

令和 6 年 6 月 20 日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04577

研究課題名（和文）ボクセル型検出器と機械学習によるガンマ線放出源位置推定技術の開発

研究課題名（英文）Development of Gamma source location estimation technology by using voxel-type detector and Machine-Learning

研究代表者

木村 祥紀（Kimura, Yoshiki）

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・核不拡散・核セキュリティ総合支援センター・研究副主幹

研究者番号：60636869

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、核セキュリティの現場で検知された異常なガンマ線の発生源位置の迅速・簡便な特定に資する方向感度型ガンマ線検知装置の開発を最終目標とし、ボクセル型ガンマ線検出器モジュールと機械学習手法を組合わせた新しいガンマ線発生位置推定技術を提案し、その有効性を確認した。シンチレーション型検出器で構成されるモジュールで測定したガンマ線スペクトルのピーク解析と最近傍探索手法を組合せて自律的に線源位置を推定するアルゴリズムを開発し、試作モジュールで線源を測定したデータにおける性能評価から、十分な統計精度が得られる測定データに対して線源の立体角方向及び距離を高精度で推定できることを実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、ボクセル型ガンマ線検出器モジュールと機械学習手法の一種である最近傍探索手法をベースとした方向感度型ガンマ線検知装置技術の有効性を確認した。本研究で提案する技術は従来のガンマ線可視化に関する代表的な技術であるガンマカメラよりも安価に実現でき、ガンマ線源の立体角方向に加えて距離も推定できる可能性が示された。また、ボクセル型モジュール全体を一つの検出器と見做すことで、異常な放射線の検知、その発生源の推定と原因核種の特定を含む一連のプロセスを一台の装置でカバーできることから大規模公共行事等における核・放射線テロ対策に貢献する技術としての実用化が期待されるものである。

研究成果の概要（英文）：Directional-Sensitive Gamma-ray Detector (DSGD) that could contribute to the rapid localization of the anomalous gamma-ray source for nuclear security was proposed and the effectiveness of the proposed technology was confirmed in this research.

An algorithm for autonomous source localization was developed by combining peak analysis of a gamma-ray spectrum measured by the DSGD module with scintillation detectors and a nearest neighbor searching approach. It was demonstrated that the proposed technology using a prototype module can estimate both of the angular direction and distance of the source for test data with sufficient statistics in actual source measurements.

研究分野：核セキュリティ・核不拡散

キーワード：核セキュリティ 放射線源位置 ガンマ線スペクトル解析 機械学習 方向感度型放射線検知装置

1. 研究開始当初の背景

近年、規制外の核物質やその他放射性物質を使用した核・放射線テロ行為に代表される核セキュリティに関する脅威が国際的な懸念事項になっている。特に我が国においては、2021年に延期された東京オリンピック・パラリンピックや2025年開催予定の大阪万国博覧会といった国際的な大規模公共行事の開催を控え、様々なテロ行為への対策が進められている。大規模公共行事における核・放射線テロの脅威への対策である核セキュリティにおいては、人や物資が複雑に流れている状況下で放射線を即時に検知し、かつその発生源を迅速かつ正確に特定することが必要不可欠となる。

大規模公共行事等の現場で異常な放射線が検知された場合、携帯型測定器を使用した放射線サーベイによりその発生源を特定するのが一般的な対応となっている。核セキュリティの現場では、放射線防護などの観点から発生源の特定は短時間で行われなければならないが、現場対応者には測定器の使用方法や放射線サーベイの手順などに関する十分な知識・経験が必要となるが、大規模公共行事等の運営・警備人員に対しこれらについて十分な教育・訓練を行うことは非常に困難である。

核セキュリティの現場で放射線の発生源位置を簡便に推定する技術として、ガンマ線可視化装置の利用が検討されている。ガンマ線可視化に関する代表的な技術であるガンマカメラ技術では、ガンマ線が到来する立体角方向を解析し光学画像と組み合わせることでその位置を簡便に推定することが可能である [1, 2]。一方、ガンマカメラ技術では、単一装置で広いガンマ線エネルギー領域の立体角方向を解析することが困難であり、また発生源までの距離の解析を行うためには複数点での測定が必要となるといった測定原理に基づいた課題が存在する。また同時計数といった複雑な信号処理が必要で価格が非常に高価であるといった理由から、現在までに大規模公共行事等の核セキュリティの現場で広く普及していない。

近年、ボクセル型検出器を利用して中性子の飛来方向を推定する方向感度型中性子検出技術の実用化が進められている [3]。この技術では各検出器ボクセルにおける中性子計数比の情報を解析することで簡便にその飛来方向を推定することができ、信号処理系も単純で比較的安価に装置を構築可能であることから、ガンマ線発生源の推定においても有用性が非常に高いと考えられる。ボクセル型検出器でガンマ線を測定した場合は、各検出器ボクセルにおける計数比に加えてエネルギースペクトルの情報も利用することが可能となる。この、ボクセル型検出器で測定したガンマ線の解析において、人間の学習能力や経験則に基づく高度な異常検知や推定といった機能を計算機上で実現する機械学習を応用することで、その発生源の位置を迅速かつ高精度に推定できる方向感度型ガンマ線検知装置 (Direction Sensitivity Gamma Detector: DSGD) が実現可能であると考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、異常なガンマ線発生源の迅速な特定に資する DSGD の開発を最終目標とし、ボクセル型検出器と機械学習を組合わせた新しいガンマ線発生位置推定技術に関する基礎研究として下記を実施することを目的とする。

- (1) ボクセル型ガンマ線検出器モジュールの開発
- (2) 機械学習手法によるガンマ線発生源位置の立体角方向・距離解析手法の開発
- (3) ボクセル型検出器と機械学習アルゴリズムによる DSGD の性能試験

3. 研究の方法

- (1) CsI(Tl)シンチレーション型検出器を立方体状に配置したボクセル型ガンマ線検出器モジュールによる測定を想定したガンマ線源の測定スペクトルをモンテカルロシミュレーションにより模擬し、各検出器チャンネルにおける模擬測定スペクトルを解析することでボクセル型モジュールによるガンマ線源の立体角・距離推定の有効性確認を行なった。
- (2) 次に、ガンマ線スペクトルにおけるピーク解析と機械学習手法を組合せて自律的にガンマ線源の位置 (立体角・距離) を特定するアルゴリズムを開発し、シミュレーションデータを用いた性能評価を行なった。
- (3) 最後に、CsI(Tl)シンチレーション型検出器をベースとしたボクセル型ガンマ線検出器モジュールを試作し、 ^{137}Cs 標準線源の実測定データに対する線源位置特定アルゴリズムの性能評価を行なった。

4. 研究成果

本研究では、ボクセル型モジュールを構成するガンマ線検出器として比較的安価に入手が可能である 1 立方インチサイズの CsI(Tl) 結晶によるシンチレーション型検出器を選択し、これを $2 \times 2 \times 2$ チャンネル構成の立方体状に配列したモジュールをベースとした DSGD 技術に関する基礎的な検討を行なった。

- (1) CsI(Tl)検出器をベースとしたボクセル型モジュールによる測定を想定したガンマ線源の測定スペクトルを模擬した。各検出器チャンネルにおける模擬スペクトルの解析から、ガンマ線源の立体角・距離の特定の有効性を確認した。本検討においては、はじめにモンテカルロ法による光子輸送計算を含む検出器におけるガンマ線に起因する計数パルス発生シミュレーションを行うことが可能な MCNP6 コード[4]により、点線源から放出される単一エネルギーガンマ線に対する各検出器チャンネルにおける応答関数のシミュレーションを行った。点線源はボクセル型モジュールの中心を原点として立体角 $(\varphi, \theta) = 0 \sim 90$ 度：間隔 5 度、半径 $R=0 \sim 200$ cm の範囲で移動させ、それぞれの点線源の位置での各検出器チャンネルの応答関数データベースを構築した。これにより、検出器応答関数と放射性核種の崩壊ガンマ線エネルギー及びその強度を組み合わせることで、様々な位置・核種・放射能の組み合わせ条件での点線源の測定を想定した模擬スペクトルデータセットを簡易的に構築することができ、機械学習モデルの学習データセットの構築においても計算資源の大幅な節約が可能となる。応答関数データベースをもとに ^{137}Cs 線源の測定を想定した各検出器チャンネルにおけるグロス計数の分布を主成分分析により解析した結果 (図) から、ボクセル型モジュールが線源の立体角方向及び距離の両方に感度を持つことが確認され、方向感度型ガンマ線検知装置の実現可能に関して見込みを得た [5]。

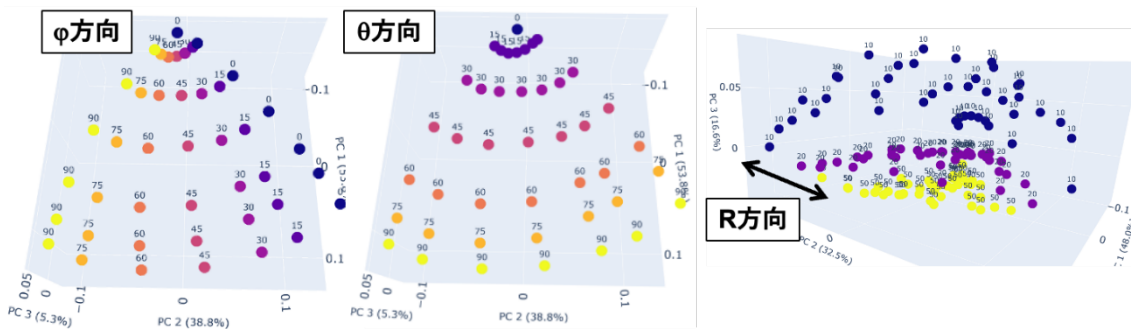
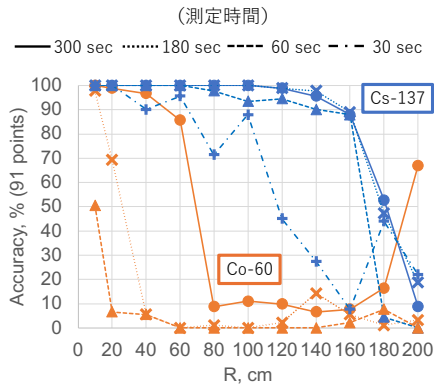


図 1：主成分空間における規格化グロス計数の分布
 $(^{137}\text{Cs}$ 線源, (φ, θ) 方向の図は $R=10$ cm のみ、 R 方向の図は $R=10, 20, 50$ cm)

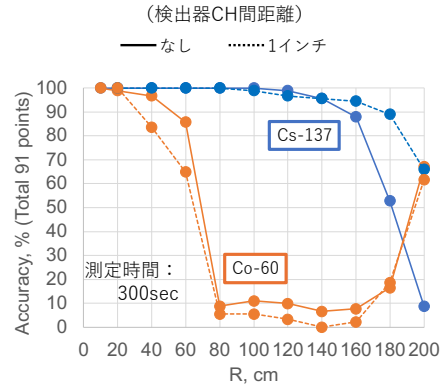
- (2) ボクセル型モジュールにおけるガンマ線源の位置 (立体角・距離) を特定する自律的アルゴリズムとして、各検出器チャンネルで測定されたガンマ線スペクトルのピーク解析と機械学習手法を組合せた新しい線源位置推定アルゴリズム (表) を開発した [6, 7]。50 $\mu\text{R/h}$ 線量相当の ^{137}Cs 及び ^{60}Co 点線源の測定を想定した模擬テストデータを応答関数データベースに基づいて作成し、機械学習手法としてユークリッド距離に基づいた KNN 最近傍探索法を用いて、ピークグロス計数から線源位置推定アルゴリズムにより位置を推定する性能評価を行なった。その結果、 ^{137}Cs 線源に対しては、比較的短時間の測定で一定距離範囲において安定した位置推定が可能であることを実証した (図 2(a))。線源距離の増大による位置推定の不安定化については、距離 R に対する計数変動の収束性が主要因であり、ボクセル型モジュールにおける検出器チャンネル間の距離を大きくすることでその影響を低減できることを確認した (図 2(b))。また、 ^{60}Co 線源の模擬テストデータに対して性能が低い問題に関しては、ボクセル型モジュールを構成する CsI(Tl) が、1MeV 以上の比較的高エネルギーのガンマ線に対して検出効率と線減弱係数が小さいことが原因である可能性が高く、高密度の検出器素子を使用することで解決が可能であると考えられる。今後の課題として、検出器素子のサイズを増大させることによる計数変動の収束性と、高密度素子の使用による比較的エネルギーが高いガンマ線への対応について検討が必要である。

表 1：線源位置推定アルゴリズム

Algorithm	Gamma-ray point-source position estimation
Input	Measured gamma-ray spectrum by 8ch boxel detector module
Library	Detector response function dataset of 8ch boxel detector module
	1 <i>Ch-Max</i> search
	1.1 Maximum peak searching and peak centering: <i>Max. Peaks</i>
	1.2 Channel search with maximum count in <i>Max. Peaks</i> : <i>Ch-Max</i> .
	2 FWHM determination for <i>Ch-Max</i> peak: <i>FWHM-Max</i> .
	3 ROI cropping
	3.1 Search response function library for gamma-ray energy closest to <i>Ch-Max</i> : <i>Library_tmp</i>
	3.2 ROI cropping with $\pm 3\text{FWHM-Max}$ for <i>Library_tmp</i> : <i>Library_ROI</i>
	3.2 ROI cropping with $\pm 3\text{FWHM-Max}$ for Input: <i>Input_ROI</i>
	4 Test & Reference data preparation
	4.1 Correction so that the maximum counts in individual datasets in <i>Library_ROI</i> are equal to <i>Ch-Max</i> : <i>Library_ROI_r</i>
	4.2 Peak count calculation with Covell method for <i>Input_ROI</i> & <i>Library_ROI_r</i> : [<i>Test_ROI</i> , <i>Ref_ROI</i>]
	5 Search for a dataset in <i>Ref_ROI</i> most similar to <i>Test_ROI</i>



(a) 線源核種・測定時間に対する評価



(b) 検出器チャンネル間距離の影響評価

図 2 : 模擬テストデータにおける推定性能 (正答率) の評価結果

- (3) モンテカルロシミュレーションでモデル化したものと同等の CsI (T1) シンチレーション型検出器をベースとしたボクセル型検出器モジュールを試作 (図 3) し、 ^{137}Cs 標準線源の実測定データに対する線源位置特定アルゴリズムの性能を評価した。実際の測定ではバックグラウンドや測定条件の不確かさなどの影響により線源位置の推定性能に不安定化が見られたことから、より安定的な性能を得るためにアルゴリズムで使用する機械学習手法と最近傍探索指標となるピーク計数に関して改良を加えた。機械学習手法としてコサイン類似度に基づいた KNN 最近傍探索法を用いて、探索指標としてピークネット計数を使用することで、実測定試験においても十分な統計精度が得られるデータに対して線源の立体角及び距離を高精度で推定できることを実証した (図 4(a)) [8]。また、線源位置推定において線源の距離 R が性能を決定する最も重要なパラメータであることを明らかにし、これを非線形型の機械学習モデルで回帰推定することで推定位置の精度を向上できることを確認した (図 4(b))。本試験で使用した ^{137}Cs 標準線源の強度が限定的であったことから、多様な線源条件における実測データの取得とそれによる性能評価が今後の課題である。

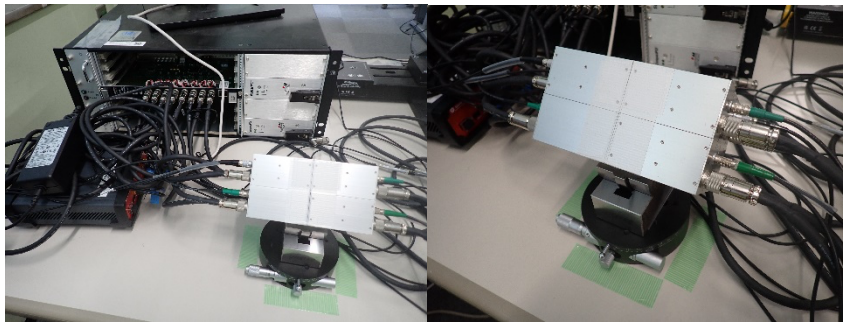
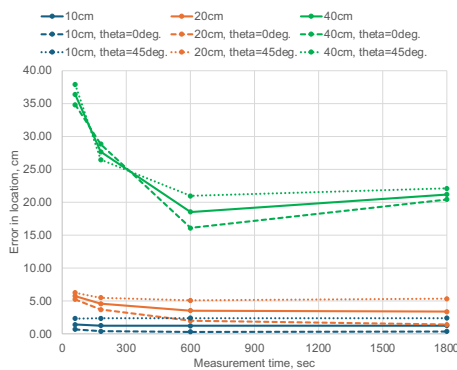
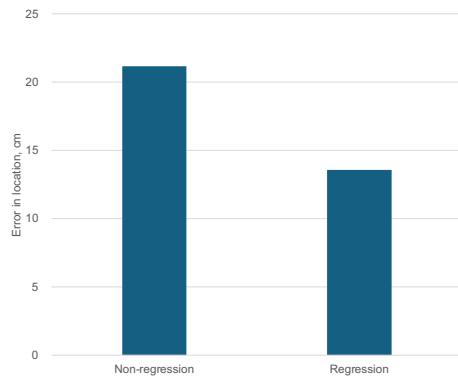


図 3 : ボクセル型ガンマ線検出器モジュール試作機



(a) 推定位置の平均誤差



(b) 距離 R の回帰推定による平均誤差の低減 ($R=40\text{cm}$, $t=1800\text{sec}$)

図 4 : 実測定テストデータにおける推定位置誤差の評価結果

以上により、ボクセル型ガンマ線検出器モジュールと機械学習手法をベースとした DSDG 技術の有効性を確認した。本研究で提案する DSDG 技術は従来のガンマ線可視化に関する代表的な技術であるガンマカメラよりも安価に実現でき、ガンマ線源の立体角方向に加えて距離も推定できる可能性が示された。また、ボクセル型モジュール全体を一つの検出器と見做すことで、異常な放射線の検知、その発生源の推定と原因核種の特定制を含む一連のプロセスを一台の装置でカバーできることから大規模公共行事における核・放射線テロ対策に貢献する技術としての実用化が期待できる。

<引用文献>

- [1] V. Schonfelder, et al., “COMPTEL overview: Achievements and expectations,” *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, vol. 120, pp. 13-21 (1996) 他.
- [2] D.A. Boardman, et al., “Single pixel compressive gamma-ray imaging with randomly encoded masks,” *Journal of Instrumentation*, Vol. 15 (2020).
- [3] A. Vavheret, et al., “nFacet 3D: Sensitive Neutron Detection for Timely Source Location and Identification,” *Nuclear Security Detection Workshop*, University of Surrey, 15-16 April (2019).
- [4] Werner, C.J., Bull, J.S., Jeffrey Jr., C., Forrest, B.B. et al., *MCNP Version 6.2 Release Notes*, LA-UR-18-20808, US: Los Alamos National Laboratory (2018).
- [5] 木村祥紀, 高橋時音, ボクセル型検出器モジュールによるガンマ線源の位置推定技術開発-モンテカルロシミュレーションによるボクセル型検出器モジュールによる線源位置推定の有効性検討-, 日本原子力学会 2022 年春の年会.
- [6] 木村祥紀, 高橋時音, ボクセル型検出器モジュールによるガンマ線源の位置推定技術開発-モンテカルロシミュレーションによるボクセル型検出器モジュールによる線源位置推定の有効性検討-, 日本原子力学会 2023 年春の年会.
- [7] 木村祥紀, 高橋時音 他, ISCN における核鑑識・核検知に関する放射線技術開発, 応用物理学学会放射線分科会誌「放射線」, Vol.48, No.2, 28-32 (2023).
- [8] Y. Kimura, T. Takahashi, (to be submitted).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 木村祥紀, 高橋時音, 弘中浩太, 持丸貴則, 小泉光生	4. 巻 48, 2
2. 論文標題 ISCN における核鑑識・核検知に関する放射線技術開発	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 応用物理学会放射線分科会誌「放射線」	6. 最初と最後の頁 28-32
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 1件／うち国際学会 0件）

1. 発表者名 木村祥紀, 高橋時音, 弘中浩太, 持丸貴則, 小泉光生
2. 発表標題 ISCN における核鑑識・核検知に関する放射線技術開発
3. 学会等名 次世代放射線シンポジウム2022（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 木村祥紀, 高橋時音
2. 発表標題 ボクセル型検出器モジュールによるガンマ線源の位置推定技術開発-モンテカルロシミュレーションによるボクセル型検出器モジュールによる線源位置推定の有効性検討-
3. 学会等名 日本原子力学会2022年春の年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 木村祥紀, 高橋時音
2. 発表標題 ボクセル型検出器モジュールによるガンマ線源の位置推定技術開発 -ボクセル型検出器モジュールを対象とした線源位置推定アルゴリズムの検討-
3. 学会等名 日本原子力学会2023年春の年会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	高橋 時音 (Takahashi Tohn) (20811102)	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・核不拡散・核セ キュリティ総合支援センター・技術・技能職 (82110)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------