

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

片岡良介^{*1}, 鈴木龍紀^{*2}, 池勇勳^{*3}, 藤井浩光^{*4}, 河野仁^{*5}, 梅田和昇^{*3}
SLAM Based on ICP and Loop Closing Considering Physical Properties of EnvironmentRyosuke KATAOKA^{*1}, Ryuki SUZUKI^{*2}, Yonghoon JI^{*3},Hiromitsu FUJII^{*4}, Hitoshi KONO^{*5} and Kazunori UMEDA^{*6}^{*1, *2} Course of Precision Engineering, School of Science and Engineering, Chuo University 1-13-27 Kasuga, Bunkyo-ku, Tokyo 112-8551, Japan^{*3, *6} Department of Precision Mechanics, Faculty of Science and Engineering, Chuo University 1-13-27 Kasuga, Bunkyo-ku, Tokyo 112-8551, Japan^{*4} Department of Advanced Robotics, Faculty of Advanced Engineering, Chiba Institute of Technology 2-17-1 Thudanuma, Narashino-shi, Chiba-ken 275-0016, Japan^{*5} Department of Faculty of Engineering Tokyo Polytechnic University 1583 Iiyama Atugi-shi, Kanagawa-ken 243-0297, Japan

Received: XXXX; Revised: XXXX; Accepted: XXXX

Abstract

This paper describes a new scan matching-based mapping method using mobile robot in an environment including various physical properties. In scan matching, localization is performed mainly focusing on the shape information of the environment. However, the localization cannot be performed correctly and matching may fail when a similar shape existing in different places if only the shape information is taken into account. Therefore, we propose a new method to improve the accuracy of scan matching by considering abundant physical features existing in the environment. In this method, it is possible to utilize not only the shape information but also the physical information of the environment as features by measuring such as heat and water sources. Experiment result in the real environment shows that a highly accurate map of the environment can be generated by utilizing these physical information.

Keywords : Scan matching, SLAM, Localization, Mapping, Iterative closest point, Decommissioning activity

1. はじめに

地震大国である日本では、人が立ち入ることが困難な場所でのロボットシステムの開発は盛んに行われている。しかし、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のロボットを使用した廃炉活動では、たくさんのロボットが未帰還になった。これは、原子力発電所内部の状況把握や情報収集が不十分であることが原因と考えられ、活動範囲の状況把握システムの開発は重要と言える。原子力発電所内部では、事故により漏れ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散布された状況が予想される。状況把握の手法として環境地図の生成が挙げられ、以前から特徴量を使用した環境地図を生成するため、特徴量を使用した SLAM (simultaneous localization and mapping) に関するシステムの研究が盛んに行われている。Mur-Artal ら (Mur-Artal et al., 2015) は、カメラを用いて ORB 特徴量を取得し、環境地図を生成した。Konolige ら (Konolige et al., 2010) は、LiDAR (laser imaging detection and ranging) を用いて、測定域の特徴的な形状を用いた地図生成システムを提案した。Hara ら (Hara et al., 2006) は、LiDAR (laser imaging detection and ranging) の反射強度情報をスキャンマッチングにて利用した環境地図の生成手法を提案した。しかし、これらの研究では環境の形状情報か、もしくはそれに加えて色やレーザの反射強度等の一種類の特徴量にしか対応しておらず、上記の原子力発電内の豊富な物理量を十分に活かすことは困難である。そこで本研究では、熱源や水たまりなどの、原発に存在しうる環境特徴量を用いたスキャン

No.xx-xxxx [DOI: 10.1299/transjsme.1x-00000]

^{*1} 学生員, 中央大学 理工学研究科 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)^{*2} 中央大学 理工学部 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)^{*3} 正員, 中央大学 理工学部 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)^{*4} 正員, 千葉工業大学 先進工学部 (〒275-0016 千葉県習志野市津田沼 2-17-1)^{*5} 正員 東京工芸大 工学部 (〒243-0297 神奈川県厚木市飯山 1583)

E-mail of corresponding author: kataoka@seosor.mech.chuo-u.ac.jp

[DOI: 10.1299/transjsme.1x-00000]

© 201x The Japan Society of Mechanical Engineers

マッチングによる地図生成システムを提案する。また、本研究で生成する地図に環境特徴量を付与することで熱源や水たまりなどの危険領域を可視化することができ、原子炉建屋の調査や機材搬入時に役立てることができる。

2. 関連研究

SLAM において、レーザースキャンマッチングに基づく手法が広く使われている。スキャンマッチングの典型例として、ICP (iterative closest point) (Besl and McKay, 1986) が挙げられる。ICP は拡張性が高く、それぞれの目的に沿った多くの拡張版が存在する (Chetverikov et al., 2002) (Granger and Pennec, 2002) (Kaneko et al., 2003)。本研究でも、ICP の最近傍点探索と最適化過程に環境特徴量を反映することで SLAM における性能向上を図る。環境の形状情報を特徴量として用いた多くの SLAM 手法とは対照的に、カメラから得られる画像から特徴量を抽出して SLAM に利用した例も数多く存在する (Engel et al., 2014) (Engel et al., 2017) (Mur-Artal et al., 2015)。しかし、被災した原子炉建屋は暗いためにカメラの視認性が悪く、環境の特徴量を得るのが難しいと考えられる。Hara ら (Hara et al., 2006) は、LiDAR から得られるレーザの反射強度が反射した物体の性質に依存することを利用し、スキャンマッチングの結果を向上させた。しかし、被災した原子炉建屋に存在する水たまりや熱源等を特徴量として利用した SLAM の研究は行われていない。点群の持つセマンティックな情報を SLAM に活かす研究が複数行われている。Civera ら (Civera et al., 2012) は、データベース上のオブジェクトとのテンプレートマッチングによって計測点群中からオブジェクトを認識することで SLAM の結果を向上させた。Sunderhauf ら (Sunderhauf et al., 2017) は、認識したオブジェクトの種類と向きをマッチングに取り入れた。Mozos ら (Mozos et al., 2007) は、環境の各領域を人間がどのように利用しているかを考慮することによって、動的な環境を SLAM で再構成した。しかし、これらの研究は点群の形状や色の情報にのみ着目しており、環境の物理量的な特性は考慮していない。

3. 提案手法概要

3・1 属性付き点群の性質

本研究では、水や熱源などの環境の属性情報を特徴として活用する。点群は、環境計測に用いる LiDAR と融合するセンサの種類によって、周囲環境の 3 次元形状情報やレーザの反射強度以外にも様々な情報を含むことが可能である。例えば、工学カメラを融合する場合は色付き点群情報を得ることが可能である。また、近赤外線カメラ、サーモカメラやガンマカメラを融合して計測する場合、水源、熱源や放射線源など環境の属性情報の取得が可能である。点の持つそれらの物理量が特徴的である場合、それと似た物理量を持つ点を同じクラスであるとみなすことが可能である。以上を踏まえ本研究では、LiDAR から取得する 3 次元点群に対して熱源のクラス、水たまりのクラス、またそれらに属さない点群のクラスのいずれかを付与し、点ごとのクラスの情報を考慮することで点群の位置合わせ結果を向上させる手法を提案する。

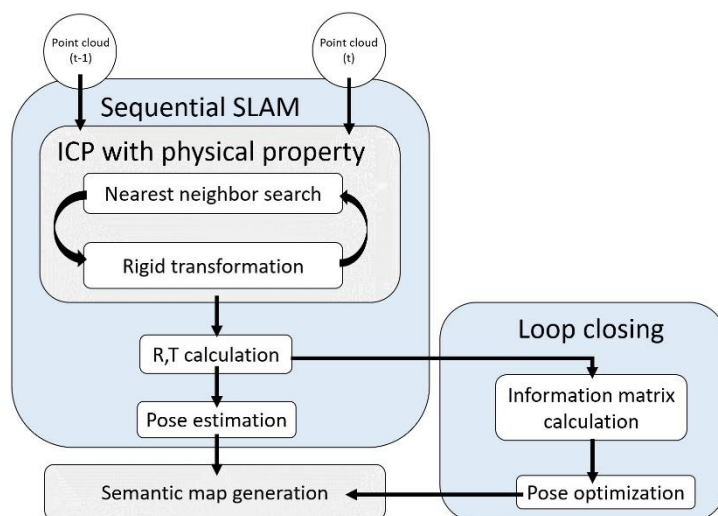


Fig. 1 Outline of proposed method

3・2 概要

提案手法の全体的なプロセスを図1に示す。まず、ロボットは遠隔操作により環境を探索し、属性付き3次元環境地図を構成する点群情報を各フレーム取得する。次に $t-1$ フレームの点群と t フレームの点群に対してオドメトリを用いて ICP アルゴリズムのための初期位置を与え、提案する属性付き ICP アルゴリズムを用いてスキャンマッチングを行い、各フレーム間の回転行列 R と並進ベクトル T を算出する。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 ICP アルゴリズムに比べ、水源や熱源などの属性を考慮することで、同属性の点がマッチングされやすくなり、ミスマッチングを減らすことが可能になる。そして、毎フレームの R , T を適用しロボット位置に適応して位置を修正することで、逐次自己位置推定を行う。この属性付き ICP アルゴリズム計算時に、同時にロボットの位置・姿勢に関する共分散行列も算出する。この共分散行列は点の重なり度合いを示しており、毎フレームのロボットの位置・姿勢の不確かさを示している。ICP アルゴリズムは点群同士のマッチング誤差を最小化する計算であるものの、誤差は完全には消えない。すなわち上記の、属性付き ICP によるロボットの逐次自己位置推定では、時間経過により誤差が累積してしまい、生成される地図にズレが生じてしまう。そこで、環境特徴量を用いて同じ場所に戻ってきたことを検知し、ポーズ調整と呼ばれるロボット軌跡の最適化を行う。フレーム間のロボット軌跡の修正パラメータ量は共分散行列の逆行列である情報行列を用いて決定される。なお、算出された共分散は環境の属性情報も反映しているため、経路最適化を行う際にも環境の属性情報が考慮され、より高精度なポーズ調整が行われる。

4. 属性付き ICP-SLAM

4・1 ICP アルゴリズム

本研究では、スキャンマッチング SLAM において主に使用される ICP アルゴリズムに基づく手法を提案する。そのため従来の ICP アルゴリズムについて簡単に述べる。まず、位置合わせのための各点群の初期位置を設定する。これは、点群間の距離が離れていることが原因で起こる精度低下や計算量増加を防ぐためである。移動ロボットの SLAM においては一般にオドメトリにおける移動ロボットの予測状態を初期位置として設定する。その後、位置合わせ状態を点間距離の総和で評価する最小化問題を解く。この時、現在フレームでスキャンした点群（以下ソース点群）と前のフレームで既存スキャン点群（以下ターゲット点群）をマッチングする。すなわち、次式のような距離の二乗和 E を評価値とし、最近傍点探索と変換行列計算を繰り返すことで、変換行列の回転成分行列 R 、変換行列の並進成分ベクトル T を求める。

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

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

4・2 属性付き ICP アルゴリズム

次に提案手法である属性付き ICP アルゴリズムについて述べる。 R , T を求める行列計算は従来の ICP と変わらないが最近傍点探索の際に点の持つ属性を考慮することで位置合わせ結果を向上させる。一般的に、属性のある点群はそうでないものに比べて数が少なく、環境の同じ位置を計測して得られている可能性が高い。つまり、属性付き点群は位置合わせの特徴量として優秀である。よって、提案手法では属性のない点に比べ探索範囲を広げることで、図2のように属性のある点同士が対応付けされやすくなり位置合わせの精度が向上される。また、従来の ICP における最近傍点探索の評価値である点ごとのユークリッド距離に、ペナルティ α を与えることで属性の不一致を回避する。

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

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

ここで、関数 $c(p)$ は点 p の属性点群を意味する。

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

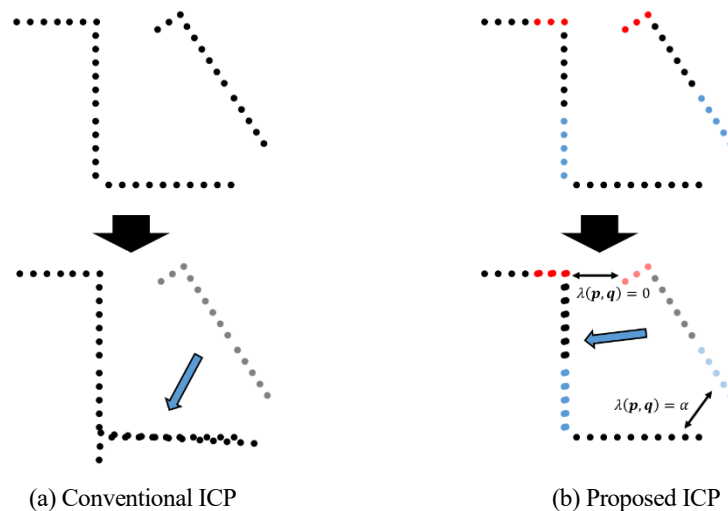


Fig. 2 Conceptual image of ICP algorithm

4・3 逐次属性付き ICP-SLAM

オドメトリのみを反映したロボットの移動パラメータは時間経過により誤差が蓄積する。そして、ロボット位置の誤差が原因で地図情報にも誤差が蓄積してしまう。そこで、時刻 t で取得したソース点群 P と時刻 $t-1$ で取得したターゲット点群 Q を用いて、上記の計算より R , T を求めロボットの逐次自己位置推定を行う。これによりロボットの自己位置推定誤差が減少し、地図情報の誤差も減少する。

ICP アルゴリズムの特性上、 P と Q の初期位置合わせをしない場合、計算時間がかかるだけでなく精度が落ちる傾向がある。そこで、オドメトリを用いて P , Q の大まかな初期位置合わせを行い、属性付き ICP アルゴリズムを適応し回転行列 R と並進ベクトル T を求める。そして、位置合わせ後の点群を用いて地図更新を行うとともに、 R , T を用いてロボットの自己位置推定も行う。このように、提案手法では、時間差で取得された環境の属性情報をマッチングにて活かすことで SLAM における地図作成と自己位置推定の精度を向上させる。

5. ループ閉じ込み

ICP-SLAM では、ICP を用いてオドメトリによるロボット位置の累積誤差を減らしている。しかし、ICP の対象である計測した点群情報にも誤差が含まれていることから、完全に誤差をなくすことは不可能である。更に、この誤差はフレーム毎に累積していくため、総フレーム数が増えるとロボットの自己位置推定の精度に大きな影響を及ぼす。そこで、ロボットが既に一度訪れた位置に再び接近した際、過去に計測した点群情報と最新フレームで計測した点群情報をマッチングすることで、それらの離れたフレーム間のロボットの相対位置を得ることができる。逐次自己位置推定によってロボットの軌跡に誤差が累積していることと比較すると、離れたフレーム間のロボットの相対位置に対しては累積誤差を考慮しなくて良い

ので、より正確であると考えられる。よって、特定のフレーム間のロボットの相対位置を考慮した上で各フレームでのロボット位置を修正することによって、ロボットの軌跡に累積した誤差を減らすことができる。

離れたフレーム間の位置関係を踏まえてロボット軌跡を修正するにあたって、ポーズグラフの最適化を行う。ポーズグラフとは、図3に示すようにロボット位置をノード、ロボット位置間の相対位置をエッジとして、ロボット軌跡をグラフ構造で表したものである。本研究では、 $\mathbf{x}_{t-1}$ から $\mathbf{x}_t$ の状態遷移モデルを $\mathbf{f}(\mathbf{x}_{t-1}, \mathbf{x}_t)$ 、それらのノードの間にあるエッジの持つ相対位置を $\mathbf{d}_{t-1,t}$ とおく。 $\mathbf{x}_t$ を最新のフレームとしたとき、ロボットが既に一度訪れている位置の中で、 $\mathbf{x}_t$ との距離が近いと考えられるものを $\mathbf{x}_u$ とおき、これを再訪点と呼ぶ。続いて、 $\mathbf{x}_t$ と $\mathbf{x}_u$ で計測したそれぞれの点群にICPアルゴリズムを適用して得られた相対位置を $\mathbf{d}_{u,t}$ に代入する。最新のフレームまでのポーズグラフの残差 J は以下の式で表される。

$$J = \sum_{i=1}^t (\mathbf{f}(\mathbf{x}_{t-1}, \mathbf{x}_t) - \mathbf{d}_{t-1,t})^T \Sigma_t^{-1} (\mathbf{f}(\mathbf{x}_{t-1}, \mathbf{x}_t) - \mathbf{d}_{t-1,t}) + \sum_{i=1}^t (\mathbf{f}(\mathbf{x}_u, \mathbf{x}_t) - \mathbf{d}_{u,t})^T \Sigma_{u,t}^{-1} (\mathbf{f}(\mathbf{x}_u, \mathbf{x}_t) - \mathbf{d}_{u,t}) \quad (3)$$

J を最小にするようなノードの組み合わせを計算することによって、再訪点の相対位置も考慮した上でロボット軌跡を最適化することができる。ここで、 Σ_t はフレーム t における共分散行列でありロボット位置の変位の不確かさを、 $\Sigma_{u,t}$ は t フレームと u フレームの間の相対位置の不確かさを表している。なお、ここでの共分散は $\mathbf{P}$ と $\mathbf{Q}$ に属性付きICPを実行した際に算出しているため、共分散行列には属性情報が反映されている。

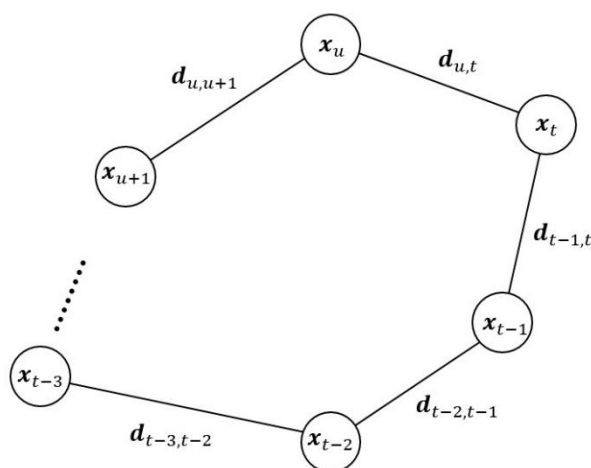


Fig. 3 Pose graph

6. 実験

6・1 実験概要

LiDARの計測データで生成した環境の地図情報を手法の評価に使用した。LiDARは探査ロボットに搭載され、遠隔操縦によって移動させながら環境を計測した。探査ロボットのエンコーダより得られるオドメトリの値をスキャンマッチングの初期位置とし、ICP-SLAMを行った。実験は図4に示す檜葉遠隔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、モックアップ階段や水槽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。本実験では、LiDARから環境の形状情報を持つ点群を取得し、それに対して仮想的な属性クラスを付与することで、特徴的な物理量を持つ環境を表現した。図5に、真のロボット軌跡を用いて生成した地図を示す。ここで、赤色、青色で描画される箇所はそれぞれ仮想的に模擬した熱源、水たまりである。また、紫色の線は真のロボット軌跡を表している。

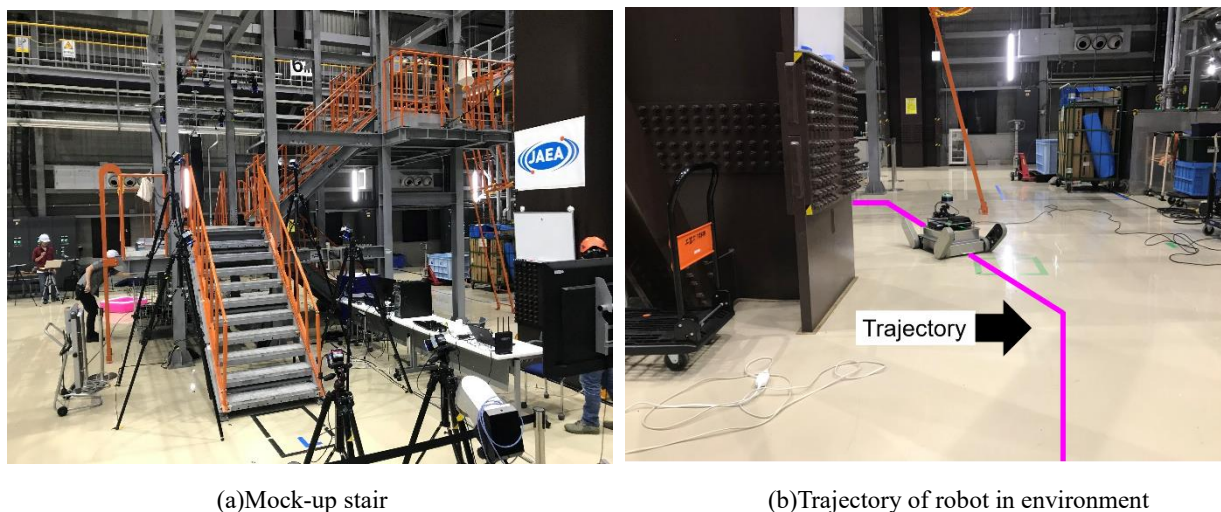


Fig. 4 Experimental environment

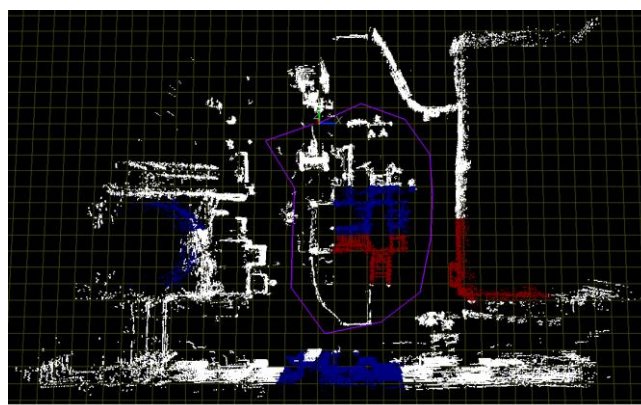


Fig. 5 Map built by true trajectory

6・2 実験機器

本研究で使用した実験装置を図6に示す。また、探査ロボットの仕様を表1に示す。探査ロボットはLiDARを搭載しており、また車輪回転量から移動量を計算するエンコーダが付いている。LiDARはVelodyne Lidar社のVLP-16を用いた。このLiDARはレーザによるToF方式により環境の3次元点群情報を取得することが可能である。



Fig. 6 Exploration robot equipped with VLP-16

Table 1 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

6・3 実験結果

図7に示す結果より、従来のICPを用いた場合よりも、提案手法のICPを用いた場合はいずれもロボット位置の誤差が減少している。属性を考慮したICPとループ閉じ込みを合わせて行った場合が最も誤差が小さい。その一方で、従来のICPとループとじ込みを合わせて行った場合は、最終フレーム付近のロボット位置の誤差は減少したものの、フレーム全体で見ると位置の誤差はさほど減少しなかった。この原因としては、ループ閉じ込みは本来、ICPで位置合わせに成功しても消えずに累積していく小さな誤差を取り除くために利用されることが多いが、その反面、本実験で従来手法のICPを用いた際のように位置合わせに失敗している場合は効果が表れないものと考えられる。なお、本実験で従来のICPが位置合わせに失敗していた原因として、クローラタイプの車輪はオドメトリの誤差が非常に大きいためであると考えられる。ICPの位置合わせ結果は位置合わせの初期位置に依存しており、オドメトリの誤差が大きい場合は、位置合わせ結果に影響を与えかねず、ロボット位置のずれを増大させる要因にもなり得る。実際に、本実験において探査ロボットは数メートル地点ごとに点群を取得していたため、オドメトリに起因する誤差の累積は充分起こり得ると考えられる。図8-11より、従来のICPの場合と比較して提案手法のICPを用いた際はいずれも、生成された地図の点群の散らばりが減少しており、地図の精度が向上した。これはロボット軌跡の誤差が提案手法によって減少したことの結果であると考えられる。表2より、提案手法のICPと提案手法のループ閉じ込みを合わせて適用した場合が、生成した地図の点群から真の地図の点群への距離が最も小さく、地図の精度が向上した。一方で、従来のICPとループとじ込みを用いた場合に、従来のICPのみを用いた場合よりも真の地図への距離が大きくなった。この原因としては、ループ閉じ込みにおけるロボット軌跡の最適化が、各フレームの計測点群の重なりを考慮していないということが考えられる。従来のICPによる位置合わせは、最初から7フレームまでは成功しており、ICPの性質上、それらのフレームにおける計測点群は真の地図の点群と高い精度で重なっていると考えられる。しかし、ループ閉じ込みによって最適化されたロボット位置は元々ICPによる位置合わせが成功していたフレームにおいても修正されており、真の地図と重なっていた計測点群の位置がずれてしまう。この結果、従来のICPとループ閉じ込みを合わせて用いた場合に真の地図への距離が大きくなった。

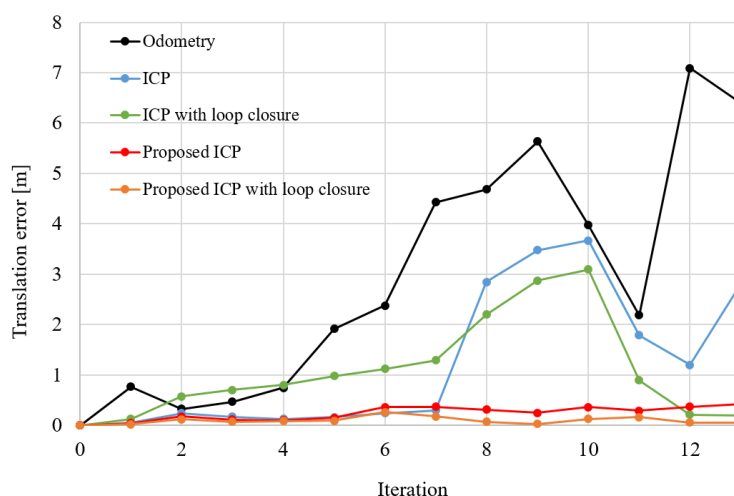


Fig. 7 Comparison of translation errors

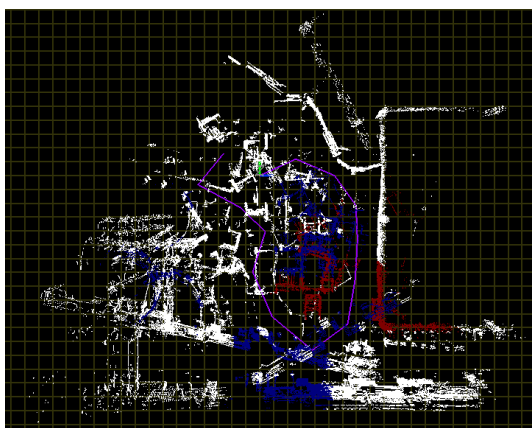


Fig. 8 Map by ICP

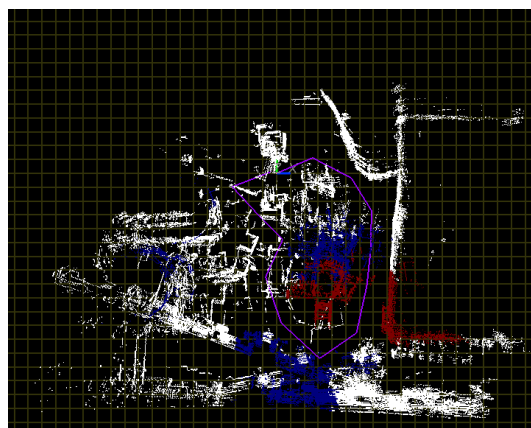


Fig. 9 Map by ICP with loop closure

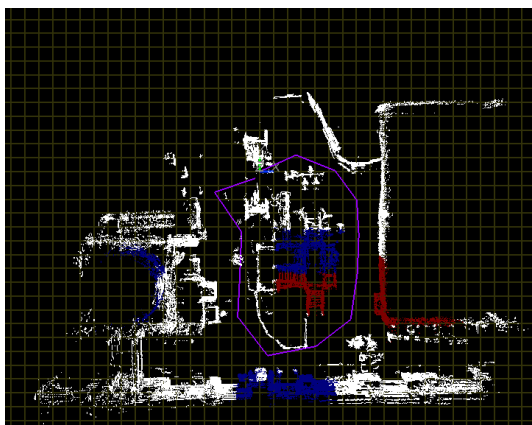


Fig. 10 Map by proposed ICP

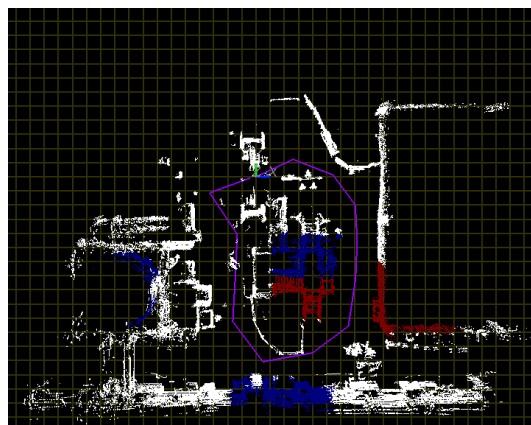


Fig. 11 Map by proposed ICP with loop closure

Table 2 Distance to the map build by true trajectory [m]

Odometry	0.918
ICP	0.320
ICP with loop closure	0.322
Proposed ICP	0.023
Proposed ICP with loop closure	0.005

7. おわりに

本研究では、特徴的な物理量を ICP に適用し、環境地図を生成する手法を提案した。提案手法では、ICP アルゴリズム時の最近傍点探索において、属性による探索範囲拡大と、異なる属性点群のマッチング時のペナルティを設けることで、属性を考慮した SLAM システムを構築した。実験では、属性付き ICP によって従来手法よりも位置合わせを正確に行い、精度の高い地図を生成した。実験では、属性付き ICP によって従来手法よりも位置合わせを正確に行い、精度の高い地図を生成した。その一方で、ループ閉じ込みの効果を十分に活かせなかった点は、属性付き ICP との相性やエンコードの精度も含めて更なる考察が求められる。

今後の展望としては、原発内は多量の特徴量を計測できる環境状態であることから、本研究の分野である逐次 SLAM と異なり、全フレームのランドマーク位置を拘束条件とし、最適化を行う完全 SLAM に着手することが重要と言える。

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）の成果の一部です（課題番号 30I107）。

References

- Besl, P. J. and McKay, N. D., A method for registration of 3d shapes, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.8, No.6 (1986), pp.679–698.
- Chetverikov, D., Svirkov, D., Stepanov, D. and Krsek, P., The Trimmed Iterative Closest Point algorithm, Proceedings of IEEE International Conference on Pattern Recognition, (2002), pp.545–548.
- Civera, J., Davison, A. J. and Montiel, J. M. M., Structure from Motion using the Extended Kalman Filter, Springer Tracts in Advanced Robotics, (2012), Vol.75.
- Engel, J. et al., LSD-SLAM: Large-Scale Direct Monocular SLAM, Proceedings of European Conference on Computer Vision, (2014), pp.834–849.
- Engel, J., Koltun, V. and Cremers, D., Direct sparse odometry, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, (2017).
- Hara, Y., Kawata, H., Ohya, A. and Yuta, S., 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, (2006), pp.3018–3023.
- Kaneko, S., Kondo, T. and Miyamoto, A., Robust matching of 3D contours using iterative closest point algorithm improved by M-estimation, Pattern Recognition, Vol.36, No.9 (2003), pp.2041–2047.
- Konolige, K., Grisetti, G., Kummerle, R., Burgard, W., Limketkai, B. and Vincent, R., Efficient sparse pose adjustment for 2D mapping, Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, (2010), pp.22–29.
- Mozos, O., Triebel, R., Jensfelt, P., Rottmann, A. and Burgard, W., Supervised semantic labeling of places using information extracted from sensor data, Robotics and Automation Systems, Vol.55, No.5 (2007), pp.391–402.
- Mur-Artal, R., Montiel, J. M. M. and Tardes, J. D., ORB-SLAM: A Versatile and Accurate Monocular SLAM System, IEEE Transactions on Robotics, Vol.31, No.5 (2015), pp.1147–1163.
- Sébastien, G. and Xavier, P., Multi-scale EM-ICP: A Fast and Robust Approach for Surface Registration, Proceedings of the European Conference on Computer Vision, (2002), pp.418–432.
- Sunderhauf, N., Pham, T.T., Latif, Y., Mailford, M. and Reid, I., Meaningful maps with object-oriented semantic mapping, Proceeding of the IEEE/RSJ International Conference Intelligent Robots and Systems, (2017), pp.5079–5085.