

柱状物体に適した TLS 点群のレジストレーション

電気通信大学 ○松本 裕稀, 篠崎 有希, 齋藤 和人, 増田 宏

Efficient Non-Rigid Registration for Large-Scale Point-Clouds of Cylindrical Facilities

The University of Electro-Communications: Hiroki MATSUMOTO, Yuki SHINOZAKI, Kazuto SAITO, Hiroshi MASUDA

There is a great interest in the efficiency of maintenance work for infrastructures in order to reduce cost and time. TLS (Terrestrial Laser Scanner) is promising for improving efficiency of maintenance tasks, because it can acquire high-density point-clouds in a wide range in a short time. However, point-clouds have relatively large registration errors when they are measured at multiple positions. Errors of point-clouds are a serious problem, because the faithful representation of irregularity on object surfaces is essentially important for deterioration diagnosis. Although non-rigid registration methods have been proposed for precise registration, but it takes a very long calculation time to apply registration to large-scale point-clouds. In this research, we discuss methods for non-rigid registration that maintains small irregularity on object surfaces. Since many large-scale infrastructures, such as storage tanks and furnaces, are approximately cylindrical shapes, we develop efficient registration methods suitable for cylindrical large-scale facilities.

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

1. 序論

インフラ設備や生産設備などの老朽化が進み、保守に要するコストが増大しているためことから、保守作業の効率化に大きな関心を持たれている。地上型レーザスキャナ (TLS, Terrestrial Laser Scanner) は、広範囲の高密度点群を短時間で取得できるため、保守点検業務を効率化する手段として有望である。

近年、TLS の性能が向上し、壁面などの比較的小さい凹凸も検出できるようになった。図 1 に、我々が行った計測実験の結果を示す。この実験では、Focus3D X330 (FARO) と P40 (Leica-Geosystems) を用いて、スキャナからの距離を変えながら、白色の平面を計測したときの平面からのばらつきを求めた。どちらのケースでもばらつきが小さく抑えられているため、計測条件が良好であれば、数mm程度の凹凸は十分に検出できると考えられる。

しかしながら、TLS では、ばらつきよりも大きい系統誤差が存在し、また、複数箇所から計測された点群ではレジストレーション誤差も相対的に大きい。我々の評価実験では、同一の壁面を複数地点から計測した点群においては、レジストレーション後に、図 2 のような 3 mm から 5 mm 程度の系統的なずれが発生した。劣化診断では、物体表面の凹凸の正確な記述が必要となるので、そうした誤差は大きな弊害となる。

劣化診断などで表面の微細な凹凸の評価を行うには、凹凸を保存するようなレジストレーションが必要である。微小な凹凸を位置合わせする目的で、非剛体変換によるレジストレーション手法も提案されているが、非常に計算時間がかかり、大規模点群に適用することは難しい。そこで本研究では、燃焼炉や貯蔵タンクなどの柱状物体を対象を限定することで、微小な凹凸を保存するレジストレーションを高速に行う手法を検討する。

2. 手法の概要

本研究では、柱状の構造物として、地上型レーザスキャナで取得した燃焼炉の点群を例題として用いる。入力データは、複数箇所から計測され、ターゲットを用いたレジストレーションがなされている。また、例題の対象物は耐火煉瓦で作られており、劣化が進んでいるために、壁面には様々なサイズの凹凸が存在する。

本手法では一つのスキャンの点群を固定して基準とし、他の各スキャンの点群をそれぞれ動かして位置合わせの補正を行うものとする。また、凹凸の保存を目的とするので、絶対的な位置については多少のずれは許容するものとする。ここでは基準とする点群を「固定点群」、他の点群を「可動点群」と呼ぶものとする。

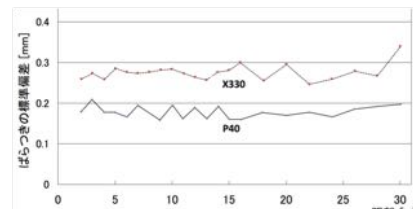


図 1 レーザスキャナのばらつき



図 2 劣化発生部分の点群における系統的な誤差

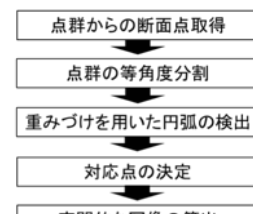


図 3 手法の概要

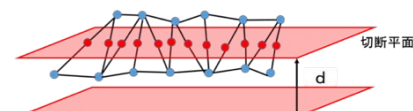


図 4 切断平面付近の拡大図

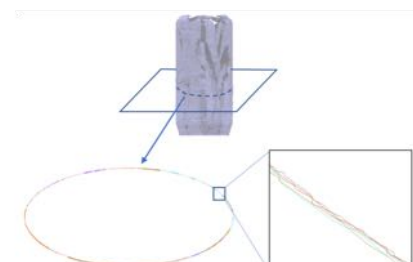


図 5 断面の生成

図3に手法の概要を示す。本手法の基本的な考え方について説明する。まず、点群をワイヤフレームに変換し、柱状物体の中心軸に垂直な複数の平面で切断して、断面集合を生成する。

ここで、固定点群を P_f 、可動点群を P_m とするとき、それらから生成された断面集合を S_f, S_m とする。次に断面集合から対応点の検出を行い、対応点のペア (Q_f, Q_m) を算出する。これらに対して、空間的な写像 $F: Q_m \rightarrow Q_f$ を算出する。最終的に、可動点群は、 $F: P_m \rightarrow P'_m$ に写像され、 P'_m を補正された可動点とする。

3. 断面の対応点の算出

3.1. 点群からの断面計算

まず、点群から断面点を抽出する。TLS で取得された点群においては、点群は規則正しく格子状に並ぶため、隣接する点間の距離が閾値以下であれば、点間にエッジを生成し、ワイヤフレームを生成する(図4)。

次に、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。ここでは、複数地点で取得された点群に関して、垂直方向と地面の位置は正確に位置合わせされているものと仮定し、すべての点群を同一の水平面で切断する。図5に、12個の点群を同一の水平面で切断した点を色分けして重ね合わせた結果を示す。この図に示されているように、切断点を連結した線分には、点群ごとに系統的なずれが存在している。

3.2. 対応点の算出

円柱状の構造物の切断面は近似的に円になるが、実際にはレーザスキャナには系統誤差があり、系統誤差の発生の方は計測位置に依存するため、点群ごとに微妙に形状が異なる。そこで、全体を剛体変換で位置合わせするのではなく、区分的に位置合わせを行うことを考える。

ここでは、近似的に円になる断面を等角度に区切り(図6)、特定の区間の点群に大きな重みをつけて、最小二乗法を用いて円当てはめを行う。算出した円を用いることで、区間内の点にだけよく合うような円が得られる。固定点群と可動点群で得られた円の半径を用い、移動量を計算することで、完全な円ではない場合でもより正確な対応点が決定できる。

ここで、 i 番目の区間に対して固定点群で求めた円弧の中心点を c_i 、半径を r_i とする。次に、 c_i を用いて可動点群で求めた円弧の半径を r'_i とおくと、半径方向移動量は下式で算出できる。

$$\Delta r_i = r'_i - r_i \quad (1)$$

この移動量だけ、可動点群の各点を半径方向に移動させる。一方、円弧の回転によるずれを補正するために、区間内の点を微小距離 $\Delta \theta$ ずつ回転し、最もよく合う位置を算出する。ここでは、一方の点を連結させたワイヤフレームを作成し、もう一方の点群からの距離の和が最小となる角度を求める。図7に区分的に位置合わせした結果を示す。最後に、対応点のペア (Q_f, Q_m) を算出する。

4. 空間的な写像の算出

空間的な写像の算出には、Floater らが提案した Mean Value Coordinates[1] を用いる。この手法は、点群を閉じたメッシュで囲み、点群の各座標 q_i を制御メッシュの構成点 $\{c_i\}$ ($i \in \Lambda$) の線形和として、以下のように表す。

$$q_i = \sum_{j \in \Lambda} w_{ij} c_j \quad (2)$$

Floater らの変形法では、図8に示すように、制御メッシュを $\{c_i\}$ から $\{c'_i\}$ に変更する。 $\{q_i\}$ は $\{c_i\}$ の線形結合なので、 $\{c_i\}$ に対応する $\{q_i\}$ に移動する。ただし本手法の場合には、図9に示すように、対応点のペア (Q_f, Q_m) に関して、 Q_m を Q_f に移動させるような制御メッシュ $\{c'_i\}$ を算出する逆問題となる。逆問題の場合には、計算が不安定になることが知られているので、ここでは、以下の最適化式によって制御メッシュを算出する[2]。

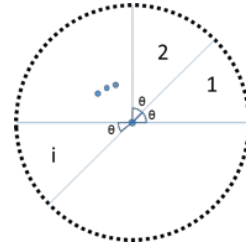


図6 等角度の区分

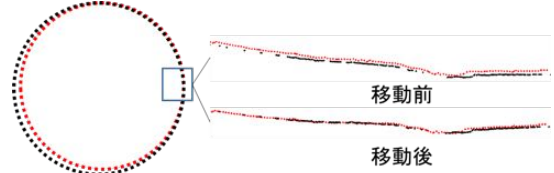


図7 円の移動前後の変化

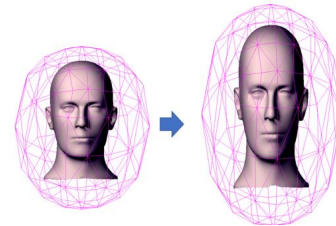


図8 Mean Value Coordinate

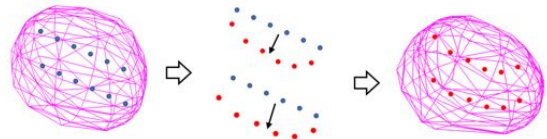


図9 対応点に変形させる制御メッシュ

$$\sum_i (q_i - \sum_{j \in \Lambda} w_{ij} c_j)^2 + \lambda \sum_{j \in \Lambda} L(c_j)^2 \rightarrow \min \quad (3)$$

$L(c_j)$ は制御メッシュの点 c_j での離散平均曲率、 λ は定数である。

大規模点の非剛体変換には非常に多くの計算時間がかかるため、本研究では、点群から切断点を算出し、それらの点を代表点として位置合わせを行うことで、高速なレジストレーションを実現する。計算には、制御メッシュの構成点の座標を変数とする線形システムを解けばよいから、計算の高速化が可能である。また、計測した高密度点群を直接利用すると線形システムが非正則になる場合があるが、制御メッシュを仲介させて計算することで、安定的に解を算出することができる。制御メッシュは、点群を囲む OBB (Oriented Bounding Box) を再分割することで計算する [2]。切断点の対応点に適合した制御メッシュを計算することで、計測で得られた点群を移動させることで、点群の位置合わせを行う。

5. まとめ

本稿では、柱状物体を対象とした、微小な凹凸を保存するレジストレーション手法を提案した。本研究では、柱状物体の断面点を生成し、それらを位置合わせする手法を示した。今後は、空間的な写像による位置合わせの実装と評価を行っていく予定である。

参考文献

- [1] M. S. Floater, G. Kòs, M. Reimers: Mean value coordinates in 3D, Computer Aided Geometric Design 22.1 (2005) 623-631
- [2] H. Masuda: Feature-preserving Deformation for Assembly Models, Computer-Aided Design & Applications 4.1-4 (2007) 311-320