

柱状物体の点群処理に適した非剛体レジストレーション(第2報)

電気通信大学 ○松本 裕稀, 緑川 佳孝, 増田 宏

1. 序論

地上型レーザスキャナ (TLS) を用いて取得した 3 次元点群の利用が様々な分野で広がっている。対象物全体の点を取得するためには複数個所で計測する必要がある。複数個所で取得した点群では、座標系を一致させるために剛体レジストレーションを行うことが多い。しかし、TLS には装置の特性や計測対象の表面特性などに起因する系統誤差が存在する。そのため、大型構造物の大規模点群においては、剛体レジストレーションにより、計測対象の詳細な凹凸が消滅してしまうことも少なくない。

詳細な凹凸を保存するために、点群の位置合わせと変形を組み合わせた手法である非剛体レジストレーション手法が提案されている。しかし、大規模点群に対しては計算量が膨大となり、実用上問題となることが多い。

本研究では、対象を柱状物体に限定することで、TLS で取得した大規模点群にも適用できる非剛体レジストレーション手法を提案する。柱状物体の点群処理では、円柱の垂直軸に垂直な等間隔の平面により算出することが多い。そこで、本研究では図 1 のように、切断点を切断平面ごとに 2 次元的に非剛体レジストレーションすることを考える。

前報では、Z 軸方向と床面については、十分正確に位置合わせがなされていると仮定して、切断点ごとに非剛体レジストレーションを行う手法を示した [1]。しかしながら、剛体レジストレーション後の複数の点群間で Z 方向のずれが生じていた場合、切断点は、異なる切断平面で生成したこととなり、切断平面ごとの非剛体レジストレーションは妥当であるとは言えない。そこで本報では、そのようなずれも考慮することで、点群処理での適用に妥当な非剛体レジストレーション手法を提案する。また、TLS ではレーザの測定条件によっては凹凸が正確に取れていない箇所も存在し、そのような箇所を用いて非剛体レジストレーションを行うと詳細な凹凸が消滅しまう。本報では信頼性の低い切断点を除去することで、詳細な凹凸を保存する手法を提案する。

2. 手法の概要

本研究では、例題として、地上型レーザスキャナで取得した、樹木の点群を用いた。複数個所で取得した点群には、商用ソフトウェアを用いて剛体レジストレーションがなされているが、局所的にずれが存在するため、そのずれを修正する手法を考える。

まず、対象となる柱状物体を抽出し、Z 方向の補正を行う。Z 方向の補正は、地面の点群から推定した平面が一致するような変換を点群全体に行う。

次に、点群から円柱の中心軸に垂直になるような平面で、切断点を算出する。TLS で取得した点群は、レーザの方位角と仰角を

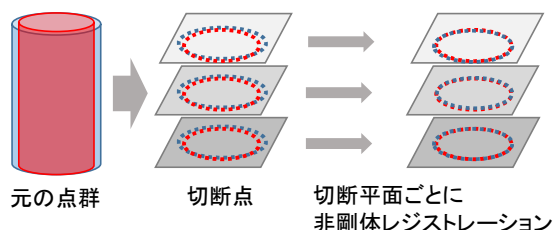


図 1 本研究の概要

主軸とした座標系に展開すると、格子状に規則的に点が並ぶ。そこで、隣接する格子状の点間距離が閾値以下であれば、エッジを生成して、ワイヤフレームを生成する。次に、生成されたワイヤフレームを円柱の中心軸に垂直な平面で切断し、ワイヤフレームとの交点を切断点として取得する。

切断点が算出されたら、信頼性の低い切断点を除去する。TLS では照射角度が大きい箇所では点が疎になり、凹凸が十分に再現されないため、そうした点群を取り除く。

次に、切断点から特徴点を算出し、対応点を決定する。切断点のそれぞれの点について、切断面上の近傍点を取り、2次元の主成分分析を行う。ここでは、第二主成分方向を局面の法線方向として算出する。この法線方向の変化率が閾値よりも大きい点を特徴点として算出する。

次に、それぞれの点群で算出された特徴点から、対応点を算出する。一方の切断点の特徴点から、もう一方の切断点の特徴点で最も近いものを算出する。それらのペアを仮の対応点とする。そして、それぞれの仮の対応点について、それらが一致するように、全体を平行移動する。次に、移動後の点群の特徴点が十分近くにあるペアの個数をカウントする。この操作を複数回繰り返し、対応点の個数が最大となる対応点の組み合わせを採用する。

最後に、求めた対応点を利用して、非剛体レジストレーションを行う。ここでは、対応点同士は一致し、他の切断点は、隣接する 3 点で構成される三角形の形状を保持するような制約を設けることで、座標を算出する。

3. Z 方向の補正

Z 方向の補正の概要を図 2 に示す。まず切断点に対して、RANSAC 法により円柱フィッティングを行い、中心軸を算出する。ここでは、中心軸が地面に対して垂直に近いものを樹木の点群として、算出する。次に、算出された中心軸から一定範囲の点群を抽出する。地面の点群を含むように、十分広い範囲で抽出するこ

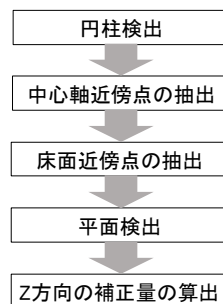


図 2 Z 方向の補正の概要

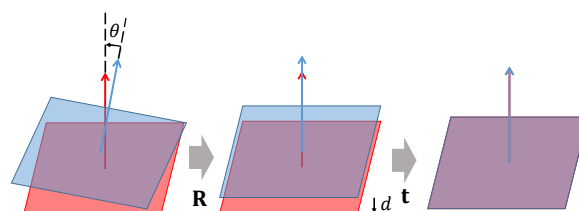


図 3 Z 方向の補正

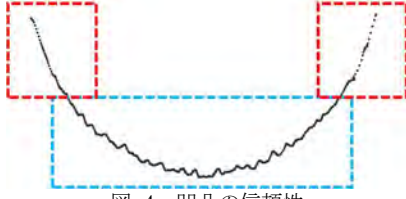


図 4 凹凸の信頼性

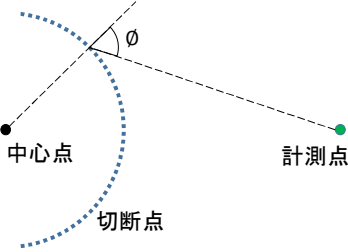


図 5 信頼性の低い点の除去

とにする。抽出された点群について、Z 座標の最小値から近い範囲を地面の点群として算出する。そして、その点群について、RANSAC 法の平面検出を行い、検出された平面に対して主成分分析により、平面の方程式を算出する。

平面の方程式が算出されたら、図 3 のように回転行列 \mathbf{R} および、並進ベクトル \mathbf{t} を算出する。ここで、矢印は法線ベクトルを表す。樹木の点群に対してこの変換を適用し Z 方向の補正とする。

4. 切断点の非剛体レジストレーション

4.1. 信頼性の低い切断点の除去

TLS では、照射角度によっては、点群密度の低下や計測精度の低下のために、凹凸が消滅することがある。図 4 において、青い枠で囲まれた部分はレーザーが垂直に近い状態で照射されており、凹凸を反映した点群が取得されている。しかし、赤い枠で囲まれた部分は、照射角度が大きく、点が疎で計測精度も低いため、凹凸が正確に取得できていない。このような、凹凸の消えた切断点を用いてレジストレーションを行うと、平均化により凹凸は消滅してしまう。そこで、図 5 のように、レーザーの方向と円柱面の法線との角度に閾値を設けることで、信頼性の低い切断点を除外する。ここで、図の中心点は切断点に RANSAC 法を適用して算出した円の中心点である。

4.2. 変形量の算出

本研究では、対応点同士は一致させ、そのほかの点は、隣接する 3 点で構成される三角形を保持するように変形することを考える。K 個の点群のそれぞれから算出された切断点集合のレジストレーションを考える。ここでは、k 番目の点群から算出された切断点の集合を $P_k = \{p_{k,i}\}$ ($i = 1, 2, \dots, n_k$) とし、レジストレーション後の切断点集合を $P'_k = \{p'_{k,i}\}$ とする。なお、ここでは、 P_1 を固定点とし、 $P'_1 = P_1$ とする。また、 $p_{u,i}$ と $p_{v,j}$ が対応点であることを (u, i, v, j) と記述し、すべての対応点の集合を Λ と書く。ここでは以下のような形状特徴量を定義する。

$$\mathbf{t}_{k,i} = \mathbf{p}_{k,i} - \frac{b\mathbf{p}_{k,i-1} + a\mathbf{p}_{k,i+1}}{a+b} \quad (1)$$

この形状特徴量が変形前後でできるだけ変化しないようにすることで、詳細な凹凸を保持する条件とできる。

対応点を一致させるための目的関数 \mathbf{E}_{corr} を以下のように定義する。

$$\mathbf{E}_{corr} = \sum_{(u,i,v,j) \in \Lambda} |p'_{u,i} - p'_{v,j}|^2 \quad (2)$$

次に、詳細な凹凸を保存するための目的関数 \mathbf{E}_{shape} を以下のように定義する。

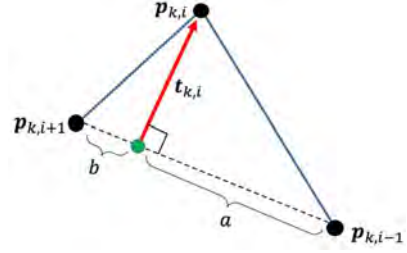


図 6 形状特徴量の定義

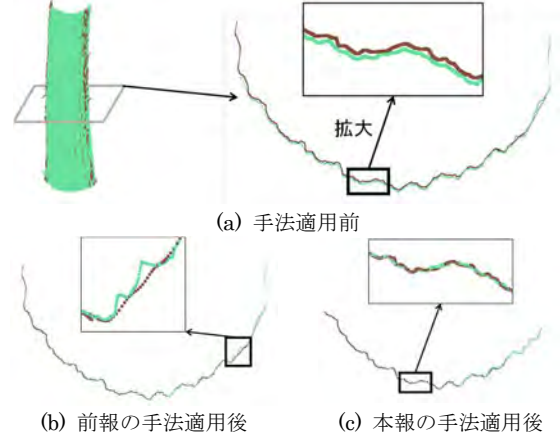


図 7 実験結果

$$\mathbf{E}_{shape} = \sum_{k=2}^K \sum_{i=1}^{n_k} |\mathbf{t}'_{k,i} - \mathbf{R}_{k,i} \mathbf{t}_{k,i}|^2 \quad (3)$$

ここで、 $\mathbf{R}_{k,i}$ は回転量を補正する回転行列である。

前報では、これら二つの関数の和を最小化するように変形量を算出した。しかし、点群がオーバーラップしていない個所については、形状が歪んでしまうという問題が生じる。そこで、全体の形状を保存するための目的関数 \mathbf{E}_{ex} を以下のように定義する。

$$\mathbf{E}_{ex} = \sum_{k=2}^K \sum_{i=1}^{n_k} |p'_{k,i} - p_{k,i}|^2 \quad (4)$$

切断点の座標は、以下の最適化式によって算出する。

$$\mathbf{E}_{shape} + \lambda \mathbf{E}_{corr} + \mu \mathbf{E}_{ex} \rightarrow \min \quad (5)$$

ここで、 λ と μ は定数である。 λ は 1 よりもはるかに大きな値とする。 μ は非常に小さい値とすることで、 \mathbf{E}_{ex} は例外的な場合にのみ作用する。本研究ではこの最適化式の解を、疎行列のコレスキー分解を用いることで、高速に算出する。

4.3. 非剛体レジストレーションの算出

2ヶ所から計測した樹木の点群に対して、本手法を適用した結果を図 7 に示す。前報の手法では、図 7 (b) のように、一方の切断点で凹凸が消滅したために、凹凸が一致しない個所が存在する。一方、信頼性の低い点群を用いないことで、図 7 (c) に示すように、妥当な非剛体レジストレーションが行えている。

5. 結言

本稿では、Z 方向のずれを補正することで、切断点の妥当な非剛体レジストレーション手法について検討した。また、レーザーキャナの照射角度を考慮することで、点群処理での使用に妥当な非剛体レジストレーション手法であることを確認した。今後は、複数の柱状物体を効率的に処理する手法を検討する予定である。

参考文献

[1] 松本裕稀, 緑川佳孝, 齋藤和人, 増田宏: 柱状物体の点群処理に適した非剛体レジストレーション, 精密工学会春季講演会 (2018)