

隠面を考慮したマッチングによる三次元点群レジストレーションの精度向上

山口 農乃

指導教員：鈴木 拓央

1 はじめに

現在日本では少子高齢化が進む中で QOL 向上や労働力確保などを目的にロボットの活用が推進されている [1]. 分野の 1 つに衛生管理上必要なタスクであるトイレ清掃があり, ロボットが便器の位置姿勢を推定する技術が必要となる.

精密な位置姿勢推定の手法としては物体の形状を三次元点群 (三次元空間上の点の集合) で表現し, 物品と作業環境の三次元点群データに対しレジストレーション (位置合わせ) を施すことで点群の位置姿勢に関する変換パラメータが得ることが挙げられる.

代表的なレジストレーション手法の Iterative Closest Point (ICP) [2] では 2 つの点群, ソース点群とターゲット点群の点を比較して最近傍の点同士をマッチングさせ, 現在の対応付けから変換パラメータを推定する試行を誤差が収束するまで反復する. レジストレーションの初期状態で本来マッチングすべきでない点同士が近傍であると局所解に陥る恐れがある. 特にロボットのための物品の位置姿勢推定の問題では, 物品の点群モデルを作成する際に様々な角度から見たデータを統合しておく様々な物品の姿勢に対応できるのに対し, 実問題として単一視点で点群情報を取得した場合, 点群モデルと環境で取得した物品の点群との間で点の数に開きが生まれるため, 対応付け決定の基準が必要となる.

先行研究 [3] ではモデルの各点においてセンサと点を結ぶベクトルと点の面法線ベクトルのなす角の角度値の場合分けで隠面であるか判定している. これにより凸物体について判定可能となったものの, 便器のような物品は凸物体でないため, 別の方策を考える必要がある.

そこで点近傍に限らずモデルの各点とセンサの間に他の点が存在するか探索し, 隠面にあたる点をマッチングの考慮から外す工程を付加することで便器のレジストレーションでの誤マッチングを減らせるのではないかと考えた. 本稿では隠面を考慮したマッチングに基づくレジストレーション手法を提案する.

2 提案手法

2.1 レジストレーションの全体構成

ソース点群 S として物品の点群モデル, ターゲット点群 T として実際の作業時に環境から得られた物品の点群が与えられるとする. 前処理として, 2 つの点群の密度が同程度となるようそれぞれ各辺の長さが l_x, l_y, l_z のボクセル (直方体形状の小領域) で分割し各ボクセルごとに含まれる点の集合の重心に代表とする点を 1 個配置しダウンサンプリングを施す. 次に局所解を避けるために点群同士を RANSAC で初期位置合わせを行い大まかな推定変換パラメータを得る. 続いて ICP により精密な位置合わせを行い推定変換パラメータを得る. 精密位置合わせのマッチング部分では試行ごとに S に含まれる点がセンサの基準位置 (p_x, p_y, p_z) から見て隠面にあたるか判定し, 隠面にあたる場合は対応する点の探索を打ち切る. 推定結果の変換パラメータによって変換した S を T と比較し, 二乗誤差平均値が目標値以下である場合, 求めた変換パラメータを最終推定結果とする.

2.2 初期位置合わせ

S と T それぞれで各点の法線ベクトルを求め FPFH 特徴量により特徴付けし, ターゲット点群からランダムに取得した点と対応する点をソース点群の中から選択し, 仮の対応とする. 定めた仮の対応に基づき初期位置合わせでの推定変換パラメータ R_{RANSAC} を求める.

2.3 精密位置合わせ

ICP の内部で隠面を考慮してマッチングする手法の流れを図 1 に示す. S に含まれる各点 s_i について点同士のマッチングを決定する際, 試行ごとに S の現時点での推定位置姿勢でセンサの位置から見えるかレイ・トラバース法 [4] により判定する. 隠面にあたらぬ場合は T に含まれる点のうち s_i から最も近い距離に位置する点 t_j を取り出し, 距離が閾値 d [m] 以下である場合に対応付けを登録する. t_j から最も近い距離に位置する S に含まれる点が s_i である場合は対応付けの集合 C_1 に, s_i 以外の点である場合は対応付けの集合 C_2 にペアを登録する. C_1 の対応付けを基に変換パラメータを推定 R_{ICP} を求める.

精密位置合わせで誤差を目標値まで下げられなくなった場合, 位置姿勢の変換パラメータの推定方法に変更を加え, 利用する対応付けについて試行回数が最大値の半分以下である場合は C_2 を利用し, それ以外では C_1 を利用する. これは局所解を抜け出すため, センサで観測できる位置にある点とされているのに対応する点がない状態を不自然とし, 強制的にパラメータ推定に取り入れるものである. $R_{\text{RANSAC}}, R_{\text{ICP}}$ の積を位置合わせ全体をまとめた最終的な推定結果とする.

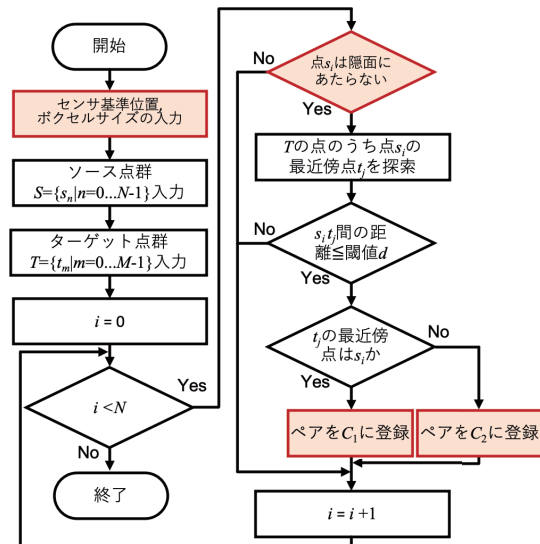


図 1 隠面を考慮したマッチングの流れ

3 実験

本項では 2 つの実験を示す. まず提案手法の効果を簡易的な状況で確認した後, 便器に適用し効果を検証する.

3.1 実験1

3.1.1 実験目的

提案手法のうち隠面を考慮したマッチングに焦点を当て、提案したマッチング手法によりレジストレーションの精度が向上するか、マッチング結果を視覚的に確認する。

3.1.2 実験方法

ソース点群として1辺0.05[m]の立方体状の三次元点群データを作成した。立方体の縦、横、高さ方向はそれぞれ点2個で表現するものとし、合計8個で構成されたデータを作成した。具体的な値としては $\{(0, 0, 0.10), (0, 0, 0.15), (0, 0.05, 0.10), (0, 0.05, 0.15), (0.05, 0, 0.10), (0.05, 0, 0.15), (0.05, 0.05, 0.10), (0.05, 0.05, 0.15)\}$ を設定した。ボクセルグリッドの辺の長さを $l_x = l_y = l_z = 0.05$ とした。センサの基準位置は原点として $(p_x, p_y, p_z) = (0, 0, 0)$ とした。このような状態でセンサで立方体の三次元形状を取得した場合、立方体の面の1つにセンサを向けることになり理想的には8個の点のうち4個の点が取得できる。そこでターゲット点群として4点 $\{(0, 0, 0.13), (0, 0.05, 0.13), (0.05, 0, 0.13), (0.05, 0.05, 0.13)\}$ を設定し、従来手法(クロスチェック付きICP)と提案手法の2通りでレジストレーションを行った。

3.1.3 実験結果

レジストレーション結果の対応付けを図2, 3に示す。

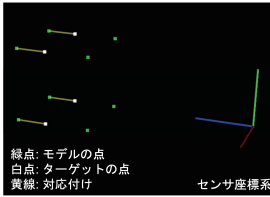


図2 対応付け結果(従来手法)

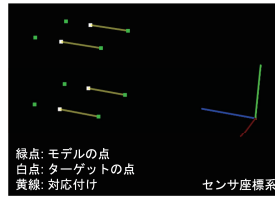


図3 対応付け結果(提案手法)

3.1.4 考察

図2より、従来手法ではモデルの点はセンサから見て奥側の4点とマッチングされた。この推定結果が真値と一致する場合、マッチングされなかった点、即ちセンサから見て手前側の4点にあたる物体の面は奥側の4点を隠蔽するため奥側の点の深度情報は取得できないと推測され、推定結果と前提として与えた点群の形状情報の間に齟齬が生まれる。一方で図3より、提案手法ではセンサから見て手前側の4点とマッチングされ、同様の齟齬は生まれていない。

3.2 実験2

3.2.1 実験目的

便器を対象にレジストレーションを実施し提案手法の効果を検証する。効果検証の指標にはソース点群の点とターゲット点群の点の間の二乗誤差を利用する。

3.2.2 実験方法

便器を対象とした効果検証を実施する。便器の点群モデルをソース点群、トイレの環境から取得した点群(環境点群)より切り出した便器にあたる点群をターゲット点群とし、従来手法である隠面を考慮せずマッチングするICP、提案手法の隠面を考慮してマッチングするICPでそれぞれ10回ずつ変換パラメータを推定した。マッチングを認める2点間の最大距離は $d = 0.1$ [m]とした。実験で利用した点群モデルを図4に示す。便器清掃に

おいては便器及び清掃用具の一般的な大きさから1[cm]程度の並進のずれは許容されるものと想定する。よって位置姿勢推定結果の二乗誤差が 1.0×10^{-4} [m²]以下とすることを旨とする。

3.2.3 実験結果

提案手法によるレジストレーションの結果例を図5に示す。また各手法の推定結果の二乗誤差の平均及び標準偏差を表1に示す。

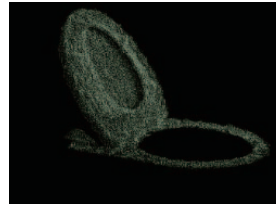


図4 便器モデル



図5 レジストレーション結果例

表1 モデル点群を基準とした二乗誤差の平均と標準偏差

評価指標	従来手法	提案手法
平均 [m ²]	3.26×10^{-4}	3.01×10^{-4}
標準偏差 [m ²]	8.63×10^{-5}	4.79×10^{-5}

3.2.4 考察

従来手法と比較して提案手法はモデル点群基準の二乗誤差が低減された。ただ提案手法では目標とする二乗誤差 1.0×10^{-4} [m²]以下を達成することはできなかった。可能性の1つとして、隠面判定の結果特定の点がセンサから見ると想定されたとしても実際には三次元計測自体に計測誤差を含むため深度情報を取得できるとは限らない。隠面だけでなくセンサの特性を含め計測誤差を考慮する部分を改良することが考えられる。

4 おわりに

本研究では隠面を考慮したマッチングによってレジストレーションの精度向上を図った。三次元点群モデルに含まれる点のうちセンサから見て隠面にあたる点をマッチングの考慮から外したことで誤マッチングを低減させ、推定変換パラメータと点群を取得した際の物品とセンサの位置関係について整合性をとることができた。今後の展開として隠面を考慮したレジストレーションに基づき物品を特定の視点から計測した場合にレジストレーションが成功する確率を推定する機能を開発することでロボットの行動計画に役立てることが考えられる。

参考文献

- [1] 日本経済再生本部. “ロボット新戦略”, 2015, https://www.kantei.go.jp/jp/singi/keizaisaisei/pdf/robot_honbun.150210.pdf, (参照 2021-11-18).
- [2] P.J. Besl, N.D. McKay. “A Method for Registration of 3-D Shapes”, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, Vol. 14, No. 2, p.239-256.
- [3] 三上 脩, 神谷 好承, 関 啓明, 正津 正利. “3次元点群に基づくロボットハンドリング技術”, 精密工学会学術講演会講演論文集, 2014, 2014A 巻, 2014年度精密工学会秋季大会, セッション ID B03, p. 71-72.
- [4] J. Amanatides, A. Woo. “A Fast Voxel Traversal Algorithm for Ray Tracing,” 1987, Proceedings of EuroGraphics '87.