

LiDAR の反射強度及び溜水の計測情報を利用した 大域的点群位置合わせによる SLAM の性能向上

Performance Improvement of SLAM Based on Global Registration Using LiDAR Intensity and measurement data of puddle

学 片岡 良介 (中央大学) 〇学 田所 功 (中央大学)
正 池 勇勲 (北陸先端科学技術大学院大学) 正 藤井浩光 (千葉工業大学)
正 河野仁 (東京工芸大学) 正 梅田 和昇 (中央大学)

Ryosuke KATAOKA, Chuo University, kataoka@sensor.mech.chuo-u.ac.jp
Isao TADOKORO, Chuo University
Yonghoon JI, Japan Advanced Institute of Science and Technology
Hiromitsu FUJII, Chiba Institute of Technology
Hitoshi KONO, Tokyo Polytechnic University
Kazunori UMEDA, Chuo University

The accuracy of scan matching-based SLAM strongly depends on the result of the initial alignments. In this paper, we improve the accuracy of scan matching-based SLAM by applying accurate initial alignments calculated by global registration using measurements from LiDAR intensity and water puddles as features, which are often found in damaged nuclear power plants. Experiment results in the real environment show that the proposed method improved the accuracy of the map and the trajectory of the robot by taking advantage of these features observed from the environment into account.

Key Words: Autonomous mobile robot, SLAM, Scan-matching

1. 序論

2011 年の東日本大震災で被災した福島第一原子力発電所内部のロボットによる探査では、ロボットシステムの事故や故障が多発した。これは、建屋内の状況把握や情報収集が不足していたことが原因と考えられ、環境の被災状況等をより正確に把握することが求められる。

環境地図の生成は、状況把握のための最も重要な手法の一つである。環境地図生成手法として SLAM (simultaneous localization and mapping) というアプローチが広く研究されている。SLAM の中でも、レーザースキャンマッチングを用いた手法の研究が盛んである。スキャンマッチングの代表例として ICP (iterative closest point) [1] が挙げられる。ICP は、大まかな位置関係が既知の点群同士を精密に位置合わせする、局所的点群位置合わせに分類される。ここで、ICP による位置合わせ結果は、位置合わせを行う前の初期位置の精度に強く影響を受けるため、ICP において精度の高い初期位置を与えることは非常に重要である。

位置合わせの初期位置は、移動ロボットのエンコーダから得られる変位から与えられることが多い。被災した原子炉建屋内の探査にて用いられる移動ロボットの多くは、階段や瓦礫のある環境に対応するため、クローラを搭載している。しかしながら、クローラのエンコーダから得られる変位は誤差が大きく、ICP の初期位置を与えるのには不適である。そのため、本研究では、初期位置を大域的点群位置合わせによって与えることで、SLAM の結果を向上する。

大域的点群位置合わせは点群同士の大まかな位置関係を求める手法で、これまでに多くの研究が行われてきた[2][3]。Godin らは、大域的点群位置合わせにおいて物体表面の拡散反射率情報を活用することで、点群の高精度な剛体変換を実現した[3]。しかしながら、実験では距離画像とカラー画像から推定された特徴量のみを用いており、被災した原発内部で見られる豊富な物理的特徴量を扱うには、利用できるデータの種類の限界がある。

本論文では、LiDAR の反射強度と、被災した原子力発電所

内に多く見られる水溜まりを環境特徴量として活用した大域的点群位置合わせ手法を提案する。検証実験では、環境の近赤外情報と形状情報を近赤外カメラと LiDAR を用いたセンサフュージョンにより取得し、提案手法を組み込んだ SLAM による地図構築システムによって高精度な地図を生成する。また、本手法により生成された地図に環境特徴量を付加することで、水溜まりを危険地域として可視化することが可能となり、原子炉建屋の探査や機器の運搬などに活用できる。

2. システムの全体構成

2.1 提案するシステム

Figure 1 に示す提案システムでは、スキャンマッチングによる SLAM を行い、ロボットの軌跡と点群地図を結果として出力する。ここで、ロボットは環境を移動しながら属性付き点群を n フレーム分計測するものとする。属性付き点群については 2.2 節にて詳しく述べる。

まず初めに、属性付き点群のスキャンマッチングを行う。位置合わせする点群は、0 フレームから $n - 1$ フレームまでの点群の全組み合わせとする。点群位置合わせは、まず提案手法の属性付き大域的点群位置合わせにより点群の初期位置合わせを行い、ICP によって初期位置合わせ後の点群を高精度に位置合わせする。そして、スキャンマッチングの結果よりロボット軌跡を出力する。

続いて、ロボット軌跡に対してポーズ調整を行う。ポーズ調整では、位置合わせ結果の不確かさに基づいて軌跡を最適化する。最適化後のロボット軌跡に従って n フレーム分の点群を剛体変換することで、点群地図を生成する。また、最終的に出力されたロボット軌跡と点群地図を真値と比較することにより、評価を行う。

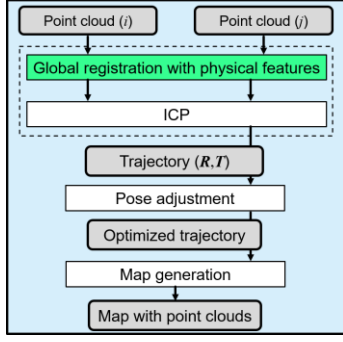


Fig. 1 System overview

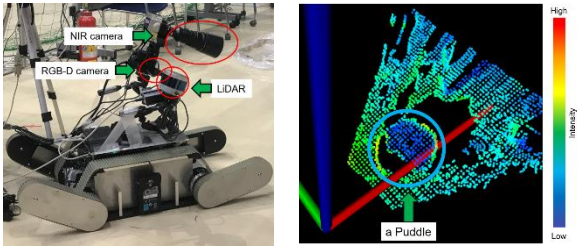
2.2 属性付き点群

本手法において、物理量の数値など形状以外の情報を属性と呼ぶ。また、通常の点群において形状情報を表す x, y, z に加え、属性を表す変数を点群に追加したものを属性付き点群と呼ぶ。本論文では、近赤外線情報と LiDAR の反射強度情報を属性として用い、位置合わせにおける特徴量として利用する。よって、点 p_i の持つ情報は次式のように定義する。

$$p_i = [x_i \ y_i \ z_i \ I_{R,i} \ I_{Laser,i}]^T \quad (1)$$

ただし、 $I_{R,i}$ は近赤外線情報は近赤外の反射強度、 $I_{Laser,i}$ は LiDAR の反射強度情報を意味する。

点群を計測できる LiDAR とほかの種類のセンサを融合させることで、周辺環境の 3 次元形状やレーザの反射強度以外にも様々な情報を取得することができる。Fujii らは、Fig. 2 に示すように近赤外線カメラと距離画像センサを組み合わせたセンサシステムを用いて、近赤外情報を持つ点群を生成し、透明な水の立体的な存在を可視化した[4]。本論文では、実験において Fujii らのシステムに LiDAR を組み込み、レーザの反射強度と近赤外情報を持つ点群を取得する。これにより、計測された点は位置情報に加えて近赤外線と LiDAR それぞれの反射強度の情報をもち、この 2 つの属性を考慮することで地図構築の精度を向上させる。



(a) Sensor system (b) Point cloud of a puddle
Fig. 2 Visualization of a puddle

3. 属性付き大域的点群位置合わせ

3.1 概要

本手法は、FPFH、近赤外情報、レーザ反射強度情報のそれぞれを特徴量として用いる。FPFH は形状情報をヒストグラムの形で特徴量としたもので、ベクトル量である[2]。一方で、近赤外情報、レーザ反射強度情報はスカラー量である。本手法では、まず、特徴量ごとに近傍点探索をし、点対応の集合を求める。続いて、2.4 節に基づき、特徴量ごとに優秀な点対応を選別する。そして、2.5 節に基づき、選別された点対応の集合を更に絞り込み、最終的に選ばれた点対応を用いて剛体変換を出力する。

3.2 空間的なばらつきを考慮した点対応集合の選別

本手法では、各特徴量に基づいた近傍点探索によって得られた点対応集合の中から、位置合わせに寄与する点対応を優先的に選別する。点対応に基づく位置合わせにおいては、近い特徴量の値をもつ点が、空間中で狭い領域にまとまっていないと、それらは位置合わせに寄与しにくいと考えられる。そのため、位置合わせにより寄与するのは、ある特徴量の特定の値における、点群中での空間的なばらつき度合いが小さい点を持つ点対応である。

まず、ある点対応に属する点と特徴量が近い点の集合を求め、その集合の空間的なばらつき度合いを計算する。続いて、ばらつき度合いの小さい点対応を選別することで、位置合わせにより寄与する点対応の集合を求める。点対応の空間的なばらつき度合いは、点対応に属する 2 点のそれぞれで特徴量が近い点の集合の共分散行列を計算し、その対角成分の和を求めることで算出する。共分散行列の対角成分は、点群の x, y, z 方向の分散を表しており、その和によって点の分布の広がりを求めることができる。

3.3 幾何学的拘束を考慮した点対応集合の選別

本手法では、幾何学的な関係を考慮し、その拘束を満たす点対応を優先的に選別する。Fig. 3 に示すように同じ形状を計測した 2 つの点群の点対応集合が得られている時、計測した形状の 2 箇所から取得した点同士の距離 $l_{i,12}, l_{i,23}, l_{i,34}$ は、2 点それぞれの点対応が正しいと仮定すれば、もう片方の点群に含まれる 2 点の距離 $l_{j,12}, l_{j,23}, l_{j,34}$ とおおよそ等しくなる。なお、この場合では $l_{i,23}$ と $l_{j,23}$ 、 $l_{i,34}$ と $l_{j,34}$ がおおよそ等しく、点対応の選び方も正しいものといえる。つまり、点対応集合に含まれる任意の 2 点対応から、片方の点群に含まれる 2 点の距離ともう片方の点群に含まれる 2 点の距離を求め、両者の大きさが近ければ、その点対応集合は幾何学的に矛盾なく選択されたといえる。

本手法の具体的な計算としては、既に得られている点対応集合から幾何学的拘束が成り立つ部分集合を選別し、より正しいとされる点対応集合から剛体変換を生成する。まず、3.2 節で既に得られている各特徴量の点対応集合を全て連結したのち、その部分集合を全組み合わせにおいて生成して、それらに対して幾何学的拘束を満たすもののみを選別する。続いて、選別された点対応集合に次式を適用して E の最小化問題を解くことで、剛体変換を計算する。

$$E = \sum_{i=1}^N |p_{k_i} - (q_i R + T)|^2 \quad (2)$$

E : 距離の二乗和 (評価値)

p : ソース点群の点

q : ターゲット点群の点

N : 点対応の数

k_i : ソース点群中の i 番目の点に対応する参照スキャンデータ点

R : 回転行列

T : 並進ベクトル

そして、得られた剛体変換を各点群に適用し、点群間の近傍点のユークリッド距離の平均が最も小さくなる剛体変換を最終的な出力として、点群の位置合わせを行う。

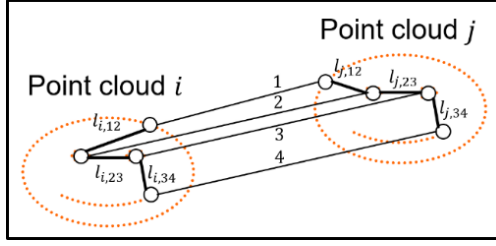


Fig. 3 Geometric constraint

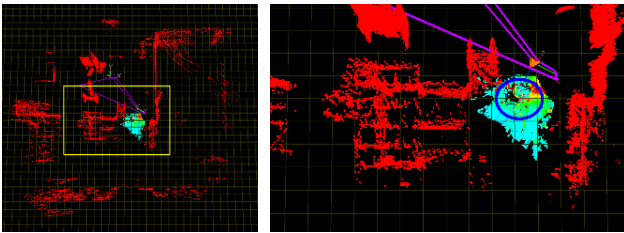
4. 検証実験

4.1 概要

近赤外線カメラ、距離画像センサ、LiDAR からなるセンサシステムを移動ロボットに搭載し、遠隔操作によって移動しながら環境を計測したのち、SLAM によってロボットの軌跡の推定と地図の生成を行った。実験は、Fig. 4 に示す檜葉遠隔制御技術開発センターの要素試験エリアで行った。この実験施設では、モックアップ階段などの特徴的な形状を持つ建造物が豊富であるため、SLAM の評価実験を行うのに適している。Figure 5 に、ロボットの真の軌跡を用いて生成した地図の真値を示す。また、人工的な水溜まりを環境内に設置することで、水が豊富な環境を再現した。水溜まりは、Fig. 4, 5 において、青色の楕円の箇所に設置している。Figure 5 において、紫色の線は、ロボット座標を直線で結んだものを軌跡として示している。また、Fig. 5 における点の色は I_{IR} の大きさを反映しており、 I_{IR} が小さいほど青く、 I_{IR} が大きいほど赤く描画している。なお、近赤外センサは LiDAR と比べて計測範囲が狭いため、点群中の多くの箇所は近赤外情報を持たず I_{IR} の値が定数であり、全体的に見て赤色となっている。



Fig. 4 Bird's-eye view of the experimental environment



(a) Entire map (b) Expanded view of yellow area
Fig. 5 Map built by true trajectory

4.2 実験機器

Figure 2(a)に、本実験で使用した実験装置を示す。ロボットの仕様を Table 2 に示す。ロボットは LiDAR、近赤外線カメラ、距離画像センサを搭載している。LiDAR は Velodyne Lidar 社製 VLP-16 を用いた。距離画像センサには Intel 社製 RealSense D415 を用いた。近赤外線センサには BITRAN 社製 BK51-IGA に近赤外線レンズ (Kowa 社製 LM8HC-SW) とテレコンバー

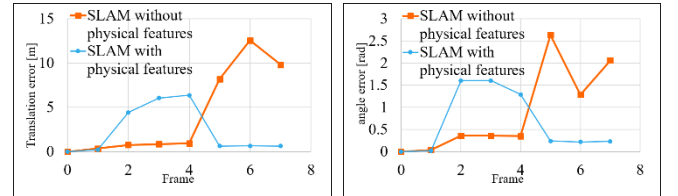
ジョンレンズ (Raynox 社製 DCR-2025PRO) を装着して用いた。詳細のセンサシステムの構成については[4]を参照されたい。

Table 2 Specification of exploration robot

Uphill slope angle [deg]	45
Payload [kg]	5
Traveling speed [mm/s]	100
Length [mm]	1000
Width [mm]	400
Height [mm]	200

4.3 実験結果

提案手法と従来手法のそれぞれで SLAM を行い、生成された軌跡と地図を比較することで評価を行った。提案手法では Fig. 1 のシステムを行い、従来手法では Fig. 1 のシステムにて、提案手法の代わりに SAC-IA[2]を用いた。Figure 6 と Table 3, 4 より、提案手法を用いた場合はロボット位置の誤差が減少したことが分かる。また、Table 5 と Fig. 8 より、提案手法によって生成された地図の精度が向上した。これは、水溜まりを計測したフレーム間でのスキャンマッチングの結果が向上したことによると考えられる。しかしながら、Fig. 6 において、フレームの中盤にて提案手法におけるロボット位置の誤差が一時的に増加した。この原因としては、フレームによっては点群が計測された箇所が大きく異なっており、位置合わせに最低限必要な形状情報が不足していたことが考えられる。本手法では形状情報以外の特徴量も考慮することでスキャンマッチングを向上させているが、形状情報が極端に不足する場合に手法が上手く動作しないことが分かっている。この問題の解決策としては、スキャンマッチングを、形状情報に乏しい環境においても適応させることが挙げられる。



(a) Translation error (b) Angle error
Fig. 6 Comparison of errors of robot position

Table 3 Mean of translation errors [m]

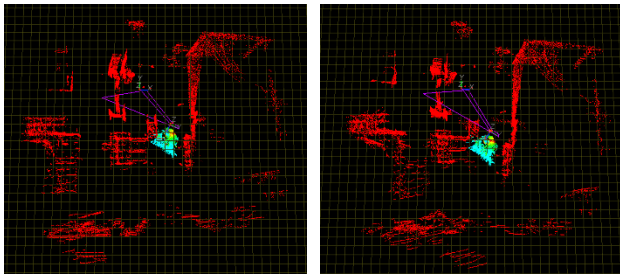
SLAM without physical features	4.775
SLAM with physical features	2.719

Table 4 Mean of angle errors [m]

SLAM without physical features	1.012
SLAM with physical features	0.744

Table 5 Mean of map errors [m]

SLAM without physical features	7.134
SLAM with physical features	4.660



(a) SLAM without physical features (b) SLAM with physical features

Fig. 7 Built map by SLAM

5. 結論

本論文では、LiDAR の反射強度と水溜まりの存在を特徴量とし、大域的点群位置合わせにて活用することで環境地図を生成する手法を提案した。提案手法では、大域的点群位置合わせにおける対応点の選別において、形状以外の特徴量を考慮することでマッチング精度を向上させた。今後の展望としては、形状情報に乏しい環境において手法が上手く動作しない問題に対処する。

謝辞

本報告は、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構「英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業」により実施した「被災地探査や原子力発電所建屋内情報収集のための半自律ロボットを用いたセマンティックサーバイマップ生成システムの開発」（研究代表者：東京工芸大学 河野 仁）の成果の一部である（研究課題番号 R02I015）。

参考文献

- [1] McKay, P. J. Besl and N. D., "A Method for Registration of 3D Shapes," IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 8, No. 6, pp. 679–698, 1986.
- [2] R. B. Rusu, N. Blodow, and M. Beetz, "Fast Point Feature Histograms (FPFH) for 3D registration," Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 3212–3217, 2009.
- [3] G. Godin, D. Laurendeau, and R. Bergevin, "A Method for the Registration of Attributed Range Image," Proceedings of the 2001 International Conference on 3D Imaging and Modeling, pp. 179–86, 2001.
- [4] H. Fujii, M. Sugawara, H. Kono, and Y. Ji, "3D Visualization of Near-Infrared Information for Detecting Water Source," Proceedings of Fukushima Research Conference on Remote Technologies for Nuclear Facilities 2019, p. 5, 2019.