

ガンマ線検出器の位置姿勢の不確実性が放射線源の位置推定結果に与える影響のシミュレーション検証

○金 度演 (東京大学), 禹 ハンウル (東京大学), 池 勇勲 (東京大学),
田村 雄介 (東京大学), 山下 淳 (東京大学), 浅間 一 (東京大学)

Effect of Localization of Radiation Sources with Pose Uncertainty of Detector in Simulation Experiment

○Doyeon KIM (The University of Tokyo), Hanwool WOO (The University of Tokyo),
Yonghoon JI (The University of Tokyo), Yusuke TAMURA (The University of Tokyo),
Atsushi YAMASHITA (The University of Tokyo), and Hajime ASAMA (The University of Tokyo)

Abstract : In this paper, we propose an approach to estimate accurate localization of radiation source using the gamma-ray CT with a detector mounted on a mobile robot. The detector on mobile robot has uncertainties of its pose. We confirmed that the error on the position related to accuracy of the localization of radiation source with simulation experiment.

1. 緒言

2011 年, 東日本大震災の地震と津波により被害があった福島第一原子力発電所の廃止措置において燃料デブリの取り出しは重要な課題となっている [1]. 溶け落ちて固まった核燃料である燃料デブリを取り出すためには, まず, 原子炉の建屋内部での燃料デブリの位置を観測する必要がある.

燃料デブリの位置を推定する研究としてミュオンを利用した福島原発の原子炉内部の可視化技術がある [2]. この研究では, 地球の大気と宇宙線の衝突により生じる素粒子のミュオンが物質を通過する際, 散乱する現象を用いて压力容器内部を可視化した. この結果から燃料の大部分が溶け落ちて压力容器底部もしくは格納容器底部にあると推定された. しかし, 原子炉建屋の内部での燃料デブリの正確な位置は確認できていないのが現状である. 本研究では, 放射線源としての燃料デブリに注目し, ガンマ線 CT 法を用いた正確な線源の位置推定を行う手法を提案する. ガンマ線 CT 法とは, 異なる位置における検出器の観測データから線源の位置分布を推定するため, 画像の再構成を用いる手法である.

福島第一原子力発電所の原子炉建屋の内部では, 高い放射線量のため, 人による作業が困難である. そのため, 本研究では移動ロボットに搭載した検出器によるガンマ線 CT 法を提案する. 医療現場で使用されているガンマ線 CT 法は検出器が線源に対して一定な距離と観測姿勢を保つため, 検出器の位置姿勢情報は正確である [3]. しかし, 移動ロボットに搭載された検出器の位置姿勢情報には, 不確実性が存在する. 本研究では, ガンマ線検出器の位置における不確実性が線源の位置推定結果の精度に及ぼす影響を検証する.

2. 放射線源の位置推定

2.1 ガンマ線の検出

本研究では, 放射線源から照射される放射線の内, ガンマ線を検出するため, 図 1 のような検出器を使用する. 図 1(a) は, コリメータが付着された検出器を示す. 放射線源から放出されたガンマ線のうち, コリメータにより遮蔽されず, シンチレータに到達したガンマ線が検出器に感知される. コリメータに到達したガンマ線は, コリメータを通過できず, 全て遮蔽される. 検出器からは, ガンマ線が検知されたシンチレータの番号及び検出器座標系での位置情報, そして感知されたガンマ線の数データとして得られる. 図 1(b) は, シンチレータに対して感知可能なガンマ線の入射角度について示す. ここで, $\theta'_{\max}$ はシンチレータに入射されるガンマ線がコリメータにより遮蔽されず, 感知可能な最大入射角度を意味する. 本稿では, シンチレータの大きさが十分小さいため ($0.01 \text{ m} \times 0.01 \text{ m}$), 検出器に感知される全てのガンマ線を ($0 \leq \theta' \leq \theta'_{\max}$), シンチレータの中心に到達するガンマ線 ($0 \leq \theta \leq \theta_{\max}$) に代表させる.

2.2 移動ロボットに搭載した検出器による計測

本研究では, 移動ロボットに搭載した検出器によるガンマ線 CT を想定する. 検出器の位置姿勢情報は, 検出器が移動ロボットに搭載されているため, 移動ロボットとの相対位置姿勢が既知である. そのため, 移動ロボットの自己位置推定により求めることが可能である.

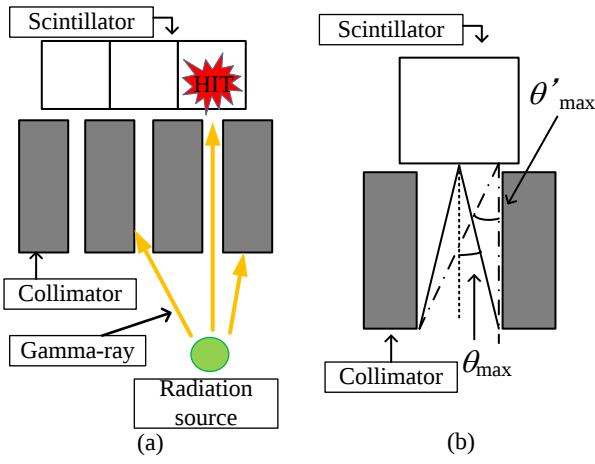


Fig. 1: Gamma-ray detector: (a) attached collimator on detector, (b) maximum incidence angle θ .

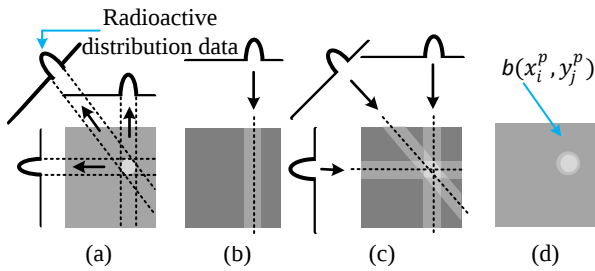


Fig. 2: Back-projection: (a) measurement from source, (b) back-projection on reconstruction image plane, (c) reiterate back-projecting, (d) localized radiation source

一方、オドメトリによる移動ロボットの位置姿勢情報には誤差が生じるため [4][5], これは検出器の位置情報に対する不確実性につながる。このような誤差は一般に正規分布としてモデル化可能である。

2.3 画像再構成による線源の分布推定

本節では、検出器から得られたデータを用いて逆投影画像を作成し、線源の位置を推定する過程を説明する [6]. 図 2(b) と図 2(c) は、複数の観測データが逆投影手法により画像平面上で再構成される過程を示す。複数の観測データが逆投影され、画像で重なる部分が生じる。従って、図 2(d) のように画像平面上に観測データが重ねられた位置が放射線源の位置であると推定可能である。図 3 は検出器の最大入射角度を考慮した逆投影手法を示す。観測点 (x_n^D, y_n^D) において得られた観測データ $f(x_n^D, y_n^D)$ を用いて逆投影画像 $b(x_i^P, y_j^P)$ を作成する。検出器が移動経路に沿って M 箇所の観測点から観測データを取得したとすると、 n 番目の観測点 (x_n^D, y_n^D) から得られた観測データを $f(x_n^D, y_n^D)$ とする。2次元平面内の対象領域を大きさ $\Delta x = 0.01$ m, $\Delta y = 0.01$ m の画素により分割する。任意

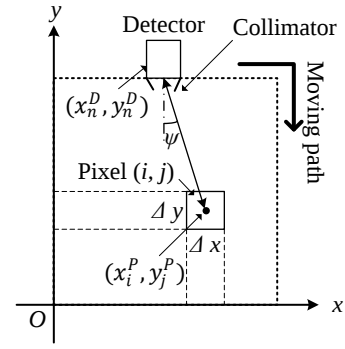


Fig. 3: Back-projection imaging processing.

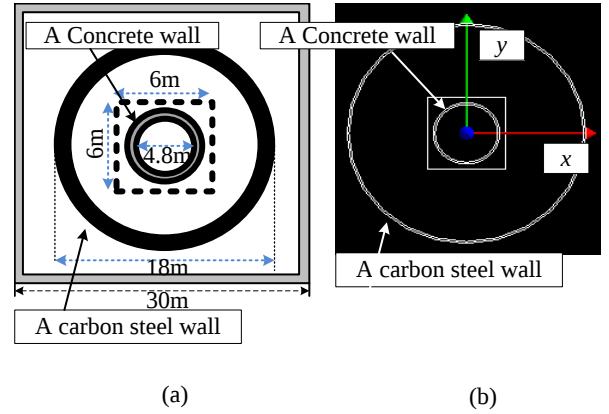


Fig. 4: Experiment environment: (a) top view of the inside nuclear power plant, (b) simulated environment.

の画素 (i, j) の中心座標を (x_i^P, y_j^P) とすると、検出器の観測方向との角度は次のように表される。

$$\psi = \arccos(y_j^P / \sqrt{(x_i^P - x_n^D)^2 + (y_j^P - y_n^D)^2}) \quad (1)$$

この時、 M 個のすべての観測データにおいて任意の画素 (i, j) の中心座標を (x_i^P, y_j^P) とし、検出器の観測方向との間の角度 ψ が検出器の最大入射角度 $\theta_{\max}$ の範囲内にある観測データのみを重ね合わせることで次のように画像再構成を行う。

$$b(x_i^P, y_j^P) = \sum_{n=1}^M f(x_n^D, y_n^D) \quad (\psi \leq \theta_{\max}) \quad (2)$$

従って、式 (2) を用いて求められた $b(x_i^P, y_j^P)$ を推定された線源の位置分布とする。

3. シミュレーション実験

3.1 シミュレーション実験環境

移動ロボットの不確実性を含む線源の位置推定結果の影響を検証するため、放射線シミュレーションツールである

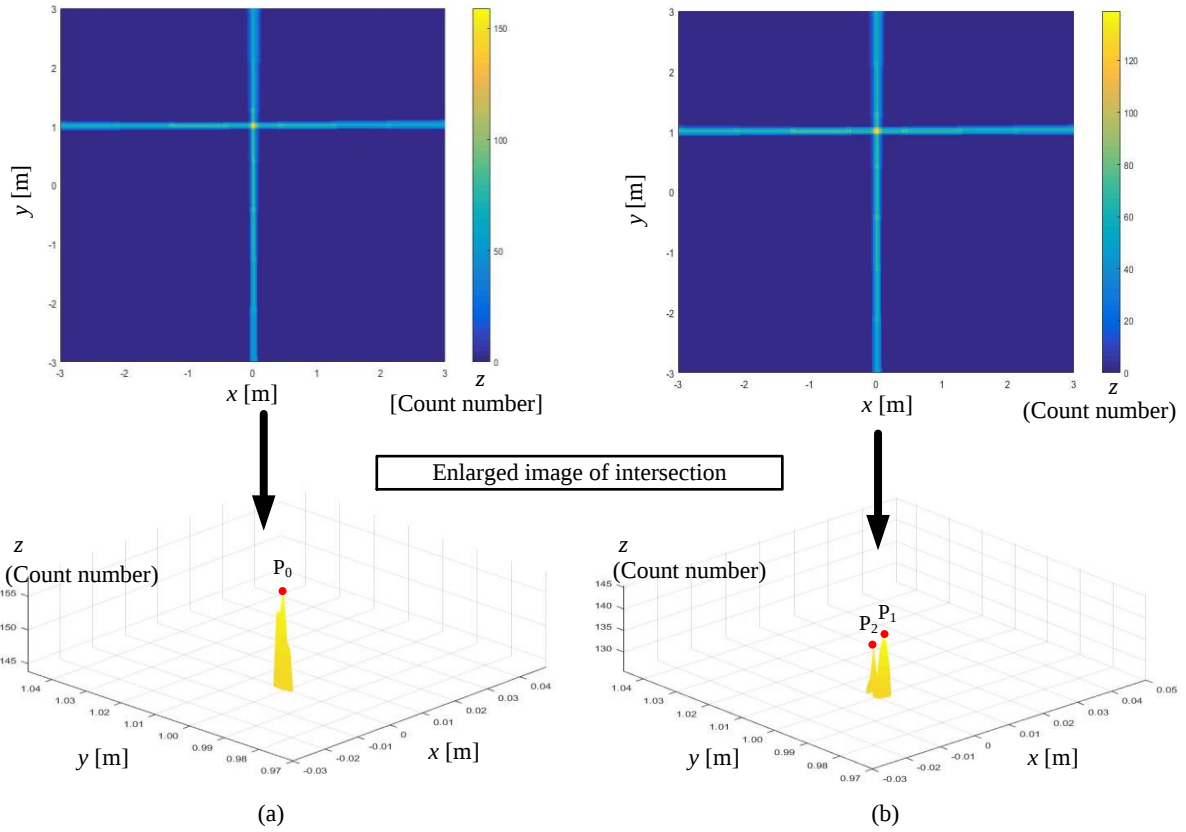


Fig. 5: Localized result of radiation source: (a) result without uncertainty on detector, (b) result with existent uncertainty on detector

Geant4[7]を用いたシミュレーション実験を行った．本実験では，線源と検出器が同じ高さにあると仮定し，2次元の環境で実験を行った．シミュレーションの環境を図4(a)に示す．30 m × 30 mの空間に直径18 mの炭素鋼の壁が位置する．検出器を搭載する移動ロボットは，炭素鋼の壁の内部の6 m × 6 mの正方形の軌跡に沿って観測を行う．一方，ロボットの移動軌跡の内には，直径4.8 mのコンクリートの壁があり，コンクリートの壁の内部に放射線源が存在する．図4(b)はGeant4を用いて作成したシミュレーション環境を示す．シミュレーション内の座標系は水平方向の x 軸と垂直方向の y 軸により定められた．原点を中心とする直径4.8 mのコンクリートの壁と炭素鋼の壁を囲む正方形のロボットの移動軌跡が図4(b)のように設定された．シミュレーションに用いた線源は，ガンマ線を放出する点線源を想定し，(0 m, 1 m)に位置させた．

実験に用いた検出器は一列に連続した8個の0.01 m × 0.01 mのサイズを有するシンチレータで構成された．また，コリメータによりガンマ線の最大入射角度は $\theta_{\max} = 0.677^\circ$ とした．検出器を搭載した移動ロボットは定められた軌跡に沿って動き，その軌跡の上に障害物や構造物はないと設定した．ロボットは，0.08 mの間隔で進行しながら観測を行った．移動ロボットによる検出器の位置情報に含まれる誤差は，検出器の移動と共にランダム誤差

が生じるように設定をした．

3.2 実験結果

図5(a)は検出器の位置姿勢に不確かさがない場合の線源の位置推定結果を，図5(b)は不確かさを含んだ場合に対する線源の位置推定の結果である．図5の上段は，検出器から得られた観測データを基に逆投影手法を用いた画像再構成による線源の位置推定結果である．各画像は水平方向の x 軸，垂直方向の y 軸， x 軸と y 軸に垂直する z 軸を有し， z 軸は逆投影による観測データの値を示す．検出器の位置姿勢情報に不確かさがない場合の結果は， P_0 (0 m, 1.01 m)で線源位置の真値に近い結果が得られた． y 値の誤差0.01 mは検出器の最大入射角度を考慮した再構成から生じたと考えられ，誤差発生の様子を図6に示す．図6(a)は，検出器の最大入射角度 $\theta_{\max}$ を0にして再構成を行った場合の結果である．推定される線源の位置は，逆投影した観測データが重なった部分である黄色の画素の中心になる．一方，図6(b)は検出器の最大入射角度 $\theta_{\max}$ を0以上にし，再構成を行った場合の結果を示す．逆投影により重なった画素の面積は，赤い線で囲んだ図6(a)の結果より大きい．従って，線源の位置推定結果の誤差は，検出器の最大入射角度が原因であると考えられる．

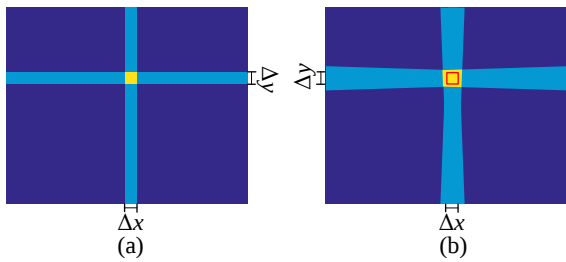


Fig. 6: Zoomed image of intersection in reconstruction image: (a) intersection area without considering incidence angle, (b) intersection area with considering incidence angle

一方、検出器の位置姿勢に不確実性を含む場合には、検出器の位置誤差により、線源の位置推定結果が (0.02 m, 1.03 m) であった。図 5 の下段は、再構成画像の上で推定された線源の位置を拡大した結果である。図 5(a) の下段は z の最大値 159 を有し、 P_0 (0 m, 1.01 m) に推定された線源の位置結果を示す。一方、図 5(b) の下段の結果では、 $z = 139$ を有する P_1 (0.02 m, 1.03 m) に線源の位置が推定された。しかし、もう 1 点 P_2 (0.02 m, 1.00 m) にも線源が推定され、 $z = 136$ は低いものの真値により近い。従って、以上のシミュレーション実験により、検出器の位置姿勢の不確実性が線源の位置推定結果に与える影響を確認した。

4. 結言

本稿では、移動ロボットに搭載した放射線検出器を用い、複数の観測位置で得られる観測データを基としてガンマ線 CT 法による放射線源の位置推定法を提案した。本稿では、移動ロボットから生じる検出器の位置姿勢に不確実性が含まれる場合、線源の位置推定結果に与える影響を検証するため、シミュレーション実験を行った。その結果、推定された線源の位置にも誤差が含まれることを確認された。今後、このような線源の位置推定における誤差を修正するため、移動ロボット simultaneous localization and mapping (SLAM) 手法の適用を計画している。また、実際のデブリは点線源ではなく、広がりをもつため、デブリのような線源の分布を考慮した位置推定の手法が要求される。そして、実際の福島第一原発の原子炉の建屋の内部は、今回シミュレーションで再現した原子炉の建屋より複雑で、障害物が多い。そのため、今後、観測経路計画の議論が必要である。

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] 廃炉・汚染水対策関係閣僚等会議, “東京電力(株)福島第一原子力発電所の廃炉措置等に向けた中長期ロードマップ”, <http://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/pdf/20160317.pdf>, (2016 年 9 月 14 日アクセス)
- [2] H. Miyadera, K.N. Borozdin, S.J. Greene, Z. Luki, K. Masuda, E.C. Milner, C.L. Morris, and J.O. Perry, “Imaging Fukushima Daiichi Reactors with Muons”, *AIP Advances*, Vol. 3, pp. 052133, 2013.
- [3] H. Turbell, “Cone-Beam Reconstruction Using Filtered Backprojection”, *Ph.D. Dissertation*, Linköping University, Sweden, 2001.
- [4] U. Frese and G. Hirzinger, “Simultaneous Localization and Mapping - A Discussion”, *Proceedings of the IJCAI Workshop on Reasoning with Uncertainty in Robotics*, pp. 17–26, 2001.
- [5] F. Chenavier and J.L. Crowley, “Position Estimation for a Mobile Robot Using Vision and Odometry”, *Proceedings of the 1992 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2588–2593, 1992.
- [6] 田中正行, 高山潤也, 大山真司, 小林彬, “地中探査レーダのための逆投影ヒストグラム法による画像再構成”, 計測自動制御学会論文誌 Vol. 38, No. 9, pp. 739–746, 2002.
- [7] J. Allison, *et al.*, “Geant4 Developments and Applications”, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Vol. 53, No. 1, pp. 270–278, 2006.