

観測機器の異なる点群データの重ね合わせ手法

1230057 暮沼 宏樹

高知工科大学 システム工学群 建築・都市デザイン専攻

近年, 適切な管理が行われない森林における生物多様性の喪失が問題視されている. 適切かつ持続可能な森林管理のためには, 植生の生育状況を三次元的な森林の空間構造により明らかにしなければならない. そのために, 観測機器の異なる点群データを重ね合わせ, 森林全体の点群データを作成する必要がある. 本研究では, 目視の対応点座標を初期値とし, 原点移動と回転による幾何補正, さらに目視の座標の精度を高める点群の深度画像のテンプレートマッチングを組み合わせた手法を開発した. 開発した手法により SfM 技術で作成した点群データと赤外線レーザーによる点群データの重ね合わせを行った結果, 対応点から離れた場所では点群の位置ずれは確認されたが, 林床と樹木形状が計測された森林内部の点群データが作成できた.

Key Words: 点群, 幾何補正, 深度画像, テンプレートマッチング

1. 研究の背景

1.1 森林計測の必要性

近年, 適切な管理が行われない森林における生物多様性の喪失が問題視されている¹⁾. 適切かつ持続可能な森林管理のためには, 森林内の生態環境の根源である植生の生育状況を三次元的な森林の空間構造解析により明らかにする必要がある. 19 世紀後半から航空機の開発により導入された空中写真測量や航空測量による森林計測は, 高性能な UAV の登場により高精度かつ効率的に行えるようになった. 現在では, 小型 UAV やハンディ LiDAR (Light Detection And Ranging) が登場したことで従来の空中からの計測に加えて森林内部での計測が可能となった. しかし, 森林の三次元構造を計測するには単一の計測では森林の三次元計測データに不足が生じるため, 複数の計測機器により計測データを補い合う必要がある. 国土情報処理工学研究室では高知県香美市佐岡地区の里山研究フィールドで, 多種多様な草木からなる森林の空間構造を把握するため, 複数の観測機器から樹冠部の植生観測と林床部の植生観測を行い, 森林の空間構造を把握するための研究を行っている. 樹冠観測では UAV の撮影画像から作成した樹冠表面部分の点群データ①と UAV-LiDAR のレーザーにより計測した樹冠と地表面までが計測された点群データ②がある. 林床観測では小型 UAV の撮影画像から作成した林床の点群データ③とハンディ LiDAR による林床と樹木の幹や枝葉の形状が計測された点群データ④がある.

これら四つの点群データを重ね合わせにより補完することで, 複雑な森林の空間構造を把握することができるとは. しかし, 観測機器や観測条件によっては地上基準点を用いた幾何補正ができず, 点群が独自のローカル座標系のみで, 重ね合わせができない場合があった. そこで本研究では, 異なる観測機器の点群を重ね合わせる手法の開発を試みた.

1.2 既存の重ね合わせ手法の問題点

二つの点群を重ね合わせるために, はじめにローカル座標点群データの幾何補正が必要である. そこで, 目視でローカル座標点群から対応点のローカル座標 (u, v, w) と地上座標点群から対応点の地上座標 (x, y, z) を取得し, 幾何補正用の二種類の対応点座標データを作成した. しかし, 目視では点群の中から正確な対応点の座標値を取得することが困難なため, 吉井ら²⁾が用いた二つの点群データを重ね合わせる ICP (Iterative Closest Point) アルゴリズムにより正確なローカル座標値の取得を試みた. ICP では, 原点移動と回転によるおおよその幾何補正を行ったローカル座標点群から対応点周辺の点群を切り抜き, 地上座標点群に対して重ね合わせを行った. その結果, ICP の特徴として点群密度の異なる点群同士では正しい位置に重ね合わせられない場合があることが分かった.

次に、点群の幾何補正の手法として三次元アフィン変換がある。杉野ら³⁾が行った三次元アフィン変換による点群データの座標系の統合を試みた。式(a)より最小二乗法を用いた三次元アフィン変換⁴⁾を行った。式(a)の (x_0, y_0, z_0) は原点移動距離で、 3×3 の行列は変換係数である。

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & h & i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{pmatrix} \quad (a)$$

アフィン変換により重ね合わせた林内の鳥居の点群の画像を図1に示す。アフィン変換は拡大縮小・原点移動・回転に加えてせん断という斜め方向の変形が行われるため、点群に歪みが生じた。



図1 林内の鳥居の点群

1.3 本研究の目的

既存手法の結果を踏まえて、本研究では、変形を伴わない原点移動と回転のみの幾何補正と深度画像マッチングによる目視の対応点座標の高精度化を組み合わせた点群の重ね合わせ手法の開発することを目的とした。

2. 深度画像マッチングによる基準点座標取得

2.1 縮尺補正と原点移動・回転

画像を作成する前にローカル座標点群のおおよその幾何補正を行った。はじめに、ローカル座標点群から目視で対応点のローカル座標 (U, V, W) を取得し、地上座標点群から対応点の地上座標 (X, Y, Z) を取得した。対応点の中から二点を選ぶ組み合わせを考え、二点間距離の比の平均値を縮尺とし、ローカル座標点群の対応点の二点間距離を補正した。縮尺補正後に、最小二乗法により式(a)の原点移動距離 (x_0, y_0, z_0) と 3×3 のアフィン変換係数を算出した。変換係数から逆三角関数と三角関

数の恒等式を用いて、 X 軸周りの回転角 ω と Z 軸周りの回転角 κ を算出し、回転行列(b)を生成した。生成した回転行列を式(a)に代入し、原点移動と回転でローカル座標点群を幾何補正した。

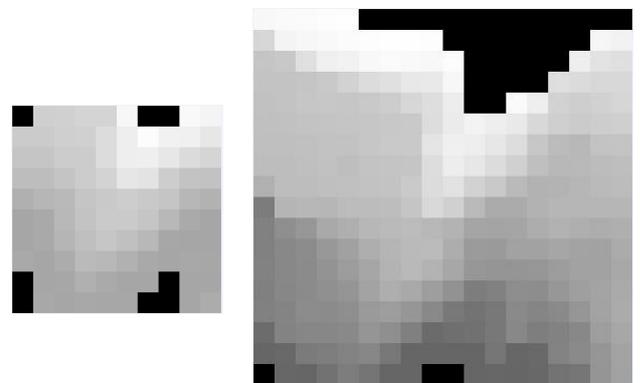
$$R_Z R_X = \begin{pmatrix} \cos\kappa & -\sin\kappa\cos\omega & \sin\kappa\sin\omega \\ \sin\kappa & \cos\kappa\cos\omega & -\cos\kappa\sin\omega \\ 0 & \sin\omega & \cos\omega \end{pmatrix} \quad (b)$$

2.2 深度画像作成とノイズ除去

おおよその幾何補正を行った対応点のローカル座標を中心に、ローカル座標点群から一辺50cmの立方体の中にある点群を抽出した。地上座標点群は、対応点の地上座標を中心に、一辺90cmの立方体の範囲で点群を抽出した。最初に、深度画像の作成に不要となる点群を除去した。不要な点群の多くは植生によるものであったため、植生点群の除去には岡嶋ら⁵⁾が用いた色情報による閾値処理(c)を行った。

$$\frac{G-R}{G+R} < 0.05 \quad \text{or} \quad \frac{G-B}{G+B} < 0 \quad (c)$$

次に、点群処理ソフトCloudCompareのSOR(Statistical Outlier Removal)機能で切り抜いた点群のノイズ除去を行った。最後に、SORで除去しきれないノイズを手作業により除去した。深度画像のサイズは点群の抽出と同様にそれぞれテンプレート画像は50cm \times 50cm、背景画像は90cm \times 90cmとし、ピクセルサイズは5cmとした。対応点から10cmの高さに投影面を設定し、各ピクセルに投影面からピクセル範囲内の最低標高点までの距離をグレースケールとして8bitの量子化した値に変換し格納した。作成した深度画像を図2に示す。



テンプレート画像

背景画像

図2 作成した深度画像

2.3 テンプレートマッチング

正確な対応点座標を取得するために、作成した深度画像を用いてテンプレートマッチングを行った。テンプレートマッチングは、背景画像の左上からテンプレート画像を1ピクセルずつ動かしていき最も相関が強くなる場所を探索する方法を用いた。点群がない場所は類似度の判定から除外したため、値が0のピクセルは相関の計算には使用しないこととした。マッチングした場所でテンプレート画像と背景画像の中心距離を求め、目視の対応点座標のX座標とY座標を補正した。Z軸方向はマッチングした場所で投影面と最低点の距離の差を求め、それらの平均値により補正し、正確な対応点座標値(U',V',W')として取得した。この(U',V',W')を使うことにより幾何補正の精度を向上させられる。

3. 繰り返し処理による幾何補正

繰り返し処理のフローを図3に示す。

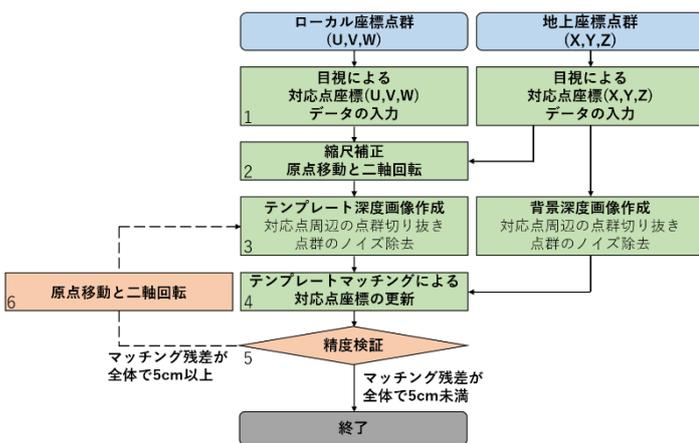


図3 繰り返し処理フロー

1から4までの処理は2章で述べたため、本章では5・6の処理について説明する。処理5の精度検証はテンプレートマッチングの残差で行い、マッチングの平均残差が全体で5cm以上となった場合は、繰り返し処理を行うこととした。処理6の原点移動と回転による幾何補正にはテンプレートマッチングで新たに得られた対応点座標(U',V',W')を用いた。取得した対応点のうち、中心に近い対応点を原点として原点移動を行い、回転角を計算した。図4に回転角 κ, ω の算出方法を示す。XY平面において、対応する対応点の角度の差を計算し、それらの平均角度をZ軸周りの回転角 κ とした。Z軸周りに回転後、同様の手法でYZ平面においてX軸周りの回転角

ω を算出し、X軸周りに回転させた。幾何補正後は点群の切り抜きから繰り返し処理を行った。

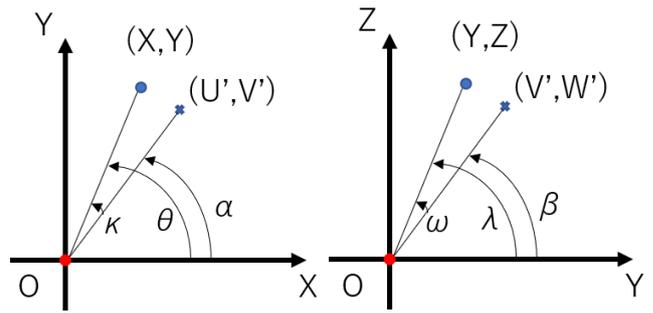


図4 κ, ω の算出方法

4. 点群の重ね合わせ結果

本章では、実際の観測データにより重ね合わせを行った結果を考察する。使用した二つの観測データの詳細を表1に示す。

表1 使用点群データの詳細

	観測機器			観測日	座標系
	メーカー	製品名	種別		
ローカル座標点群	株式会社アドイン研究所	OWL (アウル)	ハンディLiDAR	2022/08/05	(U,V,W)
地上座標点群	DJI	DJI mini2	小型UAV	2022/05/17	(X,Y,Z)

DJI mini2による地上座標点群データの作成には、SfM(三次元形状復元技術)ソフトウェア Agisoft Metashapeを用いた。使用した観測機器の画像を図5に、使用した点群データの鳥居点群と対象エリア・鳥居の位置を図6に示す。



OWL



DJI mini2

図5 使用した観測機器



ローカル座標点群 地上座標点群 対象エリア

図6 使用した点群データの鳥居点群と対象エリア

ローカル座標点群をトータルステーションで計測した地上基準点(X, Y, Z)により幾何補正することを試みた。しかしローカル座標点群では、ほとんどの地上基準点が欠落していたため、目視で石や階段などの目印となる対象物を対応点(図7)としてローカル座標値(U, V, W)を取得した。また、地上座標点群データから対応点の地上座標値(X, Y, Z)を取得した。

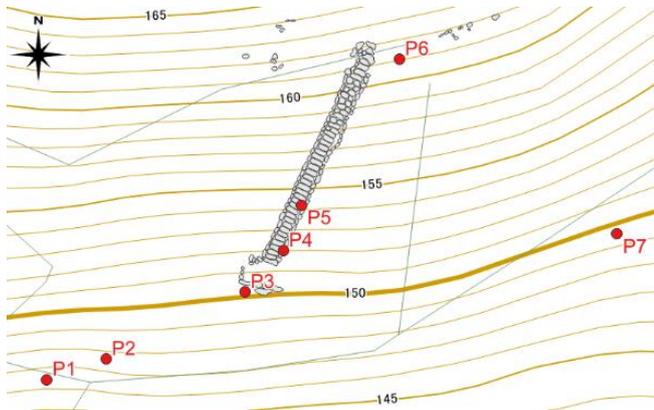


図7 対応点位置

繰り返し処理による深度画像マッチングの残差の変化を表2に示す。マッチングの平均残差が繰り返し処理回数に応じて徐々に減少する様子が確認できる。重ね合わせた林内の点群画像を図8に示す。

表2 マッチング残差の変化

処理回数	X残差(px)			Y残差(px)			Z残差(m)		
	平均	最大	最小	平均	最大	最小	平均	最大	最小
1	1.14	2	0	1.29	2	0	0.034	0.072	0.010
2	0.86	4	0	0.29	1	0	0.010	0.031	0.000
3	0.57	3	0	0.57	4	0	0.014	0.090	0.000
4	0.29	1	0	0.57	4	0	0.019	0.130	0.000
5	0.43	2	0	0.14	1	0	0.002	0.006	0.000
6	0.14	1	0	0.14	1	0	0.002	0.007	0.000

※ピクセルサイズは5cm



図8 重ね合わせた鳥居点群の画像

三次元アフィン変換と比較して、回転と原点移動による補正のため図8のように歪みが見られない。しかし、重ね合わせられた点群を確認すると、対象エリア外の点群の北側に位置する地表面はZ方向の位置ずれが確認された。

5. 考察

観測機器の異なる点群の重ね合わせ手法には、深度画像マッチングと原点移動・回転による幾何補正が有効であった。また、繰り返し処理を行うことによって重ね合わせの位置精度を高められ、点群の形状も変化しない。しかし、本手法における幾何補正ではローカル座標点群の回転に不足が生じた。回転が不足した原因として、点群全体からZ軸方向にバランスよく対応点を取得できなかったことが考えられる。

最後に、本研究の課題を述べる。まず、重ね合わせの精度は地上座標点群の精度に依存するため、広範囲かつ高精度な地上座標点群の作成が必要である。次に、任意の対応点で点群の重ね合わせは行えるが、精度検証用の地上基準点の設置が必要である。一方で、深度画像を高分解能化することで、深度画像マッチングにおいて、より細かいサブピクセルまでの重ね合わせが期待される。

参考文献

- 1) 鳥居厚志, 2016. 里山における竹林の拡大とその影響. 環境情報科学, 45 巻 3 号, p. 12-17
- 2) 杉野祐樹, 高木方隆, 2016. SfM と LiDAR を用いた三次元ボクセルモデルの構築. 高知工科大学学士論文, p. 3
- 3) 高木方隆, 2012. 国土を測る技術の基礎-地理空間情報技術者を目指す人のために- 改訂 第2版, 東京 公益社団法人 日本測量協会, p. 277-278
- 4) 吉井達樹, 松村直人, 2022. ICP アルゴリズムによる UAV-SfM 技術と航空レーザを組み合わせた樹高計測手法の精度検証. 森林計画誌, 55 巻 2 号, p. 95-101
- 5) 岡嶋杏奈, 高木方隆, 2021. UAV を用いた林内植生の成長量解析. 高知工科大学学士論文, p. 2