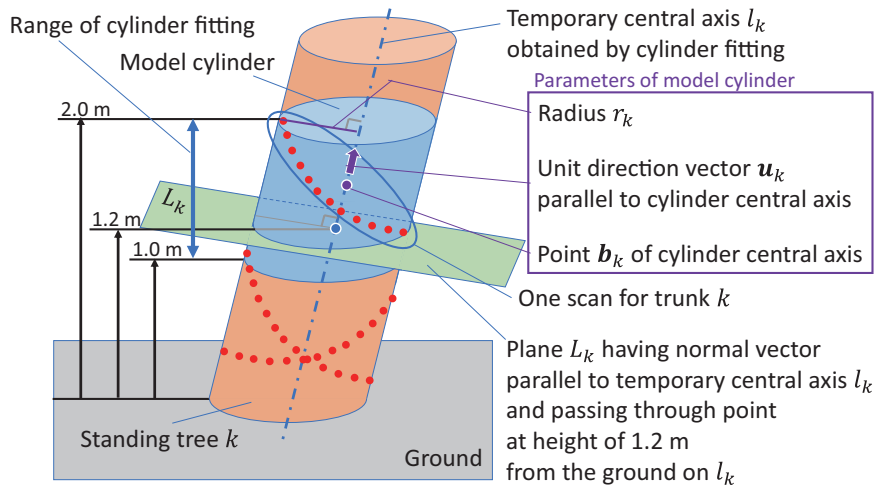


Fig. 5.2 Central axis obtained by cylinder fitting and plane to project trunk points.

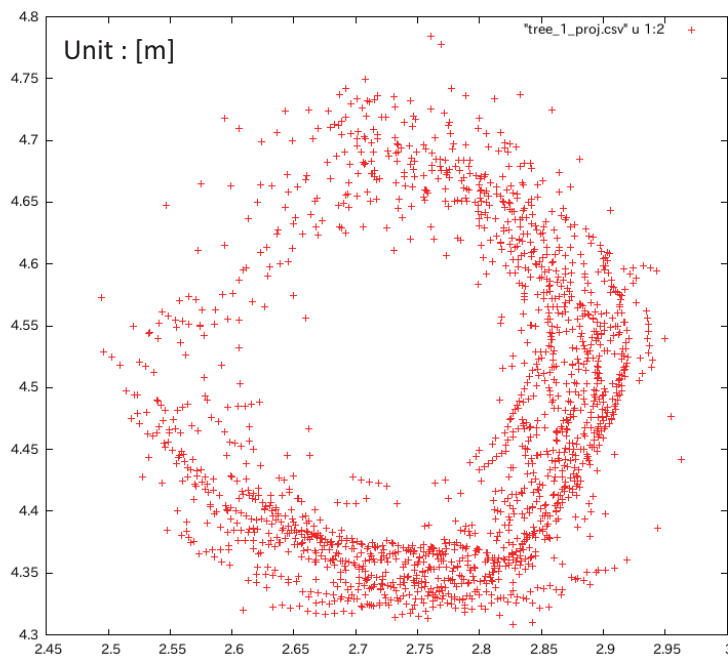


Fig. 5.3 An example of projection of trunk points onto a plane.

5.2 評価方法

森林計測実験を、Fig. 4.19 に示す茨城県つくば市柴崎にある平地林において行った。計測対象としたのは、Fig. 5.6 左の平面図に示す、長さ 30 m、幅 10 m の範囲にある 14 本のヒノキの立木である。計測範囲の設定は、林業の分野でよく行われる帯状サンプリング法 [41] を想定している。帯状サンプリングとは、例えば傾斜林の場合、尾根から谷に長さ 30 m、幅 10 m の帯状のサンプル場所を選び、そのサンプル場所の立木について、樹種、直径、樹冠長、樹高を記録したり、立木位置を図にしたりすることである。このサンプル場所をその林内の樹木の成長状況を代表する場所を選び、ここで得られるデータをもって森林全体の状態を推定するのが通例である。林内の状況が一様とみなされる人工林などの地域においては、このサンプル場所のみの計測でよいとされており、林内の全域にわたる計測を要請されるものではない。本実験では、平地林のため林内の適当な場所にこの大きさの矩形領域を定めた。

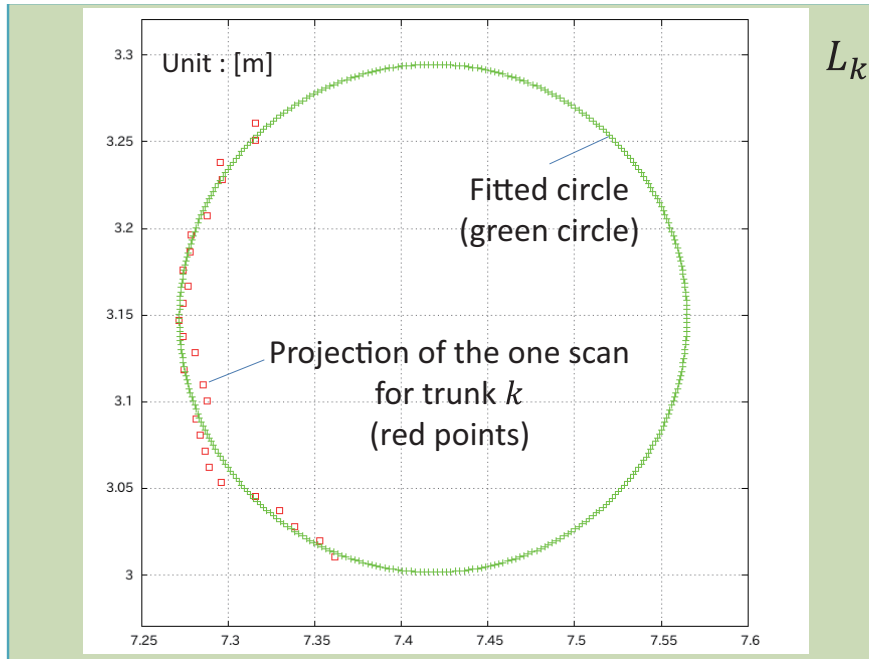


Fig. 5.4 An example of projection of one scan for trunk k onto plane L_k and fitted circle to the points.

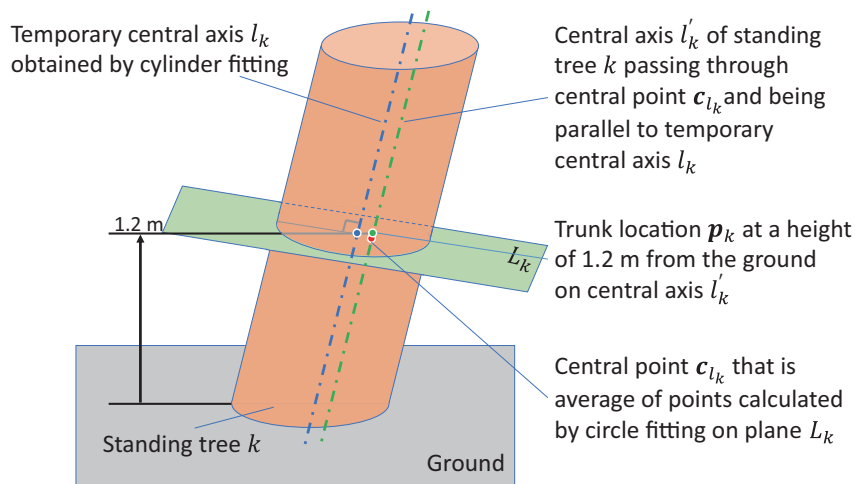


Fig. 5.5 Trunk location calculated by circle fitting to one scan for trunk k .

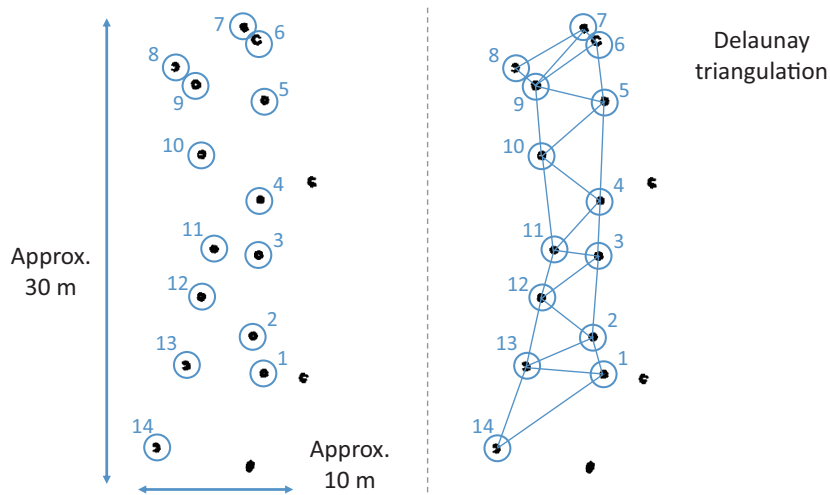


Fig. 5.6 Measurement area and Delaunay triangulation for evaluation of distances between standing trees.



Fig. 5.7 Trunk caliper.

本実験においては、その矩形領域内にある対象立木の胸高直径と立木位置を提案手法によって計測した。胸高直径の真値として、対象立木ごとに根元から高さ 1.2 m の位置での周長を巻き尺で求め、これを円周率 π で除した値を計測した。また、Fig. 5.7 に示す輪尺によって、実際には真円でない立木の最大径と最小径も測定し参考にした。Fig. 5.8 は輪尺を用いた測定の様子である。立木位置について、森林計測の現場では、巻尺による計測を行い立木位置の図を作成している。本研究では、この位置に対応するものは $p_k = (px_k, py_k)$ である。立木位置の正確さをみるひとつの指標として、レーザ距離計に基づく立木間距離による比較を行うこととした。Fig. 5.6 右のように各立木を頂点とするドロネー三角形分割により三角形をつくり、三角形ごとの立木間距離をレーザ距離計 (BOSCH 社製 DLE 150 Laser) と輪尺で測定したその距離方向の直径から推定し、立木間距離の真値とした。これらの真値と提案手法による立木間距離の計測値との間で比較を行った。

また、対象の矩形領域内の移動経路によって、これらの計測結果に影響が出る可能性を考え、これについても比較を行った。Fig. 5.9 のように立木の間を概ね直進する経路 1、立木を取り囲むように U ターンする経路 2、および立木の間を縫うように歩く経路 3 の 3 通りの経路により、それぞれ 10 回ずつ独立に計測を行った。計測を 10 回行っている理由は、同一経路における計測でも立木と装置の位置関係によって計測結果が異なることがあり、1 回の計測では不十分であることが確認されたためである。よって、それぞれの計測データから胸高直径と立木間距離を 10 回分算出して平均を求め、その平均値をもって胸高直径と立木間距離の計測値とした。

5.3 実験結果

Fig. 4.19 の環境において生成した 3 次元森林地図 (Fig. 4.20) の移動経路は経路 1 である。他の経路で計測したデータから生成した地図も、同様のものとなった。なお、計測は、対象の矩形領域の外縁の一点から開始し、その点をその矩形上の位置として記録している。さらに、同時にその開始点でのセンサの正面方向とその外縁の辺方向とのなす角も記録している。それらと、LOAM の機能によって同時に出力される計測装置の移動軌跡 (Fig. 4.20 の白矢印、向きは計測開始時の計測装置の正面方向) を利用して、対象の矩形領域と生成した地図の位置合わせを行っている。



Fig. 5.8 Measuring diameter at breast height by the trunk caliper.

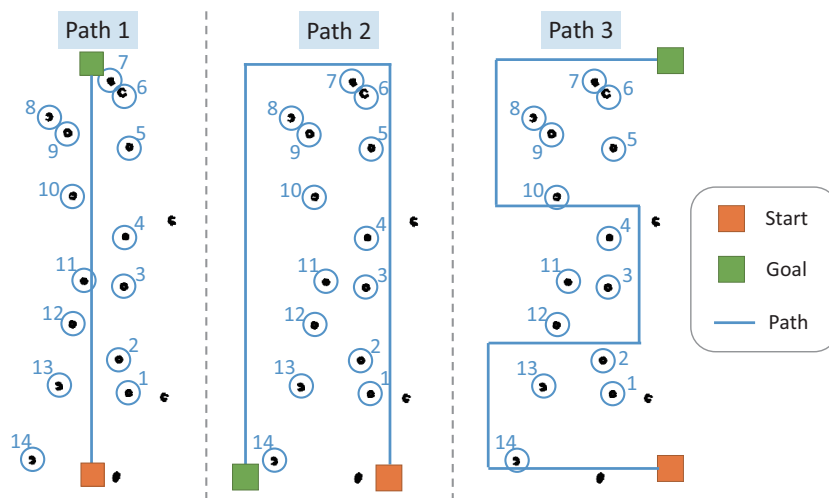


Fig. 5.9 Measurement path 1, 2, and 3.

5.3.1 胸高直径の評価

Table 5.1 に、対象の 14 本の各々について、巻尺で計測した胸高直径（真値）および各移動経路において提案手法により計測した胸高直径の計測値と真値に対する誤差（ただし、経路 3 の立木 5 は 30 点以上のスキャンを取得できたのが 5 回のみだったので、5 回分の平均としている。Table 5.2 と Table 5.3 についても同様。）をまとめた。Fig. 5.10 は、横軸に真値、縦軸に提案手法による計測値をとりグラフにしたものである。林業界では、一般に胸高直径の計測の誤差は 2 cm 以内であることが望ましいとされており、例えば国有林における胸高直径の計測値を関係機関に納める際にも、この範囲内に収めることとされている。各経路においてこれを達成している立木の本数は、対象とした 14 本の立木のうち経路 1 は 9 本、経路 2 は 12 本、経路 3 は 8 本であり、経路 2 が最も多かった。

ここで、得られた胸高直径の計測値を考察する。レーザスキャナのレーザ光の立木へのあたり方は、立木との位置関係による影響を受け、周長の半分近くの点群が得られる場合もあれば、周長の 1 割程度の点群しか得られない場合もある。Fig. 5.11 は、ある経路の移動 1 回分の計測における、計測対象の立木にあたった全ての有効スキャンに関して、周長に対してスキャンのあたった割合（点群を平面に射影した時に、点群がなす弧に対する中心角より算出）を横軸に、その 1

Table 5.1 Means of diameters at breast height, their errors, and means of scan num ratios whose scanned perimeter rates are 0.3 or more in each path.

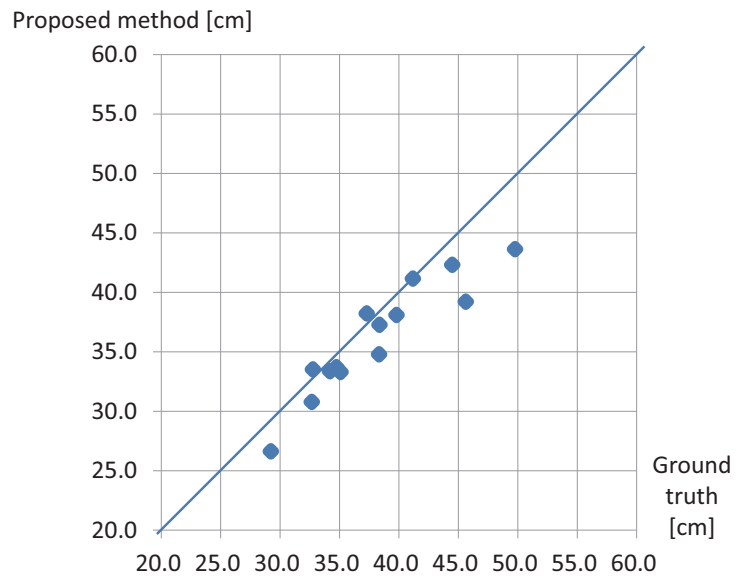
Tree number	Ground truth [cm]	Diameter (Error) [cm] in path 1	Diameter (Error) [cm] in path 2	Diameter (Error) [cm] in path 3	Scan num ratio in path 1	Scan num ratio in path 2	Scan num ratio in path 3
1	32.8	33.5 (0.7)	32.5 (-0.3)	36.3 (3.5)	0.625	0.513	0.668
2	34.7	33.7 (-1.0)	35.0 (0.2)	35.4 (0.6)	0.654	0.715	0.684
3	39.8	38.1 (-1.7)	39.3 (-0.5)	41.0 (1.2)	0.495	0.536	0.593
4	32.7	30.8 (-1.9)	32.0 (-0.6)	32.6 (-0.1)	0.578	0.691	0.643
5	38.3	34.8 (-3.6)	37.6 (-0.7)	39.9 (1.5)	0.637	0.556	1.000
6	49.8	43.6 (-6.2)	48.4 (-1.4)	42.6 (-7.1)	0.433	0.412	0.617
7	29.2	26.6 (-2.6)	28.6 (-0.7)	25.9 (-3.3)	0.713	0.675	0.605
8	35.1	33.3 (-1.8)	32.2 (-2.9)	32.7 (-2.4)	0.664	0.557	0.660
9	45.6	39.2 (-6.4)	43.8 (-1.9)	43.7 (-1.9)	0.578	0.534	0.560
10	44.5	42.3 (-2.2)	40.6 (-3.9)	42.6 (-1.9)	0.572	0.510	0.495
11	34.2	33.4 (-0.8)	33.9 (-0.3)	32.7 (-1.5)	0.656	0.761	0.851
12	38.4	37.3 (-1.1)	37.8 (-0.6)	39.0 (0.6)	0.642	0.662	0.623
13	37.3	38.2 (0.9)	37.7 (0.4)	44.5 (7.2)	0.527	0.490	0.560
14	41.2	41.2 (0.0)	41.9 (0.7)	44.7 (3.6)	0.663	0.546	0.423

スキャンから円フィッティングにより推定された直径の誤差を縦軸にとって、プロットしたものである。これらの図より、周長に対してスキャンのあたった割合が概ね 0.3 以上であれば、直径の誤差は小さくなる傾向にあることがわかる。続いて参考として、経路の移動 1 回分の計測におけるある立木の全有効スキャン数のうち、周長の 0.3 以上にあたったスキャン数の割合を計算し、スキャン率 (Scan num ratio) とした。また Table 5.1 に、経路の移動 10 回分のスキャン率の平均値を示す。Fig. 5.12 は、計測対象の立木に関して、そのスキャン率の 10 回分の平均値を横軸に、胸高直径誤差を縦軸にとって、プロットしたものである。これらの図をみると、このスキャン率が約 0.65 を超えると、胸高直径誤差が ± 4 cm 以内にすべて収まる結果となった。

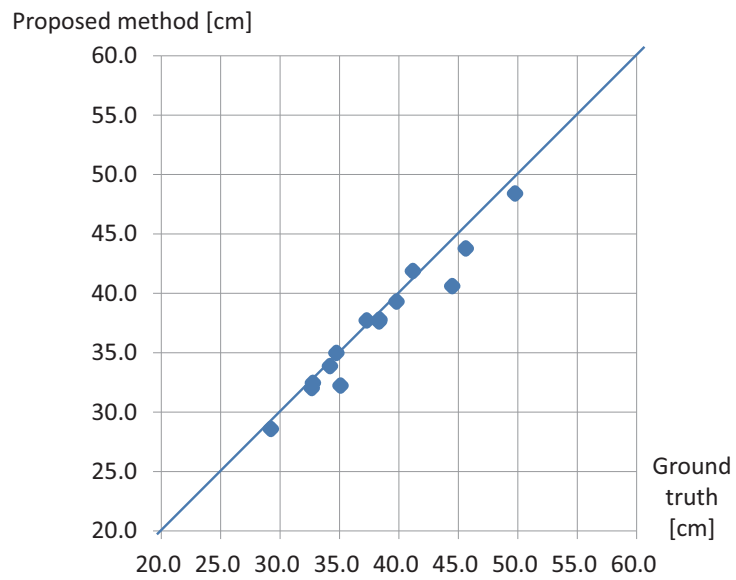
Table 5.2 に、巻尺で計測した胸高直径 (真値)、輪尺で測定した胸高直径の最大径、最小径、その差、および各経路において提案手法により計測した胸高直径の計測値とその標準偏差 1σ をまとめた。立木の断面は真円でないことから、レーザスキャナによるレーザ光のあたり方によっては、ここで真値とした巻尺で計測した平均的な直径よりも、提案手法による計測値が最大径や最小径よりの値を示す可能性がある。ここで、10 回の計測の標準偏差を考慮すると、提案手法による計測が真値とした直径と誤差があったとしても、この計測値の 1σ の範囲に真値のある可能性が高い。本手法により計測された胸高直径の 1σ の範囲が最大径と最小径の区間に重なるかを確認したところ、該当する立木の本数は経路 1 で 13 本、経路 2 で 14 本、経路 3 で 11 本となった。よって、実際の立木の形状を勘案した場合でも、この実験においては経路 2 が最善であると考えられる。

5.3.2 立木間距離の評価

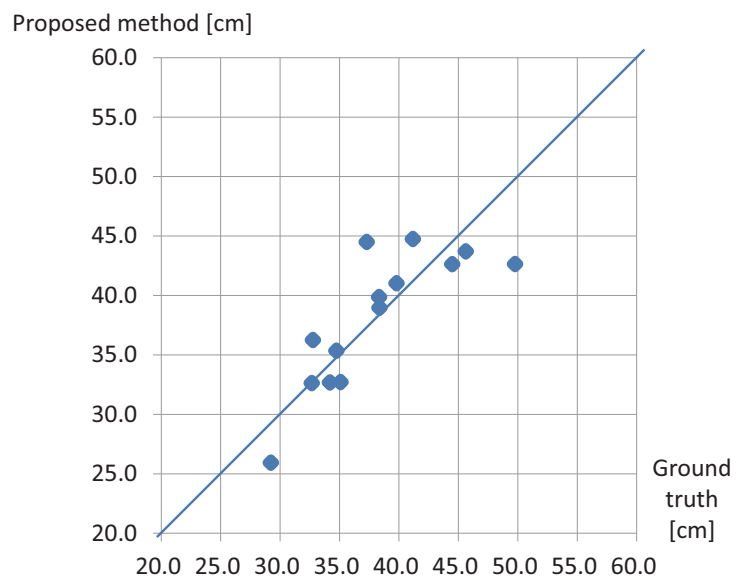
Table 5.3 に、距離を計測した立木の組み合わせ、レーザ距離計と輪尺により計測した距離 (真値)、および各経路において提案手法により計測した立木間距離の計測値と真値に対する誤差をまとめた。Fig. 5.13 は、横軸に真値、縦軸に提案手法による計測値をとりグラフにしたものである。



(a) Path 1

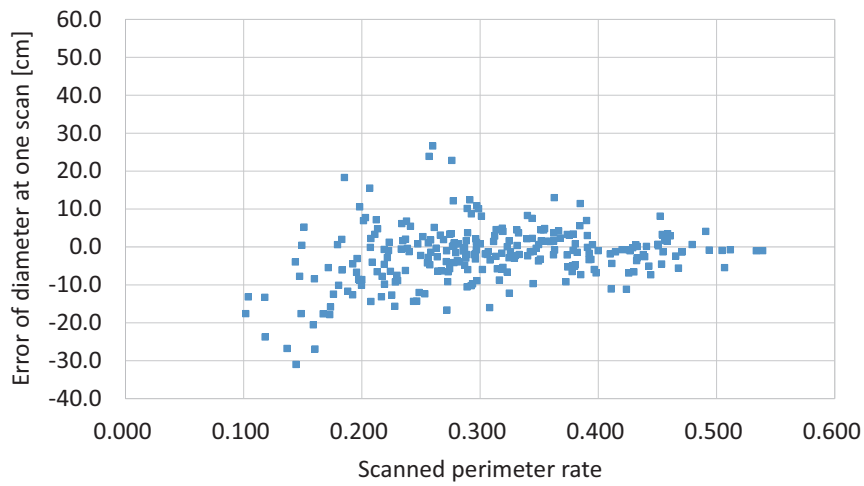


(b) Path 2

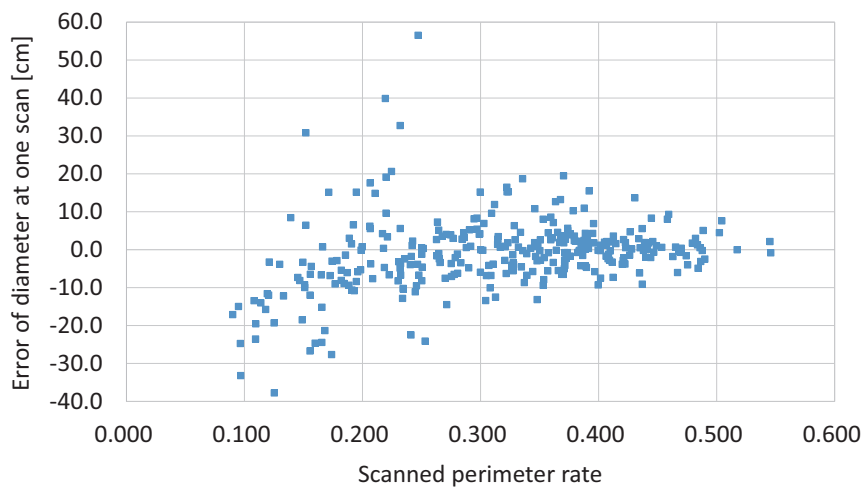


(c) Path 3

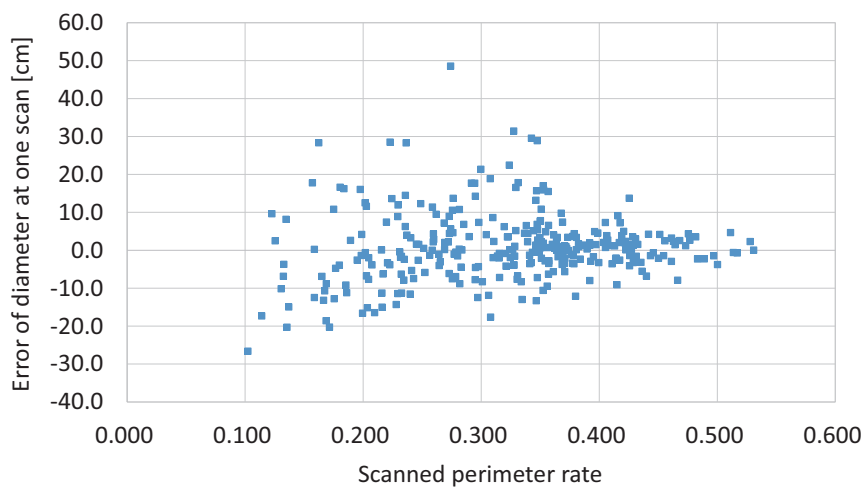
Fig. 5.10 Means of diameters at breast height for ten times measurements.



(a) Path 1



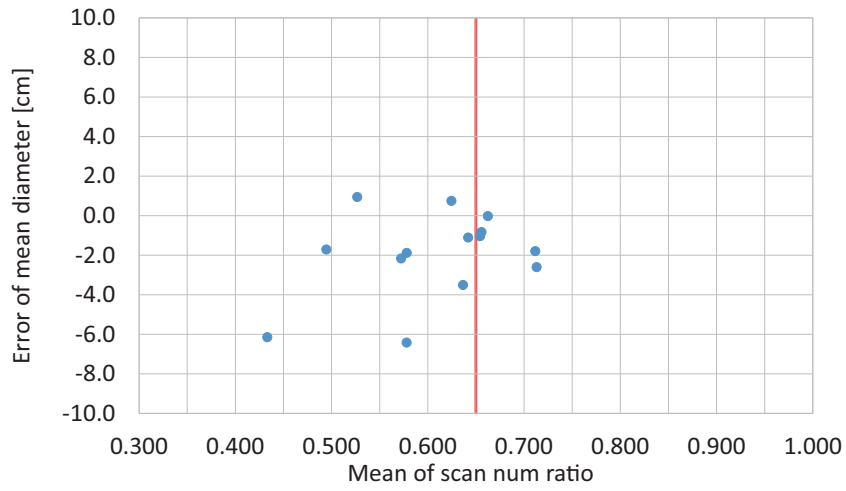
(b) Path 2



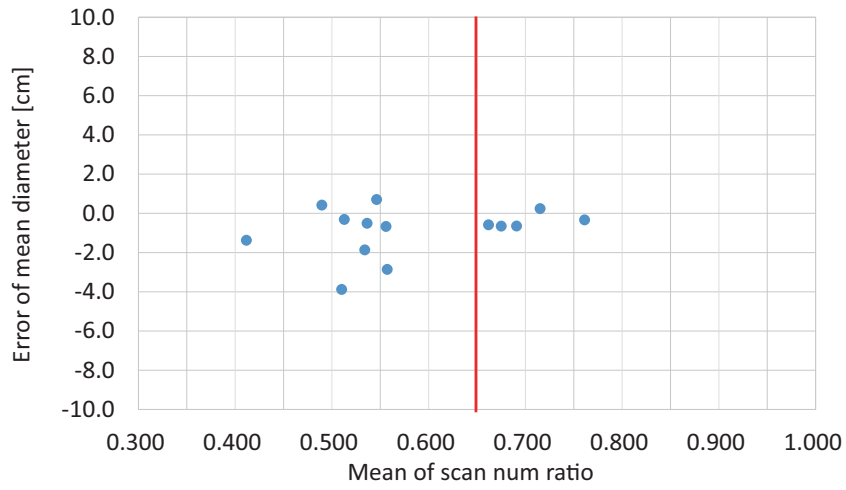
(c) Path 3

Fig. 5.11 Correlation between scanned perimeter rates and errors of diameter at breast height at one scan.

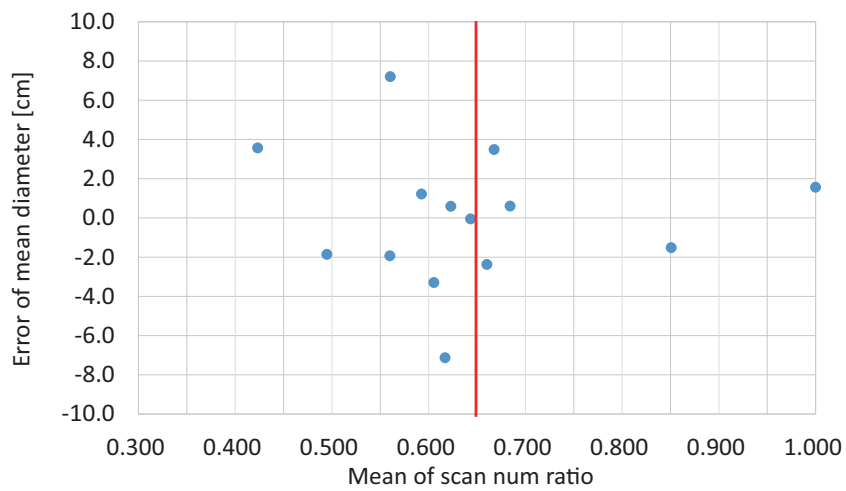
各経路のすべての立木間距離の誤差は 0.1 m を下まわっている．これに対し，各立木間の距離は 1 m 以上あるため，立木位置図を作成した際に，立木の対応付けを誤るほどの誤差ではないと言える．よって，立木位置については実用上十分な計測ができていると考える．



(a) Path 1

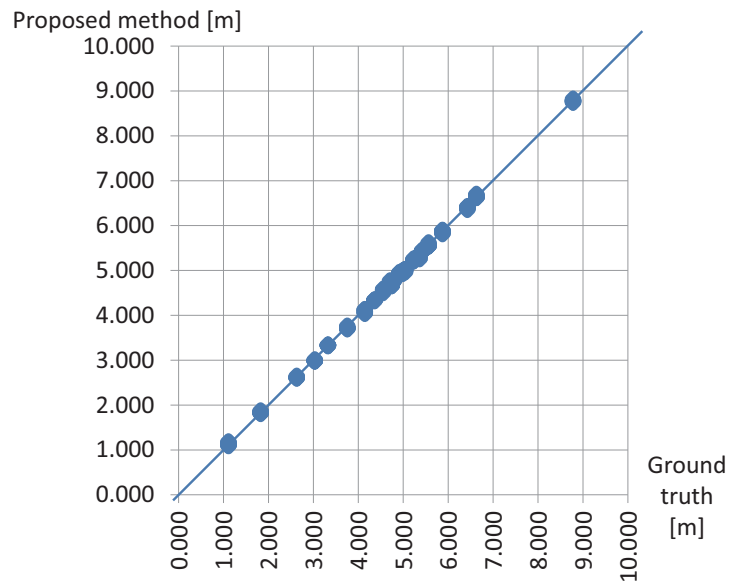


(b) Path 2

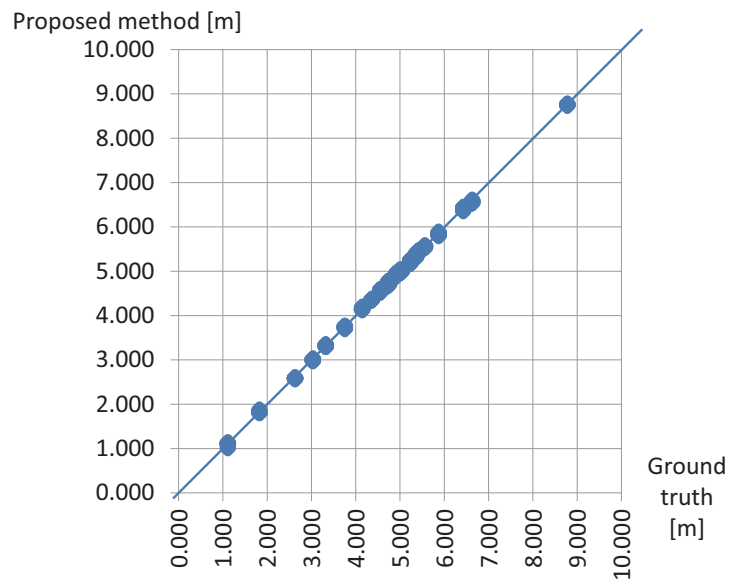


(c) Path 3

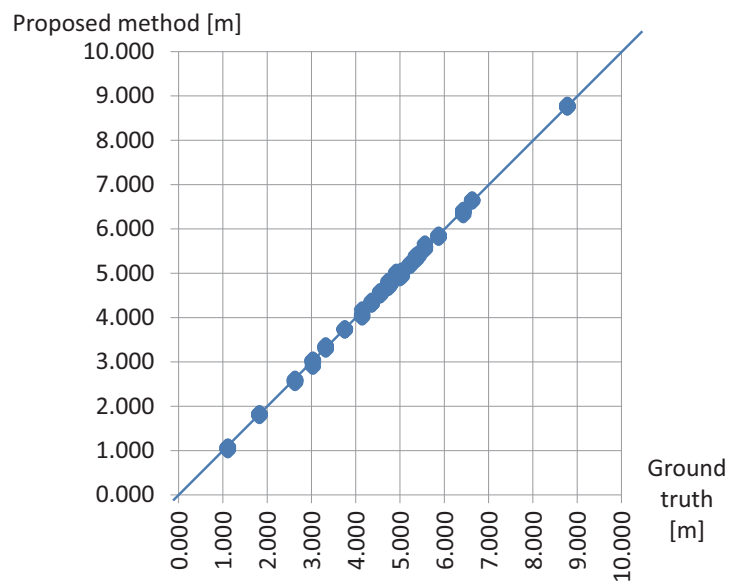
Fig. 5.12 Evaluation of errors of mean diameters at breast height to means of scan num ratios whose scanned perimeter rates are 0.3 or more.



(a) Path 1



(b) Path 2



(c) Path 3

Fig. 5.13 Means of distances between standing trees for ten times measurements.

Table 5.2 Means of diameters at breast height and their standard deviations in each path.

Tree number	Ground truth [cm]	Diameter (1 σ) [cm] in path 1	Diameter (1 σ) [cm] in path 2	Diameter (1 σ) [cm] in path 3	Maximum diameter [cm]	Minimum diameter [cm]	Difference [cm] (max – min)
1	32.8	33.5 (1.6)	32.5 (1.7)	36.3 (4.3)	34.0	30.5	3.5
2	34.7	33.7 (0.7)	35.0 (1.4)	35.4 (0.8)	35.0	33.5	1.5
3	39.8	38.1 (1.9)	39.3 (1.1)	41.0 (1.9)	40.9	37.2	3.7
4	32.7	30.8 (1.0)	32.0 (0.9)	32.6 (0.8)	34.0	31.3	2.7
5	38.3	34.8 (2.0)	37.6 (2.8)	39.9 (3.2)	41.5	34.8	6.7
6	49.8	43.6 (2.5)	48.4 (1.7)	42.6 (4.2)	51.8	48.0	3.8
7	29.2	26.6 (1.4)	28.6 (1.3)	25.9 (3.4)	29.2	27.2	2.0
8	35.1	33.3 (2.6)	32.2 (1.4)	32.7 (1.7)	37.6	32.2	5.4
9	45.6	39.2 (1.6)	43.8 (3.0)	43.7 (1.8)	48.0	40.6	7.4
10	44.5	42.3 (1.5)	40.6 (2.2)	42.6 (2.4)	45.9	42.0	3.9
11	34.2	33.4 (0.8)	33.9 (1.0)	32.7 (3.2)	34.8	33.0	1.8
12	38.4	37.3 (1.8)	37.8 (1.8)	39.0 (1.4)	39.2	35.6	3.6
13	37.3	38.2 (1.9)	37.7 (1.7)	44.5 (2.9)	38.0	35.8	2.2
14	41.2	41.2 (3.3)	41.9 (2.5)	44.7 (1.9)	41.4	37.8	3.6

5.4 考察

経路 2 における胸高直径と立木間距離の計測値は、他の経路における計測値に比べて許容誤差の範囲内におさまるものが多かった。ここで、移動経路の違いが計測結果に影響を与えた要因について考察する。経路 1 は、各立木の半分の面しかスキャンしていないため、真円ではない立木に対する計測結果は偏ったものとなり、特に胸高直径について誤差が増大したものと考えられる。経路 3 は、各立木のほぼ全周のスキャンが得られるが、yaw 方向の旋回が多く点群の重ねあわせの際に並進方向の誤差に加えて yaw 方向の誤差が追加されてしまい、円柱検出に悪影響を与えている可能性がある。その結果、点群を射影する平面の法線方向が実際の立木の中心軸の方向と異なってしまい、胸高直径と立木間距離について誤差の増大を招いたと考えられる。また、経路 3 においては、立木と計測者との距離が 5 m 以上離れた時に有効スキャン数が減少してしまい、誤差の原因となることもあった。これに対し経路 2 は、各立木のほぼ全周のスキャンが得られ、yaw 方向の旋回が少なく誤差の影響が少ないため、より良い計測結果を得ることができたと考えられる。

一方で、経路 2 において許容誤差の範囲外の立木が 2 本存在する。誤差の原因として、立木の形状が影響していることが考えられる。実際に、立木の中には曲率が一定ではなく、平らに近い形状の部分もあれば、曲率の大きい部分もあるというものが多い。前者の場合、この部分で得られた点群に対して円フィッティングを行うと、本来の直径よりも大きい直径が算出されてしまう。後者の場合はその逆である。このように曲率が一定でない立木においては、複数スキャンから算出される直径がバラつき、平均をとったとしても誤差が大きくなる可能性がある。この問題に対して、現状としては、10 回の計測を行いその平均値を計測値とすることでこのような誤差の影響を低減させているが、それでも巻尺により推定した直径の値に対して目標とする誤差範囲内に収まらないものもあるのが現状である。この対応方法としては、例えば 1 スキャンの曲率を求めることによって、そのスキャンを胸高直径の推定に使用できるかどうかを判断するという改良を行

Table 5.3 Means of distances between standing trees and their errors in each path.

Tree number	Ground truth [m]	Distance (Error) [m] in path 1	Distance (Error) [m] in path 2	Distance (Error) [m] in path 3
1-2	2.631	2.615 (-0.016)	2.586 (-0.045)	2.575 (-0.056)
1-13	5.233	5.231 (-0.002)	5.205 (-0.028)	5.204 (-0.029)
1-14	8.781	8.777 (-0.003)	8.756 (-0.025)	8.765 (-0.015)
2-3	5.422	5.429 (0.007)	5.438 (0.016)	5.416 (-0.006)
2-12	4.364	4.335 (-0.028)	4.355 (-0.009)	4.325 (-0.039)
2-13	4.918	4.928 (0.010)	4.927 (0.010)	4.977 (0.060)
3-4	3.757	3.720 (-0.037)	3.740 (-0.017)	3.735 (-0.022)
3-11	3.035	2.988 (-0.047)	3.001 (-0.034)	3.004 (-0.030)
3-12	4.782	4.759 (-0.022)	4.770 (-0.011)	4.760 (-0.021)
4-5	6.631	6.652 (0.021)	6.569 (-0.062)	6.644 (0.013)
4-10	4.989	4.962 (-0.027)	4.973 (-0.016)	4.957 (-0.032)
4-11	4.554	4.544 (-0.010)	4.551 (-0.003)	4.537 (-0.017)
5-6	4.148	4.089 (-0.059)	4.149 (0.001)	4.073 (-0.075)
5-9	4.748	4.680 (-0.068)	4.723 (-0.025)	4.710 (-0.038)
5-10	5.567	5.561 (-0.006)	5.556 (-0.011)	5.596 (0.029)
6-7	1.113	1.132 (0.019)	1.101 (-0.012)	1.052 (-0.061)
6-9	5.043	5.003 (-0.040)	5.014 (-0.029)	4.999 (-0.044)
7-8	5.365	5.320 (-0.045)	5.351 (-0.014)	5.346 (-0.019)
7-9	5.006	4.983 (-0.023)	4.997 (-0.009)	4.963 (-0.043)
8-9	1.827	1.835 (0.008)	1.823 (-0.003)	1.815 (-0.011)
9-10	4.708	4.699 (-0.009)	4.688 (-0.020)	4.682 (-0.026)
10-11	6.429	6.395 (-0.034)	6.402 (-0.027)	6.380 (-0.049)
11-12	3.326	3.330 (0.004)	3.320 (-0.006)	3.332 (0.006)
12-13	4.743	4.728 (-0.015)	4.757 (0.015)	4.776 (0.034)
13-14	5.875	5.864 (-0.010)	5.835 (-0.039)	5.835 (-0.040)

うことが考えられる。

作業量に関して、提案手法（経路2）では30 m × 10 mの範囲の矩形領域を1人で約30分（計測10回分）で計測することができた。従来の人手による計測では、同じ範囲（他地点）を計測するのに3人で約1時間かかっていた。よって、他地点における従来の手動計測と比べても、提案手法による計測は作業量を短縮できているといえる。また、1回の計測で十分な結果が得られるようになれば、1人で約3分の作業量となる。作業量の更なる短縮のためには、提案手法または地図生成手法の改良が必要であり、今後の課題である。

5.5 まとめ

本章では、平地林において生成した3次元森林地図を用いて、胸高直径と立木位置を推定する手法について説明した。本手法においては、LOAMによる重ね合わせ誤差の影響を排除するため、LOAMによるマッチングを行う前の胸高点群をモデル円柱の中心軸方向に射影し、1スキャンごとに円フィッティングを行うことでその直径と中心点を算出し、それを複数スキャンでの平均をとることで胸高直径と立木位置とした。矩形領域を定めて、3種類の各移動経路において胸高直径と立木間距離を10回ずつ計測した平均値を計測値として比較したところ、立木を取り囲むようにUターンする経路2において、林業の現場において許容できるとされる胸高直径の誤差2cm以下を達成した立木の本数が最も多く、14本中12本(約85%)であった。また、各胸高直径の 1σ の範囲と輪尺で測定した最大径と最小径の区間が重なったのは、14本中14本であった。提案手法による胸高直径の計測に関しては、本論文での比較において経路2のとり方が最善であると言える。立木間距離に関しては、3つの経路における全ての立木の組み合わせで誤差は0.1m以内であり、実際の立木間距離に比べると十分小さい誤差であるため、立木位置図を作成した際に立木の対応付けを誤るほどの誤差ではないと考える。作業量に関して、提案手法は従来の人手による計測より少ない作業量で同程度の範囲を計測することができた。以上より、提案手法による計測結果はまだ実用の水準には至らないものの、作業量を短縮する見通しができた。

第 6 章 傾斜林における立木計測

本章では、傾斜林において生成した 3 次元森林地図を用いて、胸高直径と立木位置を推定する手法について説明する。傾斜林においても、平地林と同様の手法を適用することが考えられるが、胸高点群を各立木の根元を基準とした高さで抽出しなければならないという特有の問題がある。さらに、立木位置を斜面の最大傾斜方向とそれに直交する座標系で表す必要がある。よって、この問題に対処するために、各立木の根元の基準点を推定する方法と、地面を一枚の平面に近似する方法を考案することにした。

傾斜林には、傾斜自然林と傾斜人工林があるが、当初利用できる傾斜人工林が見当たらなかったため、まずは傾斜自然林を対象とすることにした。考案した手法では、3 次元地図中の全ての点群から樹幹点群の検出を行い、その周辺の最下点を立木の根元の基準点とすることで、胸高点群を抽出して胸高直径を推定した。また、立木の根元の基準点を結びドロネー三角形分割し、各三角形の法線を平均したベクトルを法線にもつ平面を対象地域の近似平面とし、その斜面に沿った座標系で立木位置の推定を行った。Fig. 6.1 に提案手法のフローチャートを示す。この手法により実験を行ったところ、傾斜自然林においては概ね許容誤差の範囲内で推定を行うことができた。

上記の手法を考案した後、利用可能な傾斜人工林を見つけることができたため、次は傾斜人工林を対象とした。傾斜人工林は、傾斜自然林と異なり、斜度が一定であり地面の凹凸や下草も少ないという特徴がある。そこで、3 次元地図中の点群をその法線の向きを特徴として「樹幹」、「地面」および「その他」に正確に判別できるのではないかと考えた。「地面」判別された点群を用いて近似平面を求め、樹幹点群にあてはめたモデル円柱の中心軸との交点を求めて、これを立木の根元の基準点かつ立木位置とした。この立木の根元の基準点を用いて胸高点群を抽出し、平地林における手法を適用して胸高直径を推定した。Fig. 6.2 に点群判別を行う提案手法のフローチャートを示す。また、点群判別の際に用いる各点の法線を、単一サイズの局所領域から求めるか、複数サイズの局所領域から求めるかについても検討した。実験では、傾斜人工林内に定めた矩形領域において 3 通りの経路を定めて計測を行い、各経路における計測結果の評価を行った。また、作業量についても考察を行った。

上記各手法は、それぞれ傾斜自然林と傾斜人工林に適した手法であると考えられる。傾斜自然林は、斜度が不規則で地面の凹凸が多く下草も存在するため、法線による点群判別は行わず、立木周辺の最下点を立木の根元の基準点とするほうが、より正確に基準点を求めることができる。一方、斜度が一定であり地面の凹凸や下草の少ない傾斜人工林においては、法線による点群判別を行ったほうが、より斜面に近似したモデル平面が得られ、そのモデル平面上に求めた基準点からより正確に胸高点群を抽出できると考えられる。

6.1 点群判別を行わない胸高直径と立木位置の推定手法

傾斜自然林の 3 次元地図から、以下の手順により各立木の胸高付近（立木の根元から 1.0～2.0 m の高さ）の点群を抽出し、胸高直径を推定する（Fig. 6.3）。

- 1) 取得した 3 次元地図を高さ 1 m ずつの幅で分割し, そのそれぞれに対し RANSAC による円柱フィッティングで円柱形状の点群を探索する. これには, PCL (PointCloudLibrary) [40] のライブラリを使用する. 抜き出された n 本の立木ごとの点群に対して, 各立木ごとに番号 $k(k = 1, \dots, n)$ をつける.
- 2) 元の 3 次元地図において, 円柱形状の点群が検出された場所から x 方向および y 方向に ± 0.5 m の範囲から, z 座標の最も小さい 10 点を抽出する. これは, 立木の根元の地面の点群のはずである.
- 3) この 10 点の z 座標の平均と標準偏差を求め, 標準偏差内の点のみを用いて再度平均を算出する. これを, 立木の根元の高さ rz_k m とする. 2) の ± 0.5 m の範囲において, 高さ $rz_k + 1.0$ m から $rz_k + 2.0$ m の点群を胸高点群として抽出する.
- 4) この胸高点群に対して, 再度 RANSAC による円柱フィッティングを行い, そのモデル円柱の直径をこの立木の胸高直径とする.

1) において地図を分割しているのは, 分割せずに立木全体に円柱フィッティングを適用するとうまく樹幹を検出できないためである. 1m で分割する理由としては, 円柱フィッティングの際に直径の 2~3 倍の高さで分割するのが最良であるということが経験的に判明したからである. この

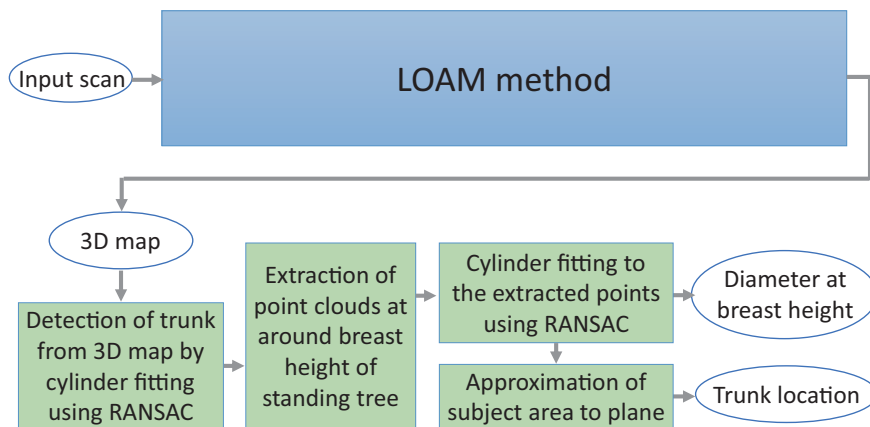


Fig. 6.1 Flowchart of 3D forest measurements.

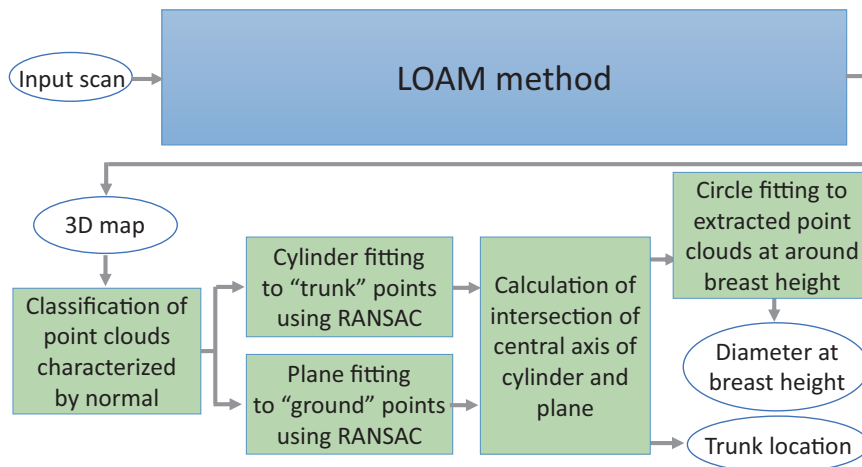


Fig. 6.2 Flowchart of 3D forest measurements.

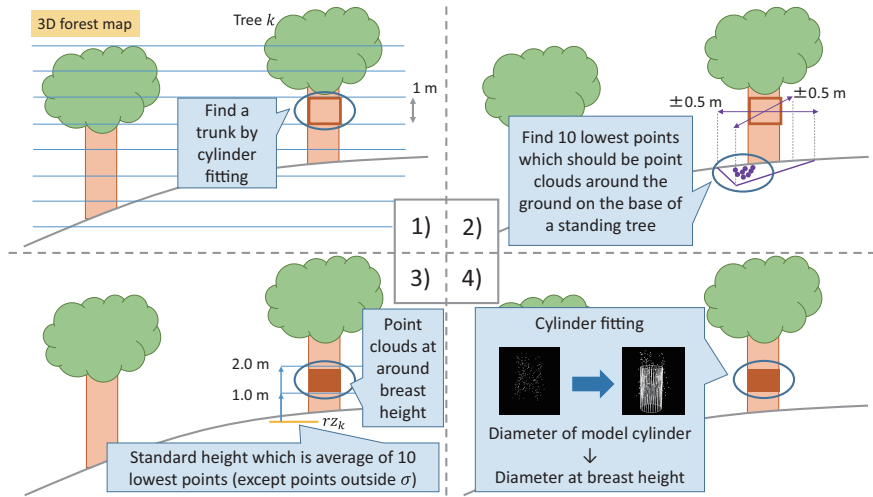


Fig. 6.3 Method of extracting point clouds at around breast height and calculation of DBH.

手法では，1) において異なる高さ範囲で同一の立木を検出するため，同一立木の胸高点群が複数回抽出されるといった問題が生じる．複数回抽出される胸高点群から算出した胸高直径は，値が大きく異なることもあった．これは，立木の傾き等により，地面の点群を抽出する範囲が異なることで，最終的に抽出される胸高点群の範囲も変化するためだと考えられる．胸高直径の値は，1) において胸高より 0.5～1.0 m 高い範囲で抽出された時の胸高点群から算出された場合に最も誤差が小さくなることがわかったので，複数算出された場合はこの条件のものを採用することとする．

実際の林業での傾斜林における立木位置は，最大傾斜方向とそれに直交する方向に座標系を設定し，その座標としている．本研究においても，以下の手順で同様に座標軸を設定して立木位置を求める (Fig. 6.4)．

- 1) 胸高直径の推定の際に，立木 k に対する円柱フィッティングにより求めたモデル円柱の中心軸を l_k とし，これを立木 k の仮の中心軸とする．この中心軸 l_k 上で，高さ r_{zk} の点を立木 k の根元の点 r_k とする．
- 2) 各立木の根元の点 r_k を結び，ドロネー三角形分割する．また，各三角形 t の法線 n_t を算出する．
- 3) 全三角形の法線の平均 n_{ave} を求める．この際，三角形の面積による重み付けをする．この n_{ave} を法線とし，ある立木 k の中心軸 l_k 上の胸高 ($r_{zk} + 1.2$ m) の 1 点を通る平面を，対象地域を 1 枚の斜面に近似したものとみなす．
- 4) 3) で求めた斜面と各立木の中心軸との交点を立木位置とする．地図座標系 Σ_m で表される立木位置 (x, y, z) を平面座標系 $\Sigma_p(x', y', 0)$ に変換する．

ここで，平面座標系 Σ_p は， z 軸の方向が n_{ave} と一致し， y 軸の方向が 3) で算出した近似斜面の最大傾斜方向と一致する座標系であると定義する．すなわち，地図座標系 Σ_m の正規直交基底を (m_1, m_2, m_3) とし，平面座標系 Σ_p の正規直交基底を (p_1, p_2, p_3) とすると， $p_3 = \frac{n_{ave}}{|n_{ave}|}$ であり， $p_1 = \frac{m_3 \times n_{ave}}{|m_3 \times n_{ave}|}$ ， $p_2 = p_3 \times p_1$ となる．

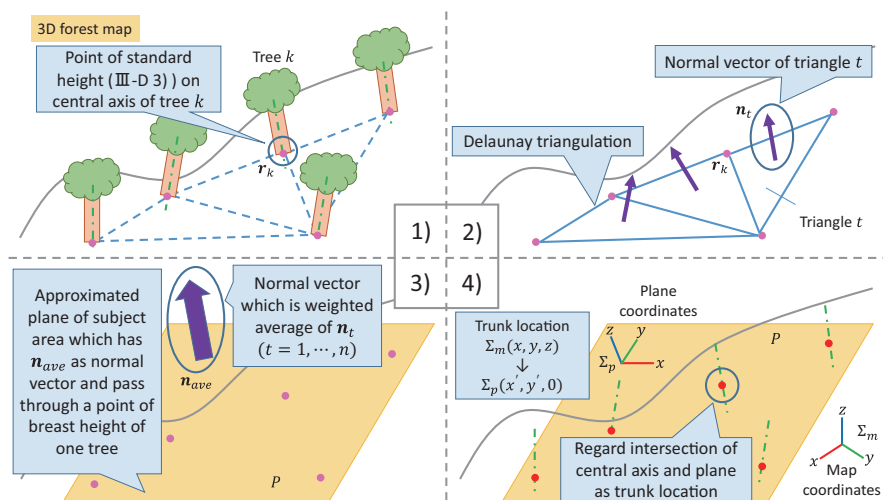


Fig. 6.4 Method used to calculate trunk location.

6.2 傾斜自然林における評価方法

森林計測実験を、Fig. 4.21 に示す茨城県つくば市小田にある傾斜自然林において行った。計測対象としたのは、Fig. 6.5 の平面図に示す7本の立木である。図中の立木点群は高さにより色分けされている（以下同様）。計測経路は概ね直進する登山道を利用し、これら7本の立木は経路沿いにある。

本実験においては、その矩形領域内にある対象立木の胸高直径と立木位置を提案手法によって1回のみ計測した。胸高直径の真値は、平地林の時と同様に巻き尺を用いて計測した。立木位置については、立木間距離による評価を行う。立木間距離の真値については、4番の立木とその他の立木との胸高における立木間距離をレーザ距離計（BOSCH社製DLE 150 Laser）と巻き尺で計測した直径から推定した。これらの真値と提案手法による計測値との間で比較を行った。

6.3 傾斜自然林における実験結果

6.3.1 胸高直径の評価

Fig. 6.5 と Fig. 6.6 に抽出した樹幹点群のうち計測対象のものを示す。Fig. 6.5 は対象地域を真上から見たもの（ xy 平面）、Fig. 6.6 は対象地域を真横から見たもの（ yz 平面）である。各立木の根元の高さを基準として、胸高の点群を抽出できていることが確認できた。

Table 6.1 に、巻尺で計測した胸高直径（真値）、提案手法により計測した胸高直径の計測値および真値に対する誤差をまとめた。林業の現場の要求から胸高直径の許容誤差は2.0 cm以下であるが、7本中6本の立木において許容誤差の範囲内である。

6.3.2 立木間距離の評価

Fig. 6.7 は、計測対象地域をドロネー三角形分割した結果である（ xy 平面）。また、Fig. 6.8 における緑枠の平面は、計測対象地域を1枚の斜面に近似したものである（ yz 平面）。

Table 6.2 に、算出した立木位置を平面座標系 Σ_p で表したものを示す。また、この立木位置の正確さを評価するため、立木間距離による比較を行った。Table 6.3 に、レーザ距離計と巻き尺で計

Table 6.1 Diameter of breast height calculated by cylinder fitting and measured by manual.

Tree number	Ground truth [cm]	Proposed method [cm]	Error [cm]
1	38.9	42.2	3.3
2	27.0	26.5	-0.5
3	36.1	37.0	0.9
4	49.1	50.5	1.3
5	38.0	37.4	-0.6
6	25.0	26.8	1.8
7	49.9	49.2	-0.7

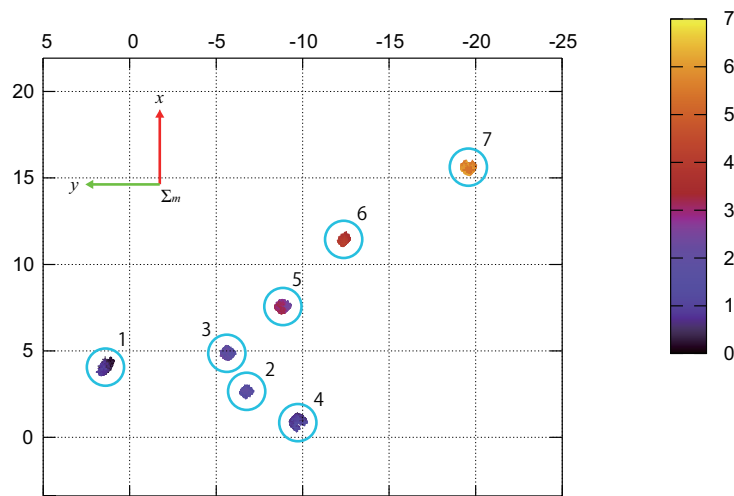


Fig. 6.5 Extracted point cloud of breast height (vertical axis is x, horizontal axis is y).

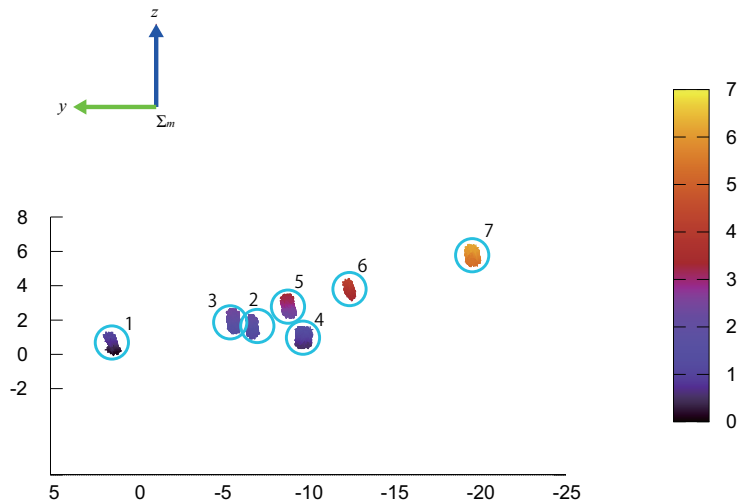


Fig. 6.6 Extracted point cloud of breast height (vertical axis is z, horizontal axis is y).

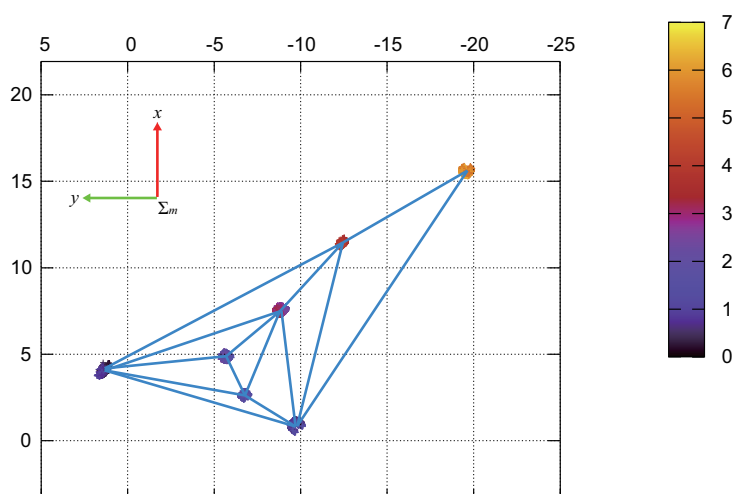
測した立木間距離（真値），提案手法により計測した立木間距離の計測値および真値に対する誤差をまとめた．誤差は 0.4 m を下まわっており，これに対し各立木間の距離は 2 m 以上あるため，立木位置図を作成した際に，立木の対応付けを誤るほどの誤差ではないと言える．よって，立木位置については実用上十分な計測ができていると考える．

Table 6.2 Trunk location indicated with coordinates of plane coordinates system.

Tree number	x coordinate [m]	y coordinate [m]
1	-3.225	2.855
2	4.545	5.838
3	2.528	7.297
4	8.080	5.675
5	3.991	11.339
6	5.106	16.545
7	9.306	24.008

Table 6.3 Distance between a tree and a tree calculated by proposed method and measured by manual.

Tree number	Ground truth [m]	Proposed method [m]	Error [m]
1-4	11.780	11.652	-0.128
2-4	3.511	3.539	0.028
3-4	5.806	5.784	-0.022
5-4	7.036	6.986	-0.049
6-4	11.411	11.269	-0.141
7-4	18.695	18.373	-0.322

**Fig. 6.7** Delaunay triangulation of measurement area (vertical axis is x, horizontal axis is y).

6.4 法線による点群判別に基づく胸高直径と立木位置の推定手法

傾斜人工林の3次元森林地図の各点における法線を推定し、その向きを特徴とすることで点群を「樹幹」、「地面」および「その他」に判別し、「地面」と判別された点群の高さに基づいて胸高点群を抽出して胸高直径を推定する手法を提案する。

従来研究において、3次元点群をボクセルに分割して、そのボクセル内に分布する点群の重心と

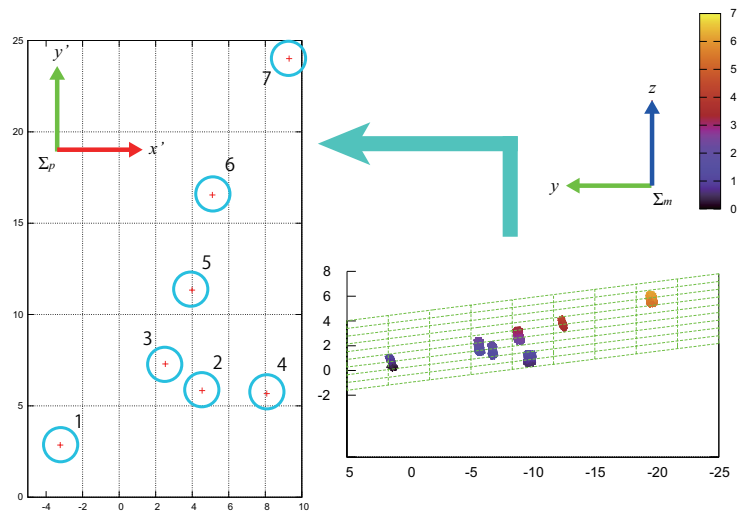


Fig. 6.8 Approximate plane of measurement area (vertical axis is z , horizontal axis is y).

各点までの距離から共分散行列を算出し，その共分散行列から得られた 3 つの固有値を特徴量として点群を分類する例がある [42, 43]．文献 [42] では，自然環境で得られた樹木や地面などの点群を Fig. 6.9 上段のように「平面」，「円筒」および「四散」の形状に分類している．文献 [43] では，人工物の多い都市環境で得られた点群を文献 [42] の考え方を利用して形状で分類し，さらに「建物」，「車」，「樹木」および「地面」などの物体に分類する手法を提案している．本稿においては，3 つの固有値のうち最小固有値に一致する固有ベクトルを法線とし，この法線の向きにより森林環境で取得した点群を分類する．

また，文献 [44] では，空間を分割するボクセルのサイズを複数用意し，そのそれぞれのボクセルで固有値を算出し，その組み合わせによってより多くのカテゴリへの分類を行っている．本稿においても，複数サイズの局所領域において法線を推定し，それらの特徴量としてクラスタリングを行うことで，点群の分類を試みる．

提案する手法においては，3 次元森林地図中の各点における法線を推定し，その法線の向きによって点群を「樹幹」，「地面」および「その他」に判別する．点群の判別結果に基づいて各立木の根元の基準点を求め，胸高点群を抽出し，胸高直径と立木位置を推定する．本稿では，単一サイズの局所領域から推定した法線を用いた場合と，複数サイズの局所領域から推定した法線を組み合わせて用いた場合とで，どちらがより適切か検討する．

6.4.1 単一サイズの局所領域による法線推定と点群判別

3 次元森林地図中の各点における法線推定には，PCL (PointCloudLibrary) [40] のライブラリを使用する．その詳細は以下の通りである．

- 1) ある注目点の k 近傍点について，重心と各点の距離を要素とする共分散行列を求める．
- 2) この共分散行列の 3 つの固有値を求め，その最小固有値に一致する固有ベクトルを法線とする．

1) のある注目点の k 近傍点は，半径または点数により指定できる．本稿では，半径により指定する．

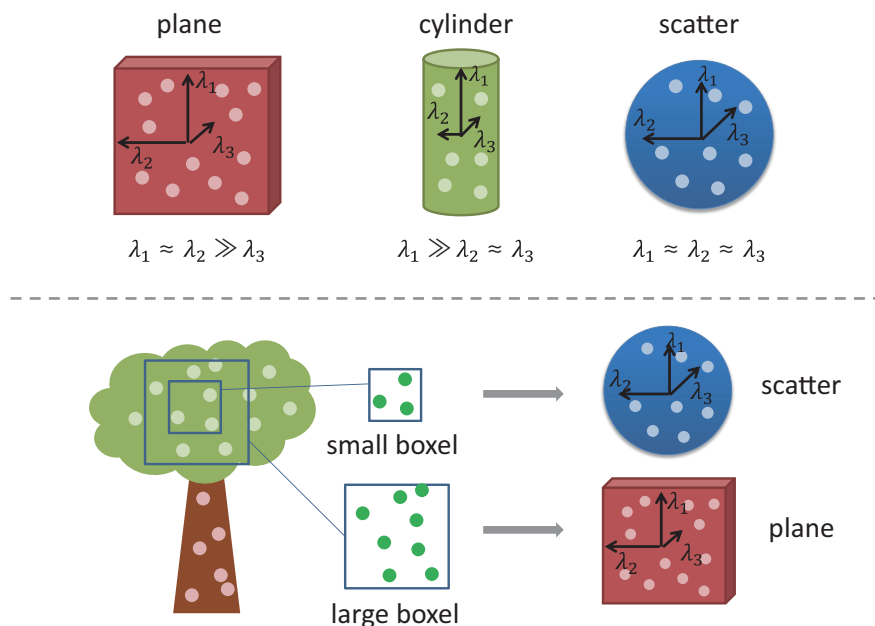


Fig. 6.9 Classification based on eigenvalues obtained from covariance matrix.

推定した法線は単位ベクトルである．ここで，鉛直方向の単位ベクトル $(0, 0, 1)$ とある点 k の法線ベクトルの内積の絶対値を求め，これを $|n_{kz}|$ とする． $|n_{kz}|$ のとりうる値は $0 \leq |n_{kz}| \leq 1$ であるが，1 に近いほど点 k の法線は鉛直に近く，0 に近いほど水平に近い．そこで， $|n_{kz}|$ が 0.8 以上の点を「地面」， $|n_{kz}|$ が 0.3 以下の点を「樹幹」，それ以外のものを「その他」と判別することにした．この判別基準は，予備実験により経験的に定めたものである．

6.4.2 複数サイズの局所領域による法線推定と点群判別

前節においては，単一サイズの局所領域で法線を推定していた．それに対して，各点において複数サイズの局所領域で法線を推定し，その各法線について $|n_{kz}|$ を求めて，Fig. 6.10 のようにそれらを組み合わせた $F_k = (|n_{kz}|_1, |n_{kz}|_2, |n_{kz}|_3)$ を特徴量として全点群に対しクラスタリングを行う．(Fig. 6.10 の上の図は，視覚的にわかりやすいように 2 次元の図としているが，実際は 3 次元の局所領域である．) これは，文献 [44] において，Fig. 6.9 の下段のように，茂みなどの点群は小ボクセルの領域では「四散」形状に見えるが，大ボクセルの領域では「平面」形状に見えるため，複数サイズの局所領域における固有値算出を調べることで，ボクセルの大小によらず「平面」形状である壁面，路面の点群や「四散」形状である木の葉の点群と区別できるという考え方にヒントを得たものである．

本研究で対象としている森林環境において，枝葉の点群は「地面」や「樹幹」と誤判別される場合があり，加えて小さい局所領域では法線方向が安定しないために，小さい局所領域と大きい局所領域で異なる判別結果となることがある．一方で，地面と樹幹の点群は，小さい局所領域と大きい局所領域でともに法線方向が安定しており，同じ判別結果になる可能性が高い．よって，複数サイズの局所領域で推定した法線の特徴量としたクラスタリングを行えば，単一サイズの局所領域による法線推定では枝葉の点群が誤判別されるところを，正確に「その他」の点群として判別できるのではないかと期待する．また，クラスタリングを行う意義としては，閾値を定めた

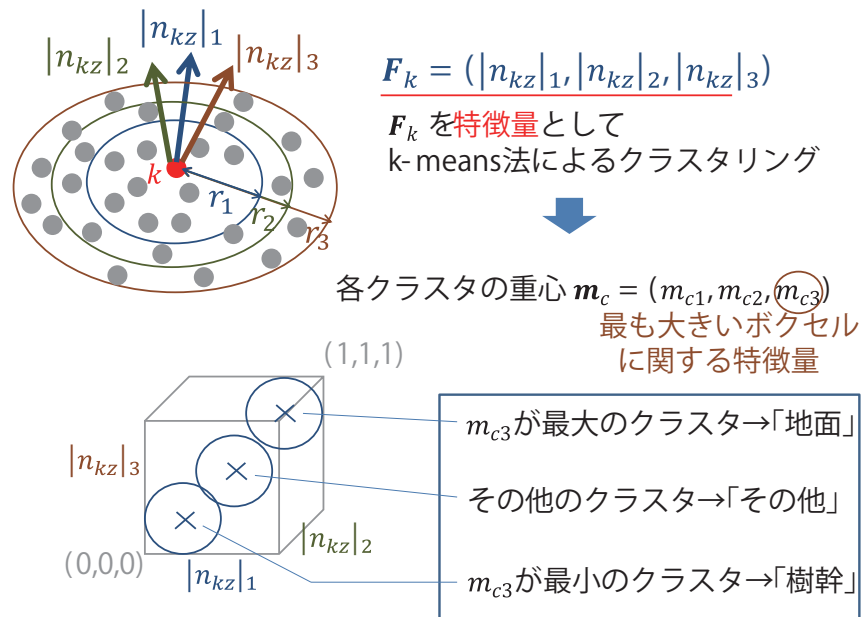


Fig. 6.10 Classification of point clouds by clustering with feature as normal.

点群判別よりも地面の傾斜や樹幹の傾きに対してロバストであり，汎用性のある判別ができるという点が挙げられる．

クラスタリングには，k-means 法を用いる．これは，非階層型クラスタリングのアルゴリズムであり，クラスタの平均を用いて，設定したクラスタ数 (k 個) に分類する．本稿では， $k = 4$ としてクラスタリングを行う．これについても，PCL [40] のライブラリを使用した．クラスタリングを行うと，Fig. 6.10 に示すように，各クラスタ c のクラスタ平均 m_c が得られる．本稿においては，3 つのサイズの局所領域で法線を推定するので，3 次元の特徴量によるクラスタリングとなる．よって，得られるクラスタ平均も 3 次元となり，これを $m_c = (m_{c1}, m_{c2}, m_{c3})$ とする．ここで各成分は，小さい局所領域の特徴量に関するものから順に m_{c1}, m_{c2}, m_{c3} とする．各クラスタの m_{c3} を比較し， m_{c3} が最も大きいクラスタの点群を「地面」，最も小さいクラスタの点群を「樹幹」，残り 2 つのクラスタの点群を「その他」に判別する．

6.4.3 胸高点群の抽出および胸高直径と立木位置の推定

以下の手順により，胸高点群の抽出および胸高直径と立木位置の推定を行う (Fig. 6.11)．

- 1) 点群判別により「地面」と判別された点群に対して，RANSAC による平面フィッティングを行う (PCL のライブラリ利用 [40])．
- 2) 点群判別により「樹幹」と判別された点群に対して，RANSAC による円柱フィッティングを行う (PCL のライブラリ利用 [40])．
- 3) 2) のモデル円柱の中心軸の傾きが鉛直から 45 deg 以内で，かつモデル円柱の直径が 80 cm 以内の場合，その中心軸と 1) で得られたモデル平面 (最もあてはめの良い平面) との交点 (r_x, r_y, r_z) を求める．これを各立木の根元の基準点とし，かつ立木位置とする．
- 4) 2) の樹幹点群において，各立木の根元を基準として， $(r_z + 1.0)\text{m} \sim (r_z + 2.0)\text{m}$ のものを胸高点群として抽出する．

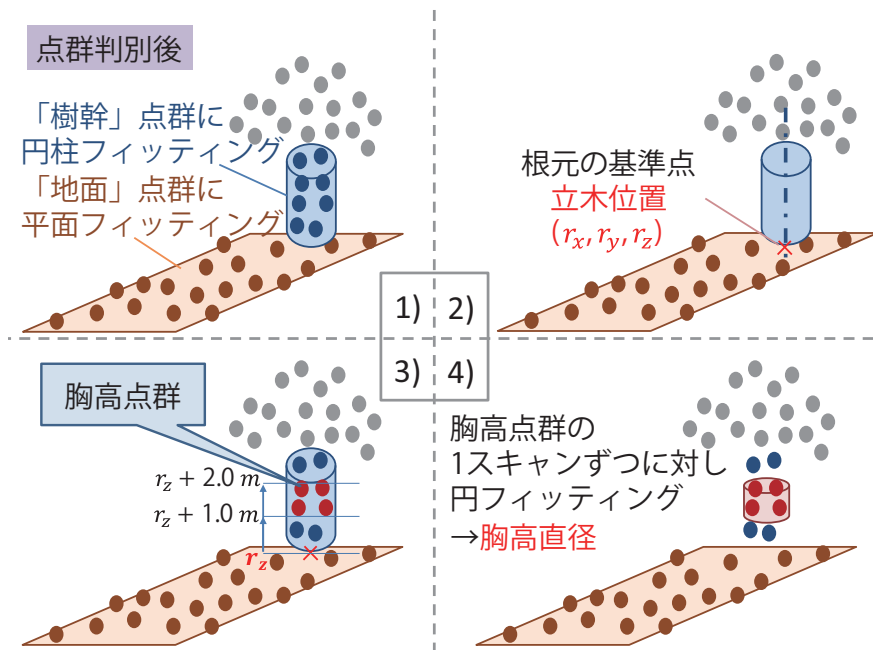


Fig. 6.11 Proposed method based on classification result.

5) 4) で抽出した点群について，平地林における胸高直径の推定手法を適用する．すなわち，1 スキャンごとに円フィッティングを行うことでその直径を算出し．同一立木における複数 スキャンの平均をとることで胸高直径とする．

1) では，「地面」と判別された点群全体に平面フィッティングを行うことで，計測対象地域を 1 枚 のモデル平面に近似できる．2) では，「樹幹」と判別された点群全体に円柱フィッティングを行う ことで，円柱状の点群を個別に検出できる．

6.5 傾斜人工林における評価方法

森林計測実験を，Fig. 4.22 に示す茨城県つくば市上大島にある傾斜人工林において行った．計 測対象としたのは，Fig. 6.12 に示すような，帯状サンプリング法 [41] に基づく長さ 30 m，幅 10 m の範囲にある 72 本の立木である．

本実験においては，その矩形領域内にある対象立木の胸高直径と立木位置を提案手法によって 計測した．胸高直径の真値は，平地林や傾斜自然林の時と同様に巻き尺を用いて計測した．立木 位置について，林業において実施されている手動による測定と同様の方法で測定した．すなわち， 最大傾斜方向とそれに直交する方向に座標系を設定し，立木の根元の座標を各方向にメジャーを 用いることで測定した．立木位置の正確さについては，立木間距離によって評価する．Fig. 6.13 に示すように，いくつかの立木を選定し，隣接する立木との間の距離によって評価する．立木間 距離の真値は，メジャーで測定した立木位置から算出した 2 点間の距離から推定した．これらの 真値と提案手法による計測値との間で比較を行った．

また，対象の矩形領域内の移動経路によって，これらの計測結果に影響が出る可能性を考え，こ れについても比較を行った．Fig. 6.14 のように矩形領域の中央を最大傾斜方向に上りながら直進 する経路 1，Fig. 6.15 のように最大傾斜方向に立木の間を縫うように歩く経路 2，および Fig. 6.16

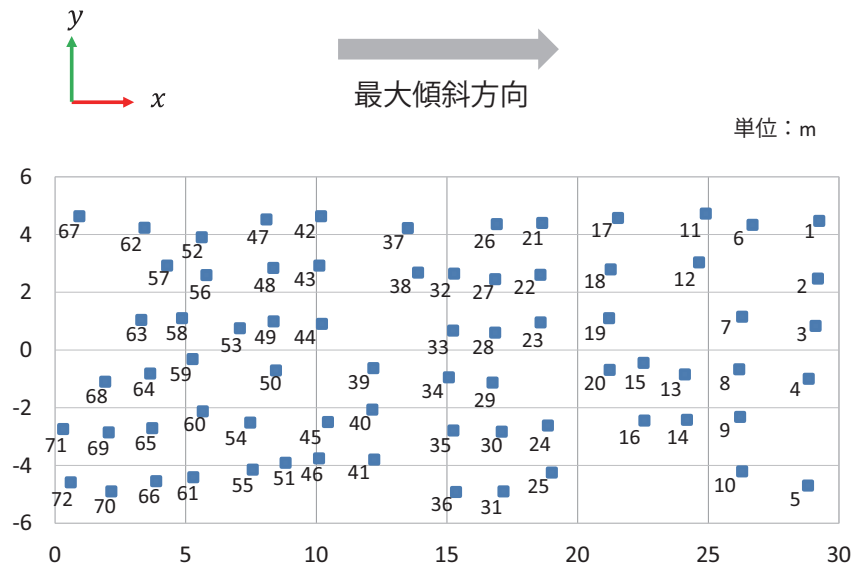


Fig. 6.12 Measurement area and number of standing trees.

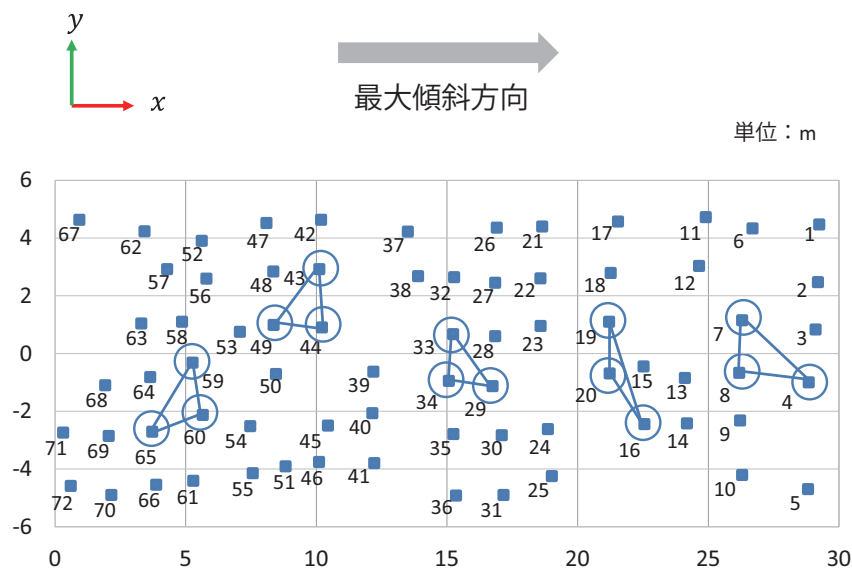


Fig. 6.13 Pairs of trees for evaluation of distances between standing trees.

のように最大傾斜方向と直交する方向に立木の間を縫うように歩く経路 3 の 3 通りの経路により、それぞれ 10 回ずつ独立に計測を行った。10 回の計測を必要とする理由は、平地林の場合と同じである。それぞれの計測データから、胸高直径と立木間距離を最大 10 回分（後述するが計測値が得られない場合がある）推定して平均を求め、その平均値をもって胸高直径と立木間距離の計測値とした。

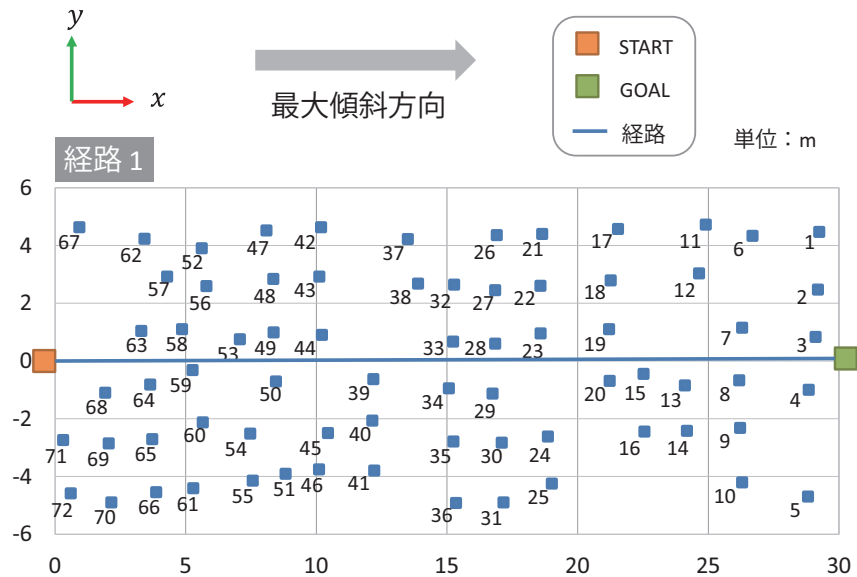


Fig. 6.14 Measurement path 1.

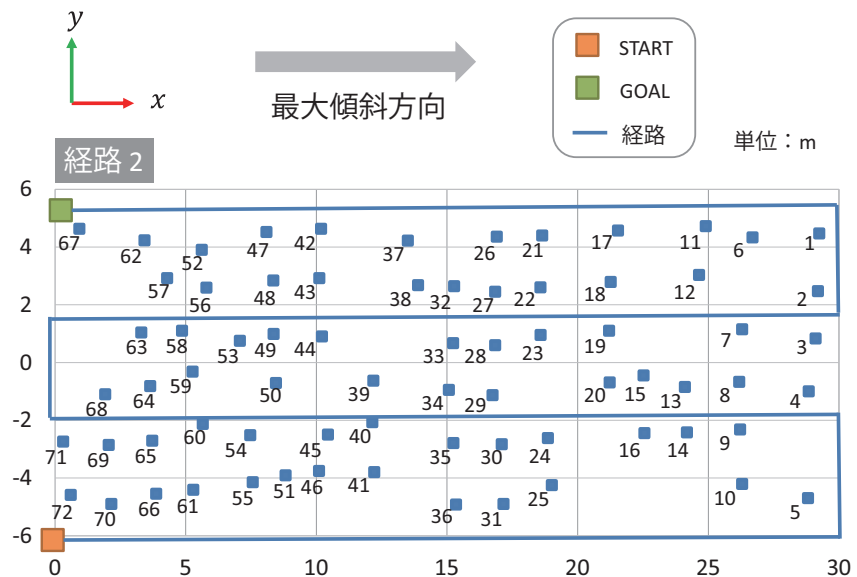


Fig. 6.15 Measurement path 2.

6.6 傾斜人工林における実験結果

6.6.1 点群判別および胸高点群の抽出結果

点群判別とその結果に基づいて胸高点群を抽出できるか、確認を行った。まず、単一サイズの局所領域による法線推定に関して、 k 近傍点の選択範囲を半径 $r = 0.1\text{m}$, $r = 0.2\text{m}$, $r = 0.4\text{m}$ とした場合の点群判別結果は、それぞれ Fig. 6.17, Fig. 6.18, Fig. 6.19 のようになった (Fig. 4.23 とは異なる視点)。また、複数サイズの局所領域による法線推定に関して、 k 近傍点の選択範囲を半径 $r = 0.1, 0.2, 0.4\text{m}$ とした場合の点群判別結果は Fig. 6.20, 半径 $r = 0.2, 0.3, 0.4\text{m}$ とした場合の点群判別結果は Fig. 6.21 のようになった (Fig. 4.23 とは異なる視点)。赤点は「地面」、青点は

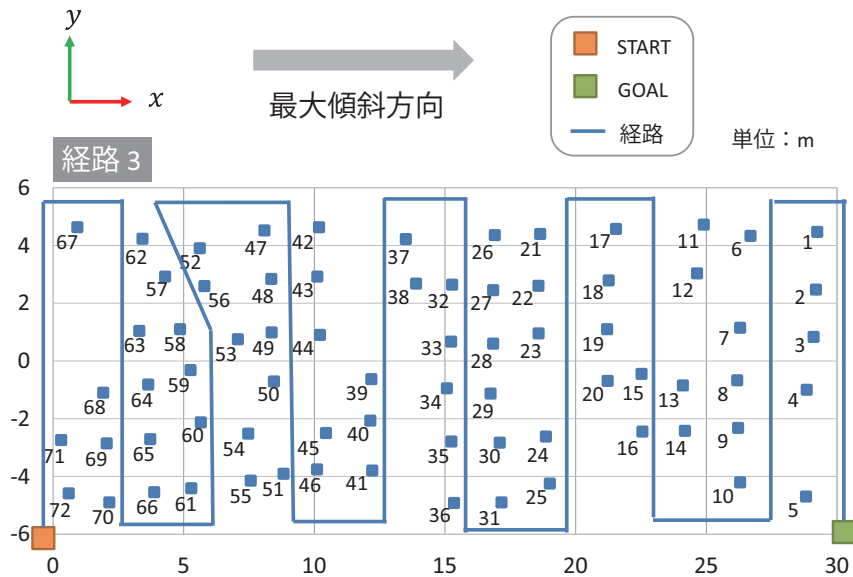


Fig. 6.16 Measurement path 3.

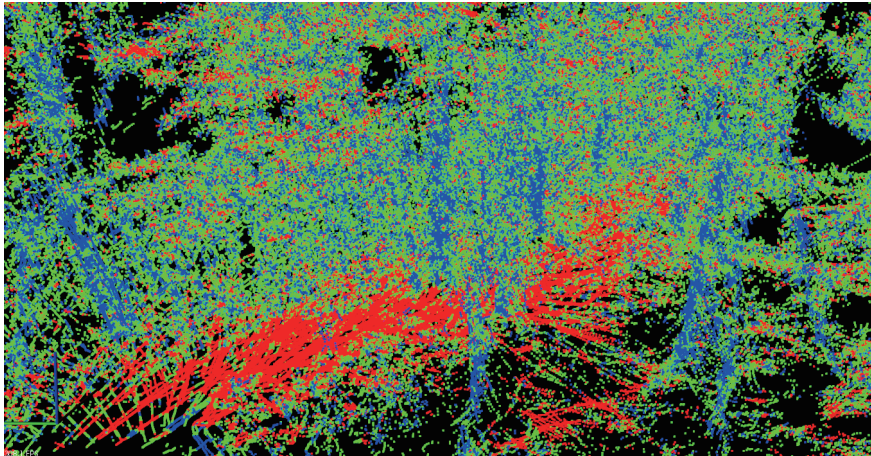


Fig. 6.17 Result of classification (single scale $r = 0.1\text{m}$).

「樹幹」, 緑点は「その他」を示す。

単一サイズの局所領域での法線推定による点群判別では, $r = 0.4\text{m}$ の時の結果が最も誤判別が少ないように見える。複数サイズの局所領域での法線推定による点群判別では, $r = 0.2, 0.3, 0.4\text{m}$ の時の結果が最も誤判別が少ないように見える。しかし, いずれの場合も枝葉の点群において「地面」と誤判別されているものがある。

Fig. 6.19 の点群判別により, 胸高点群を抽出した結果は Fig. 6.22 のように, Fig. 6.21 の点群判別により, 胸高点群を抽出した結果は Fig. 6.23 のようになった (Fig. 4.23 および Fig. 6.17 ~ Fig. 6.21 とは異なる視点, Fig. 6.22 と Fig. 6.23 も異なる視点)。白点は「地面」と判別された点群のうち平面フィッティング時のモデル平面の閾値内のもの, 青点は「樹幹」, 黄点は抽出した胸高点群を示す。いずれも, 計測対象とする立木の胸高点群を, その根元の高さを基準にして抽出することができた。

単一及び複数サイズの局所領域による点群判別結果を比較すると, この環境においては大差は

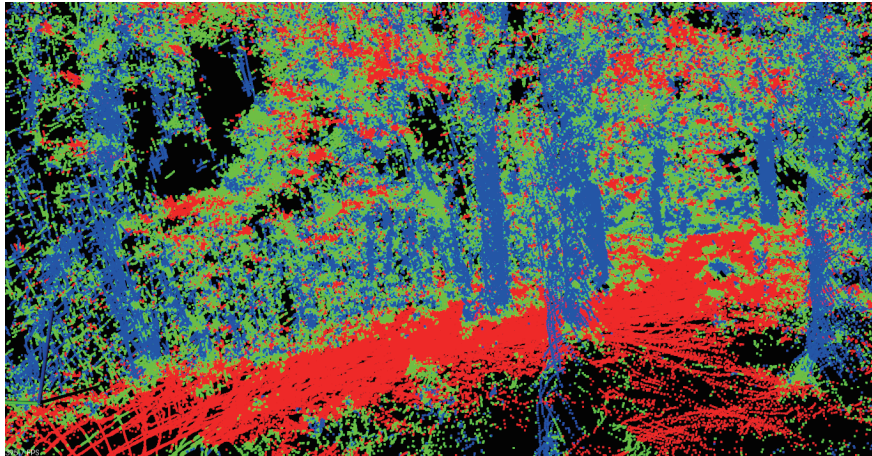


Fig. 6.18 Result of classification (single scale $r = 0.2\text{m}$).

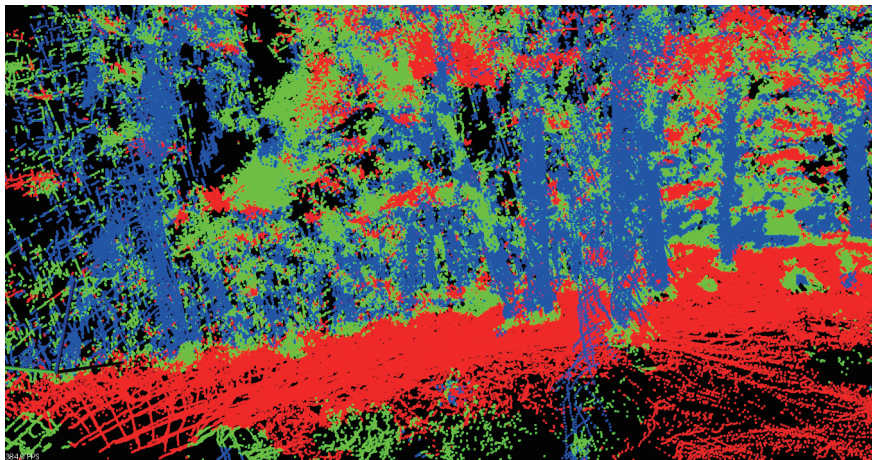


Fig. 6.19 Result of classification (single scale $r = 0.4\text{m}$).

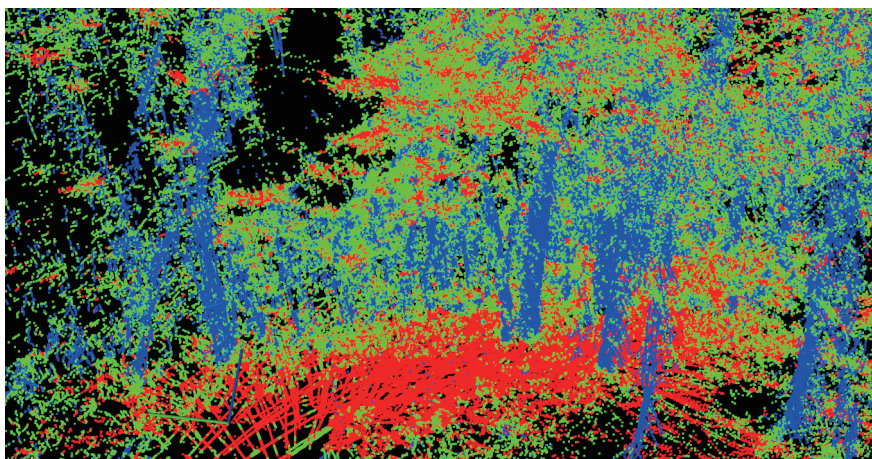


Fig. 6.20 Result of classification (multi-scale $r = 0.1, 0.2, 0.4\text{m}$).

無いように見えるが、今後様々な森林環境で実験を行った際、複数サイズの局所領域での点群判別はより良い判別結果を出す可能性がある。よって、本実験においては、複数サイズの局所領域 $r = 0.2, 0.3, 0.4\text{m}$ で点群判別をする方法により、胸高直径と立木位置を推定することとする。

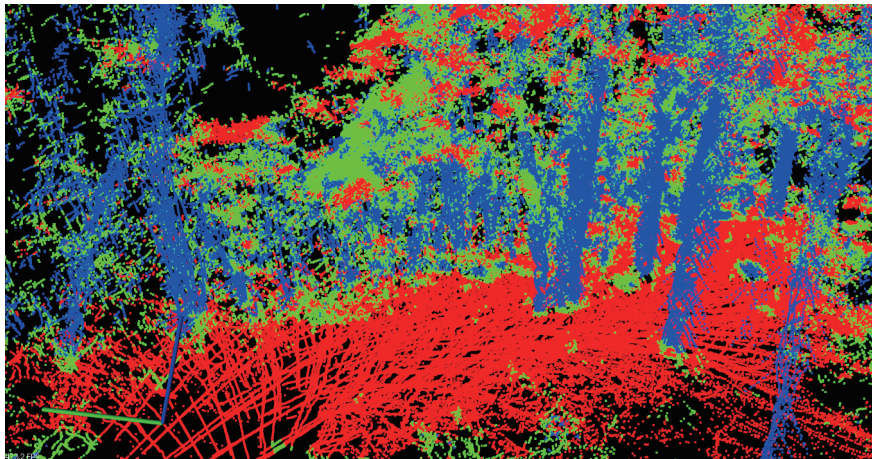


Fig. 6.21 Result of classification (multi-scale $r = 0.2, 0.3, 0.4\text{m}$).

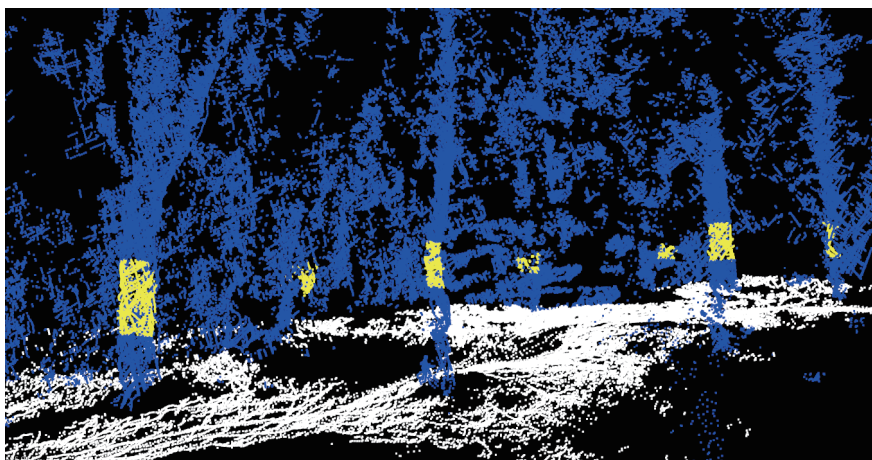


Fig. 6.22 Extracted point clouds at breast height (single scale $r = 0.4\text{m}$).

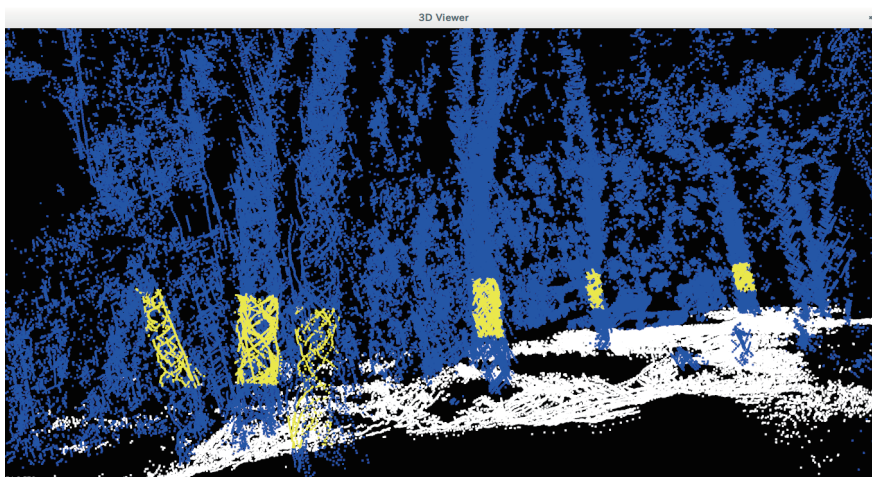


Fig. 6.23 Extracted point clouds at breast height (multi-scale $r = 0.2, 0.3, 0.4\text{m}$).

6.6.2 胸高直径の評価

Table 6.4 および Table 6.5 に、対象の 72 本の各々について、巻尺で計測した胸高直径（真値）および各移動経路において提案手法により計測した胸高直径の計測値と真値に対する誤差をまとめた。本計測では、各経路において 10 回の計測を行っているが、必ずしも 10 回分の推定値が

得られるわけではない。推定できないケースは2つある。1つは、「樹幹」と判別された点群に対して円柱フィッティングを行う時、樹幹点群が検出できない場合である。これは、樹幹が細い(10cm以下)ことや、マッチング誤差により樹幹点群の重ねあわせがうまくいかず円柱状でなくなっていることが原因として考えられる。もう1つは、本計測において、経路1に関しては1スキャンの点群が10個以上のものを、経路2と3に関しては20個以上のものを有効スキャンとして扱い(これらの点数は、計測装置と対象立木の距離によって定めた値)、それらに対してのみ1スキャンへの円フィッティングを行っているが、胸高点群において有効スキャンが1つも無い場合である。これについても樹幹が細いことや、計測装置と立木との位置関係によりうまくレーザーがあたらなかったことが原因と考えられる。よって、10回の計測のうち何回分推定値が得られたかを有効計測回数として、Table 6.4 および Table 6.5 に記した。

Fig. 6.24 は、各経路における計測結果に関して、横軸に真値、縦軸に提案手法による計測値をとりグラフにしたものである。林業の現場における胸高直径の許容誤差2cm以内を達成している立木の本数は、対象とした72本の立木のうち経路1は10本、経路2は43本、経路3は50本であり、経路3が最も多かった。

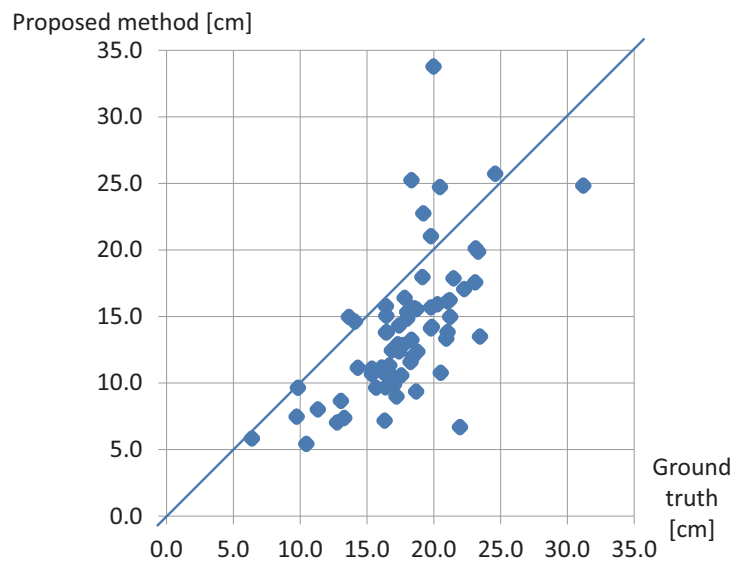
6.6.3 立木間距離の評価

Table 6.6 に、距離を計測した立木の組み合わせ、巻き尺により計測した立木位置から算出した立木間距離(真値)、各経路において提案手法により計測した立木間距離の計測値、真値に対する誤差および有効計測回数をまとめた。Fig. 6.25 は、各経路における計測結果に関して、横軸に真値、縦軸に提案手法による計測値をとりグラフにしたものである。誤差は約0.5mを下まわっており、これに対し各立木間の距離は1m以上あるため、立木位置図を作成した際に、立木の対応付けを誤るほどの誤差ではないと言える。よって、立木位置については実用上十分な計測ができていると考える。

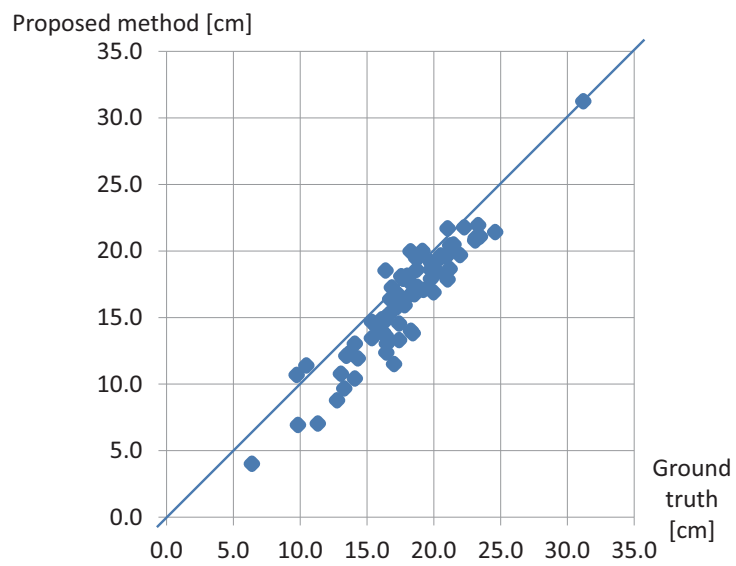
6.7 考察

移動経路の違いが計測結果に影響を与えた要因について考察する。経路1は、各立木の半分の面しかスキャンしていないため、真円ではない立木に対する計測結果は偏ったものとなる。また、計測装置から立木までの距離が大きく、得られた有効スキャンが少なかったことも誤差の原因になったと考える。経路2は、各立木のほぼ全周のスキャンが得られ、全ての立木に対して約1~2mの距離でスキャンすることができるが、斜面を2往復する経路であることから、下りの時に瞬間的に大きな振動が装置に加わった場合、特にIMUで補正していない並進方向のマッチング誤差の原因となる可能性がある。このマッチング誤差が積み重なると、後半に生成される地図に含まれる立木の点群の重ねあわせがうまくいかない原因となり、樹幹点群の検出に悪影響を与える。実際、立木の有効計測回数が5回以下の立木は、前半に生成される地図に含まれる立木において38本中8本であるのに対し、後半に生成される地図に含まれる立木においては34本中23本である。

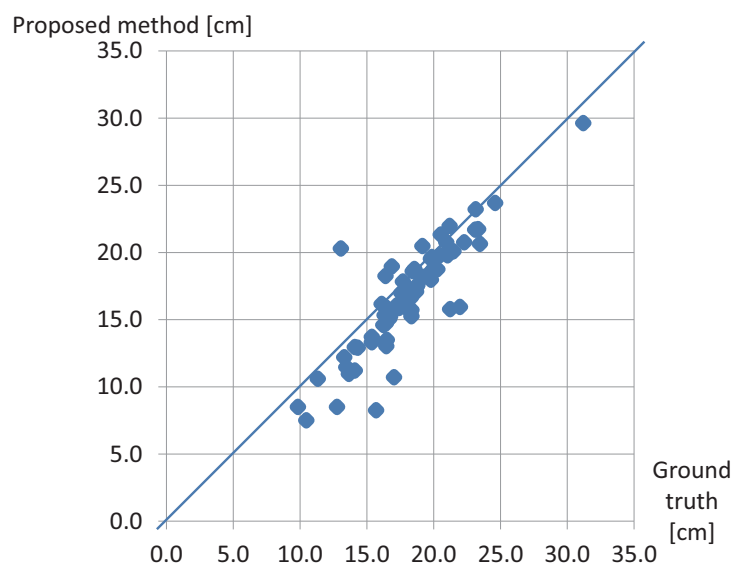
一方で、経路3における胸高直径の計測値は、他の経路における計測値に比べると許容誤差の



(a) Path 1

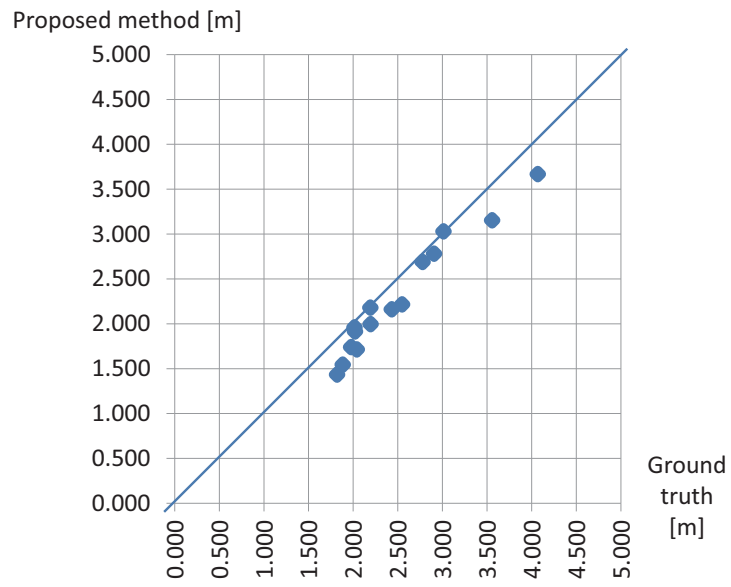


(b) Path 2

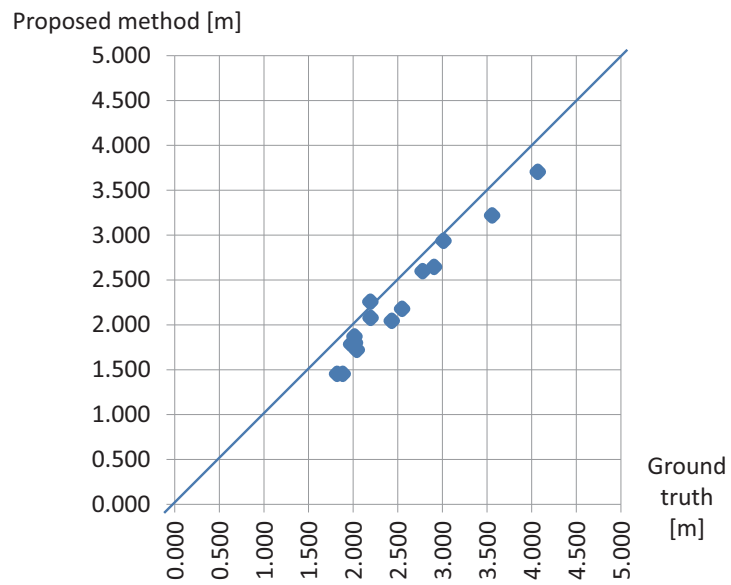


(c) Path 3

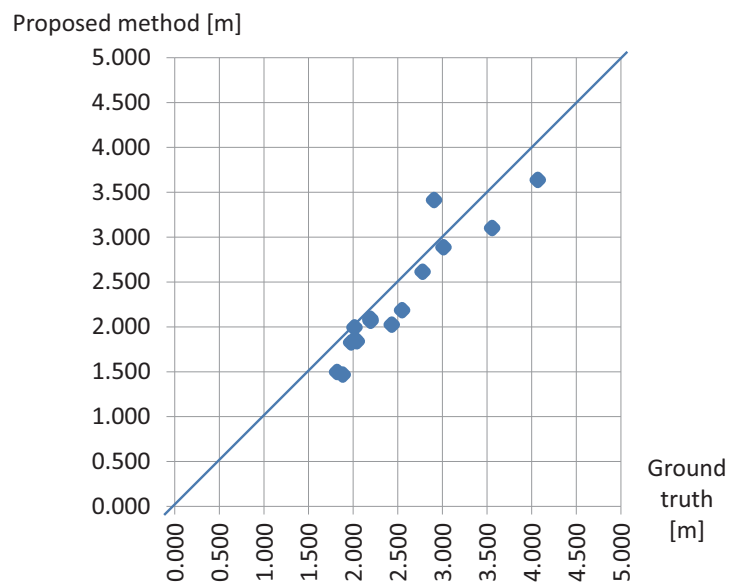
Fig. 6.24 Means of diameters at breast height for ten times measurements.



(a) Path 1



(b) Path 2



(c) Path 3

Fig. 6.25 Means of distances between standing trees for ten times measurements.

Table 6.4 Means of diameters at breast height, their errors, and the index in each path (tree 1 ~ 40).

Tree number	Ground truth [cm]	Diameter (Error) [cm] in path 1	Diameter (Error) [cm] in path 2	Diameter (Error) [cm] in path 3	Valid measurement times in path 1	Valid measurement times in path 2	Valid measurement times in path 3
1	18.3	11.6 (-6.7)	20.0 (1.7)	15.6 (-2.7)	4	4	1
2	16.4	9.7 (-6.7)	18.5 (2.1)	18.3 (1.9)	4	1	1
3	16.9	12.5 (-4.4)	17.3 (0.4)	19.0 (2.1)	9	3	3
4	23.1	20.1 (-3.0)	21.0 (-2.2)	23.2 (0.1)	9	10	6
5	21.2	15.0 (-6.3)	20.4 (-0.8)	15.8 (-5.4)	3	10	3
6	20.5	10.8 (-9.8)	19.7 (-0.9)	21.3 (0.8)	5	6	1
7	21.5	17.9 (-3.6)	20.5 (-1.0)	20.1 (-1.4)	8	9	5
8	22.3	17.1 (-5.2)	21.8 (-0.5)	20.8 (-1.5)	9	9	7
9	15.7	9.6 (-6.0)	14.3 (-1.4)	8.3 (-7.4)	5	9	2
10	21.0	16.1 (-4.9)	21.7 (0.7)	no data	4	9	0
11	22.0	6.7 (-15.3)	19.7 (-2.3)	15.9 (-6.0)	3	5	4
12	21.0	13.8 (-7.2)	17.9 (-3.2)	19.8 (-1.3)	7	8	4
13	18.3	15.6 (-2.7)	14.0 (-4.3)	16.6 (-1.7)	8	9	3
14	16.3	7.2 (-9.2)	14.7 (-1.6)	15.3 (-1.0)	5	10	2
15	13.1	8.7 (-4.4)	10.8 (-2.3)	20.3 (7.2)	8	6	3
16	31.2	24.8 (-6.4)	31.2 (0.0)	29.6 (-1.6)	10	10	9
17	19.8	21.0 (1.2)	18.6 (-1.2)	18.6 (-1.2)	4	5	4
18	19.2	22.7 (3.5)	17.1 (-2.2)	18.2 (-1.0)	9	5	9
19	23.3	19.9 (-3.5)	21.9 (-1.4)	21.7 (-1.6)	10	9	8
20	14.3	11.1 (-3.2)	11.9 (-2.4)	12.9 (-1.4)	7	9	5
21	17.0	9.9 (-7.2)	11.7 (-5.3)	10.7 (-6.3)	4	5	2
22	16.7	11.3 (-5.4)	15.3 (-1.4)	15.1 (-1.6)	6	3	9
23	15.4	10.7 (-4.7)	13.4 (-1.9)	13.7 (-1.7)	7	6	3
24	9.7	7.5 (-2.3)	10.7 (0.9)	no data	3	6	0
25	24.6	25.7 (1.1)	21.4 (-3.2)	23.7 (-0.9)	3	10	9
26	18.8	12.4 (-6.4)	18.5 (-0.3)	17.6 (-1.2)	4	4	7
27	19.8	15.7 (-4.1)	17.9 (-1.9)	18.0 (-1.8)	8	5	5
28	13.7	15.0 (1.3)	12.3 (-1.4)	11.0 (-2.7)	8	6	2
29	21.2	16.2 (-5.0)	18.7 (-2.5)	22.0 (0.8)	10	10	7
30	16.7	10.6 (-6.1)	16.4 (-0.4)	15.3 (-1.5)	5	10	8
31	23.1	17.6 (-5.6)	20.8 (-2.3)	21.7 (-1.4)	2	7	3
32	16.5	15.1 (-1.4)	12.4 (-4.1)	13.0 (-3.4)	6	4	4
33	18.7	15.5 (-3.2)	18.6 (-0.1)	17.4 (-1.3)	9	9	9
34	19.8	14.1 (-5.7)	19.2 (-0.6)	19.5 (-0.3)	9	8	9
35	18.3	13.2 (-5.1)	16.8 (-1.6)	15.3 (-3.1)	5	10	6
36	23.5	13.5 (-10.0)	21.1 (-2.4)	20.6 (-2.8)	3	9	8
37	20.0	33.8 (13.8)	16.9 (-3.1)	18.8 (-1.2)	2	5	9
38	18.3	25.2 (6.9)	17.5 (-0.8)	15.7 (-2.6)	9	5	9
39	20.5	24.7 (4.3)	19.5 (-1.0)	19.8 (-0.7)	10	9	9
40	11.3	8.0 (-3.3)	7.0 (-4.3)	10.6 (-0.7)	5	2	5

範囲内のものが多かったが、胸高直径に関して言えば、許容誤差の範囲外の立木は全体の約 3 分の 1 に近い 22 本は存在している。経路 3 の特徴としては、経路 2 と同じく各立木のほぼ全周のスキャンが得られ、全ての立木に対して約 1~2 m の距離でスキャンすることができることに加え、下る動作が無いことから瞬間的に大きな振動が加わることは少ない。しかし、他の経路と違い、180 deg の yaw 方向への旋回を合計 9 回行う。そのため、yaw 方向のマッチング誤差の原因となり、その積み重ねが後半に生成される地図に含まれる立木の樹幹点群の検出に悪影響を与え

Table 6.5 Means of diameters at breast height, their errors, and the index in each path (tree 41 ~ 72).

Tree number	Ground truth [cm]	Diameter (Error) [cm] in path 1	Diameter (Error) [cm] in path 2	Diameter (Error) [cm] in path 3	Valid measurement times in path 1	Valid measurement times in path 2	Valid measurement times in path 3
41	17.4	14.3 (-3.1)	13.3 (-4.1)	15.9 (-1.5)	5	9	8
42	15.4	11.1 (-4.3)	14.7 (-0.7)	13.3 (-2.1)	3	4	7
43	18.6	15.6 (-2.9)	16.7 (-1.8)	18.8 (0.2)	9	6	8
44	16.4	15.8 (-0.7)	15.0 (-1.4)	15.9 (-0.5)	8	7	9
45	20.3	15.9 (-4.4)	18.4 (-1.8)	18.8 (-1.5)	7	8	9
46	16.5	13.8 (-2.7)	13.0 (-3.5)	13.5 (-3.0)	2	5	8
47	13.5	no data	12.1 (-1.3)	11.5 (-2.0)	0	1	5
48	18.0	14.8 (-3.2)	18.1 (0.1)	16.1 (-2.0)	7	3	8
49	16.2	10.8 (-5.5)	13.9 (-2.4)	14.6 (-1.6)	7	6	8
50	17.3	12.9 (-4.4)	16.7 (-0.6)	16.1 (-1.2)	8	6	9
51	19.9	14.2 (-5.7)	19.1 (-0.8)	19.7 (-0.2)	3	9	9
52	12.8	7.0 (-5.7)	8.8 (-4.0)	8.5 (-4.3)	2	4	6
53	17.6	10.6 (-7.0)	18.1 (0.5)	17.0 (-0.6)	9	6	9
54	16.4	13.8 (-2.6)	13.6 (-2.8)	14.7 (-1.7)	5	6	10
55	9.8	9.6 (-0.2)	6.9 (-2.9)	8.5 (-1.3)	1	3	6
56	17.4	12.4 (-5.0)	14.5 (-2.9)	15.9 (-1.5)	6	2	4
57	10.5	5.4 (-5.0)	11.4 (0.9)	7.5 (-3.0)	3	1	4
58	13.3	7.4 (-5.9)	9.7 (-3.6)	12.2 (-1.1)	6	2	6
59	16.1	11.2 (-4.9)	14.9 (-1.2)	16.2 (0.1)	7	6	8
60	18.0	15.3 (-2.7)	18.1 (0.1)	17.0 (-1.0)	6	9	9
61	14.1	14.6 (0.5)	13.0 (-1.1)	11.2 (-2.9)	3	5	8
62	6.0	no data	no data	no data	0	0	0
63	6.4	5.8 (-0.6)	4.0 (-2.4)	no data	3	1	0
64	18.4	12.0 (-6.5)	13.8 (-4.6)	18.6 (0.2)	7	4	9
65	17.8	16.4 (-1.4)	15.9 (-1.9)	17.0 (-0.8)	7	6	8
66	18.7	9.4 (-9.3)	19.5 (0.8)	17.1 (-1.6)	1	6	7
67	6.5	no data	no data	no data	0	0	0
68	17.2	9.0 (-8.2)	15.8 (-1.5)	16.0 (-1.2)	5	5	8
69	17.7	12.9 (-4.8)	17.9 (0.2)	17.8 (0.1)	5	7	9
70	14.1	no data	10.4 (-3.7)	13.0 (-1.1)	0	3	3
71	19.2	18.0 (-1.2)	20.0 (0.8)	20.5 (1.3)	5	2	8
72	20.9	13.3 (-7.6)	19.6 (-1.4)	20.8 (-0.2)	3	6	8

る可能性がある。実際、立木の有効計測回数が5回以下の立木は、前半に生成される地図に含まれる立木において34本中8本であるのに対し、後半に生成される地図に含まれる立木においては38本中22本である。今後の課題としては、LOAMを並進方向の大きな振動やyaw方向の旋回に対してロバストな地図生成手法に改良していくことが挙げられる。

立木間距離に関して、平地人工林の計測結果に比べると、傾斜人工林の計測結果の方が誤差の大きい結果となっている。この原因については、真値の測定の方法にあると考える。傾斜人工林においては、メジャーを地面に置いて測定したために地面の凹凸の影響を受けており、レーザー距離計を用いた平地人工林に比べて、真値が正確でない可能性が高い。このことから、提案手法による計測は、従来のメジャーを用いた計測よりも正確である可能性も示唆される。

作業量に関して考察する。従来の人手による計測では30m×10mの範囲を計測するのに3人で約1時間かかると言われていた。今回、実際にこの調査領域において、調査プロットの確定が

Table 6.6 Means of distances between standing trees and their errors in each path.

Tree number	Ground truth [m]	Distance (Error) [m] in path 1	Distance (Error) [m] in path 2	Distance (Error) [m] in path 3	Valid measurement times in path 1	Valid measurement times in path 2	Valid measurement times in path 3
4-7	3.559	3.153 (-0.405)	3.220 (-0.339)	3.101 (-0.457)	8	9	4
4-8	2.908	2.780 (-0.127)	2.646 (-0.262)	3.414 (0.506)	9	9	5
7-8	2.042	1.714 (-0.328)	1.722 (-0.321)	1.840 (-0.202)	9	8	6
16-19	4.071	3.668 (-0.402)	3.706 (-0.365)	3.637 (-0.434)	10	10	9
16-20	2.434	2.161 (-0.273)	2.045 (-0.388)	2.025 (-0.409)	8	10	6
19-20	1.978	1.740 (-0.239)	1.784 (-0.194)	1.827 (-0.151)	8	10	6
29-33	2.549	2.216 (-0.333)	2.178 (-0.371)	2.186 (-0.363)	9	9	6
29-34	1.885	1.545 (-0.340)	1.454 (-0.431)	1.468 (-0.417)	9	9	7
33-34	1.820	1.433 (-0.387)	1.455 (-0.366)	1.497 (-0.323)	9	8	9
43-44	2.197	1.995 (-0.202)	2.078 (-0.119)	2.067 (-0.130)	7	6	7
43-49	2.779	2.689 (-0.090)	2.598 (-0.181)	2.614 (-0.165)	7	5	8
44-49	2.015	1.959 (-0.056)	1.871 (-0.145)	1.995 (-0.020)	7	6	8
59-60	2.022	1.914 (-0.108)	1.801 (-0.221)	1.859 (-0.163)	7	5	9
59-65	3.013	3.029 (0.016)	2.937(-0.076)	2.887 (-0.126)	7	5	9
60-65	2.194	2.179 (-0.015)	2.257 (0.063)	2.091 (-0.104)	6	5	9

ら，胸高直径と立木位置をメジャーで測定するのに要した時間は，著者ら 2 人で約 2 時間であった．これに対し，提案手法（経路 3）では同じ範囲の矩形領域を 1 人で約 1 時間 10 分（計測 10 回分）で計測することができた．よって，従来の手動計測と比べて，提案手法による計測は作業量を短縮できているといえる．また，1 回の計測で十分な結果が得られるようになれば，1 人で約 7 分の作業量となる．作業量の更なる短縮のためには，平地林と同様に，提案手法または地図生成手法の改良が必要であり，今後の課題である．

6.8 まとめ

本章では，傾斜林において生成した 3 次元森林地図を用いて，胸高直径と立木位置を推定する手法について説明した．傾斜林特有の問題である，胸高点群を各立木の根元を基準とした高さで抽出しなければならないこと，および対象地域の斜面を平面近似しなければならないことに対応した．当初，傾斜自然林を対象として，3 次元地図中の立木周辺の最下点を立木の根元の基準点とすることで胸高点群を抽出して，胸高直径を推定したところ，概ね許容誤差の範囲内で計測を行った．次に，傾斜人工林を対象として，法線の特徴とした点群判別を行うことにより，斜面を近似したモデル平面と樹幹点群にあてはめたモデル円柱の中心軸との交点を求めて，これを立木の根元の基準点とした．この立木の根元の基準点を用いて胸高点群を抽出し，平地林における手法を適用して胸高直径を推定した．また，複数サイズの局所領域での法線推定による点群判別結果を用いた提案手法により，傾斜人工林で計測実験を行った．矩形領域を定めて，3 種類の各移動経路において胸高直径と立木間距離を 10 回ずつ計測した平均値を計測値として比較したところ，最大傾斜方向と直交する方向に立木の間を縫うように歩く経路 3 において，林業の現場において許容できるとされる胸高直径の誤差 2 cm 以下を達成した立木の本数が最も多く，72 本中 50 本（約 70%）であった．立木間距離に関して，誤差は約 0.5 m 以内であり，実際の立木間の距離と比較

すると、立木位置図を作成した際に立木の対応付けを誤るほどの誤差ではないと言える。よって、立木位置については実用上十分な計測ができていると考える。作業量に関して、提案手法は従来の人手による計測の約 4 分の 1 の作業量で同程度の範囲を計測することができた。以上より、提案手法による計測結果はまだ実用の水準には至らないものの、作業量を短縮することができるという。

第7章 結論

本論文では、著者らが開発したバックパック型の可搬型3次元レーザスキャナを用いて連続移動計測を行い、2次元スキャンを6自由度でマッチングするLOAMの手法に基づいて連続移動計測により3次元地図を生成し、平地林および傾斜林の特質に応じた胸高直径と立木位置を推定する手法を提案した。

まず計測のための準備として、IMUによる装置の姿勢補正が十分に行えることを確認した。また、LOAMが森林環境においても適用可能であり、生成した地図は森林計測においても利用可能であることを確認した。

平地林での胸高直径と立木位置の推定において、LOAMによる点群の重ね合わせの誤差が推定値に及ぼす影響を軽減するように、次のような手順を採用した。まず、樹幹の点群に対して円柱検出を行うことで立木の仮の中心軸を取得し、この中心軸を法線とする平面に樹幹の1スキャンの点群を射影した。その点群に対して最小二乗法により円をあてはめて直径と中心点を求め、同一立木における複数スキャンの平均をとることで、胸高直径と立木位置を推定した。

平地林において行った実験では、定めた矩形領域内の3種類の各移動経路において、胸高直径と立木間距離を10回ずつ計測した平均値を計測値として比較したところ、立木を取り囲むようにUターンする経路2において、林業の現場において許容できるとされる胸高直径の誤差2cm以下を達成した立木の本数が最も多く、14本中12本(約85%)であった。周長に対してスキャンのあたった割合が、胸高直径の評価の参考になる可能性があることについても示唆された。また、各胸高直径の1 σ の範囲と輪尺で測定した最大径と最小径の区間が重なったのは、14本中14本であった。提案手法による胸高直径の計測に関しては、本論文での比較において経路2のとり方が最善であると言える。立木間距離に関して、誤差は0.1mを下まわっており、これに対し各立木間の距離は1m以上ある。よって、立木位置図を作成した際に、立木の対応付けを誤るほどの誤差ではないと言えるため、立木位置については実用上十分な計測ができていると考える。作業量に関して、提案手法は従来の手動計測より少ない作業量で同程度の範囲を計測することができた。以上より、提案手法による計測結果はまだ実用の水準には至らないものの、作業量を短縮する見通しがあった。

傾斜林においては、傾斜自然林と傾斜人工林を対象とし、傾斜林特有の問題である、胸高点群を各立木の根元を基準とした高さで抽出することと、対象地域の斜面を平面近似することにも対応した。傾斜自然林については、3次元地図中の立木周辺の最下点を立木の根元の基準点とすることで胸高点群を抽出して、胸高直径を推定したところ、概ね許容誤差の範囲内で計測を行えた。傾斜人工林については、法線の特徴とした点群判別を行うことにより、地図中の点群を「樹幹」、「地面」および「その他」に分類し、斜面を近似したモデル平面と樹幹点群にあてはめたモデル円柱の中心軸との交点を求めて、これを立木の根元の基準点とすることで、胸高直径および立木位置を推定した。傾斜人工林においても、矩形領域を定めて3種類の各移動経路において胸高直径と立木間距離を10回ずつ計測した平均値を計測値として比較した。胸高直径に関して、最大傾斜方向と直交する方向に立木の間を縫うように歩く経路3において、許容誤差2cm以下を達成した

立木の本数が最も多く、72 本中 50 本（約 70%）であった。立木間距離に関して、誤差は約 0.5 m を下まわっており、これに対し各立木間の距離は 1 m 以上ある。よって、立木位置図を作成した際に、立木の対応付けを誤るほどの誤差ではないと言えるため、立木位置については実用上十分な計測ができていると考える。作業量に関して、実際に同じ矩形領域内で手動による計測を行い比較したところ、提案手法は従来の手動計測の約 4 分の 1 の作業量で計測することができた。以上より、提案手法による計測結果はまだ実用の水準には至らないものの、作業量を短縮することができるといえる。

本研究の貢献としては、技術的課題に対して工夫を施すことで、バックパック型の可搬型装置を用いた森林内の連続移動計測を実現した点と、それに伴い学術的な知見を得られた点が挙げられる。特に、従来の手動計測に比べて提案手法による計測が作業量を短縮できた点は、林業における大きな貢献であると考えられる。また、本来屋内環境向けに考案された LOAM を森林環境に応用した点も、本研究の貢献であると考えられる。

提案手法における今後の課題は、現状で胸高直径誤差が 2 cm を上回る立木が存在することから、さらなる改良を施し誤差の減少を図ることである。また、1 回の計測で十分な結果が得られるように、提案手法及び地図生成手法を改良することも課題である。具体的には、1 スキャンの曲率を指標として、そのスキャンを胸高直径の推定に使用するか判別を行うことを考えている。また、立木の断面形状が真円ではない場合もあることを考慮して、立木の 1 スキャンに対して楕円をあてはめることも試みる予定である。地図生成手法 LOAM について、並進方向への短時間の大きな振動や yaw 方向の旋回にロバストな手法に改良することを考えている。本論文で述べていない課題として、今回取り扱っていない枝下高や樹高などの立木パラメータの計測を行う予定である。

謝辞

指導教員である坪内孝司教授には、学位取得のために、多くの時間を議論や論文添削に費やして頂き、研究に関する技術的な指導のみならず、研究者としての論理的思考や工学的知識を身につけるために多くの指導を頂いた。本研究を進めるにあたり、本研究室の研究員である皿田滋博士、千葉工業大学未来ロボット技術研究センター原祥堯博士、および株式会社アドイン研究所の塩沢恵子氏から技術的な助言を頂いた。研究室内のシンポジウム等において、本研究室の教員である大矢晃久教授、伊達央准教授からも有用な助言を頂いた。大学内のセミナーにおいて、副指導教員の矢野博明教授からも有用な助言を頂いた。本大学の教員である延原肇准教授には、学位審査において他分野からの視点で助言を頂いた。森林総合研究所の千葉幸弘博士には、現場の視点からの貴重な助言を頂いた。また、同千葉博士と関東森林管理局の須崎智応氏には、入林手続きの調整にご協力を頂いた。また私有林の所有者である片岡氏および上林氏には、実地林地での森林計測実験を行わせて頂いた。株式会社森林再生システムからは輪尺の貸与を頂いた。その他、家族、職場の同僚、研究室の仲間には、相談を聞いて下さるなど精神的な支えを頂いた。この 3 年間、研究を遂行する上で関わって下さった全ての方々に対し、ここに感謝の意を表す。また、このような研修の機会を与えて下さった職場の担当部署、日常の管理面で支えて下さった職場の関係者にも感謝を申し上げたい。

参考文献

- [1] 平成 26 年度森林・林業白書（第 1 部第 II 章第 1 節（1））林野庁ホームページ 2015.
<http://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/hakusyo/26hakusyo/zenbun.html>
- [2] Whittaker RH, Bormann FH, Likens GE, Siccama TG: “The Hubbard Brook Ecosystem Study: Forest Biomass and Production”, *J. on Ecological Monographs*, vol. 44, no. 2, pp. 233–254, 1974.
- [3] 関才門, 阪東 茂, 原 祥堯, 坪内 孝司: “無限回転機構を有する可搬型三次元レーザスキャナの開発”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会予稿集, 2015.
- [4] Ji Zhang, Sanjiv Singh: “LOAM: Lidar Odometry and Mapping in Real-time”, *Proc. of Robotics: Science and Systems Conf. (RSS)*, 2014.
- [5] Markus Hollaus, Wolfgang Wagner, Bernhard Maier, Klemens Schadauer: “Airborne Laser Scanning of Forest Stem Volume in a Mountainous Environment”, *J. on Sensors*, vol. 7, no. 8, pp. 1559–1577, 2007.
- [6] Curtis Edson, Michael G. Wing: “Airborne Light Detection and Ranging (LiDAR) for Individual Tree Stem Location, Height, and Biomass Measurements”, *J. on Remote Sensing*, vol. 3, no. 11, pp. 2494–2528, 2011.
- [7] Lothar Eysn, Markus Hollaus, Klemens Schadauer, Norbert Pfeifer: “Forest Delineation Based on Airborne LIDAR Data”, *J. on Remote Sensing*, vol. 4, no. 3, pp. 762–783, 2012.
- [8] Oliver Cartus, Josef Kelldorfer, Markus Rombach, Wayne Walker: “Mapping Canopy Height and Growing Stock Volume Using Airborne Lidar, ALOS PALSAR and Landsat ETM+”, *J. on Remote Sensing*, vol. 4, no. 11, pp. 3320–3345, 2012.
- [9] Ville Kankare, Mikko Vastaranta, Markus Holopainen, Minna Rätty, Xiaowei Yu, Juha Hyypä, Hannu Hyypä, Petteri Alho, Risto Viitala: “Retrieval of Forest Aboveground Biomass and Stem Volume with Airborne Scanning LiDAR”, *J. on Remote Sensing*, vol. 5, no. 5, pp. 2257–2274, 2013.
- [10] L. Monika Moskal, Guang Zheng: “Retrieving Forest Inventory Variables with Terrestrial Laser Scanning (TLS) in Urban Heterogeneous Forest”, *J. on Remote Sensing*, vol. 4, no. 1, pp. 1–20, 2012.
- [11] Pasi Raumonon, Mikko Kaasalainen, Markku Åkerblom, Sanna Kaasalainen, Harri Kaartinen, Mikko Vastaranta, Markus Holopainen, Mathias Disney, Philip Lewis: “Fast Automatic Precision Tree Models from Terrestrial Laser Scanner Data”, *J. on Remote Sensing*, vol. 5, no. 2, pp. 491–520, 2013.
- [12] Lothar Eysn, Norbert Pfeifer, Camillo Ressel, Markus Hollaus, Andreas Graf, Felix Morsdorf: “A Practical Approach for Extracting Tree Models in Forest Environments Based on Equirectangular Projections of Terrestrial Laser Scans”, *J. on Remote Sensing*, vol. 5, no. 11, pp. 5424–5448, 2013.

- [13] Xinlian Liang, Juha Hyypä: “Automatic Stem Mapping by Merging Several Terrestrial Laser Scans at the Feature and Decision Levels”, *J. on Sensors*, vol. 13, no. 2, pp. 1614–1634, 2013.
- [14] Kenneth Olofsson, Johan Holmgren, Håkan Olsson: “Tree Stem and Height Measurements using Terrestrial Laser Scanning and the RANSAC Algorithm”, *J. on Remote Sensing*, vol. 6, no. 5, pp. 4323–4344, 2014.
- [15] 森林 3 次元計測システム OWL (公開サイト : 株式会社アドイン研究所)
<http://www.owl-sys.com/>
- [16] 近藤修平, 塩沢恵子, 坪内孝司 他: “測域センサを用いた森林内立木群の三次元マップの構築”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会予稿集, 2010.
- [17] Takashi Tsubouchi et al.: “Forest 3D Mapping and Tree Sizes Measurement Based on Senseing Technology for Mobile Robots”, *Field and Service Robotics vol.92 of the series Springer Tracts in Advanced Robotics*, pp. 357–368, 2013.
- [18] Sébastien Bauwens, Harm Bartholomeus, Kim Calders, Philippe Lejeune: “Forest Inventory with Terrestrial LiDAR: A Comparison of Static and Hand-Held Mobile Laser Scanning” , *J. on Forests*, vol. 7, no. 6, pp. 127, 2016.
- [19] Joseph Ryding, Emily Williams, Martin J. Smith, Markus P. Eichhorn: “Assessing Handheld Mobile Laser Scanners for Forest Surveys”, *J. on Remote Sensing*, vol. 7, no. 1, pp. 1095–1111, 2015.
- [20] Michael Bosse, Robert Zlot, Paul Flick: “Zebedee: Design of a Spring-Mounted 3-D Range Sensor with Application to Mobile Mapping”, *IEEE Trans. on Robotics*, vol. 28, no. 5, pp. 1104–1119, 2012.
- [21] 大里 章人, 加賀 美聡, 溝口 博: “ビジュアルオドメトリと多層型レーザスキャナによる 2 次元地図作成と位置推定手法”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会予稿集, 2014.
- [22] 北陽電機株式会社 UTM-30LX
http://www.hokuyo-aut.co.jp/02sensor/07scanner/utm_30lx.html
- [23] Velodyne 社 HDL-32E, VLP-16
<http://velodynelidar.com/lidar/lidar.aspx>
- [24] Leica Geosystems 社 Leica Pegasus : Backpack
<http://leica-geosystems.com/products/mobile-sensor-platforms/capture-platforms/leica-pegasus-backpack>
- [25] 3D Walker
<http://maple96.wixsite.com/woodinfo>
- [26] Maxime Lhuillier: “Forest scan using helmet-held Virb 360 camera”
<http://360rumors.com/2017/11/software-institut-pascal-converts-360-video-3d-model-vr.html>
- [27] 吉田 智章, 入江 清, 小柳 栄次, 友納 正裕: “3D スキャナとジャイロを用いた屋外ナビゲーションプラットフォーム”, 計測自動制御学会論文集, vol. 47, no. 10, pp. 493–500, 2011.
- [28] 原 祥堯, 大島 章, 小野 幸彦, 網野 梓, 山本 健次郎: “人込み歩道環境に適応した自律移動技

- 術の開発と実験機 Sofara-T を用いた実環境での評価”, 日本ロボット学会誌, vol. 30, no. 3, pp. 287–295, 2012.
- [29] 上田 達朗, 川田 浩彦, 富沢 哲雄, 大矢 晃久, 油田 信一: “無限回転機構を用いた 3 次元測域センサ”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会予稿集, 2006.
- [30] 吉田 森彦, 渡辺 敦志, 大矢 晃久: “無限回転型全方位三次元測域センサの開発 - 回転軸を通じた電源の供給と信号の伝送 - ”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会予稿集, 2013.
- [31] 大野 和則, 桜田 健, 竹内 栄二郎, 小山 順二, 田所 諭: “高速で密な形状計測を行う小型 3 次元スキャナーの開発”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会予稿集, 2009.
- [32] 大竹 一樹, 徳永 直木, 永谷 圭司, 吉田 和哉: “移動物体検知のための高速三次元距離情報取得システムの構築”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会予稿集, 2010.
- [33] 伊達 央, 大川 真弥, 滝田 好宏: “正方形柱により表現された 3 次元地図を利用した屋内外環境の自律走行”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会予稿集, 2012.
- [34] ROBOTIS 社 Dynamixel MX-28R
<http://robotis-shop-jp.com/shop/step1.php?number=434>
- [35] ツバメ無線株式会社 SRG-1-5/6GC (11 極)
<http://www.tbm-japan.com/product/01slip.html>
- [36] MicroStrain 社 3DM-GX4-15
<http://www.microstrain.com/inertial/3dm-gx4-15>
- [37] 吉田 智章: “三次元計測のための二次元レーザスキャナとコマンド式サーボモータの計測時刻同期法”, 日本ロボット学会学術講演会予稿集, 2014.
- [38] ROS.org “loam continuous”
http://wiki.ros.org/loam_continuous
- [39] ROS.org “hector mapping”
http://wiki.ros.org/hector_mapping
- [40] PCL (PointCloudLibrary)
<http://pointclouds.org>
- [41] J.T.Holloway, W.J.Wendelken, : “Some unusual problems in sample plot design”, *J. on Forest*, vol. 7, no. 4, pp. 77–83, 1957.
- [42] Jean-Francois Lalonde, Nicolas Vandapel, Daniel F. Huber, and Martial Hebert: “Natural Terrain Classification Using Three-dimensional Ladar Data for Ground Robot Mobility”, *J. of Field Robotics*, vol. 23, no. 10, pp. 839–861, 2006.
- [43] Yungeun Choe, Inwook Shim, and Myung Jin Chung: “Urban Structure Classification Using the 3D Normal Distribution Transform for Practical Robot”, *Advanced Robotics*, vol. 27, no. 5, pp. 351–371, 2013.
- [44] 糸長 快晃, 原 祥堯, 坪内 孝司: “3 次元点群の複数スケール局所形状特徴を用いた SVM による分類に基づく物体地図生成”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会予稿集, 2014.

研究業績

学術雑誌（査読あり）

- 1) 関才門, 坪内孝司, 皿田滋, 原祥堯: “平地林での 3 次元地図生成による立木位置と胸高直径の連続移動計測”, 日本機械学会論文集, vol. 84, no. 859, p: 17–00379, 2018.

国際会議（査読あり）

- 1) Saimon Seki, Takashi Tsubouchi, Shigeru Sarata, and Yoshitaka Hara: “Forest Mapping and Trunk Parameter Measurement on Slope Using a 3D-LIDAR”, Proc. of IEEE/SICE International Symposium on System Integration, 2017.

国内会議（査読なし）

- 1) 関才門, 阪東茂, 原祥堯, 坪内孝司: “無限回転機構を有する可搬型三次元レーザスキャナの開発”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会予稿集, 2015.
- 2) 関才門, 原祥堯, 坪内孝司: “無限回転する 2 次元スキャンの 6 自由度マッチングによる森林環境の地図生成”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会予稿集, 2016.
- 3) 関才門, 原祥堯, 坪内孝司: “樹幹を特徴点とした 6 自由度マッチングによる 3 次元森林計測”, 日本ロボット学会学術講演会予稿集, 2016.