

平面抽出に基づく大規模点群データのレジストレーション

東京大学 ○山中佑治, 増田宏

Registration of Large-Scale Point-Clouds using Planar Surface Extraction

The University of Tokyo, Yuji Yamanaka, Hiroshi Masuda

To construct 3D models of large facilities, it is necessary to capture their point sets from multiple positions using laser scanners. Therefore, it is required to merge several point sets by transforming the coordinates of captured points. Many registration methods have been developed so far, but existing methods cannot handle hundreds of millions of points in reasonable calculation time. In this paper, we propose a new registration method for large-scale noisy point-clouds by detecting planes in point-clouds.

1. はじめに

近年、点群計測装置が飛躍的に進歩しており、大型設備の計測を容易に行える状況になりつつある。そのため、設備の3Dモデルを作成して、メンテナンスや解体のシミュレーションを短期間・低コストで行うことが期待されている。

3Dモデルを作成する場合、複数の視点から計測を行い、それらの点群データを統合する処理が必要となる。この処理をレジストレーションという。通常、レジストレーションは点群として構成される形状データ間の、最近傍頂点間距離の二乗和を反復計算により最小化するフレームワーク (Iterative Closest Point アルゴリズム[1]) により実装され、その実装方法も目的に応じて様々である。

しかし、こうした手法を大型設備から計測された点群データのレジストレーションに適用する場合、計算コストが膨大であり、非常に長時間の計算時間が必要となる。また、曲率や色情報などの特徴量を抽出しレジストレーションを行う手法も提案されているが、安価なPCでは数千万から数億点規模の大規模点群の処理は容易ではない。

そのため現状では、計測対象物にマーカを張り、そのマーカ位置を各計測データで指定することでレジストレーションが実現されている。しかし、高所にマーカを張る場合、足場の設置やマーカ位置の設定に時間がかかってしまうという問題がある。

そこで本稿では、対象物をプラント施設や生産設備として、以下のレジストレーション手法を考える。

- 大規模点群に適用できる。
- 現実的な時間で処理できる。
- 十分な精度で位置決めできる。

そのために、以下のアプローチを採用する。

- 点群を球面座標によってハイトフィールドに展開する。
- 平面要素を抽出する (計測された点群データは平面形状に由来する部分が多い)。
- 複数の形状データについて、平面要素の一致する組み合わせを調べて、最適な変換行列を選択する。

2. レジストレーション手法

2.1 手法の概要

本手法では、位相差方式レーザスキャナにより計測された数千万点の大規模点群データを対象とする。本手法の処理の流れを図1に示す。異なる位置から計測された点群データを X , Y とする。まず、前処理として点群データ X , Y からメッシュモデルを生成し、それらのメッシュモデルに平滑化処理と異常値の除去を施す。次に、メッシュモデルを分割して $X = \bigcup X_i$, $Y = \bigcup Y_i$ とし、 $\{X_i\}$, $\{Y_i\}$ のそれぞれに対して平面要素の抽出を行う。ここで、点群データ X , Y から抽出された平面集合を、それぞれ P^X , P^Y とする。そして、この平面要素に基づいてレジストレーションを行う。そ

の際、最適な変換行列の算定にはデプスバッファを用いた最適解探索により、効率的な処理を実現する。

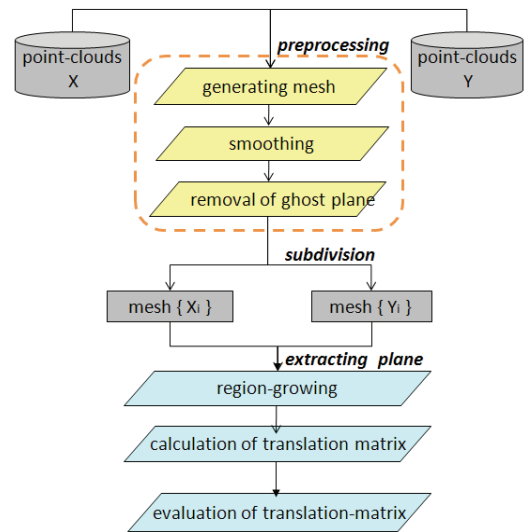


図1 提案手法の概要

2.2 前処理

位相差方式レーザスキャナはヘッドが2軸で回転するため、各計測点は重なり合うことなく球面上に投影可能である。計測装置の緯度と経度に相当する回転角を x - y 座標に対応させることにより、平面上に展開できる。メッシュモデルは、この平面上での隣接関係を用いて作成する。

生成されたメッシュには、5mm~10mmの大きな誤差が含まれている。このような点群データから平面を自動抽出するためには、適切な平滑化が不可欠である。そこで本稿では、誤差分布にローレンツ分布を想定したストリーミング型の平滑化手法[2]を用いる。

また、計測データには、レーザ光が物体の境界部で分断されることにより発生する異常値が多く含まれている。こういった異常値も前処理で除去する。

2.3 平面要素の抽出

大量の点群から生成されたメッシュモデルは大容量なので、そのままではメモリの容量を超える恐れがある。そこで、メッシュモデルをいくつかのモデルに分割する。そして、分割化されたメッシュモデルに対して領域成長法により、点群を同一の曲面式 (平面式) を持つ集合に分類し、平面要素の抽出を行う。また、ここでいう平面要素とは、平面領域に存在する頂点数、平面の面積、平面上の一点の xyz 座標値、平面の法線ベクトルである。

2.4 変換行列の算出

剛体変換行列の算出は、形状データ間で対応する平面を探索し、対応面を用いて算出する。ここでは、探索に用いる平面数を剛体変換行列の算定に最低限必要な平面数である3平面とする。但し、交点を持つ3平面を用いるものとする。

ただし、二つの頂点集合から得られる平面の組み合わせは膨大であり、そのすべてを調べるには膨大な計算コストを必要とする。そこで、大規模設備を対象とした計測では常に床面が計測されることから、その情報を利用する。さらに、面積の大きい平面を優先的に選ぶことで探索数を限定する。

床面の特徴として以下の2点が挙げられる。これらの特徴を持つ平面は床面であるという前提条件を付与する。

- ・ 床面は他の部材と比べ、特に大きな面積を持つ。
- ・ 法線ベクトルの z 軸成分が1に近い値となる。

このとき、変換行列は以下の手順で算定することができる。

- (1) 平面集合 P^y から床面と他の2平面を選択する。2平面の選択では、面積の大きい平面を優先する。
- (2) 選択した3平面間のなす角を求める。
- (3) (2)と同じなす角の組み合わせを持つ3平面を平面集合 P^x から探索し、対応平面とする。
- (4) 対応面を用いて変換行列を算定する。
- (5) 上記操作を異なる3平面の組み合わせに対して行う。

2.5 最適な変換行列の探索

本手法では対応面の探索を限定しているが、それでも、非常に多数の組み合わせが対応面候補として算出され、そのそれぞれで変換行列が算出される。そのため、計算された変換行列を評価し、レジストレーションに最も相応しい変換行列を推定する必要がある。

そこで本稿では、デプスマップに基づいた適合性検査を行い、最適な変換行列を推定する。デプスマップとは視点から対象物までの距離が画素ごとに格納されたデータである。最適な変換行列の推定処理は以下を行う。

- (1) メッシュモデル X 、 Y からデプスマップ Z_x 、 Z_y を作成する。
- (2) Z_y から離散的に頂点を m 個選択し、 xyz 座標で表す。
- (3) 選択した m 個の頂点に対し、剛体変換行列を乗じる。
- (4) 剛体変換を施した頂点のデプスマップ $Z_{y'}$ を作成する。
- (5) デプスマップ Z_x と $Z_{y'}$ の画素 (i, j) に格納されている奥行き値を、それぞれ d_{ij} 、 d_{ij}' とする。
- (6) 奥行き値 d_{ij} と奥行き値 d_{ij}' が以下の式を満たすかを検査する。 δ は閾値とする。

$$d_{ij} - d_{ij}' < \delta \quad \dots \quad (i)$$

- (7) (1)から(6)の操作を 2.4 で求めた剛体変換行列の数だけ行い、式(i)を満たさない画素の個数が最少となる時の変換行列を最尤な解とする。

式(i)を満たさない場合、変換後の点がメッシュモデル X の計測地点から見て手前に存在している。そのような点群が計測されることはありえないので、その変換は矛盾しているといえる。 m 個の頂点に対して(5)(6)の操作を行い、矛盾した回数を記録する。

本手法では同一の画素に格納されている距離の差を逐次的に計算するため、計算コストは $O(n)$ である。 n は離散的に選択した頂点数である。このことから、剛体変換行列の高速な評価が可能となるといえる。

3. 評価実験

本手法の計算時間と精度を検証するため、異なる視点から計測された点群データに対して、レジストレーションを行った。対象とした点群データはそれぞれ 11,033,017 頂点、10,066,083 頂点である。本手法との比較のため、従来手法(マーカを用いた位置合わせ)でレジストレーションを行う

方法も試みた。以下に実験結果を示す。

計算時間：実験では、12,999,872 万通りの平面の組み合わせから最適な剛体変換行列が算定された。この処理に要した計算時間を 2.4GHz の Quad Core CPU を用いて計測したところ、対応平面の探索から最適な剛体変換行列の算定まで CPU Time で約 7 分 30 秒であった。このことは生産設備のモデリングには、現実的な計算時間であると考えられる。この処理は従来の ICP に比べて圧倒的に高速である。

位置合わせ精度：図 3 は本手法でレジストレーションした結果である。図 3 に示したモデルを見やすいように加工したモデルを図 4 (下図)に示す。同様に、マーカを用いたレジストレーション結果(平均誤差 10.4mm)を加工したモデルを図 4 (上図)に示す。図 4 より、本手法が従来手法と同様に適切にレジストレーションが行われていることが分かる。したがって、本手法の位置合わせ精度は充分であると考えられる。

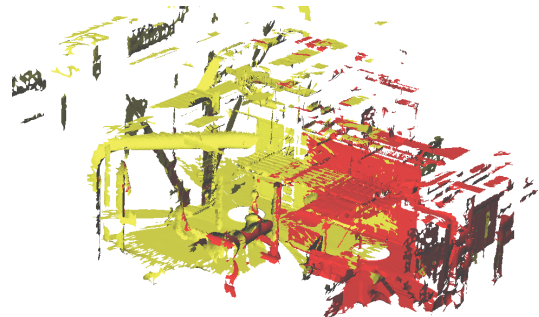


図 3. 本手法によるレジストレーションの結果

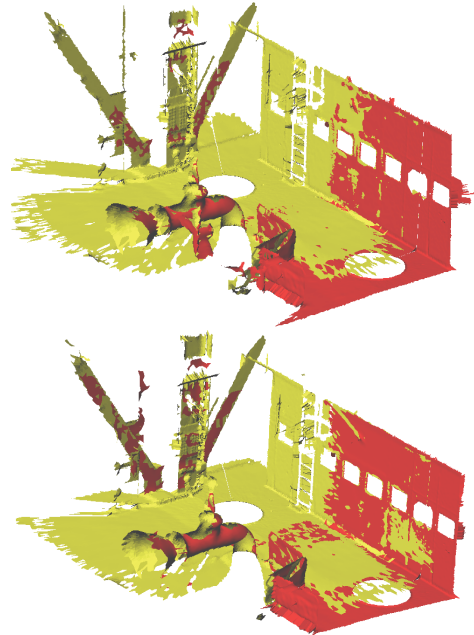


図 4 従来手法 (上図) と本手法 (下図) の比較

4. まとめ

本稿では、位相差方式レーザスキャナにより取得された大規模点群データに対して、本手法を適用し、現実的な時間で精度良くレジストレーションできることを示した。今後は、対応する領域の探索に平面以外の幾何形状を利用することで短時間でのレジストレーションを実現する予定である。

参考文献

- [1] P.J. Besl and N.D.Mckay, A method for registration of 3-D shapes. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 14(2):239-256, (1992).
- [2] 既設プラントモデリングのための点群データ平滑化と曲面生成, 精密工学会秋季大会講演論文集, 増田宏, 村上健治, 藤井智, (2007).