

# 主論文の要約

論文題目

全方向ガンマイメージングと  
周辺環境地図情報を融合した  
ガンマ線源探知手法の開発

(Development of a Gamma-ray Source Finding  
Method based on Fusion Data between  $4\pi$   
Gamma Imaging and Simultaneous  
Localization and Mapping)

氏名

向篤志

## 論文内容の要約

放射線は人の五感では感知することができないが、被ばくにより放射線障害を引き起こす可能性があるため、悪意を持って放射線源を環境中に放出させるテロや盗取された放射性物質が投棄されることによって公衆への健康被害および風評被害が引き起こされることが懸念されている。このため、所在不明もしくは隠匿された放射線源を探知する必要がある。線源の探知においては、作業員および公衆の被ばく線量の低減のため、可能な限り迅速に線源を探知することが望ましい。放射線検出器を用いて線源から放出されるガンマ線の入射方向を検出でき、検出器の位置および姿勢がわかる場合、ガンマ線入射方向に依存した計数と測定位置の情報を組み合わせることで遠距離から線源の位置が探知可能となる。そこで、検出器に対するガンマ線の入射方向分布（ガンマイメージ）を取得することのできる手法であるガンマイメージングと検出器の位置を取得可能なセンサーを組み合わせた線源探知システムの開発が行われている。先行研究で利用されているコンプトンイメージングなどのガンマイメージング手法の視野は最大でも  $180^\circ$  であるが、全方向のガンマ線入射方向分布を得るには複数回測定が必要であることからより迅速に測定を行う際には検出器の視野が可能な限り広いことが望ましい。そこで本研究では、テロ等によって公共の場に

点線源に近い線源が設置された場合を主眼として、全方向に対して視野を持つ全方向ガンマイメージングと周辺環境地図情報を融合し、ガンマ線源の位置および強度の推定を行う手法の開発を行った。具体的には、全方向ガンマイメージングを用いた線源位置・強度推定手法の開発、迅速な線源探知のための画像再構成の高度化、低計数環境下に用いる線源方向推定手法として検出器内計数分布から畳み込みニューラルネットワークを用いて線源方向を推定する手法の開発、構築したプロトタイプ検出システムを用いた線源位置・強度推定の実証を行った。

本論文は全6章から構成される。以下に各章ごとの要約を示す。

## 第1章 序論

本章では、主に本研究の背景について述べる。隠匿されたガンマ線源の探知の必要性和線源探知が必要となった実際の事例について述べ、ガンマ線源探知に用いられる各ガンマイメージング手法について説明する。また、ガンマイメージングと検出器の位置情報を用いることで遠距離から線源の探知が可能な手法の先行研究について述べ、先行研究に対する本研究の位置づけを述べる。最後に、本研究の目的が全方向ガンマイメージングと周辺環境地図情報を融合した線源探知手法の確立であること、数十メートル四方の空間中に数百 MBq 程度の強度の線源が存在する条件を想定する探知環境とし、線源位置は 1 m 以内の不確かさ、強度はオーダーで探知できることを目標とすることを説明し、本論文の構成について述べる。

## 第2章 全方向ガンマイメージングを用いたガンマ線源位置・強度推定手法の開発

本章では、全方向ガンマイメージングを用いた線源位置・強度推定手法の原理と検証、効率的な線源探知のための測定位置決定の優先順位の検討を行った。

全方向ガンマイメージのピーク強度はガンマ線源と線源の距離の二乗に逆比例し、線源の強度に比例する。この性質から、任意の位置で取得した全方向ガンマイメージをもとに空間中のある位置に線源が存在する場合の線源強度を推定することが可能となる。ここで、複数の位置で測定を行うことで各測定点から推定した線源強度がすべての測定点で一致する点にその強度の線源が存在すると推定できる。

全方向ガンマイメージの強度の線源-検出器間距離に対する依存性を検討した結果、イメージ強度は線源-検出器間距離の逆二乗則に従うことが実験的に確認され、全方向ガンマイメージによるガンマ線源位置・強度推定が可能である見込みが得られた。本検出器を用いて  $^{137}\text{Cs}$  線源周辺の複数の位置で全方向ガンマイメージを取得し、各位置で得られた全方向ガンマイメージから線源の位置・強度を推定した結果、線源の位置・強度が推定可能であることが示された。

少ない測定点で効率的な線源探知を行うためには、より狭い範囲に推定線源位置を絞り込むことのできる測定位置の組み合わせを決定する必要がある。そこで、決定木を用いた機械学習により、線源探知のための測定位置決定の優先度の検討を行った。決定木の学習結果から以下の測定点決定の優先度を明らかにした。

- (1) 推定線源位置に近づく
- (2) より検出器に対する線源方向の変化が大きくなるように移動する
- (3) 推定線源位置から検出器の距離大きく変化するように移動する

全方向ガンマイメージングを用いた  $^{137}\text{Cs}$  線源の位置と強度の推定において、線源位置・強度推定結果から、決定した測定位置決定の優先度に合致した測定点の組み合わせが効率的な線源探知に有効であることを確認した。

### 第3章 線源探知システムの開発のための全方向ガンマイメージングの高度化

本章では、第2章で述べた全方向ガンマイメージングを用いたガンマ線源位置・強度推定手法を用いてガンマ線源探知システムを構築するため、1. 計算コストに起因する画像再構成のリアルタイム性の欠如、2. 低計数環境におけるガンマイメージの統計的ばらつき増加、の二つの課題の解決を図った。

本研究で開発した線源位置・強度推定手法を用いたガンマ線源探知システムを構築するためには、測定時間に対して十分短い時間で全方向ガンマイメージを取得する必要がある。そこで、全方向ガンマイメージングの画像再構成アルゴリズムの簡素化を行い、その計算時間の低減効果と線源探知への適用性の検証を行った。全方向ガンマイメージングにおいて、コンプトンコーンは検出器中の散乱位置から再構成球面に投影される。散乱点の違いによってコンプトンコーンの投影の際の計算コストが増加することに着目し、コーンを検出器中心から投影すると近似することで計算コストの低減を図った。この仮定が線源との距離が 50 cm 以上の場合に適用可能であることを実験的に示し、本手法を用いることでコンプトンコーンの投影の計算時間は 23% 減少することを確認した。また、この過程に基づくイメージング法が線源位置・強度推定に適用可能であることを明らかにした。

第2章で述べた線源位置・強度推定手法では、線源強度の推定に全方向ガンマイメージの強度を用いる。そのため、低計数率もしくは測定時間の短い環境においては、全方向ガンマイメージの計数統計に起因するばらつきが相対的に増加することによって線源方向および推定線源強度のばらつきが増加することが問題となる。この問題の解消のため、全方向ガンマイメージに対して球面調和関数によるフィルタを適用し、全方向ガンマイメージングで得られる応答よりも高い空間周波数の成分を除去することで計数統計に起因するばらつきの低減を図った。全方向ガンマイメージに対してフィルタを適用した結果、フィルタを適用しないイメージと比較して低計数環境下において線源方向の推定精度が向上すること、全方向ガンマイメージの強度の線形性が向上することが確認された。また、フィルタを適用した全方向ガンマイメージを用いて線源探知実験を行い、低計数での線源位置・強度推定精度がフィルタを適用しないものに比べて高いことを示した。

### 第4章 検出器内計数分布を用いたガンマ線入射方向推定手法の提案

全方向ガンマイメージングでは、ガンマ線が検出器内でコンプトン散乱したのちに光電吸収された同時計数事象を用いてイメージングを行う。このような同時計数事象はシング

ル事象と比較して事象率が低いため、特に低計数環境では全方向ガンマイメージの強度に計数統計に起因するばらつきが生じやすく、線源方向推定精度および推定線源強度の精度が低下することが問題となる。より低い計数で線源の方向のみを推定できれば、より多い計数を得るために線源に対してより近づくことができる。このため、特に低計数時において線源に近づくために線源方向を推定する手法の開発を行い、その線源方向推定精度を評価した。

位置分解能を持つ検出器に入射したガンマ線が検出器内で相互作用を起こす確率は、ガンマ線が検出器媒体によって遮蔽されるためにガンマ線が入射する側に近い位置ほど高く、遠いほど低くなる。よって、位置分解能を持つ検出器でガンマ線の計測を行うとき、得られる位置ごとの計数の分布はガンマ線の入射方向と強度、ガンマ線源起因の計数とバックグラウンドの計数の比に依存する。そこで、畳み込みニューラルネットワーク(CNN)を用いて検出器内の計数分布から検出器内の全計数のうち各入射方向からのガンマ線に起因する計数及びバックグラウンドの計数の占める割合(寄与率)を推定する CNN モデルの構築を行った。

構築したモデルに対し、モンテカルロシミュレーションコード EGS5 を用いて作成したデータおよび  $^{137}\text{Cs}$  および  $^{60}\text{Co}$  を用いて実験的に取得したデータを用いて評価を行った。その結果、シミュレーションデータと実験データの線源方向推定の不確かさはそれぞれ  $16^\circ$ 、 $17^\circ$  と評価され、よく一致することが示された。また、モデルの線源方向推定精度は検出器の全計数および線源起因のガンマ線の寄与率が高いほど高いことが明らかになった。実験データに対して、従来法である全方向ガンマイメージングとモデルの線源方向推定精度を比較した結果、低計数環境においてモデルの線源方向推定精度は全方向ガンマイメージングよりも高いことが示された。

## 第5章 プロトタイプガンマ線源探知システムを用いた線源探知の実証

本章では前章までに開発した全方向ガンマイメージングおよびこれに基づくガンマ線源探知手法を用いた線源探知システムを構築し、実験による線源探知の実証およびシステムに必要となる要素の検討を行った。

本研究で構築したプロトタイプ線源探知システムは、3D LiDAR、全方向ガンマカメラ、制御用ラップトップ、バッテリー、Wi-Fi ルーター、無人ビークル、全方向光学カメラから構成された。プロトタイプシステムを用いた線源探知が可能であることを確認するため、チェックソースの  $^{137}\text{Cs}$  線源を探知する実験を行い、低強度線源に対して線源位置・強度が目標となる精度で探知可能であることを確認した。

上述の実験では用いる線源の強度が低いことから線源と検出器間の距離を小さくすることが必要であり、想定する環境に対して狭い範囲での探知実験となっていた。そこで、広探知範囲中の大強度線源を探知する実験を行った。80 m 四方の探知空間中でシステムを移動させ、 $(2.1 \pm 0.4) \times 10^2 \text{ MBq}$  の  $^{137}\text{Cs}$  線源の位置・強度推定を行った。その結果、構築したシステムを用いた想定する環境下での推定精度は、位置は真の線源位置に対して各方向 1 m

以内、線源強度は不確かさの範囲で一致することが確認され。本研究で開発した手法による線源探知が可能であることが実証された。加えて、本研究で用いたシステムに要求される性能について検討を行い、角度依存性が小さく時間分解能の高い検出器を用いること、悪路での移動能力を持つビークルの採用、SLAM の蓄積誤差を補正するための位置検出システムの併用を行うことが理想的な線源探知システムの開発のために必要であることを示した。

## 第6章 結論と今後の展望

本章では、本研究の結論と今後の展望について述べた。本研究では全方向ガンマイメージングを用いたガンマ線源位置・強度推定手法の開発および本手法を用いた線源探知システムの構築に必要な要素技術の開発を行い、プロトタイプシステムを用いて本研究で開発した手法による線源探知の実証を行った。加えて、本手法を用いた線源探知システムを構築するにあたって必要な要素を示した。

今後の展望として、線源位置・強度推定手法の多線源および分布線源への拡張、周辺環境地図情報を用いたガンマ線の遮蔽・散乱評価が挙げられる。また、本研究で開発した線源探知手法の応用例として、より小型の検出器を人体に投入することで体内のトレーサー薬物から放出されるガンマ線源の位置推定を行うことなどが可能になると考えられる。加えて、4章で開発した線源方向推定モデルはゲートモニタなどの大型の検出器に応用することでゲートを通過した放射性物質の三次元位置の推定などが可能となることが期待される。