

ガンマ線検出器を搭載した移動ロボットによる複数放射線源の分布推定

○岸本 卓也, Woo Hanwool, 田村 雄介, 大島 佑介, 島添 健次, 高橋 浩之, 山下 淳, 浅間 一
(東京大学)

Localization of Radiation Sources Using a Mobile Robot Equipped with a Radiation Detector

○Takuya Kishimoto, Hanwool Woo, Yusuke Tamura, Yusuke Oshima, Kenji Shimazoe,
Hiroyuki Takahashi, Atsushi Yamashita, and Hajime Asama
(The University of Tokyo)

Abstract : In this paper, we propose an approach for the three-dimensional reconstruction of radiation source distribution by using the gamma-ray CT with a mobile robot equipped with a detector in unknown environment. Slam is used for localization of a mobile robot, and MLEM is applied to radioactivity distribution mapping. It was confirmed that the combination of two methods is significantly effective by experiments.

1. 序論

2011年に起きた東日本大震災において、福島第一原子力発電所は地震と津波によって甚大な被害を受けた。この福島第一原子力発電所の廃炉措置において、人や環境への影響を抑えた安全な燃料デブリの取り出しは重要な課題である [1]。福島第一原子力発電所等の被災した施設内に存在する放射性物質を取り出すためには、その位置を特定する必要がある。

施設内の放射線測定の研究として、ドローンを用いた研究が存在する [2]。この研究において半導体検出器を搭載したドローンを使用して、放射線を測定する手法が提案された。しかし、半導体検出器を用いた場合、検出器の存在する位置の放射線しか測定できないため、柱及び壁の中などの遮蔽された空間中の放射線を測定することは難しい。

この問題点を解決する研究として、コンプトンカメラを搭載した移動ロボットによる放射線源の分布推定の研究が存在する [3]。コンプトンカメラはガンマ線の飛来する方向を測定できるため、コンプトンカメラを用いてガンマ線 CT 法を行うことで、ロボットが侵入できない遮蔽された空間中の放射線も計測することが可能である。ガンマ線 CT 法を用いる場合、コンプトンカメラの空間上の位置姿勢が必要であるが、[3]においては、測定を行う環境中の障害物の位置などといった空間の地図が与えられた前提でコンプトンカメラの自己位置推定を行っている。しかし、被災した施設は内部の構造も地震や津波の被害により変化しており、内部の正確な地図を事前に得ることは困難である。そのため、未知の環境において周辺の地図を生成しながら自己位置推定を行うことが必要である。また、[3]において、測定対象として想定されている放射線源は1ヶ所のみ

である。しかし、実際の環境中に単数の線源のみが存在することは稀である。

そこで、本研究では未知の環境における複数放射線源の分布推定を研究の目的とする。

2. 提案手法

2.1 概要

本研究において、Simultaneous Localization And Mapping (SLAM) を用いた自己位置推定とガンマ線 CT 法を組み合わせることで、未知環境における複数放射線源の分布推定を行う (図 1)。ガンマ線検出器としてコンプトンカメラを使用し、自己位置推定の為のセンサとしてレーザーレンジファインダ及びオドメトリを使用する。レーザーレンジファインダ及びオドメトリを使用した SLAM を用いることで事前に環境地図を得ることのできない未知環境においてもコンプトンカメラの位置姿勢を推定でき、放射線源の3次元再構成が可能となる。

具体的には、ガンマ線検出器を搭載した移動ロボットが SLAM による自己位置推定を行いながら複数の地点でガンマ線を測定する。その後、観測点におけるガンマ線検出器の位置情報及び姿勢とガンマ線検出器の測定データをもとに Maximum Likelihood Expectation Maximization (MLEM) 法による放射線源の分布の三次元再構成を行う。

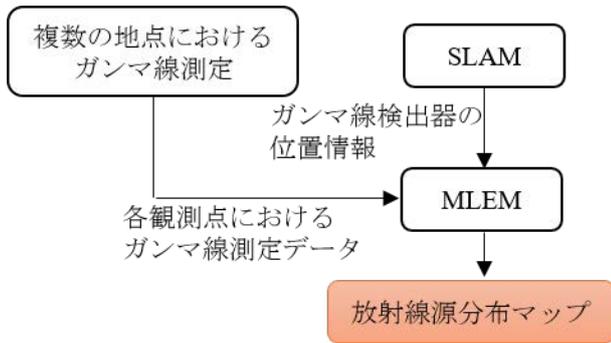


Fig. 1: 全体の流れ

2.2 SLAM

正確な放射線源の位置推定を行うために、本研究では移動ロボットにガンマ線検出器を載せて複数の場所で観測する。放射線源の位置を正確に推定するためには、ガンマ線検出器の正確な位置姿勢を知る必要があるが、オドメトリによる自己位置推定では車輪のスリップやノイズにより、誤差が発生する。この問題点を解決するために、本研究ではSLAMによる自己位置推定を用いる。具体的には、センサとしてレーザーレンジファインダ及びオドメトリを使用し、計算コストを低く抑えることができる Rao-Blackwellized particle filter に基づいた手法を用いる [4]。

2.3 ガンマ線 CT 法

ガンマ線 CT 法は、複数箇所から観測して得られた、それぞれの観測点におけるデータをイメージ空間に逆投影し、観測対象を三次元に再構成する手法である。

この際に単純逆投影法を用いるとノイズが大きく、鮮明な放射線分布の画像を得ることは難しい。そのため、本研究では Maximum Likelihood Expectation Maximization (MLEM) 法と呼ばれる方法を用いる。MLEM 法は最尤推定及び期待値最大化法を用いて画像再構成を行う [5]。これにより、単純逆投影法と比べてより精度の良い3次元再構成が可能となる。

また、ガンマ線の検出に関しては、軽量かつ小型で移動ロボットへの搭載に適しているコンプトンカメラを使用する [6]。コンプトンカメラによって観測点においてガンマ線が飛来した方向とエネルギーが測定できる。

3. 実験

提案手法の有効性を検証するため、実機を用いた観測実験を行った。移動ロボットとして、Pioneer-3DX を使用した。Pioneer-3DX は高さ 0.45 m、幅 0.38 m で奥行き 0.46 m の二輪で走行する移動ロボットである。レーザーレン

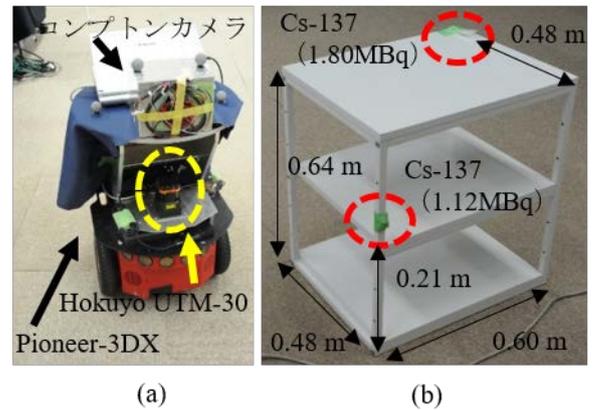


Fig. 2: (a) 移動ロボットとコンプトンカメラ及びレーザーレンジファインダ (LRF) の配置, (b) 放射線源の取り付け位置

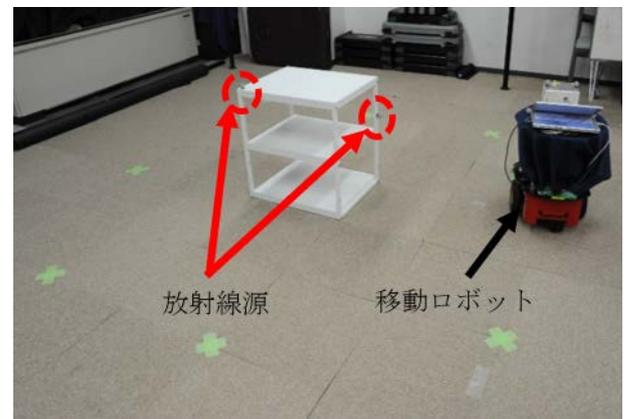


Fig. 3: 観測の様子

ジファインダは Hokuyo UTM-30 を使用した。レーザーレンジファインダ及びコンプトンカメラは図 2(a) のように配置した。散乱体及び吸収体にはそれぞれ 8×8 チャンネル、つまり 64 個のシンチレータが使用されている。放射線源には 1.80MBq 及び 1.12MBq の Cs-137 を使用し、図 2(b) のように 3 次元的に配置した。

実際の観測の様子を図 3 に示す。放射線源を取り付けた台座の周囲にテーピングされた緑の印の上で観測を行った。それぞれの観測点において移動ロボットは 30 分間静止し、コンプトンカメラによるガンマ線の測定を行った。見やすくするため図 3 では取り外しているが、実際の観測においては台座を覆う壁を設置した。

4. 結果

図 2(b) における Cs-137 (1.80MBq) を放射線源 1, Cs-137 (1.12MBq) を放射線源 2 とする。実験環境の水平面に xy 座標を取り、鉛直方向を z 軸で表す。3 次元再構成の

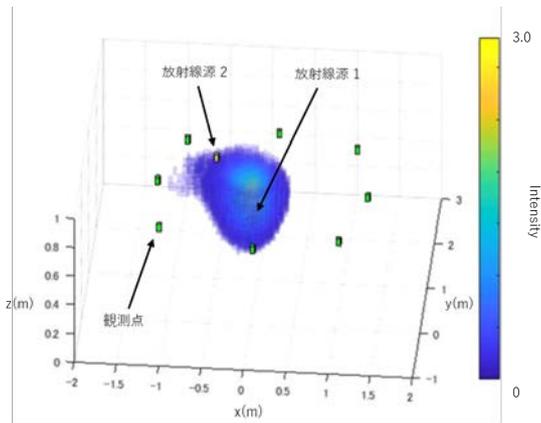


Fig. 4: 放射能分布

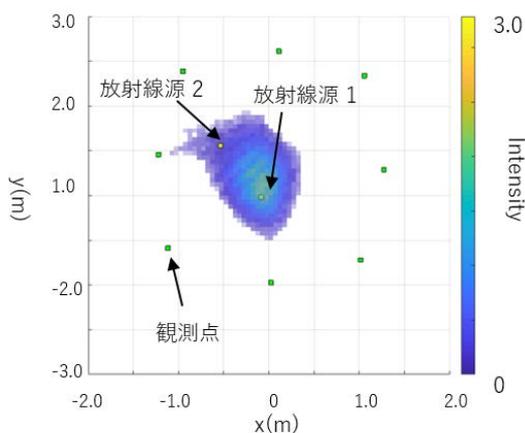


Fig. 5: z 軸から見た位置関係

結果を図 4 に示す。また、図 4 を z 軸方向から見た放射線源、観測点及び放射線源分布の xy 座標における位置関係を図 5 に示す。円形に並ぶ緑のボクセルは観測点の環境中での位置を示し、黄色で示された点は放射線源 1 及び 2 の環境中での位置を示す。各ボクセルの値は存在確率と放射線源の強度が掛け合わされた値であり、黄色に近づくにつれ高い値となる。放射線源 1 が存在する部分は値が高く推定されているが、放射線源 2 は放射線源 1 に比べて値が低く推定されている。これは SLAM の自己位置推定の真値との誤差が、再構成された放射線源の分布全体の位置に影響しているといった問題や、線源が弱くコンプトンカメラで測定できていないといった問題が考えられる。

5. 結論

本研究では、SLAM を用いた自己位置推定の結果を利用したガンマ線 CT 法を用いることで、複数線源の位置推定を行う手法を提案した。SLAM は、レーザレンジファインダ及びオドメトリを搭載した移動ロボットによって行った。それによって求められたコンプトンカメラの位置及び姿勢を利用して、MLEM 法による 3 次元再構成を行い、放射線源の分布マップを生成した。また、実験によって提案手法の有効性を検証した。

今後の展望は、より精度良く複数放射線源の位置を推定可能な手法を構築することである。

参考文献

- [1] 浅間 一: "東日本大震災および福島第一原子力発電所事故におけるロボット技術の導入とその課題 (その 1)", 日本ロボット学会誌, Vol 29, No. 7, pp. 658-659, 2011.
- [2] Frank Mascari, Taylor Wilson, Christos Pappachristos and Kostas Alexis: "Radiation Source Localization in GPS-denied Environment using Aerial Robots", Proceedings of 2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp. 6537-6544, 2018.
- [3] Doyeon Kim, Hanwool Woo, Yonghoon Ji, Yusuke Tamura, Atsushi Yamashita and Hajime Asama: "3D Radiation Imaging Using Mobile Robot Equipped with radiation detector", Proceedings of 2017 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, WeA3.1, 2018.
- [4] Giorgio Grisetti, Cyrill Stachniss and Wolfram Burgard: "Improved Techniques for Grid Mapping with Rao-Blackwellized Particle Filters", IEEE Transactions on Robotics, Vol 23, No. 1, pp. 34-46, 2007.
- [5] Arth Dempster, Natalie Laird and Donald B Rubin: "Maximum Likelihood From Incomplete Data via The EM algorithm", Journal of the Royal Statistical Society Series B (Statistical Methodology), vol 38, No. 1, pp. 1-38, 1977.
- [6] Yoshiaki Shikaze, Yukiyasu Nishizawa, Yukihiisa Sanada, Tatsuo Torii, Jianyong Jiang, Kenji Shimazoe, Hiroyuki Takahashi, Masao Yoshino, Shigeki Ito, Takanori Endo, Kosuke Tsutsumi, Sho Kato, Hiroki Sato, Yoshiyuki Usuki, Shunsuke Kurosawa, Kei Kamada and Akira Yoshikawa: "Field test around Fukushima Daiichi nuclear power plant site using improved Ce:Gd₃(Al,Ga)₅O₁₂ scintillator Compton camera mounted on an unmanned helicopter", Journal of Nuclear Science and Technology, Vol 53, No. 12, pp. 1907-1918, 2016.