# コンプトンカメラを搭載した移動ロボットによる SLAM を用いた放射線源の位置推定手法の構築 Radiation Source Localization Using SLAM for Compton Camera Mounted on Mobile Robot

〇学	金	度淌	寅 (東京大学)		禹 ノ	ヽンウル	(東京大学)
正	池勇	勳	(東京大学)	正	田村	雄介	(東京大学)
正	山下	淳	(東京大学)	正	淺間	<u> </u>	(東京大学)
Doyeon KIM, the University of Tokyo, kim@robot.t.u-tokyo.ac.jp							
Hanwool WOO, the University of Tokyo							

Yonghoon JI, the University of Tokyo

Yusuke TAMURA, the University of Tokyo

Atsushi YAMASHITA, the University of Tokyo

Hajime ASAMA, the University of Tokyo

For taking out the melted down nuclear fuel debris in Fukushima nuclear power plant, localization of the debris inside plant is required. Because of high radioactive in Fukushima nuclear power plant, a mobile robot mounting the Compton camera is used in order to investigate the power plant instead of human. However, the mobile robot has uncertainties of its pose. We propose a method to localize radiation source and the robot using extended Kalman Filter (EKF)based simultaneous localization and mapping (SLAM) with Compton camera. We evaluated the performance of proposed method in a simulated environment.

Key Words: Radiation source localization, Compton camera, SLAM, Mobile robot

# 1 緒言

2011 年 3 月 11 日の東日本大震災により福島原子力発電所に 事故が発生し,内部にあった核燃料が溶け落ちた.廃炉作業にお いて作業者の被ばくを考慮した線量の低減のために,溶け落ちた 核燃料デブリの取り出しは重要な課題になっている.デブリを原 子炉建屋の内部から安全に取り出すためには,デブリの位置を正 確に把握する必要がある.放射線源の位置を推定する従来手法と してサーベイメータを用いて,空間線量を測定することによる放 射能分布マップを作成し線源の位置を推定する手法がある.この ような手法は,作業者がサーベイメータを携帯して移動しなが ら,空間線量を測定しなければならないため,高放射能を有する 環境では,作業者の被ばくの可能性が高くなる.本研究では,図 1に示すようにコンプトンカメラのようなガンマ線検出器を移動 ロボットに搭載し,原子炉内部のガンマ線を測定するタスクを想 定する.

Jiang らはドローンにコンプトンカメラを搭載し,屋外環境の 放射能汚染環境を飛行しながら,多視点での計測により,放射能 分布マップを生成した [1].生成されたマップから汚染環境の放 射能強度が周りに比べ高いところに線源が位置すると推定した. しかし,Jiang らの研究では,全ての線源が地面を基準とした表 面上に存在するという仮定でマップを生成するため,地面の下や 上に放射線源が存在する場合には,その位置を正確に推定するこ とが困難である.また,ドローンや移動ロボットのような移動体 には,位置姿勢不確実生による誤差が存在するため,それらを考 慮した手法を構築する必要がある.Kim らは,移動体の位置姿勢 不確実性が放射線源推定結果に及ぼす誤差について報告した[2].

本研究では、コンプトンカメラを搭載した移動ロボットの 査による simultaneous localization and mapping (SLAM)[3][4] 手法を適用し、デブリのような放射線源の位置を推定する手法を 構築する.本手法では、拡張カルマンフィルタに基づく SLAM を利用し、多視点におけるコンプトンカメラにより得られる線源 の方位角情報からロボットの位置姿勢及び線源の位置に関する同



Fig.1 Radiation source localization inside nuclear facility using Compton camera mounted on a mobile robot.

時推定を行う [6].本報告では,構築した提案手法を検証するため,2次元環境でのシミュレーション実験を行う.

# 2 コンプトンカメラの計測モデル定義

コンプトンカメラは, 放射線源から飛来してくるガンマ線を計 測してガンマ線の飛行方向を算出することにより線源が存在する 方向情報を含む画像を生成する. コンプトンカメラは, 図 2(a) ように散乱層と吸収層と呼ばれる 2 枚のガンマ線センサで構成さ れる. コンプトンカメラは, 入射されたガンマ線の内, 散乱層で 散乱し, 吸収層に吸収されるガンマ線における各層に寄与された



Fig.2 Principle of Compton camera: (a) observation of gamma-ray to camera and (b) imaging concept of Compton camera.



Fig.3 Concept of Compton camera-based SLAM.

エネルギーと検出位置を測定する.その測定データを用いてコン プトン散乱の運動方程式を解くことにより,ガンマ線の散乱角度 *θ*が導出される.図2(b)のように,導出したガンマ線の散乱角度 からカメラ全面にコンプトンコーンと呼ばれる円錐を天球座標系 に描画する.複数のガンマ線を測定することにより,コンプトン コーンの交点上に放射線源が存在すると予測できる[5].一般的 に1,000個以上のガンマ線の測定により,コンプトンコーンによ る放射線源の方位を特定することが可能であると知られている. 本研究では,コンプトンカメラに放射線源の方位を特定できるよ うな十分な量のガンマ線が計測される環境を仮定する.

## 3 拡張カルマンフィルタに基づく SLAM

本研究では、入力情報として、誤差を含む移動ロボットの制御 入力情報とコンプトンカメラの計測情報を用い、移動ロボットの 位置姿勢情報及び線源の位置情報を拡張カルマンフィルタに基づ く SLAM 手法から推定する [6].以下、放射線源の位置を推定す るコンセプトについて図 3 から説明をする.コンプトンカメラは 線源までの距離を直接測定することができず、線源の方向情報の みが得られるため、複数視点での計測により線源までの距離を推 定しなければならない.また、コンプトンカメラの計測情報は観 測誤差を持っているため、線源に対する位置不確実性を図 3(a) に示すように正規分布として表す.移動ロボットの移動により、 他の視点での計測結果にも同様に不確実性が表されるが、最初の 計測との統合によって不確実性が小さくなる.続いて線源を複数 の視点から観測することにより線源の位置不確実性は図 3(c) の ように収束する [7][8].また、このように推定された放射線源の 位置精度は移動ロボットの位置姿勢推定精度にも影響を与える.

## **3.1** 状態変数の定義

本研究では、2次元空間での検証を想定し、コンプトンカメラ を搭載した移動ロボットの位置姿勢を示すベクトルと線源の位置 を示すベクトルを各々 $x_c \ge x_l \ge c$ 義する.また、ロボットの位 置姿勢ベクトル $x_c \ge b$ 射線源の位置ベクトル $x_l$ を含む状態ベ クトル Xを定義し、状態ベクトルXの不確実性を示す共分散 行列をPと定義する.

$$\boldsymbol{x}_c = \begin{bmatrix} x_c & y_c & \theta_c \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$$
(1)

$$\boldsymbol{x}_l = \begin{bmatrix} x_l & y_l \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \tag{2}$$

$$\boldsymbol{X} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{x}_c \\ \boldsymbol{x}_l \end{bmatrix} \tag{3}$$

$$\boldsymbol{P} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{P}_c & \boldsymbol{P}_{c,l} \\ \boldsymbol{P}_{c,l} & \boldsymbol{P}_l \end{bmatrix}$$
(4)

ここで、 $P_c$ はロボットの位置に対する共分散行列、 $P_l$ は線源の 位置に対する共分散行列である. $P_{c,l}$ は $P_c$ と $P_l$ に関連する交 差共分散行列である.

#### 3.2 予測ステップ

拡張カルマンフィルタに基づく SLAM における予測ステップ では、移動ロボットの制御入力情報に基づいた運動モデル f によ り、各時刻における状態ベクトル及び共分散行列の予測を行う. 時刻 t-1 の状態ベクトル  $X_{t-1}$  にロボットの移動制御  $u_t$  が入力 された時、時刻 t の状態ベクトル  $X_t^-$  と共分散行列  $P_t^-$  は、次 式のように予測される.

$$\boldsymbol{X}_{t}^{-} = f(\boldsymbol{X}_{t-1}, \boldsymbol{u}_{t})$$
$$\boldsymbol{P}_{t}^{-} = \boldsymbol{G}_{t} \boldsymbol{P}_{t-1} \boldsymbol{G}_{t}^{\mathrm{T}} + \boldsymbol{R}_{t}$$
(5)

ここで関数 f は移動ロボットの運動モデルであり、 $R_t$  は移動ロボットの制御誤差、 $G_t$  は状態ベクトルに対する運動モデル f の ヤコビ行列である.

## 3.3 更新ステップ

更新ステップでは、次式のように予測ステップで予測された状態ベクトルによる予測計測値を算出する. コンプトンカメラの計測モデルでは、次式のように求められる.

$$\hat{z}_t = h(\boldsymbol{x}_{c,t}, \boldsymbol{x}_{l,t}) \tag{6}$$

$$h(\boldsymbol{x}_{c,t}, \boldsymbol{x}_{l,t}) = \tan^{-1}(\frac{y_{l,t} - y_{c,t}}{x_{l,t} - x_{c,t}}) - \theta_{c,t}$$
(7)

コンプトンカメラの計測情報を用い,予測ステップで推定された 状態ベクトル  $X_t$  と共分散行列  $P_t$  を更新する.時刻 t で計測し た計測情報  $z_t$  と得られた  $\hat{z}_t$  を用いて状態ベクトル  $X_t$  と共分散 行列  $P_t$  を次式のように更新する.

$$\boldsymbol{K}_{t} = \boldsymbol{P}_{t}^{-} \boldsymbol{H}_{t}^{\mathrm{T}} (\boldsymbol{H}_{t} \boldsymbol{P}_{t}^{-} \boldsymbol{H}_{t}^{\mathrm{T}} + \boldsymbol{Q}_{t})^{-1}$$

$$\tag{8}$$

$$\boldsymbol{X}_{t} = \boldsymbol{P}_{t}^{-} + \boldsymbol{K}_{t}(\boldsymbol{z}_{t} - \boldsymbol{h}(\boldsymbol{x}_{c,t}^{-}, \boldsymbol{x}_{l,t}^{-}))$$
(9)

$$\boldsymbol{P}_t = (\boldsymbol{I} - \boldsymbol{K}_t \boldsymbol{H}_t) \boldsymbol{P}_t^- \tag{10}$$

ここで,  $Q_t$ はコンプトンカメラの計測誤差に対する共分散行列 であり,  $H_t$ は,状態ベクトルに対する計測モデルのヤコビ行列,  $K_t$ はカルマンゲインである. $z_t$ は実際の計測値である.

## 4 シミュレーション実験

本章では、2次元空間にある線源の位置推定に対するシミュレーション実験について述べる.実験では、計測範囲  $(-\pi,\pi)$ のコンプトンカメラを搭載した移動ロボットを移動させながら、2次元空間上にある1つの放射線源を計測し続くと仮定した.最初の移動ロボットの位置・姿勢を2次元座標系(世界座標系)の原点とした.線源が最初に計測された時の線源の位置及び共分散情報(式(3)の $x_l$ と式(4)の $P_l$ と $P_{c,l}$ )は任意の距離情報とそれに対する大きな分散値を与えて初期化する.

コンプトンカメラを搭載した移動ロボットによる線源の位置推 定結果を図4に示す.2次元空間において移動ロボットの移動軌 跡の真値とオドメトリ情報に基づいた推定軌跡を,それぞれ青い 線と黒い線で示す.また,提案手法による移動ロボットの推定軌 跡を赤い線で示す.放射線源位置の真値及び推定された位置を, それぞれダイアモンドマークと正方形マークに示す.図4の左 上はロボットが動き始めた時の様子であり,右下の図は,移動ロ ボットが円軌跡で1周した後の結果を示している.また,右上及 び左下の図はその間の様子を示している.ここで,楕円の大きさ は推定された線源の位置に対する不確実性(共分散)を意味する. 提案手法により推定された移動ロボット軌跡はオドメトリによる



**Fig.4** Result of EKF SLAM with the evolutions of the radiation source position uncertainty.



Fig.5 Result of EKF SLAM: (a) error on the estimates of robot position and (b) error on the estimates of radiation source.

結果より真値に近い. 放射線源の位置推定結果も真値に近い結果 が得られた.移動ロボットの推定軌跡に対する誤差を図 5(a) に 示す.オドメトリによる推定結果は時間につれて誤差が蓄積され る一方,提案した手法で推定された結果に対する誤差は,ある範 囲内に保たれている.図 5(b) は推定された放射線源の誤差を示 す.時刻 0 の際,約 5 m であった誤差が時間につれてだんだん 小さくなり,真値に近い推定結果が得られた.図 6 は推定中の線 源の位置に対する不確実性(楕円の面積)を示す.時刻 0 では, 線源の不確実性が約 1,000 m<sup>2</sup> の面積を持ち,時間につれてだん だん小さくなることが分かる.すなわち,計測回数が増加するこ とにより,線源の位置推定結果に対する誤差が小さくなると解釈 できる.実際の線源の位置(0 m, 10 m) に対して,最後に推定 された線源の位置は(0 m, 9.2 m) であった.

## 5 結論

本研究では、移動ロボットに搭載したコンプトンカメラを用い て、ロボットの移動軌跡と線源の位置を同時に推定する SLAM 手法を提案した.提案手法により、移動ロボットの移動軌跡と線 源の位置に対する同時推定が可能であることをシミュレーション 実験により確認した.今後の展望としては、複数の線源が存在す



Fig.6 Uncertainty of radiation source.

る環境でも対応可能な手法の構築を考えている.

## 6 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

- J. Jiang, et al., "A Prototype of Aerial Radiation Monitoring System Using an Unmanned Helicopter Mounting a GAGG Scintillator Compton Camera," Journal of Nuclear Science and Technology, vol. 53, no. 7, pp. 1067–1075, 2016.
- [2] D. Kim, H. Woo, Y. Ji, Y. Tamura, A. Yamashita, and H. Asama, "Localization of Radiation Sources Using Gammaray Detector in Simulated Environments," Proceedings of the 4th International Conference on Maintenance Science and Technology, Shenzhen, 2016.
- [3] 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.
- [4] H. Durrant-Whyte and T. Bailey, "Simultaneous localization and mapping: part I.," IEEE Robotics and Automation magazine, vol. 13, no. 2, pp. 99-110, 2006.
- [5] R. Basko, G. L. Zeng, and G. T. Gullberg, "Application of Spherical Harmonics to Image Reconstruction for the Compton Camera," Physics in Medicine and Biology, vol. 43, no. 4, pp. 887, 1998.
- [6] G. Welch and G. Bishop, "An Introduction to the Kalman Filter," Dept. Comput. Sci., Univ. North Carolina, Chapel Hill, Tech. Rep. TR95041, 2000.
- [7] J. Sola, A. Monin, M. Devy, and T. Lemaire, "Undelayed Initialization in Bearing Only SLAM," Proceedings of the IEEE Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 2499–2504, 2005.
- [8] 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.