

# ガンマ線検出器を搭載した移動ロボットによる空間中の構造物を考慮した放射線源分布の3次元再構成

3D Reconstruction of Radiation Sources Considering Objects in Measurement Environment  
by a Mobile Robot Equipped with a Gamma-ray Detector

○学 岸本 卓也 (東大)      正 Woo Hanwool (東大, 秋田県立大)      正 田村 雄介 (東大)  
島添 健次 (東大)      高橋 浩之 (東大)      正 山下 淳 (東大)  
正 浅間 一 (東大)

Takuya KISHIMOTO, The University of Tokyo  
Hanwool WOO, The University of Tokyo / Akita Prefectural University  
Yusuke TAMURA, The University of Tokyo  
Kenji SHIMAZOE, The University of Tokyo  
Hiroyuki TAKAHASHI, The University of Tokyo  
Atsushi YAMASHITA, The University of Tokyo  
Hajime ASAMA, The University of Tokyo

This study proposes a new method to reconstruct 3D radiation distribution considering objects in measurement environment. A mobile robot equipped with a gamma-ray detector and a 3D LiDAR is used. The gamma-ray CT is applied for image reconstruction. The mobile robot observes radiation at different points and localizes the position of the robot. In observing process, the robot makes environment map which is made from point clouds at multiple observing points. By using this map made from point clouds, precise reconstruction area is set and reconstruction is conducted in the designated area. Experimental results show the effectiveness of the proposed method.

**Key Words:** Robot, Radioactive distribution, SLAM

## 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。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、その分布を特定する必要がある。

この問題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[2]。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、複数の観測点で得られたデータを用いて放射線源分布の3次元再構成を行うことが可能である。一方で先行研究の手法[2]では再構成を行う空間の選定を行っていないために、放射線源の存在しえない領域に対しても放射線源の分布を推定していることが問題である。

そこで、本研究では再構成領域に関して適切な補正を加えることで、より放射線源が存在する確率の高い部分に画像再構成領域を設定して放射線源の分布推定を行うことを研究の目的とする。

## 2 提案手法

### 2.1 概要

複数の異なる位置で得られたセンサデータを用いて計測対象の3次元形状を再構成する手法としてComputed Tomography (CT) 画像再構成が存在する。本研究において、移動ロボットを用いて幾つかの観測点で放射線計測を行い、観測点におけるセンサの位置姿勢と放射線計測の結果を用いてCT画像再構成を行うことで放射線源分布の3次元再構成を行う。

ガンマ線検出器としてコンプトンカメラを使用し、自己位置推定及び環境地図を作成するためのセンサとして3次元LiDARを使用する。3次元LiDARを用いて作成した環境地図中の構造物の存在する領域に対して3次元再構成を行うことで、より精度の良い放射線源の分布推定を行う。

### 2.2 Maximum Likelihood Expectation Maximization

ガンマ線CT法は、複数箇所の観測結果を用いて観測対象を3次元に再構成する手法である。本研究では提案手法[2]と同様にMaximum Likelihood Expectation Maximization (MLEM) と呼ばれる方法を用いる。MLEM法は最尤推定を用いた繰り返し計算により画像再構成を行う手法である[3]。

MLEM法は、空間中にコンプトンカメラのデータを重ね合わせる単純逆投影法とは異なり、最尤推定と期待値最大化を組み合わせることで放射線源分布の統計的な推定を行う手法である。そのため、計測データの誤差から生じるノイズに強いという特徴がある。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。

### 2.3 構造物の情報を考慮した放射線源分布の3次元再構成

本研究における放射線源としてCs-137やCo-60等の金属元素を想定する。これらは常温環境下では固体で存在している。そのため、これらの放射線源の位置を推定するとき、構造物が存在する領域のみに放射線源が存在すると考えられる。

本研究では3次元LiDARを用いて環境地図の作成とその位置図上での自己位置の推定を行う[4]。また、これによって作成した環境地図を用いて環境中の構造物の位置を把握する。3次元LiDARは光の反射を用いた計測を行う性質上、計測できるのは構造物の表面形状のみである。そのため環境地図中の点群が存在しない領域の内、点群によって囲われている領域に関しては構造物の内部であるために再構成領域に含む必要がある。

これらを考慮して点群の存在する領域及び未計測であるために点群の存在していない領域を特定する。その後、特定した領域内に対して、MLEMによる放射線源の3次元再構成を行う。

## 3 構造物の情報を考慮した3次元再構成の実証実験

### 3.1 実験設定

提案手法の有効性を検証するために実機による実験を行った。移動ロボットとしてPioneer-3DXを使用した。Pioneer-3DXの

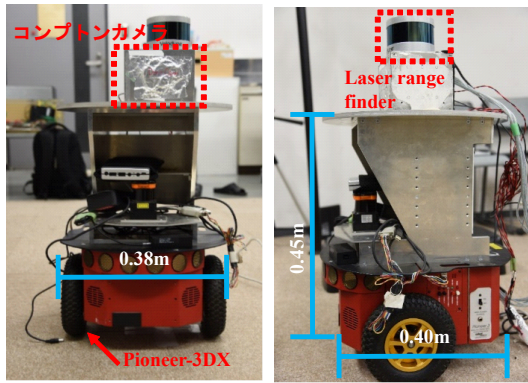


Fig.1 移動ロボットとセンサの配置

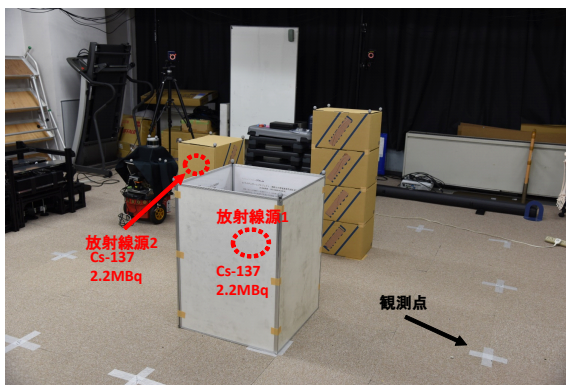


Fig.2 移動ロボットとセンサの配置

大きさは  $0.38 \times 0.40 \times 0.45\text{m}$  であり、コンプトンカメラと3次元 LiDAR を図1に示すように配置する。また、放射線源として  $2.2\text{MBq}$  の Cs-137 を2つ使用する。放射線源の位置を図2に示す。放射線源は箱及び壁で覆われた内部に配置されている。また、床面の白十字の印は観測点の位置を示しており、移動ロボットは観測点10ヶ所でそれぞれ30分間静止して放射線の計測を行う。

### 3.2 実験結果

3次元 LiDAR による計測で得られた環境地図に関して再構成領域を設定し、放射線源分布の再構成を行う。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。従来手法である構造物を考慮しない再構成結果を図3に示し、提案手法による再構成結果を図4に示す。円形に配置された緑の点は観測点の位置を示しており、赤の2点は放射線源の位置を示す。また、環境中に存在する構造物が計測できていることが確認できる。

従来手法及び提案手法それぞれの再構成に関して両者とも放射線源1の近傍に放射線源の分布が存在しない。これはガンマ線のコンプトンカメラに対する入射角が大きくなることで、ガンマ線の計測数が低下した観測点が存在するため、放射線源の分布が一方の放射線源の位置に局所化したためであると考えられる。

次に、放射線源2の近傍に推定された放射線源分布に関して考察を行う。従来手法による再構成では本来であれば放射線源が存在する可能性の低い構造物の外部に対しても分布が広がっている。一方で提案手法による再構成では適切な再構成領域の指定を行ったことにより、実際の放射線源の位置の近傍にのみ分布が推

Table 1 放射線源の位置推定の評価

手法	推定位置	真値との距離
従来手法 [2]	(-0.37, 0.13, 0.50)	0.40
提案手法	(-0.23, 0.21, 0.49)	0.09
真値	(-0.17, 0.21, 0.55)	

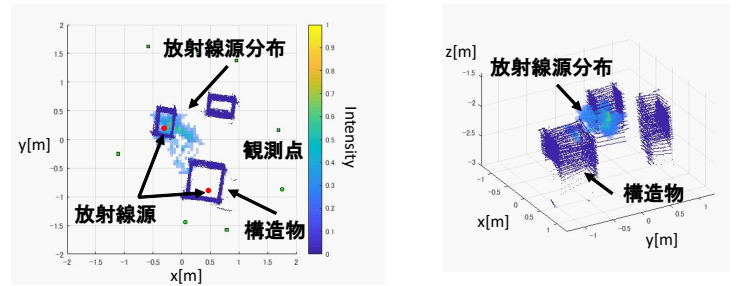


Fig.3 従来手法による画像再構成

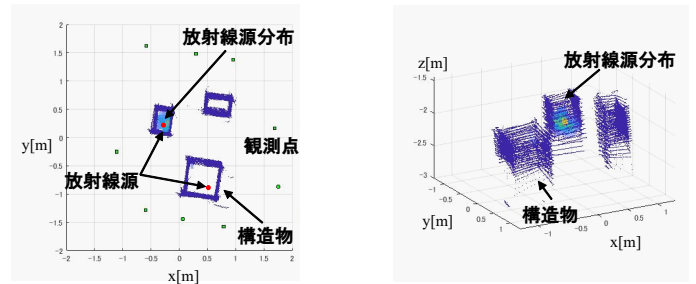


Fig.4 提案手法による画像再構成

定されている。放射線源分布に対して加重平均を取り線源の位置を推定した(表1)。提案手法において位置推定の精度が向上している。

## 4 結論

本研究では、3次元 LiDAR を用いて作成した環境地図を用いて構造物の情報を入力し、放射線源の存在する可能性の高い領域のみに対して3次元再構成を行う手法を提案した。

提案手法を用いることで空間中の構造物の位置形状を考慮した、放射線源の3次元再構成を行った。一方で観測を行う際のコンプトンカメラの位置姿勢によって単位時間当たりのガンマ線計測数が低下し再構成に影響することを確認した。

今後の展望として、計測環境においてガンマ線計測の効率を最大化するようなコンプトンカメラの最適な位置姿勢を決定して観測を行うシステムの構築が重要であると考えられる。

## 5 謝辞

本研究の一部は、文部科学省「英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業」により実施された「遠隔操作技術及び核種分析技術を基盤とする俯瞰的廃止措置人材育成」の成果である。

## 参考文献

- [1] 東京電力株式会社, “福島第一原子力事故調査報告書(中間報告書),” [http://www.tepco.co.jp/cc/press/betull\\_j/images/i11202c.pdf](http://www.tepco.co.jp/cc/press/betull_j/images/i11202c.pdf), 閲覧日 2018.12.15.
- [2] 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 the 2017 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII2017), pp. 444-449, 2017.
- [3] Xavier Lojaco: “Image Reconstruction for Compton Camera with Application to Hadron-therapy (Doctoral dissertation),” INSA Lyon, France.
- [4] Ji Zhang and Sanjiv Singh: “LOAM: Lidar Odometry and Mapping in Real-time,” Proceedings of Robotics: Science and Systems, pp. 55-63, 2014.