環境の持つ物理的属性を考慮した 3 次元地図生成

3D Map Building Considering Physical Properties of an Environment

○学　鈴木　龍紀（中央大）　　学　片岡　良介（中央大）　　正　池　　勇勳（北陸先端大）
正　藤井　浩光（千葉工業大）　　河野　仁　（東京工芸大）正　梅田　和昇（中央大）
Ryuki SUZUKI, Chuo University, r.suzuki@sensor.mech.chuo-u.ac.jp
Ryosuke KATAOKA, 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

In this paper, a novel SLAM (simultaneous localization and mapping) scheme that uses scan matching in an environment including various physical properties is proposed. In scan matching, localization is performed mainly focusing on the shape information of the environment. Abundant physical features existing in the environment can be very useful information when performing scan matching. Thus, we 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 that accurate map information can be built when using such physical information of the environment.

***Key Words*:** Scan matching, SLAM, ICP, Decommissioning activity

1.　緒言

日本は，世界的に見ても有数の地震大国であることから，被災地でも実働可能なロボットシステムの開発は急がれている．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．この出来事を通じ，現状のロボットシステムの課題として，原子力発電所内部の状況把握や情報収集が不十分であった点が挙げられた．よって，活動範囲の状況把握システムの開発は重要と言える．一方，原子力発電内部では，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，SLAM（simultaneous localization and mapping）と呼ばれる特徴量を使用した環境地図生成に関するシステムの研究が盛んに行われている．Konolige[1]らは，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[2]らは，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．これらを踏まえ，筆者ら[3]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マッチングによる地図生成システムを提案した．しかし，この手法は，環境特徴量のマッチングに連続したフレームのみ利用する手法に留まっている．そこで本論文では，離れたフレームにおける拘束条件にも適用可能な完全 SLAM 手法を提案する．

2.　提案手法概要

2.1　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 と近赤外線カメラやサーモカメラを融合させることで，周囲環境の 3 次元形状情報以外にも水源，熱源など環境の属性情報の取得が可能である．

2.2　システム概要

手法の全体的なプロセスを図 1 に示す．筆者らの手法[3]と同様に，逐次的な ICP-SLAM では，隣接フレームにて取得した属性付き点群情報に対して，属性付き ICP アルゴリズムを適応することで，ロボットの自己位置推定を行う．しかし，ICP アルゴリズムは誤差を最小化する計算であるため，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う．そこで，同じランドマークを観測したフレームの位置関係を踏まえて，ポーズ調整と呼ばれるロボットの軌跡の最適化を行う．この時，ロボットはすべてのフレームにおいて，属性点群のみをランドマークとして保存することで，ランドマークの形状を可能な限り正確に把握する．

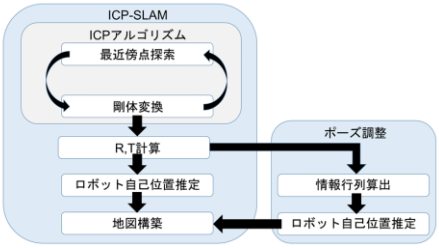


Fig. 1 Outline of proposed method.

3.　属性付き ICP アルゴリズム

属性付き ICP アルゴリズムは，筆者らが先行研究[3]で提案した同属性の点同士が対応付けされやすくなる ICP アルゴリズムである．本論文では，先行研究[3]と同様に逐次 SLAM にて用いる他に，ポーズ調整にて連続しない 2 つのフレーム間の相対位置の不確かさ$\boldsymbol{\Sigma}_{u,t}$を算出する際に用いる．

4.　ポーズ調整

本論文では，完全 SLAM 問題を扱っており，ポーズ調整を用いてロボット軌跡全体を最適化する．完全 SLAM では，ロボットの最新の位置・姿勢 $\boldsymbol{x}_t$ のみではなく，ロボットの軌跡全体 $\boldsymbol{x}_{1:t}$ に対して以下の事後確率を計算する．

$$p = (\boldsymbol{x}_{1:t}, \boldsymbol{m} | \boldsymbol{z}_{1:t}, \boldsymbol{u}_{1:t}) \tag{1}$$

ここで $\boldsymbol{m}$ は地図，$\boldsymbol{z}_{1:t}$ は計測値，$\boldsymbol{u}_{1:t}$ はロボットの制御入力である．ロボットの軌跡全体 $\boldsymbol{x}_{1:t}$ の管理はポーズグラフで行う．ポーズグラフとは図 3 に示すように，ロボット位置・姿勢をノー

ド，ノード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．ロボットは異なるフレームで同じランドマークを観測した時，そのランドマークを観測したノード間にエッジを作成する．

本論文では，$\boldsymbol{x}_{t-1}$ から $\boldsymbol{x}_t$ の状態遷移モデルを $\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}_{t-1}, \boldsymbol{x}_t)$，それらのノードの間にあるエッジの持つ相対位置を $\boldsymbol{d}_{t-1,t}$ とおく．また，$\boldsymbol{x}_t$ にて観測した点群に対応するランドマークを観測したフレームを $\boldsymbol{x}_u$ とおく．続いて，$\boldsymbol{x}_t$ と $\boldsymbol{x}_u$ 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 $\boldsymbol{d}_{u,t}$ とおく．すると，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．

$$J = \sum_t \left(\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}_{t-1}, \boldsymbol{x}_t) - \boldsymbol{d}_{t-1,t}\right)^T \boldsymbol{\Sigma}_t^{-1} \left(\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}_{t-1}, \boldsymbol{x}_t) - \boldsymbol{d}_{t-1,t}\right) + \sum_{(s,t)\in C} \left(\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}_u, \boldsymbol{x}_t) - \boldsymbol{d}_{u,t}\right)^T \boldsymbol{\Sigma}_{u,t}^{-1} \left(\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}_u, \boldsymbol{x}_t) - \boldsymbol{d}_{u,t}\right) \tag{2}$$

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，ロボット軌跡を最適化する．ここで，$\boldsymbol{\Sigma}_t$ はフレーム t における共分散行列でありロボット位置・姿勢に関する不確かさを，$\boldsymbol{\Sigma}_{u,t}$ 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．著者らの先行研究[3]に比べ，同じランドマークを観測したフレームを検知することから，ポーズグラフ内のエッジが増加し，より環境特徴量を活かすことが可能になる．

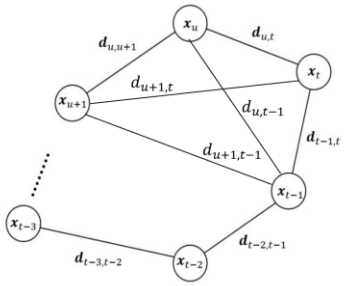


Fig. 2 Pose graph.

5. 実験

5.1 実験条件

本論文では，LiDAR で取得した点群情報に仮想的に属性を与えた．そして，これらの点群情報を用いて地図を生成し，提案手法の評価を行った．図 3(a)に実験で使用したロボットの様子と，表 1 にロボットの仕様を示す．遠隔操作探査ロボットは，Velodyne LiDAR VLP-16 とエンコーダを搭載している．実験は，図 3(b)に示す楢葉遠隔技術開発センターの要素試験エリアで行った．図 4 に真のロボットの軌跡を用いて生成した地図を示す．地図上の赤色と青色で描画された点群はそれぞれ，仮想的に付与した熱源と水たまり情報である．また，紫色の線は，ロボットの軌跡を示す．

Table 1 Specification of exploration robot.

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

(a) Exploration robot

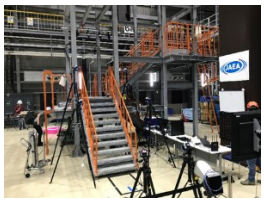

(b) Experimental environment.

Fig. 3 Experimental condition.

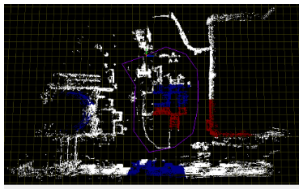
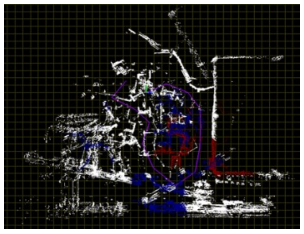


Fig. 4 Map built by trajectory of ground truth.

5.2 実験結果

図 5 に従来の ICP 用いて生成した地図と提案手法を用いて生成した手法をそれぞれ示す．また，真の地図との誤差は，従来の ICP を用いた手法は 0.320 m であったのに対し，提案手法は 0.011 m であった．これらから属性点群をランドマークとして用いることで，地図生成の精度が向上したことが分かる．


(a) Map built by ICP

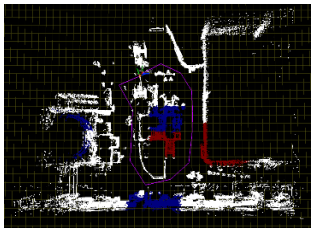

(b) Map built by proposed method

Fig. 5 Experimental results.

6. 結論

本論文では，環境の持つ物理的属性をランドマークとして SLAM に適応させ，環境地図を生成する手法を提案した．提案手法では，属性付き点群をランドマークとして毎フレーム保存し，ポーズ調整を行うことで，精度の高い完全 SLAM システムを構築した．今後の展望は，近赤外線カメラによる水たまりの属性点群システムを統合し，実環境に対応する SLAM システムの開発を行う．

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）．

参考文献

[1] Konolige, K., Grisetti, G., Kummerle, R., Burgard, W., Limketkai, B. and Vincent, R., “Efficient Sparse Pose Adjustment for 2D Mapping,” *Proceedings of the 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 22–29, 2010.

[2] 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*, pp. 3018–3023, 2006.

[3] 片岡良介，鈴木龍紀，池勇勳，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ア予稿集, 2020.