

LiDAR の反射強度及び溜水の計測情報を利用した ICP による SLAM

○片岡良介（中央大学） 鈴木龍紀（中央大学）

池勇勳（北陸先端科学技術大学院大学） 藤井浩光（千葉工業大学）

河野仁（東京工芸大学） 梅田和昇（中央大学）

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のロボットを使った廃炉活動では、原発建屋内における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十分であったことが原因と考えられ、活動地域の状況を把握するためのシステム開発が重要である。

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) システムが広く研究されている。その中でも、レーザースキャンマッチングを用いた SLAM 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 は拡張性が高く、目的に応じた拡張版が多数存在する[2-3]。本論文では、ICP の最近傍点探索の処理において環境特徴を反映させることで、SLAM の精度向上を図ることを目的とする。原子力発電所の内部には、事故で流出した水や爆発による熱源、放射線などの特徴的な物理量が分散していることが予想される。環境の物理的な特徴を利用した SLAM の研究がいくつか行われている。Hara らは、LiDAR のレーザの反射強度が物体の反射特性に依存することを利用してスキャンマッチングの精度を向上させた[4]。しかし、上記で挙げた、水や爆発による熱源、放射線などの特徴量は、LiDAR からの情報のみでは活用できない。

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たまりを環境特徴量として活用したスキャンマッチングによる地図構築システムを提案する。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、水た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有用活用できる。

2. 属性付き点群

2.1 属性付き点群の計測

本論文では、環境の物理的特徴を位置合わせにおける特徴量として利用する。LiDAR と融合させるセンサの種類によって、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。例えば、光学カメラ、サーモカメラ、ガンマカメラを組み合わせることで、色、熱源、放射源など

の環境属性の情報を得ることができる。藤井らは、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[5]。本論文では、実験で藤井らのシステムに 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している。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。

2.2 属性値による属性付き点群のクラス分け

本手法では、測定した段階では連続値として与えられる属性値を二値化し、複数のクラスに分割してから点群を位置合わせする。近赤外線の反射強度の大小と、LiDAR の反射強度の大小によって、表 1 に示すように 4 つのクラスを定義する。

表 1 属性値によるクラス分け

-	近赤外反射強度大	近赤外反射強度小
LiDAR 反射強度大	クラス i	クラス ii
LiDAR 反射強度小	クラス iii	クラス iv

3. 属性付き ICP-SLAM

3.1 提案するシステムの概要

提案するシステムの概要を図 1 に示す。まず、ロボットは遠隔操作により環境を探索し、3 次元環境地図生成のための属性付き点群を各フレームで取得する。次に $t-1$ フレームの点群と t フレームの点群に対して、FPFH[6]特徴量を用いた SAC-IA[6]による大域的位置合わせを行い、点群位置合わせの初期位置を計算する。そして、属性付き ICP によってスキャンマッチングを行い、各フレームでの回転行列 R と並進ベクトル T を求める。ここで、 R 、 T は各フレームの点群同士を位置合わせする剛体変換のパラメータである。従来の ICP に比べ、水源や LiDAR の反射強度などの属性を考慮することで、点对応算出時にミスマッチングを防ぐことができる。 R 、 T を各フレームで求めていくことで逐次自己位置推定が行われ、ロボットの軌跡が算出される。しかしながら、この軌跡にはスキャンマッチングの誤差が累積していることが考えられるため、軌跡に対してポーズ調整を適用する。ポーズ調整によって、累積したスキャンマッチングの誤差を減少させられることが知られている。最後に、ポーズ調整によって最適化された軌跡に従

って各フレームの点群を剛体変換して貼り合わせることで、点群地図が生成される。

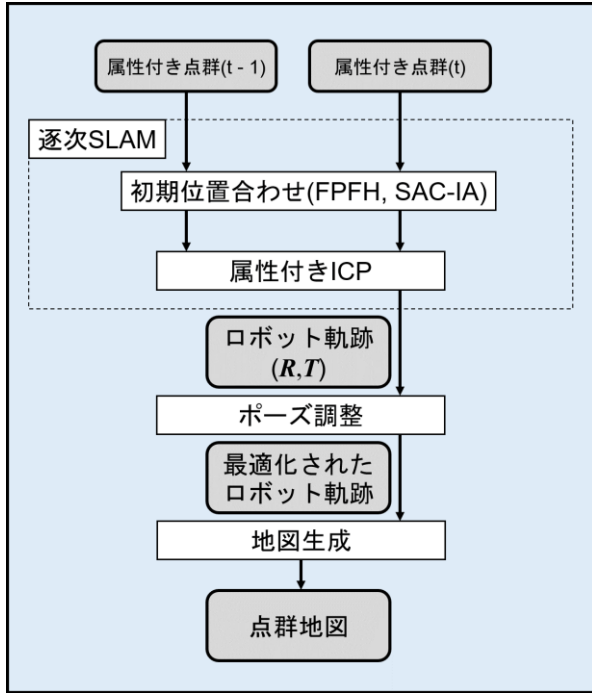


図1 システムの概要

3.2 従来のICPアルゴリズム

本論文では、主にスキャンマッチングSLAMで用いられているICPアルゴリズムに基づいた手法を提案する。ここでICPアルゴリズムについて簡単に説明する。この手法は、点群同士を位置合わせするような剛体変換を求めるために用いられる。まず、点群間の距離に起因する精度の低下や計算コストの増大を避けるため、点群位置合わせのための初期位置を設定する。そして、最近傍点間の距離の二乗和 E を最小化する剛体変換の計算を繰り返し行うことで、位置合わせにおける回転行列 R と並進ベクトル T を求める。ここで、現在のフレームでスキャンした点群をソース点群、前のフレームでスキャンした点群をターゲット点群と呼ぶ。以下に、 E を与える式を示す。

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

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 : ソース点群の点の数 (繰り返し計算の試行回数)

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 : 変換行列の回転成分行列

T : 変換行列の並進成分ベクトル

3.3 属性付きICPアルゴリズム

著者らの従来手法[7]にて提案した属性付きICPア

ルゴリズムについて述べる。剛体変換の計算は従来のICPと同じであるが、最近傍点探索の際に点の属性を考慮することで位置合わせ結果を向上させている。ここで、属している点の数が少ないクラスを、希少クラスと呼ぶ。希少クラスの選び方は、環境から属性付き点群を計測した時点で、2.2節に示す方法で点群を4つのクラスに分け、その中で点群数の比較的小さいクラスを希少クラスとして扱う。なお、条件によっては、希少クラスとして選ばれるクラスが複数存在する場合がある。属性付きICPでは、最近傍点探索において、希少クラスの点をクエリとして近傍点探索をする際に探索領域を拡大することで、マッチングの精度を高められる。希少クラスの点は、環境中の限られた領域のみに分布していると考えられ、同じ希少クラス同士の点同士を優先的にマッチングできれば、環境中の同じ場所から測定されたものである可能性が高い。その一方で、環境中の限られた領域のみに存在するために、通常の最近傍点探索では同じクラス同士がマッチングされにくいという欠点がある。そこで、希少クラスの最近傍探索の範囲を広げることで、同じ希少クラスの点とマッチングされる可能性を高め、この問題に対処することができる。また、従来手法のICPにおける最近傍点探索の評価値に、属性に応じたペナルティ α を与えることで、図2に示すように同一クラスに属する点同士が優先的にマッチングされ、位置合わせの精度が向上する。なお、著者らの従来手法[7]が仮想的に属性値を与えていたのに対し、本論文では4.2節にて述べる計測システムを用いて、実際の環境から測定した属性値を活用してSLAMを行う。以下に、最近傍点間の距離の二乗和 E を与える式を示す。

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

$$\lambda(p, q) = \begin{cases} \alpha & \text{if } c(p) \neq c(q) \\ 0 & \text{if } c(p) = c(q) \end{cases}$$

ここで、関数 $c(p)$ は点 p のクラスを意味する。

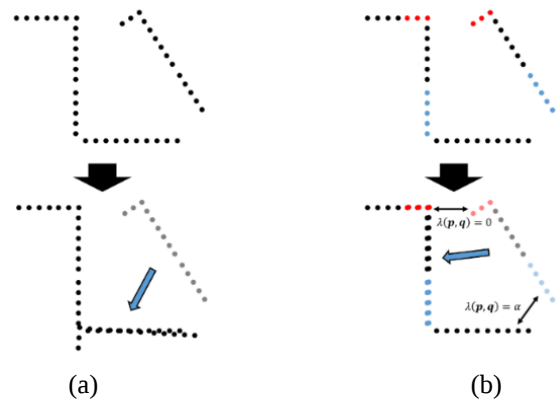


図2 ICPアルゴリズムの概念図: (a) 従来のICP, (b) 属性付きICP

4. 実験

4.1 実験概要

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で計測した属性付き点群から地図を生成し，本手法の評価に用いた．実験は，図 3 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，ICP-SLAM の評価実験を行うのに適している．図 4 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．水が豊富な環境を再現するために，図 5 に示す人工的な水溜まりを環境内に設置した．水溜まりは，図 3，6 において，水色の楕円の箇所に設置している．ここで，図 6 は図 4 の黄色い枠の範囲の拡大図である．図 4 において，紫色の線はロボットの軌跡を示している．また，計測した全フレームの属性付き点群を 2.2 節に従ってクラス分けした結果，クラス i とクラス iv にそれぞれ属する点の数がそれ以外のクラスのものよりも少なかったため，クラス i とクラス iv を希少クラスとした．ここで，図 4 において，希少クラスの点を視認しやすくするため，クラス i の点を赤，クラス iv の点を青，それ以外のクラスを白で色分けする．



図 3 実験環境の俯瞰図

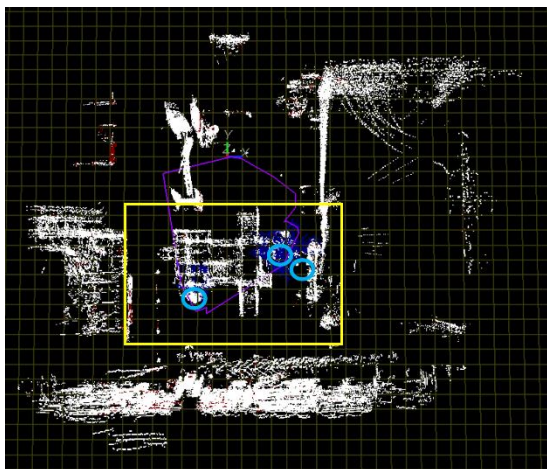


図 4 地図の真値

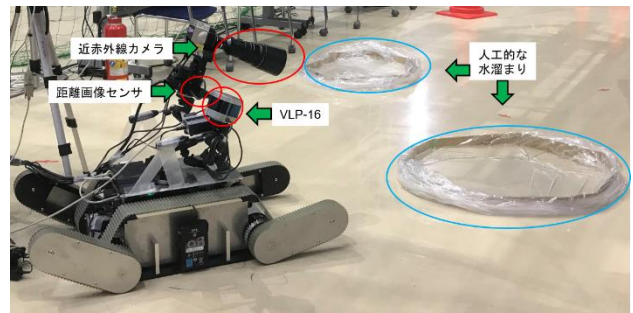


図 5 実験機器と人工的な水溜まり

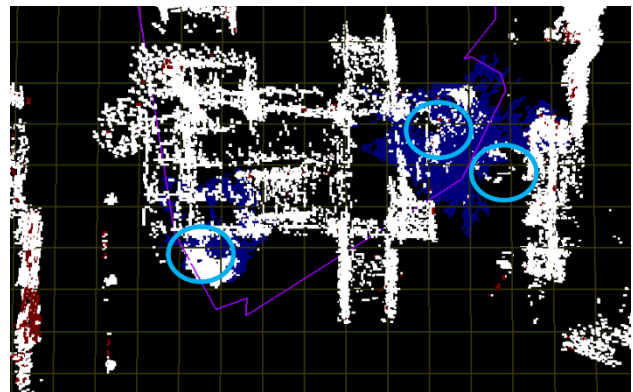


図 6 地図の真値の拡大図

4.2 実験機器

図 5 に，本実験で使用した実験装置を示す．ロボットの仕様を表 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[5]を参照されたい．

表 2 探査ロボットの仕様

最大登坂傾斜角[deg]	45
ペイロード [kg]	5
走行速度 [mm/s]	100
全長 [mm]	1000
横幅 [mm]	400
高さ [mm]	200

4.3 実験結果

図 7 と表 3 より，提案手法を用い SLAM を行った際はロボット位置の並進誤差が減少していることが分かる．また，図 8，表 4 に示すように，提案手法を用いた場合，地図の精度が向上していることが分かる．しかしながら，提案手法を用いた場合でも，真値

の地図と比較した場合は、地図が十分な精度では生成されていない。その原因としては、フレームによって、点群が計測された箇所が大きく異なっていたことが挙げられる。これによって、異なるフレーム間で同じ構造物の形状を計測することができず、点群の重なりが部分的なものとなり、位置合わせ精度が低下する。同じ構造物の形状を計測できなかった原因は、測定フレーム数に対するロボットの変位量が大きく、構造物によるオクルージョンの影響を大きく受けていたためと考えられる。この問題の解決策としては、計測を行うフレーム数を増やすことと、ピッチ方向の計測範囲が広いLiDARを用いることが挙げられる。

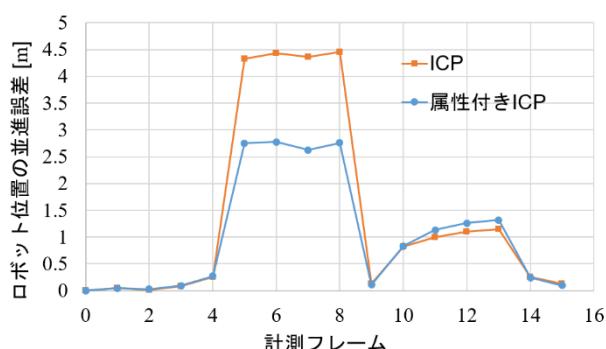


図7 ロボット位置の並進誤差の比較

表3 並進誤差の平均 [m]

ICP	1.410
属性付き ICP	1.021

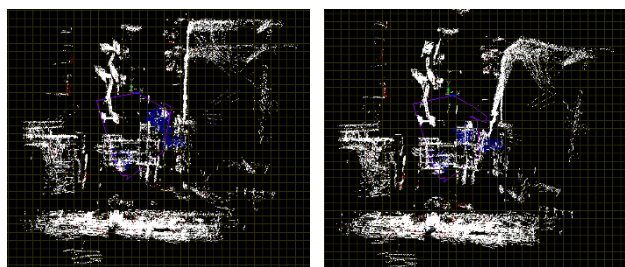


図8 ICP-SLAMによって生成した地図: (a) ICP, (b) 属性付き ICP

表4 真の地図との誤差 [m]

ICP	1.360
属性付き ICP	1.291

5. 結論

本論文では、LiDARの反射強度と水溜まりの存在を物理的特徴量とし、ICP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、ICPの最近傍探索において物理的属性を考慮することでマッチング精度を向上させた。実験において、属性付き

ICPを用いることで、従来の手法よりも高い精度の地図を生成した。今後の展望としては、計測した領域がフレームごとに変化してしまう問題に対処する。

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ベ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] P. J. Besl and N. D. McKay, "A Method for Registration of 3D Shapes," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 8, No. 6, pp. 679–698, 1986.
- [2] D. Chetverikov, D. Svirko, D. Stepanov and P. Krsek, "The Trimmed Iterative Closest Point Algorithm," *Proceedings of IEEE International Conference on Pattern Recognition*, pp. 545–548, 2002.
- [3] P. Biber and W. Strasser, "The Normal Distributions Transform: A New Approach to Laser Scan Matching," *Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Vol. 3, pp. 2743–2748, 2003.
- [4] Y. Hara, H. Kawata, A. Ohya and S. Yuta, "Mobile Robot Localization and Mapping by Scan Matching using Laser Reflection Intensity of the SOKUIKI Sensor," *Proceedings of the 32nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 3018–3023, 2006.
- [5] 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*, 2019.
- [6] 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.
- [7] 片岡良介, 鈴木龍紀, 池勇勲, 藤井浩光, 河野仁, 梅田和昇: "環境の持つ物理的属性を考慮したICPとループ閉じ込みにおけるSLAM", 第25回ロボティクスシンポジウム予稿集, pp. 246-249, 2020.