

令和 6 年 6 月 3 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K19839

研究課題名（和文）隠匿された放射線源の迅速な探索

研究課題名（英文）Rapid Exploration of Concealed Radiation Sources

研究代表者

田村 雄介（Tamura, Yusuke）

東北大学・工学研究科・准教授

研究者番号：40515798

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、ガンマ線検出器を搭載した移動ロボットが環境中を動き回り、カルマンフィルタによって放射線源の存在確率の高い領域を推定する手法を開発した。また、その領域に対して詳細計測を行い、構造物の遮蔽効果を考慮して計測結果を補正することで、遮蔽物存在下でも放射線源の位置を正確に推定する画像再構成手法を開発した。提案手法の有用性をシミュレーションと実機実験により確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、これまで適切に考慮されていなかった構造物の遮蔽による影響を考慮した逐次近似画像再構成手法を提案した。これにより、事故後の原子力発電所内部や核物質テロ等、目に見えないところに放射線源が存在している場合でも適切にその位置を把握することができるようになり、作業員やその他の人の被曝リスク低減につながることを期待される。

研究成果の概要（英文）：In this research, a method was developed in which a mobile robot equipped with a gamma-ray detector moves around the environment and estimates regions with a high probability of a radiation source's existence using a Kalman filter. Additionally, detailed measurements were performed in those regions, and an image reconstruction method was developed to accurately estimate the position of radiation source even in the presence of shielding materials by correcting the measurement results while considering the shielding effects of structures. The usefulness of the proposed method was verified through simulations and actual experiments.

研究分野：ロボティクス

キーワード：放射線源推定 移動ロボット

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

原子力災害による放射性物質の飛散や、核物質テロによる放射性物質の隠匿などが発生した場合、迅速に放射線源の位置を特定し、除染・除去をすることが求められる。放射線源の位置特定には、線量計による空間線量の測定結果からの推定や、ガンマカメラによる計測に基づく推定が行われているが、放射線源を探索するためには対象とする空間を網羅的に計測する必要があるというのが現状であり、多大な時間を要する。また、このような放射線源探索を手で行うことは作業者を放射線被曝のリスクに晒すことになり、好ましくない。

特に、放射線源が意図的に隠匿されていたり、意図的ではなくても壁の奥などに存在したりする場合、遮蔽による放射線の減衰を無視することはできない。

2. 研究の目的

本研究では、ガンマ線検出器を搭載したロボットを用いて隠匿された放射線源を迅速に探索し、遮蔽物の影響を考慮した放射線源位置推定を行う手法の構築を目的とする。

3. 研究の方法

環境中に存在する放射線源の位置を迅速かつ正確に推定するため、本研究ではまずガンマ線検出器を搭載した移動ロボットが環境中を動き回ることにより、線源の存在確率の高い領域を推定する。このステップにより絞り込まれた領域に対して詳細な測定を行うことで、放射線源の位置を推定する。このプロセスにおいて、構造物の遮蔽効果を考慮して放射線計測結果の補正を行い、推定に利用する。提案手法全体の概要を図1に示す。



図1 提案手法全体の概要

(1) 構造物による遮蔽効果を考慮した計測補正

従来様々な研究で行われてきたように、複数箇所でのガンマ線計測結果から放射線源の位置を推定することができるが、放射線源と検出器の間に壁などの構造物が存在している場合、その構造物によって遮蔽されることで放射線は減衰してしまう。この影響を考慮せずに線源の位置を推定しようとすると、実際の線源の位置よりも遠くに見積もってしまうなど、正確な推定が困難となる。特に原子力発電所建屋内部等ではこの影響を無視することができない。

そこで本研究では、3次元LiDARによって計測されたロボット周辺の点群情報から環境の形状を得るとともに、Open3DとSemantic KITTIデータセットを用いて物体認識を行うことで、環境中の構造物を識別する手法を開発した。

識別された構造物の3次元データと設計図情報から得られる材質及び厚さの情報を統合し、遮蔽効果の推定に用いた。厚さ x [m]、線源弱係数 μ の構造物に入射した際の、入射強度 I_0 と構造物を通過した後に計測される強度 I の間には、 $I = I_0 e^{-\mu x}$ という関係があることが知られている。これに基づき、観測された放射線強度から入射強度を推定するモデルを構築した。このモデルは入力として検出器と放射線源の間の距離が必要となるが、これについては繰り返し計算において逐次得られた線源の推定位置から計算するものとした。

(2) 放射線源の存在確率の高い領域の推定

本研究における放射線源の位置推定には逐次近似画像再構成法の一つである最尤推定-期待値最大化法 (Maximum Likelihood-Expectation Maximization; ML-EM) を用いる。ML-EM法を用いることで質の高い再構成画像が得られるが、環境全体に対して実行しようとすると、多くの計測点と膨大な計算時間が必要となってしまう。

そのため本研究では、拡張カルマンフィルタ (Extended Kalman Filter; EKF) を用いて放射線源

の存在確率の高い領域を絞り込み、その領域に対してのみ ML-EM を行うという戦略を採用した。ここでは、ロボットの位置姿勢 3 次元と放射線源の位置 2 次元の計 5 次元の状態ベクトルを考え、観測ベクトルは線源の強度とロボットから見た線源の方向の 2 次元とした。この線源の強度は、(1)で述べたモデルに基づき計算される。EKF を用いて各時刻におけるロボットの位置姿勢と放射線源の位置を推定し、得られた放射線源の推定位置は、離散化されたセル空間上にその推定強度とともにプロットすることとした。ロボットが環境中を移動しながら放射線を計測し、最終的に高い値を持つセルが指し示す領域を放射線源の存在確率の高い領域とすることとした。

(3) 画像再構成による放射線源位置推定

ML-EM 法による画像再構成は、順投影、実投影・純投影比率の計算、逆投影、再構成画像更新の 4 つのステップからなる。本研究では構造物の遮蔽効果を考慮するため、パラメータ更新、構造物の有効厚さ計算、補正強度計算の 3 つのステップを追加し、拡張した(図 2)。拡張した提案手法では、更新された再構成画像に基づいて放射線検出器と線源との距離や角度を更新し、それに基づいて遮蔽の影響を考慮するための構造物の有効厚さを計算する。これらを用いて(1)で構築した計測補正手法により強度の補正を行い、補正した投影結果と順投影との比を計算するステップに戻る。このステップを繰り返すことにより、最終的な再構成画像を取得することができる。

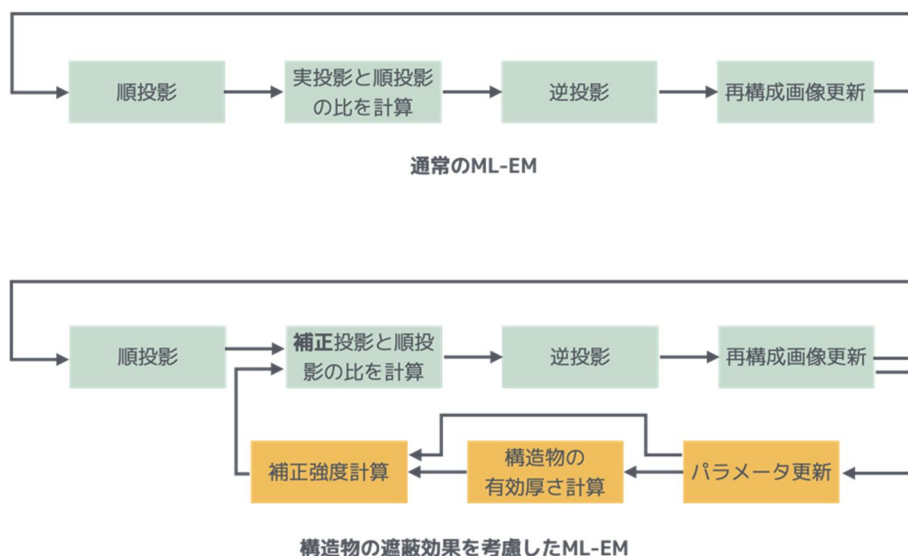


図 2 通常の ML-EM と構造物の遮蔽効果を考慮した ML-EM

4. 研究成果

提案手法の有効性を確認するために、シミュレーション検証と実機実験による検証を行った。シミュレーションでは、提案手法全体の有効性について確認し、実機実験では主に計測補正とそれに基づく画像再構成の有効性について確認した。

(1) シミュレーション検証

提案手法を Robot Operating System (ROS) 上で実装し、3 次元シミュレーション環境である Gazebo 上で放射線を扱うことのできる Gazebo_Radiation_plugin を用いて放射線源を探索するシミュレーションを行った。その結果、放射線源が 2 箇所程度の点線源であれば、EKF を用いた放射線源存在領域推定が十分機能することが確認された。また、提案した遮蔽効果を考慮した ML-EM を用いることで、通常の ML-EM に比べて放射線源の位置推定精度が向上することを確認した。提案手法とシミュレーションの結果については、国内・国際学会でその成果を報告した(文献 [10])。

(2) 実機実験

3 次元 LiDAR とガンマ線検出器を搭載した移動ロボットを用いて、ガンマ線源の位置を推定する実機実験を行った。実験には、多面体型指向性検出器(野上他, 2024)を用い、放射線源としては、ガンマ線源である ^{137}Cs を用いた。線源の強度は 10 MBq であった。また、放射線源の周辺 3 方向を厚さ 60 mm のコンクリート板で囲うことで、遮蔽による影響を検証することとした。実験の様子を図 3 に示す。ロボットは放射線源の周辺 8 箇所まで停止し、ガンマ線の測定を行った。



図3 実機実験の様子

10回の繰り返し計算を行った後の再構成画像を図4に示す。図から、通常のML-EMに比べて提案手法では真値の周辺に収束していることがわかる。再構成画像と真の画像の平均二乗誤差について比較したところ、提案手法の場合、通常のML-EMに比べて半分以下となることを確認した。

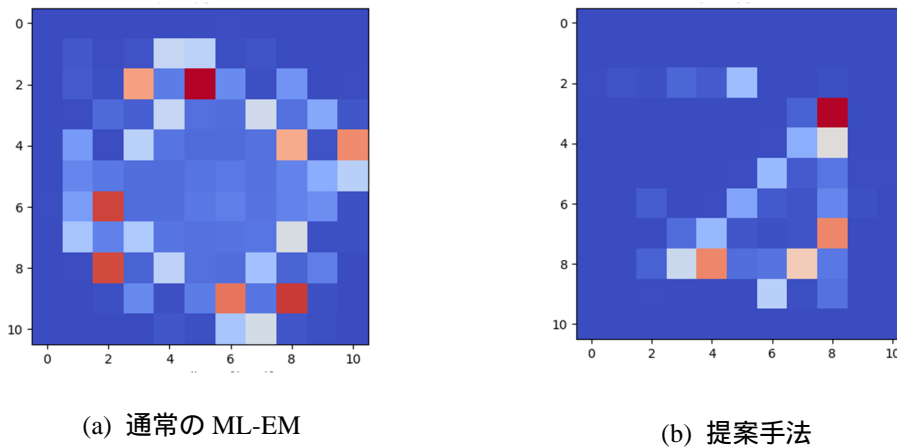


図4 再構成結果 (線源の真の位置: (7, 3))

<引用文献>

阮霸唯, 田村雄介, 平田泰久, “3次元物体認識を用いた構造物による遮蔽効果を考慮した計測補正”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2023 講演論文集, 2A1-B10, 2023.
 Baduy Nguyen, Yusuke Tamura, Yasuhisa Hirata, “Radiation Source Localization Considering Shielding Effect of Structures Using 3D Object Recognition,” Proceedings of the 2024 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, pp.122-128, 2024.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 鈴木洋佑, 田村雄介, 平田泰久
2. 発表標題 複数台ロボットでの粗密探索による放射線源分布推定
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 阮霸唯, 田村雄介, 平田泰久
2. 発表標題 3次元物体認識を用いた構造物による遮蔽効果を考慮した計測補正
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Baduy Nguyen, Yusuke Tamura, Yasuhisa Hirata
2. 発表標題 Radiation Source Localization Considering Shielding Effect of Structures Using 3D Object Recognition
3. 学会等名 2024 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (国際学会)
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

放射線源分布の推定
<http://tamlab.jp/project/radiation/>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------