

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

電気通信大学 ○松本 裕稀, 緑川 佳孝, 齋藤 和人, 増田 宏

Non-rigid Registration suitable for Point-Clouds processing of Pole-like Objects

The University of Electro-Communication: Hiroki MATSUMOTO, Yoshitaka MIDORIKAWA, Kazuto SAITO, Hiroshi MASUDA

TLS (Terrestrial Laser Scanner) is effective to detect deterioration of engineering facilities and infrastructures. Although the state-of-the-art laser scanners can detect small irregularities caused by deterioration, these irregularities often disappear due to registration errors when multiple point clouds are registered. Non-rigid registration is effective for this problem, but non-rigid registration requires an unacceptably large amount of calculation time. To solve this problem, we restrict objects to cylindrical objects and apply efficient non-rigid registration to section curves, which are useful to reconstruct detail cylindrical shapes. In our method, section curves are calculated from point-clouds, and then they are registered so that feature points coincide with each other and the shapes of section curves are preserved as much as possible.

Key words: Point-Clouds, Registration, Terrestrial Laser Scanner

1. 序論

近年, 地上型レーザスキャナ(TLS, Terrestrial Laser Scanner)の性能の向上により, 生産設備やインフラ設備の凹凸を検出することで, 劣化診断を効率化できることが期待されている。

生産設備の計測においては, 複数地点から点群を計測し, それらをレジストレーションによって位置合わせする必要がある。しかし, レジストレーションの誤差により, 劣化診断などで必要な凹凸がしばしば消失するため, 劣化診断では大きな弊害となる。

計測においては, 素材の特性やレーザの照射角度に依存して系統誤差が発生するため, 微細な凹凸を保存するレジストレーションを実現するには, 剛体レジストレーションでは不十分である。これまで, 形状変形を含んだ非剛体レジストレーションとしていくつかの手法が提案されてきたが, 大規模点群においては, 非線形最適化の計算に膨大な計算時間とメモリ量が必要となる。そのため, 測定の現場ではほとんど利用されてこなかった。

そこで, 本研究では, 対象物の形状を柱状物体に限定することで, 現実的な時間で非剛体レジストレーションを実現することを考える。柱状物体は, 燃焼炉, タンク, 電柱, 樹木など, 点群処理の応用として非常に一般的な形状であり, 適用範囲が広い。柱状物体の点群処理では, 中心軸に沿った切断面を用いて, 対象物の分析を行う手法が一般によく用いられてきた。そこで, 本研究では, 元の点群を直接にレジストレーションするのではなく, 点群から生成された切断線を基本的な単位として効率的な非剛体レジストレーションする手法を考える。

2. 手法の概要

本研究では, 入力として, 剛体レジストレーションを施された点群を考える。その際, Z 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する。

本研究では, 複数地点から計測された点群のそれぞれから切断線を算出し, それらの非剛体レジストレーションを行う。その際, 基準とする一つの点群を「固定点群」, それ以外の点群を「可動点群」と呼ぶものとする。

本手法においては, まず, 剛体レジストレーションされた点群をワイヤフレームに変換した後, 水平面で切断した切断線を生成する。次に, 複数の点群から生成された切断線を各水平面上で位置合わせを行う。位置合わせは, 切断線から特徴点を抽出した後, 特徴点の位置が一致し, 切断線の平均曲率をできるだけ保持するような変換を行うことで非剛体レジストレーションを実現する。

3. 断面の対応点の算出

3.1. 点群からの断面線の算出

TLS で取得された点群は, レーザの方位角と仰角を主軸とした格子上に規則正しく並ぶ。そこで, 隣接する格子上的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, 図 1 のようにワイヤフレームを水平面で切断して, 断面点の集合を取得する。算出された切断点は, 中心からの角度によってソートされ, 切断線は, ソートされた切断点を順次連結していくことで生成される。

図 2 は, 樹木を 6 地点から計測した点群に対して剛体レジストレーションを施した後, 算出された切断線を示している。この例では, 切断線に系統的なずれが存在していることがわかる。

3.2. 対応点の決定

生成された断面点の集合を 2 次元的に位置合わせするために, オーバーラップした点群について対応点を決定する。対応点は, 2 次元の切断面上で考える。まず, 図 3 のように, 切断線から各点の法線を算出する。次に算出された法線について, 隣接する点の法線の角度変化の大きい個所を特徴点とする。各点群から生成

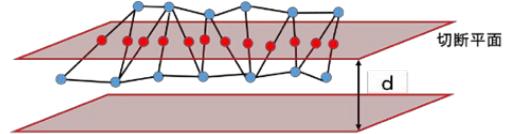


図 1 断面点の取得

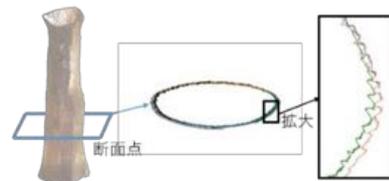


図 2 樹木のレジストレーション誤差

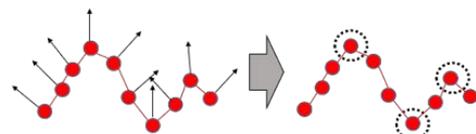
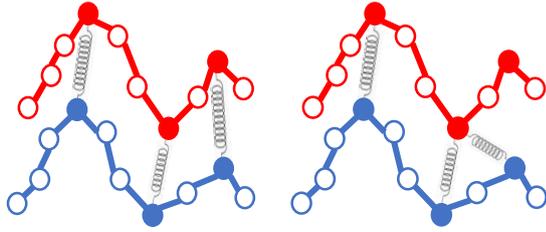


図 3 特徴点の算出



(a) 正しい特徴点对応 (b) 誤りを含む特徴点对応

図4 特徴点の抽出と対応点候補

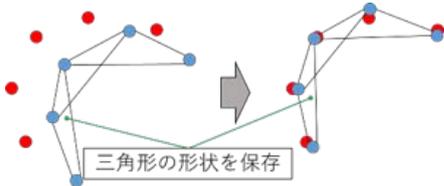


図5 隣接点との位置関係の保存

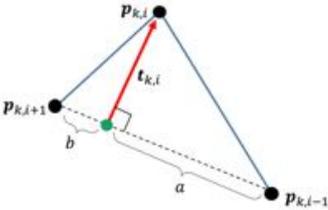


図6 形状特徴量 $t_{k,i}$ の定義

された切断線のそれぞれから特徴点を求め、ある特徴点からの距離が最も近い他の特徴点を対応点候補とする。

ここで、図4に示すように、対応点候補には誤った対応が含まれていることがある。そこで、誤った対応点を検出し、それらを除外する。まず、対応点を任意に2個選択し、それらが一致するように全体を平行移動する。次に、移動後の点群の対応点が十分近くにあるペアの個数をカウントする。この操作を多数回繰り返して、対応点の個数が最も多くなる対応点の組み合わせを採用する。

4. 断面線の非剛体レジストレーション

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。

本手法では、微細な凹凸の形状を保存するために、図5のように、隣接する3点で構成される三角形の形状を保存するための制約を考える。そのため、図6で定義される3角形の形状特徴量 $t_{k,i}$ を考え、変形後でもこの値が保持するようにする。 $t_{k,i}$ は、以下の式で表すことができる。

$$t_{k,i} = p_{k,i} - \frac{bp_{k,i-1} + ap_{k,i+1}}{a+b} \quad (1)$$

なお、レジストレーション後の形状特徴量を $t'_{k,i}$ とする。

ここで、 $t_{k,i}$ はベクトルであるため、非剛体レジストレーションでは、回転量についての補正も必要である。ここでは、回転量と平行移動量を別々に算出するものとし、各切断点での回転量と算出した後、平行移動量を算出する。

まず、形状特徴量の回転量を算出する。ここでは、図7に示す様に、対応点の形状特徴量 $t_{u,h}$ と $t_{v,i}$, $t_{u,j}$ と $t_{v,k}$ について考え、

それらのベクトルの方向を一致させるための $t_{u,h}$ と $t_{u,j}$ の回転量をそれぞれ $\theta_{u,h}$, $\theta_{u,j}$ とする。

対応点についての回転量が算出された後は、対応点の間にある断面点の回転量を求める。ここでは、図7の $t_{u,h}$ と $t_{u,j}$ の間にある点に関して、二つの対応点までの線分長さの比によって回転量を線形補間する。また、二つの対応点に挟まれていない端部については、距離による回転量の変化率を用いて、外挿によって回転量を算出する。

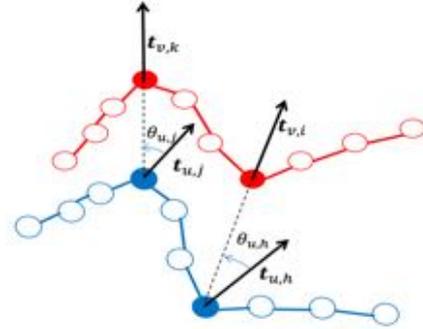


図7 形状特徴量の回転量の算出

次に、平行移動量を算出する。ここでは、平面上で $\theta_{k,i}$ 回転させる回転行列を $R_{k,i}$ とする。このとき、 K 個の点群から算出された切断点集合 $P_k = \{p_{k,i}\}$ ($k = 1, \dots, K$; $i = 1, \dots, n_k$) に関して、対応点の座標が一致し、元の切断線の形状をできる限り保存する点集合 P'_k ($k = 1, 2, \dots, K$) は以下の式で算出できる。

$$\sum_{k=2}^K \sum_{i=1}^{n_k} |t'_{k,i} - R_{k,i} t_{k,i}|^2 + \lambda \sum_{(u,i,v,j) \in \Lambda} |p'_{u,i} - p'_{v,j}|^2 \rightarrow \min \quad (2)$$

ここで、 λ は定数であり、十分に大きな数値を設定するものとする。本研究では、この最適化式を疎行列のコレスキー分解を用いて算出する。

5. 評価実験

評価のために、図8(a)に示すように、波長と振幅を変えた周期関数によって、断面線のサンプルデータを人工的に作成した。特徴点としては、凹凸の頂点を対応点として与えた。このデータに、式(2)を適用した結果を図8(b)に示す。赤色は固定点群、青色が可動点群である。この評価実験によって、対応点が正しく与えられるのであれば、本手法により、妥当な非線形レジストレーションが行えることがわかる。

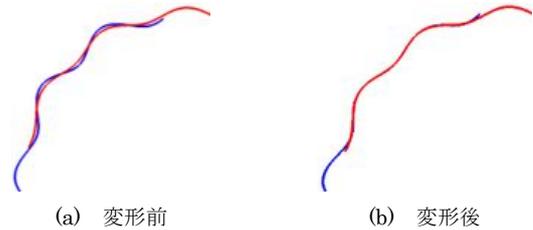


図8 評価実験

6. 結言

本稿では、柱状物体の断面点の微小な凹凸を保存するための非剛体レジストレーション手法を提案した。また、人工的に作成した断面線を用いた評価から、本手法により、妥当なレジストレーション結果が得られることを確認した。今後は、対応点の算出手法の実装と、実データによる評価を行っていく予定である。

参考文献

[1]松本裕稀, 篠崎有希, 齋藤和人, 増田宏: 柱状物体に適した TLS 点群のレジストレーション, 精密工学会秋季講演会(2017)