

# 未知の放射線源に関する自律探索ロボットの移動計画

## Autonomous Exploration for Unknown Radiation Source Using Mobile Robot

○学 高橋 由利花 (工学院大) 正 禹 ハンウル (工学院大)

Yurika TAKAHASHI, Kogakuin University  
Hanwool WOO, Kogakuin University

This study proposes a path planning method for an unknown radiation source using a mobile robot. The proposed method autonomously determines a next measurement point based on the direction and number of incident gamma-rays in a unit of time obtained from a directional gamma-ray detector, even when the intensity of the source is unknown.

**Key Words:** Path Planning, Radiation Source Localization, Mobile Robot

### 1. 緒言

福島第一原子力発電所の廃炉作業といった人間が放射線源に近づいて作業を行う場面では、事前に放射線源の分布を把握し、作業計画を行う必要がある。しかし、放射線源の分布を把握するための探索を人間が行うと、被曝のリスクがあると考えられる。この問題を解決するためにガンマ線検出器を搭載した自律移動ロボットを用い、自律的に移動しながら放射線源の分布を推定するアプローチが提案されている[1]。Kishimotoらは、指向性ガンマ線検出器から単位時間におけるガンマ線の入射数と入射方向を計測し、主成分分析を用いてロボットの移動経路を計画した[1]。しかし、この手法は放射線源の強度が既知であることを前提にしているため、未知の放射線源の探索に適用することはできない。実際の探索では、事前に放射線源の強度を把握することは困難であり、このような状況でも自律的に探索を行えるシステムの構築が求められる。

そこで本研究では、放射線源の強度が不明な場合においても自律的に移動経路を生成し、放射線源の分布を推定することが可能なシステムの構築を行う。単位時間におけるガンマ線の入射数は、放射線源と検出器間の距離の二乗に反比例するという法則に基づき、線量の変化率を用いることで放射線源と検出器間の距離のみに依存する指標を新たに定義する。この指標を参照することにより、強度が未知である放射線源に対しても、一定距離まで放射線源に近づき、周回する移動経路を生成することが可能となる。

### 2. 提案手法

#### 2.1 放射線検出器

放射線検出器は大きく非指向性検出器と指向性検出器の2つに分けられる。非指向性検出器は放射線源から出ている放射線の入射数を検出するものであり、指向性検出器は放射線の入射数に加え、入射方向を検出するものである。また、放射線にはアルファ線、ベータ線、ガンマ線などの種類があり、物体を通り抜ける透過力が最も強いのはガンマ線である[2]。用途によって検出に適している放射線が変わり、目的にあう検出器が開発されている。そこで本研究では、指向性ガンマ線検出器を用いることを想定している。具体的にはコンプトンカメラやガンマカメラなどが挙げられる。

放射線源の位置を特定するための移動経路は、図1に示すように放射線源に十分近づいて放射線源を包囲することが必要となる。放射線源とガンマ線検出器間の距離が近いほど、単位時間におけるガンマ線の入射数は大きくなり、計測効率は高くなる。そのため、ロボットはまず放射線源が存在する方

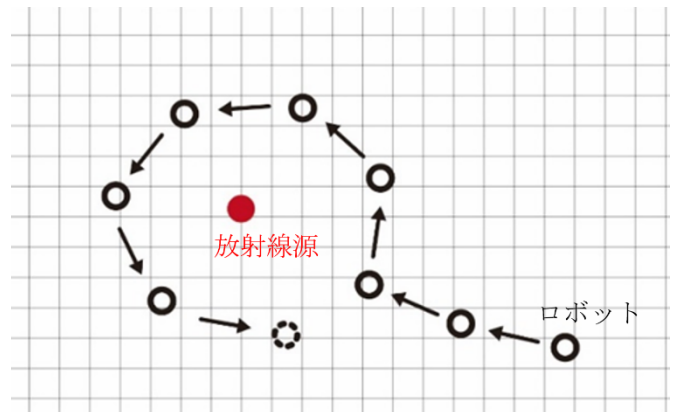


Fig.1 Designed path for autonomous exploration

向に移動し、計測時間の短縮を図る。また、指向性検出器はガンマ線の入射方向は分かるものの、奥行の情報は取得できず、線源の位置を特定するためには多方面からの計測が必要となる。そのため、ロボットは放射線源を囲うように移動する必要がある。

#### 2.2 線量率の特徴

放射線は等方向に広がるため、放射線の強さ(線量率)は放射線源からの距離の二乗に反比例する[3]。本研究では、線量率は単位時間における検出器に入射するガンマ線の数を指す。平面の空間に球状の放射線源があると仮定し、放射線源の強度を $G$ 、検出器から放射線源までの距離を $r$ とすると、単位時間、単位面積あたりのガンマ線の入射数 $N$ は式(1)から求まる。

$$N = G/4\pi r^2 \quad (1)$$

さらに検出器の面積を $S$ とすると、単位時間あたりに検出器が検出するガンマ線の入射数 $n$ は式(2)で表される。

$$n = SN = GS/4\pi r^2 \quad (2)$$

本研究では、この線量率が放射線源からの距離の二乗に反比例する法則に着目し、移動経路を生成する際に必要な指標を新たに定義する。

Kishimotoらはロボットの移動経路を生成するために主成分分析を行い、その結果からガンマ線の入射方向を第一主成分とし、それに直行する方向を第二主成分とした。ロボットの動きは、ある一定の強度になるまで第一主成分へ移動して放射線源に近づき、指標を超えたら第二主成分へ移動して放射線源を囲うように経路生成を行った。この基準となる指標を放射線源の強度を把握したうえで決定していたため、本研究では放射線源の強度に依存しない指標を導き出す。

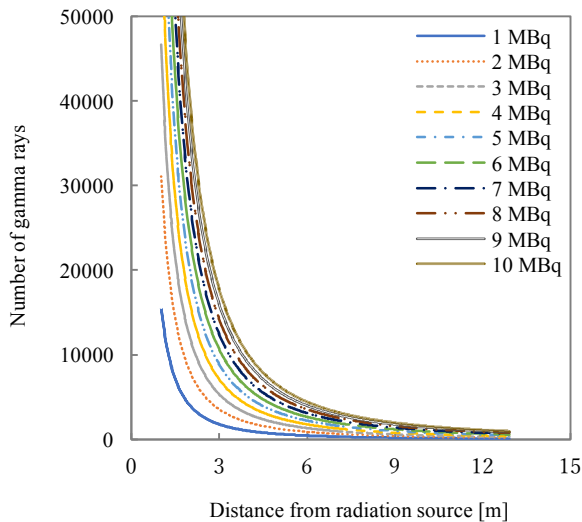


Fig.2 Number of gamma rays vs distance from radiation source

### 2.3 線量率の変化率

式(2)より、放射線源の強度 $G$ を 1 MBq から 10 MBq まで変化させ、ガンマ線の入射数 $n$ と検出器と放射線源との距離 $r$ との関係を図 2 に示した。式(2)を積分して得られる傾きは放射線源の強度に依存してしまうため、指標に用いることは難しい。そこでガンマ線の入射数から変化率を導き出した。放射線源に近いほうのガンマ線の入射数を $n(r_i)$ とすると、ひとつ前の計測点のガンマ線の入射数は $n(r_{i-1})$ となり、変化率 $\alpha$ は次式で表される。

$$\alpha = \{n(r_i) - n(r_{i-1})\} / n(r_{i-1}) \quad (3)$$

そして式(2)を代入して変形すると次式となる。

$$\alpha = r_i^2 / r_{i-1}^2 + 1 \quad (4)$$

図 3 に 1.0 m 間隔で計測を行うロボットの変化率 $\alpha$ と検出器と放射線源との距離 $r$ の関係を示す。式(4)を見ると、変化率 $\alpha$ は検出器から放射線源までの距離 $r$ みで表すことができる。よって変化率に放射線源の強度は影響がなく、放射線源の強度が不明な場合でも、主成分分析を用いた経路生成における移動方向を決める指標として用いることができる。ただし放射線源に向かって一直線に、一定の間隔で移動している場合に用いることができる。

## 3. 実験

### 3.1 実験設定

事前にロボットと放射線源間の距離に応じたガンマ線の入射数の変化率を求め、移動方向の指標を決定した。また、計測したガンマ線の分布を可視化し、計測数が多いほどマス色が濃くなるように描画した。ロボットは初期状態では右方向を向いており、計測点ごとに 300 秒間停止しガンマ線を計測した。取得したデータから入射方向へ 1 m 移動し、再び停止して計測を繰り返した。今回は放射線源の約 2 m 手前地点で終了するよう、変化率を 1.2 に設定した。放射線源の強度を変えた場合、放射線源の位置を変えた場合、複数線源の場合においてシミュレーションによる検証を行った。

### 3.2 放射線源の強度ごとの検証結果

まず放射線源の強度を変えた場合について、変化率は 1.2 とし、放射線源の強度を 1 MBq, 5 MBq, 10 MBq ごとに変化させた。図 4 に放射線源の強度が 1 MBq と 10 MBq の場合に生

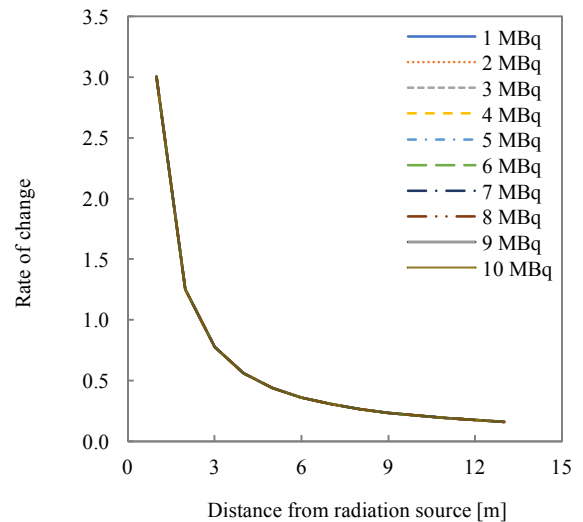


Fig.3 Rate of change vs. distance from radiation source

成された経路とガンマ線の分布を示す。どの放射線源の強度の場合もガンマ線分布が最も濃いピクセル番号が放射線源のピクセル番号と一致しており、提案手法が有効であることを確認した。

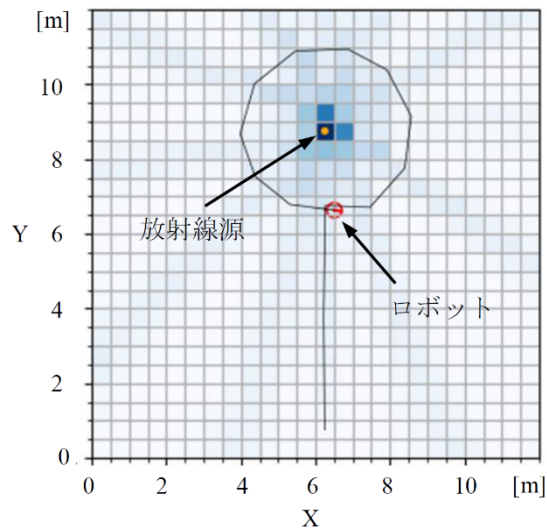
### 3.3 放射線源の位置ごとの検証結果

放射線源の位置を変えた場合について、放射線源の位置をロボットから見て 7 方向にそれぞれ変化させて比較した。変化率は 1.2 とし、放射線源の強度は 1 MBq とした。図 5 に放射線源の位置がロボットから見て後、左前方向にある場合に生成された経路とガンマ線の分布を示す。放射線源の位置が左前、右前、左後、右後方向の場合、指標を超えた時の変化率と放射線源との距離に誤差が生まれた。本検証は、1 m 間隔で計測を行うため、初期位置のロボットと放射線源との距離が数 cm ~ 数十 cm の間にある場合、ちょうど 2 m 地点で止まることはなく、誤差が生じたと考える。放射線源との距離に違いはあるが、どの放射線源の場合も、ガンマ線分布の最も濃いピクセル番号が放射線源のピクセル番号と一致しており、提案手法が有効であることを確認した。

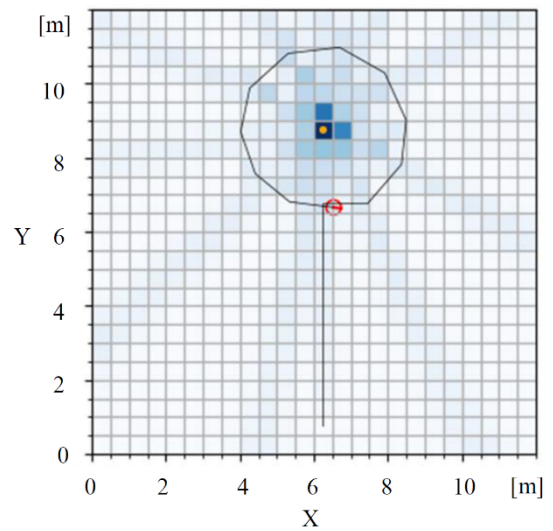
### 3.4 複数線源の検証結果

最後に放射線源の数を 2 つにし、ロボットから見て垂直と直線に位置する放射線源について、放射線源間の距離を 1 m ずつ変化させて比較した。変化率は 1.2 とし、放射線源の強度はどちらも 1 MBq とした。図 6 に複数線源が垂直と直線に位置し、複数線源の間隔が 3 m の場合に生成された経路とガンマ線の分布を示す。複数線源が垂直に位置する場合、放射線源の間隔が 1 m と 2 m では、指標を超えて放射線源を囲うことができたが、間隔が 3 m と 4 m では、変化率が指標を超えられず、放射線源を囲うことができなかった。また、複数線源が直線に位置する場合も指標を超えた時の変化率と放射線源との距離に誤差が生まれた。ガンマ線の入射数が放射線源からの距離の二乗に反比例するのは、放射線源に向かって一直線に、一定の間隔で移動している場合のため、本検証ではガンマ線の入射数の増加の仕方が異なり、変化率に誤差が生まれたと考える。

放射線源との距離の違いはあるが、複数線源が垂直に位置し、間隔が 1 m と 2 m の場合と、複数線源が直線に位置する

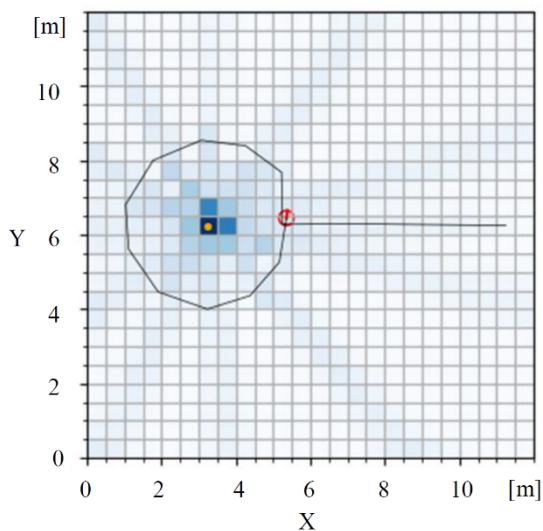


(a)

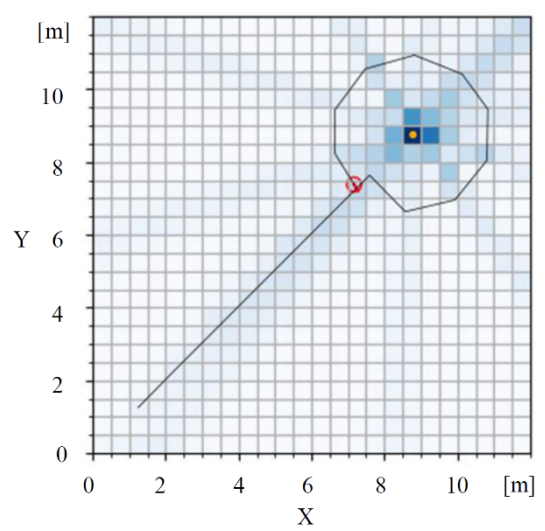


(b)

Fig.4 Simulation results: (a) intensity of radiation source is 1 MBq (b) intensity of radiation source is 10 MBq

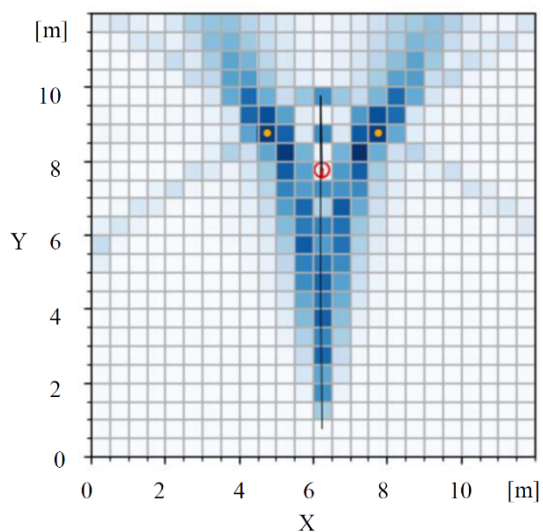


(a)

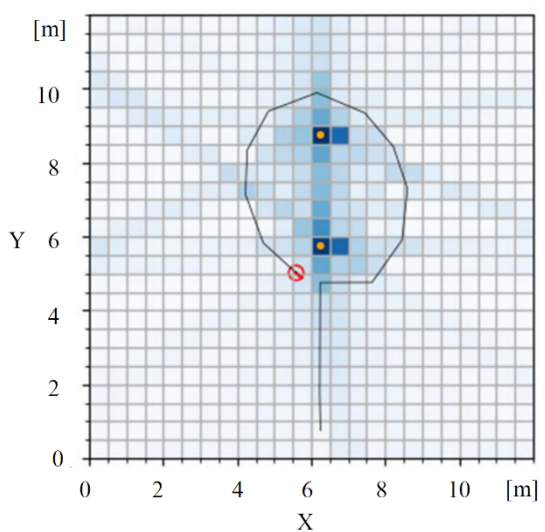


(b)

Fig.5 Simulation results: (a) radiation source located on left side from robot (b) radiation source located on upper right from robot



(a)



(b)

Fig.6 Simulation results: (a) two radiation source located horizontally (b) two radiation sources located vertically

場合は、ガンマ線分布の最も濃いピクセル番号が放射線源のピクセル番号と一致しており、提案手法が有効であることが確認できる。一方、複数線源が垂直に位置し、間隔が3 mと4 mの場合では、経路生成がうまくいかず、放射線源の位置を特定することができなかった。本研究では複数線源を考慮した経路生成を行っていないため、様々な場合の複数線源を考慮した経路生成手法が必要である。

#### 4. 結論

本論文では、移動ロボットを用いた放射線源の位置推定において、線源の強度が不明な場合においても、自律的に経路を生成するシステムの構築を行った。ガンマ線の入射数から変化率を導き出し、放射線源の強度に関係なく変化率は一定であることを確認し、変化率から指標を決定した。

放射線源の強度を変えた場合、放射線源の位置を変えた場合、複数線源の場合でシミュレーションによる検証を行った。放射線源の強度を変えた場合、放射線源の位置を変えた場合、複数線源の一部の条件では、放射線源の位置を特定することができ、提案手法が有効であることが確認できた。複数線源の場合、放射線源が垂直に2つ位置していて、放射線源間の距離が離れていると、線源の位置を特定することができなかった。そのため様々な場合の複数線源を考慮した経路生成手法が必要である。

#### 参考文献

- [1] Takuya, K., Hanwool, W., Komatsu R., Tamura, Y., Tomita, H., Shimazoe, K., Yamashita, A. and Asama, H., "Path Planning for Localization of Radiation Sources Based on Principal Component Analysis," *Applied Sciences*, 11(10):4707, 2021.
- [2] 鳥居寛之, 小豆川勝見, 渡辺雄一郎, “放射線を科学的に理解する”, 2012年
- [3] 環境省, “放射線による健康影響等に関する統一的な基礎資料, 外部被ばく線量の特徴, 2021, <https://www.env.go.jp/chemi/rhm/h29kisosshiryo/h29kiso-02-04-05.html>, (閲覧日: 2023年3月26日)