JAEA-Review 2022-041 DOI:10.11484/jaea-review-2022-041



連携計測による線源探査ロボットシステムの開発研究 (委託研究)

- 令和3年度 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業-

Development of a Cooperative Operation Robot System for Radiation Source Exploration (Contract Research) -FY2021 Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource Development Project-

福島研究開発部門 福島研究開発拠点 廃炉環境国際共同研究センター 東北大学

> Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science, Fukushima Research Institute, Sector of Fukushima Research and Development Tohoku University

January 2023

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。 本レポートはクリエイティブ・コモンズ表示 4.0 国際 ライセンスの下に提供されています。 本レポートの成果(データを含む)に著作権が発生しない場合でも、同ライセンスと同様の 条件で利用してください。(<u>https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ja</u>) なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ウェブサイト(<u>https://www.jaea.go.jp</u>) より発信されています。本レポートに関しては下記までお問合せください。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 JAEA イノベーションハブ 研究成果利活用課 〒 319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方 2 番地 4 電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency. This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (<u>https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en</u>). Even if the results of this report (including data) are not copyrighted, they must be used under

the same terms and conditions as CC-BY.

For inquiries regarding this report, please contact Institutional Repository and Utilization Section, JAEA Innovation Hub, Japan Atomic Energy Agency.

2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan

Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2023

連携計測による線源探査ロボットシステムの開発研究 (委託研究) -令和3年度 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業-

日本原子力研究開発機構 福島研究開発部門 福島研究開発拠点 廃炉環境国際共同研究センター

東北大学

(2022年9月21日受理)

日本原子力研究開発機構(JAEA)廃炉環境国際共同研究センター(CLADS)では、令和3年度英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業(以下、「本事業」という)を実施している。

本事業は、東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子力発電所の廃炉等を始めとした原 子力分野の課題解決に貢献するため、国内外の英知を結集し、様々な分野の知見や経験を、従前 の機関や分野の壁を越えて緊密に融合・連携させた基礎的・基盤的研究及び人材育成を推進する ことを目的としている。

平成 30 年度の新規採択課題から実施主体を文部科学省から JAEA に移行することで、JAEA とア カデミアとの連携を強化し、廃炉に資する中長期的な研究開発・人材育成をより安定的かつ継続 的に実施する体制を構築した。

本研究は、研究課題のうち、令和3年度に採択された「連携計測による線源探査ロボットシス テムの開発研究」の令和3年度の研究成果について取りまとめたものである。

本研究は、ガンマ線の飛来方向を検出可能な検出器を開発し、これを搭載した複数のロボット の連携により、単一センサーでは得られない広視野・迅速・安価な放射線源探査を実現するロボ ットシステム (Cooperative Operation Robot system for RAdiation Source Exploration: CORRASE、コラッセ)を開発することを目的とする。東京電力ホールディングス株式会社福島第一 原子力発電所の現場への投入に資することを目的として、線源探査を行う小型ロボットに放射線 計測機器を搭載したシステムを3年間の計画終了時に完成させるための研究を行う。

本報告書は、日本原子力研究開発機構の英知事業における委託業務として、東北大学が実施した成果を取りまとめたものである。

廃炉環境国際共同研究センター:〒979-1151 福島県双葉郡富岡町大字本岡字王塚 790-1

i

JAEA-Review 2022-041

Development of a Cooperative Operation Robot System for Radiation Source Exploration (Contract Research) - FY2021 Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource Development Project -

Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science, Fukushima Research Institute, Sector of Fukushima Research and Development Japan Atomic Energy Agency Tomioka-machi, Futaba-gun, Fukushima-ken

Tohoku University

(Received September 21, 2022)

The Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science (CLADS), Japan Atomic Energy Agency (JAEA), had been conducting the Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource Development Project (hereafter referred to "the Project") in FY2021.

The Project aims to contribute to solving problems in the nuclear energy field represented by the decommissioning of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc. (TEPCO). For this purpose, intelligence was collected from all over the world, and basic research and human resource development were promoted by closely integrating/collaborating knowledge and experiences in various fields beyond the barrier of conventional organizations and research fields.

The sponsor of the Project was moved from the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology to JAEA since the newly adopted proposals in FY2018. On this occasion, JAEA constructed a new research system where JAEA-academia collaboration is reinforced and medium-to-long term research/development and human resource development contributing to the decommissioning are stably and consecutively implemented.

Among the adopted proposals in FY2021, this report summarizes the research results of the "Development of a cooperative operation robot system for radiation source exploration" conducted in FY2021.

The present study aims to develop a Cooperative Operation Robot system for RAdiation Source Exploration (CORRASE). The multiple robot system provides radiation source exploration with wide field of view, rapidity, and low cost. The radiation source exploration is realized with multiple robots carrying directional gamma-ray detectors determining the incident direction of the incoming gamma-rays. We will develop the system by the final year of this proposal aiming for application in the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station.

Keywords: Directional Gamma-ray Detector, Cooperative Operation Robot, Scintillation Detector

This work was performed by Tohoku University under contract with Japan Atomic Energy Agency.

目次

1.	英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業の概要	1
2.	平成 30 年度 採択課題	2
3.	令和元年度 採択課題	5
4.	令和2年度 採択課題	8
5.	令和3年度 採択課題1	0
付	録 成果報告書	3

Contents

1.	Outline o	f Nuclear	Energy	Science	& Techn	ology	and	Human	Resource	Developmer	nt Pr	ojec	t
		• • • • • • • • • •				••••	• • • •	• • • • • •	• • • • • • • • •				1
2.	Accepted	Proposal	in FY20	018									2
3.	Accepted	Proposal	in FY20	919		••••							5
4.	Accepted	Proposal	in FY20	20		••••							8
5.	Accepted	Proposal	in FY20	21			••••					1	.0

Appendix Result Report 1	
--------------------------	--

This is a blank page.

1. 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業の概要

文部科学省では、「東京電力(株)福島第一原子力発電所の廃止措置等研究開発の加速プラン(平 成26年6月文部科学省)」等を踏まえ、平成27年度から「英知を結集した原子力科学技術・人材 育成推進事業」(以下、「本事業」という。)を立ち上げ、「戦略的原子力共同研究プログラム」、「廃 炉加速化研究プログラム」及び「廃止措置研究・人材育成等強化プログラム」を推進している。

具体的には、国内外の英知を結集し、国内の原子力分野のみならず様々な分野の知見や経験を、 機関や分野の壁を越え、国際共同研究も含めて緊密に融合・連携させることにより、原子力の課 題解決に資する基礎的・基盤的研究や産学が連携した人材育成の取組を推進している。

一方、日本原子力研究開発機構(以下、「JAEA」という。)では、平成27年に廃炉国際共同研究 センター(以下、「CLADS」という。現:廃炉環境国際共同研究センター)を組織し、「東京電力ホ ールディングス(株)福島第一原子力発電所の廃止措置等に向けた中長期ロードマップ」等を踏 まえ、東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子力発電所廃炉(以下、「1F廃炉」という。) に係る研究開発を進めている。

また、平成 29 年 4 月に CLADS の中核拠点である「国際共同研究棟」の運用を開始したことを踏 まえ、今後は CLADS を中核に、廃炉の現場ニーズを踏まえた国内外の大学、研究機関等との基礎 的・基盤的な研究開発及び人材育成の取組を推進することにより、廃炉研究拠点の形成を目指す ことが期待されている。

このため、本事業では平成 30 年度の新規採択課題から実施主体を文部科学省から JAEA に移行 することで、JAEA とアカデミアとの連携を強化し、廃炉に資する中長期的な研究開発・人材育成 をより安定的かつ継続的に実施する体制を構築することとし、従来のプログラムを、①共通基盤 型原子力研究プログラム、②課題解決型廃炉研究プログラム、③国際協力型廃炉研究プログラム、 ④研究人材育成型廃炉研究プログラム(令和元年度より新設)に再編した。

- 1 -

2. 平成 30 年度 採択課題

平成30年度採択課題については以下のとおりである。

課題数:19課題

共通基盤型原子力研究プログラム	11 課題	(若手研究6課題、	一般研究5課題)
課題解決型廃炉研究プログラム	6 課題		
国際協力型廃炉研究プログラム	2 課題	(日英共同研究)	

平成 30 年度 採択課題一覧

共通基盤型原子力研究プログラム

【若手研究】

課題名	研究代表者	所属機関
被災地探査や原子力発電所建屋内情報収集のための 半自律ロボットを用いたセマンティックサーベイマ ップ生成システムの開発	河野 仁	東京工芸大学
汚染土壌の減容を目的とした重液分離による放射性 微粒子回収法の高度化	山﨑 信哉	筑波大学
ラドンを代表としたアルファ核種の吸入による内部 被ばくの横断的生体影響評価	片岡 隆浩	岡山大学
炉心溶融物の粘性及び表面張力同時測定技術の開発	大石 佑治	大阪大学
iPS 細胞由来組織細胞における放射線依存的突然変 異計測系の確立	島田 幹男	東京工業大学
レーザー共鳴イオン化を用いた同位体存在度の低い ストロンチウム 90 の迅速分析技術開発	岩田 圭弘	東京大学

共通基盤型原子力研究プログラム

【一般研究】

課題名	研究代表者	所属機関
放射性核種の長期安定化を指向した使用済みゼオ ライト焼結固化技術の開発	新井 剛	芝浦工業大学
燃料デブリ取り出しを容易にするゲル状充填材の 開発	牟田 浩明	大阪大学
レーザー蛍光法を用いた燃料デブリ変質相の同定	斉藤 拓巳	東京大学
過酷炉心放射線環境における線量測定装置の開発	岡本 保	木更津工業 高等専門学校
レーザー加工により発生する微粒子の解析と核種 同定手法の開発	長谷川 秀一	東京大学

課題解決型廃炉研究プログラム

課題名	研究代表者	所属機関
合金相を含む燃料デブリの安定性評価のための基 盤研究	桐島 陽	東北大学
ガンマ線画像スペクトル分光法による高放射線場 環境の画像化による定量的放射能分布解析法	谷森 達	京都大学
燃料デブリ取出し時における放射性核種飛散防止 技術の開発	鈴木 俊一	東京大学
アルファダストの検出を目指した超高位置分解能 イメージング装置の開発	黒澤 俊介	東北大学
ナノ粒子を用いた透明遮へい材の開発研究	渡邉 隆行	九州大学
先端計測技術の融合で実現する高耐放射線燃料デ ブリセンサーの研究開発	萩原 雅之	高エネルギー 加速器研究機構

国際協力型廃炉研究プログラム(日英共同研究)

課題名	研究代表者	所属機関
放射性微粒子の基礎物性解明による廃炉作業リスク 低減への貢献	五十嵐 康人	茨城大学
放射線耐性の高い薄型 SiC 中性子検出器の開発	三澤 毅	京都大学

3. 令和元年度 採択課題

令和元年度採択課題については以下のとおりである。

課題数:19課題

共通基盤型原子力研究プログラム7 課題(若手研究2課題、一般研究5課題)課題解決型廃炉研究プログラム4 課題国際協力型廃炉研究プログラム4 課題(日英共同研究2課題、日露共同研究2課題)研究人材育成型廃炉研究プログラム4 課題

令和元年度 採択課題一覧

共通基盤型原子力研究プログラム

【若手研究】

課題名	研究代表者	所属機関
ウラニル錯体化学に基づくテーラーメイド型新規海 水ウラン吸着材開発	鷹尾 康一朗	東京工業大学
動作不能からの復帰を可能とする多連結移動ロボッ トの半自律遠隔操作技術の確立	田中 基康	電気通信大学

共通基盤型原子力研究プログラム

【一般研究】

課題名	研究代表者	所属機関
ー次元光ファイバ放射線センサを用いた原子炉建 屋内放射線源分布計測	瓜谷 章	名古屋大学
低線量・低線量率放射線被ばくによる臓器別酸化ス トレス状態の検討	鈴木 正敏	東北大学
単一微粒子質量分析法に基づくアルファ微粒子オ ンラインモニタリングに向けた基礎検討	豊嶋 厚史	大阪大学
幹細胞動態により放射線発がんを特徴付ける新た な評価系の構築	飯塚 大輔	量子科学技術 研究開発機構
耐放射線性ダイヤモンド半導体撮像素子の開発	梅沢 仁 (~R2.3.31) 大曲 新矢 (R2.4.1~)	産業技術総合 研究所

課題解決型廃炉研究プログラム

課題名	研究代表者	所属機関
Multi-Physics モデリングによる福島 2・3 号機ペデ スタル燃料デブリ深さ方向の性状同定	山路 哲史	早稲田大学
燃料デブリ取出しに伴い発生する廃棄物のフッ化 技術を用いた分別方法の研究開発	渡邉 大輔	日立GE ニュークリ ア・エナジー
アパタイトセラミックスによる ALPS 沈殿系廃棄物 の安定固化技術の開発	竹下 健二 (~R3.6.30) 塚原 剛彦 (R3.7.1~)	東京工業大学
拡張型スーパードラゴン多関節ロボットアームに よる圧力容器内燃料デブリ調査への挑戦	高橋 秀治	東京工業大学

国際協力型廃炉研究プログラム(日英共同研究)

課題名	研究代表者	所属機関
高い流動性および陰イオン核種保持性を有するア ルカリ刺激材料の探索と様々な放射性廃棄物の安 全で効果的な固化	佐藤 努	北海道大学
再臨界前の中性子線増に即応可能な耐放射線 FPGA システムの開発	渡邊 実	静岡大学 (~R3.3.31) 岡山大学 (R3.4.1~)

国際協力型廃炉研究プログラム(日露共同研究)

課題名	研究代表者	所属機関
燃料デブリ取出し臨界安全技術の高度化	小原 徹	東京工業大学
微生物生態系による原子炉内物体の腐食・変質に 関する評価研究	金井 昭夫	慶應義塾

研究人材育成型廃炉研究プログラム

課題名	研究代表者	所属機関
燃料デブリ取り出し時における炉内状況把握のた めの遠隔技術に関する研究人材育成	淺間 一	東京大学
化学計測技術とインフォマティックスを融合した デブリ性状把握手法の開発とタイアップ型人材育 成	高貝 慶隆	福島大学
放射線・化学・生物的作用の複合効果による燃料デ ブリ劣化機構の解明	大貫 敏彦 (~R2.3.31) 竹下 健二 (R2.4.1~)	東京工業 大学
燃料デブリ分析のための超微量分析技術の開発	永井 康介	東北大学

JAEA-Review 2022-041

4. 令和2年度 採択課題

令和2年度は、2つのプログラムにおいて、研究課題の採択を決定した。 公募の概要は以下のとおりである。

公募期間: 令和2年3月17日~令和2年5月14日(課題解決型) 令和2年5月13日~令和2年7月15日(国際協力型)

課題数:10課題

課題解決型廃炉研究プログラム	8 課題	(若手研究2課題、	一般研究6詞	果題)
国際協力型廃炉研究プログラム	2 課題	(日英共同研究)		

これらの提案について、外部有識者から構成される審査委員会において、書面審査及び面接審査、日英共同研究については二国間の合同審査を実施し、採択候補課題を選定した。

その後、PD(プログラムディレクター)・PO(プログラムオフィサー)会議での審議を経て、採 択課題を決定した。

令和2年度 採択課題一覧

課題解決型廃炉研究プログラム

【若手研究】

課題名	研究代表者	所属機関
燃料デブリにおける特性の経年変化と環境劣化割れ の調査	楊 会龍 (~R4.7.31) 村上 健太 (~R4.8.1)	東京大学
健全性崩壊をもたらす微生物による視認不可腐食の 分子生物・電気化学的診断及び抑制技術の開発	岡本 章玄	物質・材料 研究機構

課題解決型廃炉研究プログラム

【一般研究】

課題名	研究代表者	所属機関
遮蔽不要な臨界近接監視システム用ダイヤモンド 中性子検出器の要素技術開発	田中 真伸	高エネルギー 加速器研究 機構
α / β / γ 線ラジオリシス影響下における格納 容器系統内広域防食の実現:ナノバブルを用いた 新規防食技術の開発	渡邉 豊	東北大学
β、γ、X線同時解析による迅速・高感度放射性核 種分析法の開発	篠原 宏文	日本分析 センター
合理的な処分のための実機環境を考慮した汚染鉄 筋コンクリート長期状態変化の定量評価	丸山 一平	東京大学
	小崎 完	北海道大学
マイクロ波重畳 LIBS によるデブリ組成計測の高 度化と同位体の直接計測への挑戦	池田 裕二	アイラボ

国際協力型廃炉研究プログラム(日英共同研究)

課題名	研究代表者	所属機関
革新的水質浄化剤の開発による環境問題低減化技 術の開拓	浅尾 直樹	信州大学
無人航走体を用いた燃料デブリサンプルリターン 技術の研究開発	鎌田 創	海上・港湾・ 航空技術 研究所

5. 令和3年度 採択課題

令和3年度は、2つのプログラムにおいて、研究課題の採択を決定した。 公募の概要は以下のとおりである。

公募期間: 令和3年3月16日~令和3年5月17日(課題解決型) 令和3年4月13日~令和3年7月1日(国際協力型日英共同研究) 令和3年7月12日~令和3年8月18日(国際協力型日露共同研究)

課題数:12課題

課題解決型廃炉研究プログラム	8 課題	
国際協力型廃炉研究プログラム	2課題(日英)、	2 課題(日露)

これらの提案について、外部有識者から構成される審査委員会において、書面審査及び面接審査、日英・日露共同研究については二国間の合同審査を実施し、採択候補課題を選定した。

その後、PD(プログラムディレクター)・PO(プログラムオフィサー)会議及びステアリングコミッティでの審議を経て、採択課題を決定した。

令和3年度 採択課題一覧

課題解決型廃炉研究プログラム

課題名	研究代表者	所属機関
建屋応答モニタリングと損傷イメージング技術を 活用したハイブリッド型の原子炉建屋長期健全性 評価法の開発研究	前田 匡樹	東北大学
燃料デブリ周辺物質の分析結果に基づく模擬デブ リの合成による実機デブリ形成メカニズムの解明 と事故進展解析結果の検証によるデブリ特性デー ターベースの高度化	宇埜 正美	福井大学
ジオポリマー等による PCV 下部の止水・補修及び 安定化に関する研究	鈴木 俊一	東京大学
世界初の同位体分析装置による少量燃料デブリの 性状把握分析手法の確立	坂本 哲夫	工学院大学
アルファ微粒子の実測に向けた単一微粒子質量分 析法の高度化	豊嶋 厚史	大阪大学

課題名	研究代表者	所属機関
連携計測による線源探査ロボットシステムの開発 研究	人見 啓太朗	東北大学
中赤外レーザー分光によるトリチウム水連続モニ タリング手法の開発	安原 亮	自然科学 研究機構
福島原子力発電所事故由来の難固定核種の新規ハ イブリッド固化への挑戦と合理的な処分概念の構 築・安全評価	中瀬 正彦	東京工業 大学

国際協力型廃炉研究プログラム(日英共同研究)

課題名	研究代表者	所属機関
福島第一原子力発電所の廃止措置における放射性 エアロゾル制御及び除染に関する研究	Erkan Nejdet (~R4.1.31) 三輪 修一郎 (R4.2.1~)	東京大学
燃料デブリ取り出しのための機械式マニピュレー タのナビゲーションおよび制御	淺間 一	東京大学

国際協力型廃炉研究プログラム(日露共同研究)

課題名	研究代表者	所属機関
福島第一発電所2、3号機の事故進展シナリオに基づくFP・デブリ挙動の不確かさ低減と炉内汚染状況・デブリ性状の把握	小林 能直	東京工業 大学
非接触測定法を用いた燃料デブリ臨界解析技術の 高度化	小原 徹	東京工業 大学

本報告書は、以下の課題の令和3年度の研究成果を取りまとめたものである。

課題解決型廃炉研究プログラム

課題名	研究代表者	所属機関
連携計測による線源探査ロボットシステムの 開発研究	人見 啓太朗	東北大学

研究成果を取りまとめた成果報告書を付録として添付する。

付録

成果報告書

This is a blank page.

令和3年度

日本原子力研究開発機構

英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業

連携計測による線源探査ロボットシステムの 開発研究

(契約番号 R03I141)

成果報告書

令和4年3月

国立大学法人東北大学

JAEA-Review 2022-041

本報告書は、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構の 「英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業」に よる委託業務として、国立大学法人東北大学が実施した 「連携計測による線源探査ロボットシステムの開発研究」 の令和3年度の研究成果を取りまとめたものです。

目次

概略vii
1. はじめに1
2. 業務計画
2.1 全体計画
2.2 実施体制
2.3 令和3年度の成果の目標及び業務の実施方法4
3. 実施内容及び成果
3.1 指向性検出器開発 5
3.1.1 シミュレーションによる検出器設計5
3.1.2 指向性検出器の製作と評価 17
3.2 画像・情報処理技術開発 24
3.2.1 測位システム LiDAR と SLAM による自己位置推定及び周囲環境測定システムの
試作
3.3 ロボット制御システム開発 31
3.3.1 複数台ロボットによる対象空間全体の探索
3.3.2 遠隔操作システムの基盤構築
3.4 実証試験
3.4.1 遮蔽体等の製作
3.4.2 線源位置探査ツールの基本設計 40
3.5 研究推進
4. 結言
参考文献

執筆者リスト

事業代表者

国立大学法人東北大学

准教授	人見	啓太朗
准教授	田村	雄介
助手	野上	光博

委託先

独立行政法人国立高等専門学校機構富山高等専門学校			卢 校
	教授	高田	英治
	准教授	金子	慎一郎

国立大学法人福島大学

特任教授 鳥居 建男

連携先

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

研究系職員 北山 佳治

表一覧

表 3.1-1	シンチレータ特性評価の結果	15
表 3.2-1	搭載 LiDAR の性能諸元	26
表 3.2-2	測定精度の結果	29
表 3.3-1	各ロボットに割り当てられたセルの数と探索時間	37
表 3.4-1	2つの検出器に搭載された各8つのシンチレータのピークカウント数	45
表 3.4-2	2 つの検出器のカウント数の High/Low への分類結果①	47
表 3.4-3	2 つの検出器のカウント数の High/Low への分類結果②	48

叉一	覧
----	---

図 2.1-1	全体計画図2
⊠ 2.2-1	実施体制図3
図 3.1-1	検出器の概略図6
図 3.1-2	デススターにおけるガンマ線入射角度と有効イベント数の関係7
図 3.1-3	シンチレータペア A、D の出力7
図 3.1-4	10 MBq の ¹³⁷ Cs 線源をデススター正面 3 m の位置に置いた状況をシミュレート
	した際の各シンチレータの応答8
図 3.1-5	推定入射角度と実際の入射角度の対応9
図 3.1-6	C3P0 のジオメトリ 11
図 3.1-7	C3P0の画像再構成結果12
図 3.1-8	(a)製作したフレキシブル基板及びバイアス電源回路並びに購入した多チャンネル
	信号処理回路(Cosmo-Z)の写真(b)測定された ²² Naのスペクトル13
図 3.1-9	製作した基板の写真(左)と実装イメージ13
図 3.1-10	シンチレータ特性評価の実験体系15
図 3.1-11	シンチレータ特性のレーダーチャート16
図 3.1-12	LYSO (Ce) のバックグラウンドスペクトルと ²² Na のスペクトル17
図 3.1-13	デススター型指向性検出器用の遮蔽体18
図 3.1-14	製作した最小単位のデススター型指向性検出器18
図 3.1-15	ROI 選定のための ¹³⁷ Cs のエネルギースペクトル計測体系19
図 3.1-16	LYSO シンチレータを用いて計測した ¹³⁷ Cs のエネルギースペクトル19
図 3.1-17	LYSO シンチレータの自己発光 BG エネルギースペクトル 20
図 3.1-18	指向性検出器の性能評価実験体系21
図 3.1-19	入射角度 10°の際に計測されたエネルギースペクトル 22
図 3.1-20	入射角度 200°の際に計測されたエネルギースペクトル
図 3.1-21	各入射角度の ROI 範囲内カウント数23
⊠ 3.1-22	90°毎にずらした各入射角度の ROI 範囲内カウント数23
図 3.2-1	放射線源分布推定手法
図 3.2-2	システムの構築方針25
図 3.2-3	VLP-16
図 3.2-4	L515
図 3.2-5	Jetson Nano 4G版
図 3.2-6	先行ロボット及び後続ロボットの外観
図 3.2-7	構築したシステムの概略27
図 3.2-8	NDT アルゴリズムの概略
図 3.2-9	試験環境のスタート地点周囲の様子と全体経路28
図 3.2-10	環境地図の合成結果
図 3.2-11	測定精度の評価部
⊠ 3.2-12	自己位置推定結果

図 3.3-1	複数台ロボットによる対象空間全体の探索31
図 3.3-2	グリッドマップのグラフ構造化32
図 3.3-3	ランダムマッチングを用いた Coarsening と Initial Partitioning の例 33
図 3.3-4	Uncoarsening Phase の例
図 3.3-5	マップ分割結果の例34
図 3.3-6	掃引経路の生成
図 3.3-7	SLAM によって得られた環境地図とそのグリッドマップ化 36
図 3.3-8	マップ分割及び経路生成の結果
図 3.3-9	遠隔操作用ロボット
図 3.4-1	遮蔽体の製作
図 3.4-2	検出器の計算体系
図 3.4-3	検出器の計算体系(PHITS)40
図 3.4-4	検出器に搭載された8個のシンチレータの位置と呼称41
図 3.4-5	等方点線源と検出器の位置42
図 3.4-6	2つの検出器に搭載された各8つのシンチレータの応答関数 44
図 3.4-7	2つの検出器に搭載された各8つのシンチレータのピークカウントの比 45
図 3.4-8	線源の実際の位置と推測された範囲(ピークカウントの比による方法)46
図 3.4-9	2つの検出器のカウント数に1%のノイズを加算した場合のピークカウントの比.46
図 3.4-10	線源の実際の位置と推測された範囲(最大値の 50%以上を High として分類) 47
図 3.4-11	線源の実際の位置と推測された範囲(総カウント数の平均値以上を High として
	分類)

略語一覧

富山高専	: 独立行政法人国立高等専門学校機構富山高等専門学校
JAEA	: Japan Atomic Energy Agency
	(国立研究開発法人日本原子力研究開発機構)
CLADS	: Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science
	(廃炉環境国際共同研究センター)
1F	: 東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子力発電所
VPC	:Virtual Pinhole Camera (バーチャルピンホールカメラ)
多脚型ロボット	:移動手段として複数本(4本、6本)の脚を用いて動作し、障害物でも乗り
	越え移動することを目的としたロボット
LiDAR	: Light Detection And Ranging
コラッセ	: Cooperative Operation Robot system for RAdiation Source Exploration (CORRASE)

概略

東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子力発電所(以下、「1F」という)の建屋内作 業環境で廃炉作業を円滑に進めるためには、高線量率環境下において放射線源の位置分布を詳細 に把握する必要がある。しかし、放射線分布を計測する現状のガンマカメラは、厚い遮蔽体を要 するため大型で重量物になったり(ピンホールカメラ)、高線量率環境では散乱体検出器と吸収 体検出器の偶発同時計数によって線源位置の特定が困難だったり(コンプトンカメラ)と、高線 量環境下での線源分布の把握が困難であり、大型重量で迅速性に欠けるものとなっている。この ため、従来型のガンマカメラで撮影しても汚染源の特定には至らないことも少なくなかった。

本研究はガンマ線の飛来方向を検出可能な検出器を開発し、これを搭載した複数のロボットの 連携により、単一センサーでは得られない広視野・迅速・安価な放射線源探査を実現するロボッ トシステム (Cooperative Operation Robot system for RAdiation Source Exploration: CORRASE、 コラッセ)を開発することを目的とする。1F 現場への投入に資することを目的として、線源探査 を行う小型ロボットに放射線計測機器を搭載したシステムを3年間の計画終了時に完成させるた めの研究を行う。本研究では目的達成のために以下の研究開発に取り組む。

(1) 指向性検出器開発

① シミュレーションによる検出器設計 (JAEA)

最適な検出器のジオメトリ(遮蔽体構造、結晶サイズ、結晶配置)をシミュレーションによって検討する。検出器総重量は1.5 kgを上限とし、数 mSv/h~数百 mSv/h の高線量率環境下でも指向性を出せる構造を目標とする。4π/8[sr]程度の指向性を持った指向性検出器 8 個を等方的に配置し、検出器重心を中心とした 4π[sr]方向に感度を持たせる。

② 指向性検出器の製作と評価(東北大学)

- 1. シミュレーションによる検出器設計を行う JAEA と共に検出器システムの基本概念を構築する。
- 2. JAEA と共に設計した検出器システムを実際に試作し、シミュレーション結果と比較しなが らその特性評価を行う。また、その結果を元に、ロボットに搭載する検出器システムの仕 様を決定する。
- 3. シンチレータ結晶及び受光素子の選定、並びに信号読み出し回路及びバイアス電源回路の試作基板設計と実装を行う。シミュレーションで設計した構造に収まるよう各種基板を設計し、密封線源を用いた性能評価試験を実施する。
- 4. 上記で得られた成果を土台に、実証試験で多脚型ロボットに搭載する検出器システムの製 作及び評価を行う。
- (2) 画像·情報処理技術開発(富山高専)
 - 1. ロボット搭載の LiDAR によって周囲環境を測定し、物体等の配置を 3 次元空間上に再現する。
 - 2. 東北大学・JAEAの開発する指向性検出器による測定結果及び1で開発した周囲環境測定結果をもとに、対象空間内の放射線源の3次元分布を推定・表示するシステムを開発する。
 - 3. 上記の1、2について、単体ロボットによる測定に加え、複数台のロボットを協調して測定 し、推定精度を向上させる。

(3) ロボット制御システム開発(東北大学)

対象空間内の放射線源の3次元分布を効率的に推定するための複数台ロボットによる探索手法の構築を行う。

(4) 実証試験(福島大学、東北大学、富山高専、JAEA)

上記研究課題のシステム化をするためのツールを整備し、照射施設や模擬実験施設などにおいてシステムの実証試験を行う。

1. はじめに

1Fの建屋内作業環境で廃炉作業を円滑に進めるためには、高線量率環境下において放射線源の 位置分布を詳細に把握する必要がある。

散乱線が多い環境で線源分布を求めるために、研究代表者らは「高線量率環境下における小型 半導体を用いたバーチャルピンホールカメラの開発(文部科学省 国家課題対応型研究開発推進 事業 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業:平成 29 年度~令和元年度)」におい て高指向性検出器を開発し、大型の遮蔽体が不要な放射線イメージャー(バーチャルピンホール カメラ、以下、「VPC」という)の開発を進めてきた。本研究では、VPC を発展させ、ガンマ線の 飛来方向を検出可能な検出器を開発し、これを搭載した複数のロボットの連携により、単一セン サーでは得られない広視野・迅速・安価な放射線源探査を実現するロボットシステムを開発する。

従来のガンマカメラは全体を覆う大型遮蔽体による重量、偶発同時計数による偽線源分布、長時間の収集時間といった欠点がある。この問題を解決するために本プロジェクトでは先行研究の VPC 用の指向性検出器を3次元に拡大し、遮蔽体の窪みに小型検出器を配置する新しい指向性検 出器を開発する。本システムでは、センサーの計数比から迅速に線源の方向を求めることができ る。1台の指向性検出器では空間分解能が低いが、この検出器を複数台のロボットに搭載し、ロ ボットが相互に連携しながら作業環境内を移動することで空間分解能を上げ、迅速に線源位置を 割り出すことができる。さらに、その移動経路上の計数から線量率のマップも形成できる。本計 測システムは比較的単純な計測系の組み合わせで放射線分布のイメージングを実現する画期的な アプローチである。

先行研究の VPC は空間内を直接計測し線源強度分布が得られるが、広視野を得るためには検出 器数を増やす必要があった。しかし、現場への適用においては検出器数には限界がある。本プロ ジェクトで開発するイメージャーは VPC の原理を踏襲しかつ検出器数や総重量など現場適用性の 観点から最適化を試みるものである。また、この3次元拡張の延長として、新たなイメージング 手法である Coded Cube Camera - Portable (以下、「C3P0」という)型検出器の開発も同時並行 で行い、システム開発の冗長性を持たせる。

本研究では小型多脚ロボットに上記検出器を搭載する。ロボットは、現場投入に際し重機や台 車を必要とせず、人が持ち運べる重さで、狭隘部へのアクセスも容易な小型のものを採用する。 多脚型ロボットは、階段の昇降やその場での回転、ロボット本体の上下動による段差の乗り越え や構造物の潜り抜けが可能な他、クローラー型では難しいガレキの乗り越えも可能である。本研 究では耐荷重5 kgのロボットを使用し、搭載計測システムを1.5 kgと軽量にすることでバッテ リーの負荷を減らし、長時間の計測が可能なものとすることを目指している。

これまで、放射線イメージャーを搭載したロボット単体での放射線計測は多くの試みがなされ てきたが、ロボットを複数台使用した例は多くない。本研究では、センサー自体は小型で単純な 機能のものを使うが、複数台のロボットを用いて連携動作させることで、単体では実現できない 広視野で迅速な線源探査と位置認識を可能とするシステムの構築に挑む。

本研究では VPC の原理を応用した比較的単純な計測系を用いることで、ピンホールカメラやコ ンプトンカメラと異なりシステムの軽量化と簡素化が図れる。また、開発した指向性検出器を多 脚式の小型ロボットに搭載することにより、狭隘部や段差があるところでも計測が可能となる。 さらに、複数のロボットを用いて連携走行することにより、これまで計測が困難であった場所で も迅速に線源分布を計測できるという学術的特色がある。

また、本検出器システムは高バックグラウンド環境下での計測という特長を有しており、本研

究で培われた技術は、様々な放射線環境で適用可能であると考えている。1F 廃炉作業だけでなく 様々な原子力環境や核セキュリティ分野での放射線計測、人工衛星搭載による宇宙計測にも応用 できる可能性がある。

2. 業務計画

2.1 全体計画

全体計画を図 2.1-1 に示す。

実施項目	令和3年度	令和4年度	令和5年度
 (1)指向性検出 器開発 ①シミュレー ションによ る検出器設 計(JAEA) 	シミュレーションによる基礎 検討 試作回路の製作と動作確認 使用するシンチレータの検討 ◆───	試作機の製作と性能評価 実験とシミュレーションの相 互フィードバックによる検出 器の改良 ◀	検出器をロボットに搭載し、 実環境を模擬した試験を実施 ◀────►
 ②指向性検出 器の製作と 評価「若 手」 	指向性検出器の仕様検討 最小単位の指向性検出器の製 作と評価 ◀━━━━━	指向性検出器の試作と評価 ◀────►	ロボットへの指向性検出器の 実装・評価 ◀━━━━━━
 (2) 画像・情報 処理技術開 発 (富山高専) 	線源分布推定手法に関する 予備検討 環境地図作成システム開発 ◀────►	環境地図と放射線源分布の融 合・表示システムの開発 検出器感度の特性評価 ◀────►	システム全体の特性評価 及び改良 ◀────►
 (3) ロボット制 御システム 開発(東北 大学) 	空間探索手法開発 ◀────●	複数台協調手法の開発 ◆ ◆	システム統合・評価 ◀ ─────►
 (4)実証試験 (福島大学、 東北大学、 富山大学、 JAEA) 	ツール類の検討・整備 ◀━━━━━	システム試作の製作実証 ▶ ◀ ────►	実証試験の実施 ◆ ◀─────◆
(5)研究推進 (東北大学)	技術評価委員会の開催 ◀────►	技術評価委員会の開催 ◀────	技術評価委員会の開催 ◀────
	まとめ・評価	まとめ・評価 ◆─▶	まとめ・評価 ◀──▶

図 2.1-1 全体計画図

2.2 実施体制

実施体制図を図 2.2-1 に示す。



図 2.2-1 実施体制図

- 2.3 令和3年度の成果の目標及び業務の実施方法
- (1) 指向性検出器開発
 - ① シミュレーションによる検出器設計(連携先: JAEA)

モンテカルロシミュレーションツールキット Geant4 を用いて、検出器の応答をシミュレーションし最適な検出器のジオメトリを検討する。

多チャンネル信号処理回路や多チャンネル波高分析器を整備し、検出器に採用するシ ンチレータ結晶を比較検討する。実際に信号読み出し回路やバイアス電源回路を設計、 実装し密封線源を用いて動作の確認を行う。

② 指向性検出器の製作と評価

ロボットに搭載することを念頭において、指向性検出器の重量やガンマ線イメージン グ性能等の検討を JAEA と連携して行う。また、多チャンネル信号処理回路や多チャンネ ル SiPM 読み出し回路を整備し、最小単位の指向性検出器を製作し、その特性評価を行う。

(2) 画像·情報処理技術開発(再委託先:富山高専)

東北大学及び JAEA で設計、試作する放射線検出器について、シミュレーションによる特性 評価をもとに、放射線源分布推定手法に関する予備的な検討を行う。また、LiDAR を用いて 周囲環境測定による環境地図作成システムを開発する。

(3) ロボット制御システム開発

複数台のロボットに探索タスクを割り当てる手法、ならびに各ロボットの経路を計画する 手法の開発を行う。また、複数台のロボットを遠隔から操作するシステムの構築を行う。

(4) 実証試験(再委託先:福島大学、富山高専、連携先:JAEA、東北大学)

ロボットに搭載する遮蔽体と周辺治具及び 3D カメラ等のツール類の整備を行う。検出器の 試作状況に応じて、線源を用いた感度試験、角度分布特性、エネルギー特性等の解析調査を 実施する。

(5) 研究推進

研究代表者の下で各研究項目間ならびに廃炉環境国際共同研究センター(CLADS)等との連携を密にして、研究を進める。また、研究実施計画を推進するための打合せや会議等を開催する。

- 3. 実施内容及び成果
- 3.1 指向性検出器開発
 - 3.1.1 シミュレーションによる検出器設計(連携先: JAEA) 令和 3 年度に JAEA が実施した内容は主に
 - (1) シミュレーションによる検出器応答の計算及び検出器ジオメトリの検討
 - (2) 検出器の信号読み出し回路及びバイアス電源回路の設計と実装並びにその動作試験
 - (3) 検出器に採用するシンチレータ結晶の比較検討
 - である。各実施内容の成果を順に述べる。

(1) シミュレーションによる検出器応答の計算及び検出器ジオメトリの検討

本プロジェクトは、人が容易に持ち運べる程度の小型ロボットに、ガンマ線イメージャー を搭載し、1F建屋内部の汚染状況を可視化するシステムの開発を目的としている。ロボット に搭載するガンマ線イメージャーは、小型ロボットに搭載可能なほど小さく軽量でなくては ならない。また、現場は数 mSv/h から数百 mSv/h の環境であると予想されるため、高線量場 においても測定できる性能が求められる。これらの条件を十分に満足するガンマ線イメージ ャーは現状存在しないため、今回新たにガンマ線イメージャーの開発を行う。新しいガンマ 線イメージャーの開発は大きく、シミュレーション、試作機の製作、現場環境での実用化試 験といった流れで実施する。令和3年度は、主にシミュレーションによる検出器応答の計算 及び検出器ジオメトリの検討を実施した。シミュレーションにはモンテカルロシミュレーシ ョンツールキットである Geant4[1]を用いた。

今回新しいガンマ線イメージャーとしてデススター型検出器と C3P0 型検出器の 2 つのジ オメトリを提案した。1 つ目のデススター型検出器は、人見らが開発した VPC に用いられて いる指向性ガンマ線検出器[2]を3次元的に配置することで、遮蔽体の量を極力抑えて全方 向ガンマ線イメージングを行うものである。VPC に用いられている指向性ガンマ線検出器は、 。鉛ブロックを挟んで配置された 2 つの検出器から構成されている。2 つの検出器の検出レー トの比より、放射線源が指向性ガンマ線検出器の軸上にあるか否かを識別する。図3.1-1(a) に示すように、デススター型検出器は特殊な形状をした鉛遮蔽体の窪みに、ガンマ線検出用 のシンチレータを配置された構造をしている。鉛の遮蔽壁を挟んだ2 つのシンチレータペア が1つの指向性ガンマ線検出器として機能する。8個のシンチレータによって12個の指向性 検出器として機能するシンチレータペアが作られる。C3P0型検出器は、非対称構造を持った 3次元的な鉛ブロック群(以下、「符号化立体」という)内部に生じる、ガンマ線フラックス の勾配を測定することで、その勾配を作り出しているガンマ線源の位置を逆推定するという アイデアに基づいている。符号化立体内部に生じる 3 次元的なフラックスの勾配は、謂わば ガンマ線が作り出す3次元的な影のような存在である。そのためこの手法は、街灯によって 夜道に映し出された自身の影を観察することで街灯の位置を推測できるという一般的な経験 則を、ガンマ線検出に置き換えたものとして理解できる。図 3.1-1(b)に C3P0 型検出器の全 体像を載せる。



図 3.1-1 検出器の概略図 (a)デススター (b)C3P0

まず、デススターのガンマ線入射方向に対する各シンチレータの応答をシミュレーション によって調べた。以下にシミュレーションの条件を記述する。

・シンチレータ

材料:GAGG (Ce) サイズ:5 mm×5 mm×5 mm エネルギー分解能:8.4% @662 keV

·遮蔽体

材料:鉛

シンチレータ間の鉛厚:20 mm (全高及び全幅:60 mm)

・ガンマ線源

エネルギー:662 keV

線源サイズ:60 mm×60 mmの平面線源

·照射条件

照射方向:平面線源に垂直にガンマ線を並行照射

測定点:仰角θを90°に固定し、方位角φを0°から355°まで5°ずつ変化させ、合計 72点で測定

照射数:各測定点で10⁷イベント

8 個のシンチレータのうち1つでもエネルギーを検出すると、そのイベントで検出された各 シンチレータのエネルギーをリストデータとして出力する。鉛ブロックで散乱し、シンチレ ータへ入射したイベントによる影響を抑えるために、検出エネルギーに662±55.6 keVのエネ ルギーウインドウを設けた。エネルギーウインドウの条件を満たしたイベントを有効イベン トとしてカウントし、ガンマ線の入射角度による有効イベントの推移を調べた。図3.1-2 に、 上面に設置された4 個のシンチレータ A、B、C、D の有効イベント数のガンマ線入射角度推移 を載せる。


図 3.1-2 デススターにおけるガンマ線入射角度と有効イベント数の関係

このデータを用いてガンマ線の入射方向を推定する。図3.1-3 にシンチレータAのカウント 数をシンチレータDのカウント数で割った値の、ガンマ線の入射角度による推移を載せる。シ ンチレータ A とシンチレータ D の鉛による遮蔽距離の差が最も大きい、入射角度 100°から 120°の間で、比は最大値を取ることがわかる。例えば、今回計算を行った条件では、各シン チレータペアの出力が 20 以上となった時に、角度分解能±10°程度でガンマ線の入射角度を 推定することが可能であることが示唆された。



シンチレータペアのカウントレート比を利用する手法に加えて、ガンマ線の入射角度と8個 のシンチレータの応答を事前にルックアップテーブルとして用意することで、得られたガン マ線の応答とルックアップテーブルからガンマ線の入射角度を推定する手法についても検討 した。これは、8個のシンチレータのカウント数を相対的にHigh (H) と Low (L) で2値化し、 事前に整備したルックアップテーブルと見比べることでガンマ線の入射角度を推定するもの である。例えば、ガンマ線が仰角 θ 90°、方位角 φ 0°の方向から入射した場合(図 3.1-2 の 右上の図の状況)、シンチレータ A、B、C、D の応答はそれぞれ H、L、L、H となることが予想 される。図 3.1-4 に、10 MBq の¹³⁷Cs 線源をデススター正面 3 m の位置に置いた時の、各シン チレータのカウント数をシミュレーションした結果を載せる。シンチレータ A'、B'、C'、 D'はそれぞれ、A、B、C、D の真下に位置するシンチレータである。例えば、カウント数の H、 L 識別閾値を 4 とした場合、シンチレータ A、B、C、D の応答は H、L、L、H となり事前に用意 したルックアップテーブルを参照することで、ガンマ線の入射方向を仰角 θ 90°、方位角 φ 0°の方向であると推定することができた。図 3.1-5 に、仰角 θ を 90°に固定した場合の、推 定入射角度と実際の入射角度の対応を示す。図より角度分解能 35°と 55°でガンマ線の入射 角度推定が可能であることがわかった。



図 3.1-4 10 MBq の¹³⁷Cs 線源をデススター正面 3 m の位置に置いた状況を シミュレートした際の各シンチレータの応答



図 3.1-5 推定入射角度と実際の入射角度の対応

シンチレータペアのカウントレート比をもとにガンマ線の入射角度推定を行う手法を3次元 VPC 法、事前に用意したルックアップテーブルを参照する手法をルックアップテーブル法と呼 ぶことにする。3次元 VPC 法は角度分解能 20°程度で入射角度推定を行えるが、4π方向全て を一度に測定することはできない。一方、ルックアップテーブル法は4π方向全てを一度に測 定することができるが、角度分解能が 35°及び 55°程度で3次元 VPC 法に劣る。また、両手 法共に、対称的な方向に、見かけ上同強度の線源があった場合、1台の検出器応答からでは適 切な測定が行えないという性質がある。これは、多点測定のデータを適切に組み合わせて解 析することで解消できると考えられる。

続いて、C3P0の原理並びに一連のシミュレーションの概要及び結果を報告する。C3P0 は図 3.1-1(b)に示すように、鉛キューブ群で構成される非対称の符号化立体の内部に、シンチレ ータキューブが配置された構成になっている。ある角度から、符号化立体に対してガンマ線 が照射されると、符号化立体内部にはガンマ線フラックスの3次元的な勾配、すなわち3次元 影が生じる。符号化立体は全ての軸に対して非対称構造を持っているため、内部に生じる3次 元影は、ガンマ線入射位置によって一意に定まる。3次元影は符号化立体内部に配置された各 シンチレータのカウント数を測定することで、間接的に知ることができる。どの角度からガ ンマ線が照射されると、どのような3次元影が測定されるのかという情報を予め全ての方向に ついて整備しておくことで、実際に現場で測定された3次元影からガンマ線の入射方向を逆算 することができる。この逆問題を、古くから知られる SAND II というアンフォールディングア ルゴリズムを用いて解いた。

得られた3次元影を行列 H、事前に用意した3次元影の情報(応答関数)を行列 R、ガンマ 線入射角度分布(重み行列)を行列 Fと置くと以下の式が成り立つ。

H = RW

ここで、*R*は符号化立体の形状やシンチレータキューブの配置などによって決まる検出器固 有の行列で、測定環境に依らない。そのため、一度*R*を求めておけば、1F現場の原型を留めて いない RPV/PCV 内部を含め、いかなる環境にも適用可能である。上式から*W*を求めたいわけだが、 一般に*R*は非正則行列なので、これは劣決定系における逆問題となる。そこで、両辺の差の二 乗である最小二乗誤差

$\sigma = (\boldsymbol{H} - \boldsymbol{R}\boldsymbol{W})^2$

を最も小さくする Wを近似的に求め、これを尤もらしいガンマ線入射角度分布として得ること にした。最小のσを求めることは、Hの次元をnとするとn+1次元曲面の最小値を求める問題 に帰着する。SAND II では、これをベイズ推定に基づいたアルゴリズムで計算する。

この手法の実現可能性を検討するために、シミュレーションを実施した。本来、*R*は照射場等のコントロールされた場で実験的に用意すべきだが、今回はGeant 4を用いてシミュレーションで*R*を用意した。シミュレーションの条件を下記に示す。

・シンチレータ

材料:GAGG (Ce) サイズ:10 mm×10 mm×10 mm エネルギー分解能:8.4%@662 keV 個数:8個

·符号化立体

材料:鉛 サイズ:10 mm×10 mm×10 mm 個数:18 個

・ガンマ線源

エネルギー:662 keV 線源サイズ:44 mm×44 mmの平面線源

·照射条件

照射方向:平面線源に垂直にガンマ線を並行照射 測定点:ガンマ線照射角度を仰角 θ、方位角 φ を 10° ずつ変化させ、合計 615 点 照射数:各測定点で 10⁷ イベント

シンチレータの検出エネルギーが 662 keV±56 keV の条件を満たしたイベントを有効イベントとしてカウントし、各測定点での各シンチレータの有効イベント数を列要素として持つ8行 615 列の応答関数 **R**を用意した。シミュレーションに用いた C3PO のジオメトリを図 3.1-6 に示す。



図 3.1-6 C3P0 のジオメトリ

測定された 3 次元影 H もシミュレーションによって求めた。10 MBq の ¹³⁷Cs 点線源を C3P0 から 3 m 離した点に置き、1 分、5 分そして 10 分間の測定時間で測定した状況を再現した。放射線源分布は、(a)(θ , ϕ)=(60°, 270°)の単一線源、(b)(θ , ϕ)=(120°, 320°)の単一線源、 そして、(c)は(a)と(b)の二線源の 3 パターンとした。逆問題を解いて得られた Mを θ , ϕ の 2 次元行列に変換し、球面上に強度分布を描写した結果を図 3.1-7 に載せる。



単一線源、二線源共に、位置分解能±10°以下で適切な位置に結像することを確認した。 特に単一線源については、3 m 先の 10 MBq、¹³⁷Cs線源を1分以内でイメージングできる。角 度分解能、イメージング速度共に既存のガンマ線イメージャーを凌ぐ性能が得られる可能性 が示された。二線源イメージングに関して、2 つの関心領域(region of interest、以下、 「ROI」という)のイメージング強度を比較したところ、96%以上の精度で一致した。これは、 多線源イメージングにおいて汚染分布測定だけではなく、線源強度推定を行える可能性があ ることを強く示唆している。以上より、C3POの実現可能性を十分に支持する結果が得られた と結論付けた。

(2) 検出器の信号読み出し回路及びバイアス電源回路の設計と実装並びにその動作試験

続いて、令和3年度に実施した3つの内容の2つ目である、回路設計及び動作試験についての結果を述べる。(1)で提案した2種類のガンマ線イメージャーは、令和4年度に試作機の製作と性能評価試験を実施する計画である。試作機の製作に先立ち、基本的な回路設計のコン セプト立案と、要素回路の設計及び実装並びにその動作試験を実施した。 デススター型は、シンチレータ結晶が鉛遮蔽体の窪みに可能な限り近い位置に配置される ことが、高い信号のコントラストを得る上で重要である。加えて、遮蔽体の形状が複雑なの で、シンチレータと受光素子を載せる基板はフレキシブル基板を採用することを検討してい る。そこで、最も基本的なフレキシブル基板を用いた信号読み出し回路と、バイアス電源回 路供給回路を設計し動作確認を行った。設計した回路から得られた信号は、今回購入した多 チャンネル信号処理回路 Cosmo-Z に入力し AD 変換した後、波高分析を行った。図 3.1-8(a) に 製作した回路と Cosmo-Z の写真を、図 3.1-8(b) に得られた²²Na の波高スペクトルを載せる。 測定の際に用いたシンチレータは5 mm 四方の GAGG (Ce) シンチレータである。GAGG (Ce) の スペックに相当するエネルギースペクトルが得られ、設計した回路が正常に動作しているこ とを確認した。



- 図 3.1-8 (a) 製作したフレキシブル基板及びバイアス電源回路並びに購入した多チャンネル 信号処理回路(Cosmo-Z)の写真
 - (b) 測定された²²Na のスペクトル

C3P0は3×3キューブを1つの基板にまとめ、それを三段積層することで実現した。図 3.1-9 に製作した回路の写真と、実装イメージを載せる。各段の基板の動作は確認済みで、令和4年度以降に本格的な性能評価試験を実施する。



図 3.1-9 製作した基板の写真(左)と実装イメージ(右)

(3)検出器に採用するシンチレータ結晶の比較検討

本研究では新しい手法の確立及び実証に主眼を置いているため、開発コストが低く短期間 で実装が行えるシンチレーション検出器をガンマ線検出器として採用する。半導体検出器は 優れた特性を有するが、読み出しや電磁遮蔽が煩雑であるため、今回は検出器候補から外し た。検出器に採用するシンチレータ結晶を決めるために、複数のシンチレータ結晶の特性を 比較検討した結果について述べる。測定対象の環境は数 mSv/h から数百 mSv/h の空間線量率だ と予想されるため、高計数率でも測定のできる比較的減衰時間の早いシンチレータが理想で ある。また、製作や実装、保守の観点から潮解性が無く、安定した性能の結晶の入手性が良 いものが望ましい。今回、検出器に採用するシンチレータを決めるため、候補として 14 種類 のシンチレータを用意し、実験的に特性を評価、比較した。候補とした 14 種類のシンチレー タは以下の通りである。

- BaF2
- BGO
- CdW04
- CeF3
- GAGG (Ce)
- GFAG (Ce)
- LuAG (Ce)
- LuAG (Pr)
- LYSO (Ce)
- PbF2
- PbW04
- YAG (Ce)
- YAP (Ce)
- YSO (Ce)

各シンチレータは、全て5 mm×5 mmで、受光面を除く5 面に 0.2 mm 厚の BaS0₄反射 膜と 0.03 mm 厚のアルミ保護膜を蒸着してある。シンチレータの特性評価試験のために、専用 のシンチレータ評価基板を設計した。図 3.1-10 に実験体系を載せる。放射線源及び、シンチ レータは小型の暗箱の中に配置し、信号処理は暗箱の外に置かれた Cosmo-Z によって行った。 800 kBq の ²²Na をシンチレータから 76.4 mm 離れた場所に設置し、測定時間は 300 秒とした。

試験の結果、エネルギー分解能や信号強度、減衰時間を考慮して BGO、GAGG (Ce)、GFAG (Ce)、LuAG (Ce)、LuAG (Pr)、LYSO (Ce) の 6 種類を最終候補とした。最終候補の試験結果 を表 3.1-1 にまとめる。蛍光減衰時間はカタログ値を用いた。明るさとは、入射光子のエネル ギーに対するシンチレーション光の強度である。明るさを評価する量として、511 keV のピー クの ADC ch の位置を利用した。明るいシンチレータほど、511 keV のピークは大きな ADC ch に現れる。感度を評価する量として、波高スペクトルの 511 keV ピークを正規分布でフィッテ ィングした際の、± σ の領域の積分値を用いた。感度は結晶の密度や、発光波長と受光素子 の感度波長依存性などに依る。エネルギー分解能 R は

$R = FWHM/H_0$

で定義される量である。ここで FWHM として 511 keV のピークを正規分布でフィッティングした際の半値幅をもちいた。 H_0 は 511 keV のピーク位置である。価格は、5 mm×5 mm×5 mm 結晶 4 個の入手価格を 4 で割った値である。



図 3.1-10 シンチレータ特性評価の実験体系

	減衰時間 [ns] ※カタログ値	明るさ [ch]	感度 @511 keV [count]	エネルギー分解能 @511 keV [%]	価格 [¥]
BGO	317	46	27902	16.4	5280
GAGG (Ce)	90	391	9711	10.8	18400
GFAG (Ce)	40	345	10310	10.3	18400
LuAG (Ce)	60	166	17116	12.3	42500
LuAG (Pr)	22	85	18144	15.6	52000
LYSO (Ce)	42	417	19624	14.6	6530

表 3.1-1 シンチレータ特性評価の結果

結果を視覚的に比較できるように、各パラメータを頂点としたレーダーチャートを作成した。各結晶の各パラメータの最大スコアを1、最小スコアを0として規格化し、全てのパラメータの重みを1とした場合のレーダーチャートを図3.1-11に示す。総合スコアはLYS0(Ce)が3.75で最も高く、次いでGFAG(Ce)の3.50、GAGG(Ce)の3.34という結果になった。



図 3.1-11 シンチレータ特性のレーダーチャート

LYSO は、自己崩壊をする元素である Lu を含有しているため、自己発光によるバックグラウ ンドに関する議論も重要である。真の信号源由来の信号に対して、自己発光による信号の割 合が十分低い環境でないと使用できない。図 3.1-12 にガンマ線源を置かない環境で測定した LYSO (Ce) シンチレータのバックグラウンドスペクトルと、76.4 mm 離れた位置に 800 kBq の ²²Na を置いた場合のスペクトルを載せる。測定時間はいずれも 300 秒である。バックグラウン ドのカウントレートは約 36 cps であった。一方、²²Na 線源を置いた場合のカウントレートは 約 180 cps であった。ICRP Publication 74[4]の換算係数をもとに概算をすると、75 mm 先に 800 kBq、500 keV の放射線源がある場合の空間線量率は大体 10 µSv/h 程度である。今回の用 途では、その 2 桁以上大きな環境での使用を想定しているため、Lu 由来の自己発光は無視で きる。

以上の結果より、今回の用途では GAGG (Ce)、GFAG (Ce)、LYSO (Ce) が適していると結論 付けた。



図 3.1-12 LYSO (Ce) のバックグラウンドスペクトルと²²Na のスペクトル

3.1.2 指向性検出器の製作と評価

JAEA と共同でロボットに搭載することを念頭において、指向性検出器の開発を行った。 JAEA は主にシミュレーションによる検出器設計を担当し、東北大学では、指向性検出器の製 作と評価を主に担当した。令和3年度は、デススター型の指向性検出器の最小単位の指向性検 出器を製作し、その特性評価を行った。

(1) 最小単位の指向性検出器製作

本プロジェクトで開発を行っているデススター型の指向性検出器は主にシンチレータ、シ ンチレータ読み出し回路、検出器遮蔽体から構成される。令和3年度では、指向性検出器を製 作するために、各々の構成要素の整備を行い、それらを組み合わせた最小単位のデススター 型の指向性検出器の製作を行った。

今回は、シンチレータとしては、5×5×5 mm³のLYSO(Ce)を採用した。LYSO(Ce)は JAEA のシンチレータ結晶の比較検討の中で述べられているように、速さ(減衰時間)・明るさに優 れシンチレータであり、指向性検出器を構成するシンチレータの有力候補の1 つとなってい る。シンチレータのサイズは、JAEA のシミュレーションの体系と合わせるために5×5×5 mm³ とした。

シンチレータを用いてガンマ線計測を行うためには、シンチレータからの蛍光を計測する ための光検出器とその光検出器からの信号を処理するための回路が必要となる。光検出器と して浜松ホトニクス製の MPPC (S13360-6025PE)、信号処理回路としてクリアパルス製の 8 チ ャンネル SiPM 読み出し回路(80470 型)を採用し、それらを組み合わせたシンチレータ読み 出し回路の整備を行った。8 チャンネル SiPM 読み出し回路は計測制御用 PC によって制御を行 った。

3.4.1 の遮蔽体の製作(福島大学)により整備された検出器遮蔽体を組みわせて、デススター型指向性検出器用の遮蔽体を構築した(図 3.1-13)。今回製作したデススター型指向性検出器用の遮蔽体のサイズは、JAEAのシミュレーションの体系と同じとした。

JAEA-Review 2022-041



図 3.1-13 デススター型指向性検出器用の遮蔽体

反射材のテフロンを巻いた LYSO シンチレータと MPPC を、光学グリスを用いて接続した。 MPPC はわずかな光にも感度があるため、黒い遮光テープを用いて LYSO シンチレータと MPPC の遮光を行った。図 3.1-14 に示すようにデススター型指向性検出器の遮蔽体の窪みに LYSO シ ンチレータを配置することにより、最小単位のデススター型指向性検出器の製作を行った。



図 3.1-14 製作した最小単位のデススター型指向性検出器

(2) 最小単位の指向性検出器の評価

本プロジェクトでは、小型の指向性検出器を小型ロボットに搭載し、1F内のガンマ線汚染 状況のイメージングを行うことを目指している。その際に、主なガンマ線汚染源としては、 ¹³⁷Csを想定している。そのため、指向性検出器の評価には¹³⁷Csの密封線源を使用した。 シンチレータは、同じエネルギーのガンマ線が入射した場合でも出力に幅が出ることが知られている。そのため、あらかじめ¹³⁷Cs からの 662 keV のガンマ線のピークがエネルギースペクトルのどこに計測されるか ROI を定めておく必要がある。そこで、指向性検出器の評価を行う前に、ROI を選定するために¹³⁷Cs のエネルギースペクトル計測を 600 秒間行った(図3.1-15)。今回の計測で得られた¹³⁷Cs のエネルギースペクトル計測を図 3.1-16 に示す。明瞭な 662 keV の全吸収ピークがグラフの中央に確認することができる。ROI は 662 keV の全吸収ピークを網羅できるように 400~600 ch と設定した。



図 3.1-15 ROI 選定のための ¹³⁷Cs のエネルギースペクトル計測体系



図 3.1-16 LYSO シンチレータを用いて計測した¹³⁷Cs のエネルギースペクトル

LYSO は Lu を含むシンチレータである。Lu には放射性同位体である¹⁷⁶Lu があるため、LYSO シンチレータには¹⁷⁶Lu 由来の自己発光 BG がある。この自己発光 BG は計測したいエネルギー 帯に影響を与えることがある。そのため、LYSO の自己発光 BG の評価を行うために、¹³⁷Cs の密 封線源なしで 600 秒間、自己発光 BG エネルギースペクトル計測を行った(図 3.1-17)。LYSO の自己発光 BG エネルギースペクトルを計測したところ、今回設定した ROI の範囲にもカウン トが入ることを確認した。合計で 2 回自己発光 BG エネルギースペクトルの計測を行ったとこ ろ、ROI の範囲に入ったカウント数の平均値は 611.5 counts (1.02 counts/sec) であった。



図 3.1-17 LYSO シンチレータの自己発光 BG エネルギースペクトル

今回製作した最小単位の指向性検出器の指向性性能を評価するために、線源と指向性検出 器の相対角度を変化させながら、ROI範囲内のカウント数の変化を評価した。実験内容を以下 にまとめる。

実験内容 使用した線源 : ¹³⁷Cs 使用したシンチレータ : LYSO (5×5×5 mm³) 中心から線源までの距離 : 20 cm 照射角度 : 10°刻みで 360° (合計 36 点) 計測時間 : 各角度で 60 sec ROI の範囲 : 400~600 ch

今回の指向性検出器の性能評価実験においては、実験体系の精度が重要となる。そこで、 3D プリンタを用いて実験用治具を製作し、それを用いて実験を行った。入射角度 10°及び 200°の際の実験体系を図 3.1-18 にまとめた。入射角度 10°の際に計測されたエネルギース ペクトルを図 3.1-19 に示す。線源の入射角度 10°ではシンチレータと線源間に遮蔽体がなく、 明瞭な 662 keV の全吸収ピークが得られた。一方で、入射角度 200°の際に計測されたエネル ギースペクトルを図 3.1-20 に示す。線源の入射角度 200°ではシンチレータと線源間に遮蔽 体あるため、662 keV の全吸収ピークは見られなかった。各入射角度の ROI 範囲内カウント数 (LYSO の自己発光 BG 分のカウント数を差し引き後) について図 3.1-21 まとめた。線源の入 射角度により ROI 範囲内カウント数が変化しており、またシンチレータと線源の間に遮蔽体が ある際には大きく ROI 範囲内カウント数が減少することが確認でき、今回製作した指向性検出 器がデススター型指向性検出器の設計コンセプトを再現していることを確認した。また、デ ススター型指向性検出器は対称形状であるため、90°毎に線源の入射角度をずらすことによ り、遮蔽体の他の窪みに同サイズの LYSO シンチレータが配置した際の ROI 範囲内カウント数 の推定を行うことができる。線源の入射角度を 90°毎にずらした際の ROI 範囲内カウント数 を図 3.1-22 にまとめた。90°毎にずらした各入射角度の ROI 範囲内カウント数は、3.1.1 シ ミュレーションによる検出器設計で計算されたシミュレーション結果(図 3.1-2 デススター におけるガンマ線入射角度と有効イベント数の関係)と良い一致を示した。



図 3.1-18 指向性検出器の性能評価実験体系 (左)入射角度 10° (右)入射角度 200°



図 3.1-19 入射角度 10°の際に計測されたエネルギースペクトル



図 3.1-20 入射角度 200°の際に計測されたエネルギースペクトル



図 3.1-21 各入射角度の ROI 範囲内カウント数



図 3.1-22 90°毎にずらした各入射角度の ROI 範囲内カウント数

3.2 画像·情報処理技術開発(再委託先:富山高専)

画像・情報処理技術の開発では各検出器の出力と、各検出器の位置及び向き等の情報を組 合せ、広い領域の線源分布推定を目指す。その際、広域線源分布を取得するために多くの視 点から測定を行うと、現実的な時間での推定が困難となるものと予測される。そこで、本研 究開発においては、図 3.2-1のような段階の測定を検討(各方向からのガンマ線入射強度測定 が可能な検出器を使用する場合)した。



 大まかな指向性を持つ検出器を用いて、ロボットを移動させて対象とする 領域内で線源強度が大きいと考えられるサブ領域を設定する。

② 空間分解能の高い検出器を用いて、サブ領域について複数回の測定を実施。 その結果を組み合わせてサブ領域全体の詳細線源分布を推定する。

図 3.2-1 放射線源分布推定手法 -考え方の例-

このシステム構築は、JAEAによる新型指向性検出器(3.1節参照)の採用を想定して、大き く以下の A)~D)の 4 項目に分けられる。令和 3 年度は、富山高専において、B)について検討 及び試作を行った。

- A) 高指向性検出器より得られたデータをもとにした放射線強度分布の推定
- B) 測位システム LiDAR と SLAM による自己位置推定及び周囲環境測定システムの構築
- C) 連携計測による互いの位置認識
- D) LiDAR 情報と放射線強度分布情報を融合し画面表示するシステムの開発

3.2.1 測位システム LiDAR と SLAM による自己位置推定及び周囲環境測定システムの試作

本システムにおいては、未知の調査対象領域でロボットが活動するために、先行ロボット により領域全体の環境地図を迅速に生成する。また、後続ロボットは得られた環境地図を共 有参照し、各個搭載の LiDAR スキャンデータと照合することで自身の位置を推定する(図 3.2-2)。後続ロボットは、新型放射線検出器を搭載するため、小型な LiDAR 搭載が求められ る。以上から、先行ロボットに広視野型LiDAR を搭載し、後続ロボットに狭視野型LiDAR を搭 載することとした。



(1) 使用ハードウェアの概要

広視野型 LiDAR には、全周 360°を高速で掃引可能な Velodyne Lidar 社製 VLP-16 (図 3.2-3、以下、「VLP-16」という)を採用し、狭視野型 LiDAR には小型で標準的な RGB カメラ相当の 視野を持つ Intel 社製 RealSense L515 (図 3.2-4、以下、「L515」という)を採用した。表 3.2-1 に各性能諸元を示す。

試験用移動ロボットに iRobot 社製 Create 2 を使用し、小型 CPU ボード (NVIDIA 社製 Jetson Nano 4G 版、図 3.2-5) を搭載することで制御した。図 3.2-6 に各デバイスを搭載した先行ロボット及び後続ロボットの外観を示す。



図 3.2-3 VLP-16



図 3.2-4 L515



図 3.2-5 Jetson Nano 4G版

項目	VLP-16	L515
寸法	直径 103.3 mm×高さ 72.7 mm	直径 61 mm×高さ 26 mm
重量	約 590 g	100 g
接続方式	イーサネット 100 Mbps	USB-C 3.1 Gen 1
視野範囲	水平 360° 垂直 30°	水平 70° 垂直 55°
距離測定方式	ToF	ToF
測定点数	約 300,000 ポイント	_
測定スピード	5~20 Hz	30 Hz
測定距離	0.5~100 m	0.25~9 m
測定精度	± 30 mm	$+5{\sim}14$ mm

表 3.2-1 搭載 LiDAR の性能諸元



図 3.2-6 先行ロボット及び後続ロボットの外観

(2) 構築したシステムの概略

令和3年度は、地図生成及び自己位置推定手法について試作検証するものとし、事前収 集した LiDAR スキャンデータをワークステーション内でオフライン処理した。またデータ 収集のため、イーサネットを介したオペレータのジョイパッド入力によるロボット遠隔操 作機構も併せて構築した。図3.2-7に示すこれらすべては、Robot Operating System(以 下、「ROS」という)[5]を利用し構築した。



図 3.2-7 構築したシステムの概略

LiDAR のスキャンデータは点群データであり、調査対象領域の空間的拡がりに応じて膨大な 量となる。可能な限り処理負荷が小さいものである必要があることから、Normal Distribution Transform(以下、「NDT」という)アルゴリズムを採用した(図3.2-8)。NDTア ルゴリズムは探索空間を格子状(グリッド)に分割することで個々のグリッド内の点データ から正規分布を参照スキャンとして準備し、新規入力スキャンとマッチングを行う手法であ る[6][7]。収束演算により入力スキャンの位置を修正していく。参照スキャンと入力スキャ ンの両方を含むグリッドのみ収束演算に利用するため、計算量オーダー(N)で計算できる (新規入力データ数Nの増加とともに計算量は線形的に増加する)利点がある。



図 3.2-8 NDT アルゴリズムの概略

(3) 評価試験と結果

構築したシステムを用いて環境地図の合成及び自己位置推定について検証した。測定は富 山高専本郷キャンパス内の実験室をスタート地点として室内を周回し、クランク経路状の廊 下へ進出、階段前をゴールとした(図3.2-9)。全体経路長は約35 m程度である。なお本実験 では、学内無線LANの電波干渉の影響を避けるため、有線LANによりロボットの操作、通信を 行っている。 図 3.2-10 は、VLP-16 によるスキャンデータを用いて NDT アルゴリズムにより合成した環境 地図である。図 3.2-9(a)、図 3.2-10(a)を比較すると、大きな破綻なく室内の 3 次元幾何学的 形状を捉えており、良好な結果が得られた。また、図 3.2-10(b)、図 3.2-10(c)においても、 目立つ歪みもなく経路全体が明瞭に再現されている。図 3.2-10(c)に一定して傾斜が見られる が、これはLiDARの取り付け姿勢のズレによるものであり、実環境は水平な平坦路面である。



図 3.2-9 試験環境のスタート地点周囲の様子と全体経路



図 3.2-10 環境地図の合成結果

得られた環境地図上での距離計測を、大規模点群処理ソフト InfiPoints (Elysium 社製)を 用いて行い、測定精度の検証を行った。測定は図 3.2-11 に示す(a)、(b)の 2 か所で行い、そ れぞれランダムに抽出した点を5回ずつ測定した(表 3.2-2)。



図 3.2-11 測定精度の評価部

	(a) [m]	(b)[m]
	16.40	9.13
InfiDainta LTM	16.27	9.13
IIII IFOIIIUS 上 C の 計測/店	16.26	9.01
口的胆	16.29	9.12
	16.53	8.81
平均値[m]	16.35	9.04
真値[m]	16.56	9.09
誤差[m] (1 mあたり)	0. 01	0. 01

表 3.2-2 測定精度の結果

なお、真値はメジャーを用いて実際に測定した値である。表 3.2-2 より、1 m あたりの誤差が 30 mm 以内となり、VLP-16 のスペック精度(表 3.2-1)が十分得られていることを確認した。

引き続き、VLP-16 で作成した環境地図と L515 によるスキャンデータを照合することで、L515 の自己位置推定が可能かを実験により検証した。なお、L515 によるスキャンデータは VLP-16 と は別に収録したものを用意しておき、オフラインで時系列ごとにフレームを切り出すことで、 NDT アルゴリズムを用いて既存環境地図と比較照合した。

図 3.2-12 は自己位置推定の結果を示しており、大まかな自己位置推定は可能であることを確認した。なお、最後の部分については大きくずれてしまっている(図3.2-12(b)(c))が、この地点ではL515と壁の距離が400 mm程度しかなく、マッチング処理を収束させるに足る特徴量が得られなかったためと考えられ、今後の課題である。また、図3.2-12の結果を得るまでに、約3時間もの処理時間を要する結果となったことから、並列処理やGPUの活用について検討し、実時間ベース並みのデータ処理速度向上を図る必要がある。

JAEA-Review 2022-041



図 3.2-12 自己位置推定結果

3.3 ロボット制御システム開発

本研究では、対象空間内の放射線源の3次元分布を効率的に推定するための探索手法の構築 を行うことを目指している。ここでは、放射線源の探索を、(a)対象空間全体の大まかな探索と、 その探索によって得られた予備的な放射線源分布推定結果を利用した(b)特定箇所の詳細な探索、 の2段階で行うというアプローチをとる。

令和 3 年度は、複数台のロボットによって対象空間全体を大まかに探索する手法の開発を行った。また、複数台のロボットを遠隔から操作するシステムの構築を行った。

3.3.1 複数台ロボットによる対象空間全体の探索

対象空間内を最初に空間を大まかに探索することで、詳細な測定が必要な箇所とそうで ない箇所を把握することができると期待される。そのため、まずは複数台の移動ロボット が対象空間全体を覆うような動作を行うことが望ましい。このような作業は「掃引作業」 と呼ばれる。

複数台のロボットによる掃引作業を扱った研究は様々あるが、有限時間内に作業が完了 することを保証するためには、(a)あらかじめ領域を分割して複数台のロボットに割り当て た上で、各領域において1台のロボットによる掃引経路を計画するか、(b)先に1台のロボ ットによる空間全体の掃引経路を計画した上で、経路を分割する、といったトップダウン のタスク割り当てを行うアプローチが適している。(b)のアプローチの場合、複数台のロボ ットで経路が重なる可能性があり、その場合は衝突回避を考慮する必要があるため、本研 究では(a)のアプローチをとることとする。

本研究における複数台ロボットによる対象空間全体の探索の概要を図 3.3-1 に示す。



図 3.3-1 複数台ロボットによる対象空間全体の探索

(i) LiDAR による環境地図のグリッドマップ化

LiDAR は、レーザ光を照射し、周辺の障害物等からの反射光を捉えることで距離を測定するセンサーである。LiDAR による距離測定の方式にはいくつかあるが、一般的によく用いられているものは ToF (Time of Flight)方式と呼ばれており、レーザ照射から反射光受光までの時間を光速で除することで距離を算出するものである。

LiDAR によって取得できるのは、周囲の障害物までの距離情報であり、これは点群の位置 に変換される。この点群の情報を用いて SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) により、環境地図を構築する。SLAM のアルゴリズムとしては、Hector SLAM[8]を用いる。

Hector SLAMによって得られた環境地図は点群で構成されており、このままではデータ量が膨大となるだけでなく、探索経路の生成には使いにくい。そこで、2次元平面環境を格子

状のセルに区切ったグリッドマップとして表現する。ここでは、各セルは一辺が*d*[m]の正 方形とし、セルに障害物の点群が含まれている場合は、そのセルを障害物とみなすことと する。

(ii) マップ分割

次に、(i)で得られたグリッドマップを分割することで、複数台のロボットに対して、 各々が探索するべき領域を割り当てる。全体の探索時間を短くするためには、各ロボット による探索時間ができる限り同じになるようにするのがよい。探索時間を同程度にするた めに、探索領域の広さを同程度にするというアプローチをとる。すなわち、グリッドマッ プをn台のロボットによって探索する場合、マップをできるだけ均等にn個に分割すること を目標とする。また、分割された各領域においては、1 台のロボットがその領域に含まれる 全てのセルを通過する必要がある。そのため、1 台のロボットに割り当てられる領域は隣接 セルをたどることによって接続されている必要がある。本研究では、このような要求を満 たすマップ分割を目指す。

ここでは、グリッドマップを、各セルをノードとし、セルの隣接関係をエッジとするようなグラフに変換し、マップ分割の問題をグラフ分割問題として扱う。図3.3-2に、グリッドマップとそれをもとに構成したグラフの例を示す。なお、セル間の接続については4近傍のみを対象としている。



図 3.3-2 グリッドマップのグラフ構造化

このようにして構成されたグラフの分割には、Karypis らによって提案されている Multilevel k-way Partitioning[9]を用いる。このアルゴリズムは、グラフをk個に分割す るための方法で、Coarsening Phase、Initial Partitioning Phase、Uncoarsening Phase、 の3段階で構成されており、Coarsening Phase では、グラフのノードとエッジを小さなグ ループとしてまとめることで、グラフを粗くし、サイズを小さくする。次に、Initial Partitioning Phase において、サイズの小さくなったグラフをk個に分割する。その後、 Uncoarsening Phase において、サイズを小さくしたグラフをもとに戻していく。その際、 要素数が均等になるように、グループ間でノードを移動させる。これにより最終的に均等 な要素数でかつ連結グラフとなるようなk個のグループに分割することができる。以下に本 研究でのグラフ分割の詳細を示す。 Coarsening Phase

ノードとエッジをまとめる方法には様々なものがあるが、ここではランダムマッチング を用いる。この手法は、あるグラフに対して、エッジによって接続されている2つのノード をランダムに選び、そのノードを1つの小グループとしてまとめる。全てのノードの重みの 初期値を1とし、2つのノードをまとめる際に各ノードの重みを加算していく。ランダムマ ッチングを繰り返すことで、ノードとエッジの数は少なくなっていき、結果としてグラフ のサイズが小さくなる。

Initial Partitioning Phase

ロボットの台数をn台とすると、グラフをn個に分割する必要がある。上述の Coarsening Phase におけるランダムマッチングを、グラフのノード数がnになるまで繰り返す。これにより、各グループの要素数は不均等ではあるが、n個のグループにグラフを分割することができる。

Coarsening Phase と Initial Partitioning Phase の例を図 3.3-3 に示す。



図 3.3-3 ランダムマッチングを用いた Coarsening と Initial Partitioning の例

Uncoarsening Phase



ここで、グラフ G_0 のノード数を V_0 とすると、 $W = [V_0/n]$ であり、w(v)はノードvの重みで ある。全てのノードについて調べ、ノードが移動しなくなったら、グラフを1段階詳細化す る。すなわち、 G_{i-1} について同様の操作を行う。これをi = kからi = 0まで繰り返すことで、 最終的にグループの要素数の最大値は $W = [V_0/n] + 1$ となり、均等なグラフ分割を行うこと ができる。図 3.3-3 の例について、Uncoarsening Phase を施した例を図 3.3-4 に示す。

最終的に得られたグラフ分割結果を、グリッドマップに対応させることで、図 3.3-5のように与えられたマップの分割結果を得ることができる。



図 3.3-4 Uncoarsening Phase の例



図 3.3-5 マップ分割結果の例

(ⅲ) 経路生成

次に、各ロボットが割り当てられた領域内を探索する経路を生成する。ここでは、倉林 らの研究[11]を参考に、(ii)同様、グリッドマップをグラフと捉えて、割り当てられた全 てのセルを通るような掃引経路を求める。

図 3.3-6 に、掃引経路生成の概要を示す。(a)まず、障害物に隣接するノード群をエッジ で連結する。次に、連結されたパスを障害物とみなすことで同様にしてノード群を連結す る。これを全てのノードに対して繰り返す。(b)その後、このようにして生成された複数の パスをエッジで連結し、連結グラフを作成する。

ロボットが与えられた領域を効率よく掃引するためには、この連結グラフを一筆書きで きることが望ましい。すなわち、このグラフがオイラーグラフとなっていればよい。しか し、図3.3-6の例でもわかるように、上述のようにして作成された連結グラフは必ずしもオ イラーグラフとはなっていない。連結グラフがオイラーグラフであるためには、全てのノ ードの次数が偶数である必要がある。図3.3-6の例の場合、(b)で複数のパスを連結した箇 所のノードの次数が3となってしまっている。そこで、(c)次数が奇数のノード同士に重複 したエッジ(図3.3-6では太線)を加えることで、これらのノードの次数を4とする。これ により、全てのノードの次数が偶数となるため、このグラフはオイラーグラフとなる。オ イラーグラフにおける一筆書き経路については、Hierholzer アルゴリズムによって生成す ることができる。



(iv) シミュレーション実験

令和3年度に開発した複数台のロボットによって対象空間全体を大まかに探索する手法について、その有効性を確認するために実験を行った。

実験では、東北大学機械・知能系共同棟の一室を対象として、実機センサーによって計測 して得られた環境地図をもとに、3台のロボットによる探索を仮定してシミュレーションを行った。 環境地図作成のためのセンサーとしては、北陽電機株式会社製の2次元 LiDAR である UST-20LX を用いた。得られた点群データをもとに、Hector SLAM によって作成された点群地図を図3.3-7(a)に、点群地図をもとに作成したグリッドマップを図3.3-7(b)に示す。





(a) Hector SLAM によって得られた点群地図

(b) グリッドマップ

図 3.3-7 SLAM によって得られた環境地図とそのグリッドマップ化

ここで、ロボットは対向2輪型の移動ロボットであり、並進速度0.5 m/s、回転角速度π/2 rad/s で動くことができるものとした。また、簡単のためロボットの移動に伴う誤差は生じないものとした。また、グリッドマップの各セルは一辺が1 mの正方形としたところ、当該環境においてはロボットが移動可能なセルの総数が136 個となった。

このような条件下で、提案手法によるマップ分割及び経路生成を行い、環境全体を探索するのに要する時間を計算した。また、比較対象として、1台のロボットで探索した場合に要する時間についても計算した。



(b) 3 台での探索経路

図 3.3-8 マップ分割及び経路生成の結果

また、表 3.3-1に各ロボットに割り当てられたセルの数と探索時間を示す。

表 3.3-1 名	Sロボッ	トに割り当	てられたセ	ルの数と	探索時間
-----------	------	-------	-------	------	------

ロボットの台数		セルの数			探索時間[s]	
1		136			721	
3	Robot A	Robot B	Robot C	Robot A	Robot B	Robot C
	45	46	45	244	242	233

これらの結果から、提案手法によって与えられた領域を3台のロボットに対してほぼ均等に 分割することができており、3台で探索した場合の探索時間は1台のときの33.8%と、ほぼ 1/3の時間で探索できることが示された。

図 3.3-8 に、3 台のロボットのためのマップ分割及び経路生成の結果を示す。

3.3.2 遠隔操作システムの基盤構築

令和3年度は脚型ロボット(図3.3-9(a))及び車輪型ロボット(図3.3-9(b))について、 ネットワークを介した遠隔操作を行うためのシステム基盤の構築を行った。







具体的には、ROS を用いて無線 LAN 経由で遠隔操作用 PC と各ロボットを接続した。PC からの操作で各ロボットを移動させ、ロボットに搭載されたカメラやLiDAR 等のセンサー情報を PC 上で可視化できることを確認した。

3.4 実証試験(再委託先:福島大学、富山高専、連携先:JAEA、東北大学)

3.4.1 遮蔽体等の製作 (連携先:福島大学)

ロボットに搭載する遮蔽体(図 3.4-1)と周辺治具等のツール類の整備を行った。検出器の試作状況に応じて、線源を用いた感度試験、角度分布特性、エネルギー特性等の解析調査を実施した。

令和3年度は検出器の製作が完了していないため、検出器遮蔽体等のツール類の整備、3D 画像化のためのカメラ類の整備、実証試験に向けて線源位置探査ツールの基本設計解析を中 心に実施した。小型ロボットに搭載した指向性検出器の情報により、3次元空間内での線源 位置を探査するツールの基本設計の解析を行った。以下に解析結果について記す。



図 3.4-1 遮蔽体の製作

3.4.2 線源位置探査ツールの基本設計(再委託先:福島大学)

3.4.2.1 複数の検出器による線源位置の特定

計算体系に複数の検出器を配置して応答関数の計算を行い、整理を行った。

ここで応答関数の計算には、モンテカルロ輸送計算コード PHITS ver. 3.24 の EGS5 モードを用いて、光子・電子・陽電子の輸送を計算した。

また、指向性検出器(以下、「検出器」という)は、3.1 節に記しているように、鉛遮蔽 体の窪みにシンチレータを配置した形状となっている(デススター)。検出器の計算体系 を図 3.4-2 に示す。検出器のジオメトリの PHITS 用入力ファイルを作成し、幾何形状の 3 次元パース図を[T-3Dshow]で出力したものを図 3.4-3 に示す。

検出器の孔部及び検出器外側は空気とする。

輸送計算を行う範囲は、検出器と線源が十分に含まれるように設定する。 検出器に搭載された 8 個のシンチレータを区別するため、それらを A、B、C、D、A'、 B'、C'、D'と呼称する。シンチレータの位置と呼称の対応を図 3.4-4 に示す。



図 3.4-2 検出器の計算体系



図 3.4-3 検出器の計算体系 (PHITS)



シンチレータ	x 座標	y 座標	z 座標
А	+	+	+
В	-	+	+
С	-	-	+
D	+	-	+
A'	+	+	_
B'	-	+	_
C'	-	-	-
D'	+	-	-

図 3.4-4 検出器に搭載された 8 個のシンチレータの位置と呼称

3.4.2.2 複数の検出器の応答関数の計算条件

連携計測の観点から、本解析では2つの検出器(デススター)について応答特性を計算 した。計算条件は以下の通りである。

検出器

検出器(デススター)は検出器 1 と検出器 2 の 2 つを配置した。それぞれ、(0,0,0)と(0,3,0)に配置した。

線源条件

線源は、等方点線源とした。線源の位置は(3,3,0)とした。照射される放射線は、662 keVの単色エネルギーのガンマ線とした。

モンテカルロ輸送計算コード、検出器の計算体系、計算タリー、物質組成は 3.4.2.1 の 計算条件と同様とした。

等方点線源と検出器の位置を図 3.4-5 に示す。輸送計算を行う範囲は線源、検出器、線 源から検出器までの直線経路が十分含まれるように取ることとした。

実際の計算においては、検出器の存在しない方向への照射は計算への影響が小さいため、 照射は検出器の存在する 2 方向のみとし、検出器が照射範囲に含まれるように十分な広が りをもたせて照射した。具体的には、300 cm 先の半径√(3²+1²+1²)の球が含まれる ような平面角を設定している。平面角は次式で計算した値を用いた。

asin(sqrt(11.)/300)*180/pi*1.05 = 0.665113659 [deg]



なお、1.05は照射範囲にマージンを持たせるために乗じた値である。

図 3.4-5 等方点線源と検出器の位置 検出器は原点(0,0,0)及び(0,3,0)に配置。線源は(3,3,0)に配置。 検出器は実際の縮尺より大きく図示している。 輸送計算を行う範囲は線源、検出器、線源から検出器までの直線経路が十分含まれるよ うに取ることとした。
3.4.2.3 複数の検出器の応答関数の計算結果

2つの検出器に搭載された各8つのシンチレータの応答関数を図3.4-6に示す。ピークカウント数を表3.4-1に示す。

3.4.2.4 線源位置の特定(ピークカウントの比による方法)

各々の検出器の AB、BC、CD、DA(検出器上側)の組み合わせについて、シンチレータの カウント数の比を棒グラフにて図 3.4-7 に示す。

比が 10 以上のものの有無や、比が同程度のものの有無といった観点から比較を行った。 その結果、検出器 1 と同様の結果が得られているのは、極角 θ は 90°、方位角 ϕ は 42°から 51°付近であった。また、検出器 2 と同様の結果が得られているのは、極角 θ は 90°から 45°、方位角 ϕ は 357°から 3°付近であった。

<u>検出器1</u>:

 $\theta = 90^{\circ}$, $42 \leq \phi \leq 51$

<u>検出器2</u>:

 $-3^{\circ} \leq \phi \leq 3^{\circ}$

線源の実際の位置と、推測された範囲を図 3.4-8 に示す。本ケースでは、縦 0.4 m×横 1.2 m 程度の範囲に絞り込むことができた。

比を取るという計算は、ノイズの影響を強く受ける可能性がある。各検出器のシンチレータの計数率の総和の 1%程度を全てのシンチレータに加算した場合の比の棒グラフを図 3.4-9 に示す。比の値が 10 を超えるものがなくなり、サブ線源がある場合には線源位置の 特定が困難となる可能性が示唆された。

3.4.2.5 線源位置の特定(H/Lへの分類①最大値の 50%以上を High として分類)

2 つの検出器のカウント数を、最大値の 50 %以上のものを High として分類した結果を 表 3.4-2 に示す。これに合致する θ 及び φ は次の通りであった。

検出器1:

 $\theta = 90^{\circ}$, $17.5 \le \phi \le 72.5$, $\pm c$, $\theta = 75^{\circ}$, $20 \le \phi \le 70$

検出器 2:

 $\theta = 90^{\circ}$, $\phi \leq 17.5$, $342.5 \leq \phi$, $\ddagger cti$, $\theta = 75^{\circ}$, $\phi \leq 5$, $355 \leq \phi$

線源の実際の位置と、推測された範囲を図 3.4-10 に示す。

3.4.2.6 線源位置の特定(H/Lへの分類②総カウント数の平均値以上をHighとして分類) 2つの検出器のカウント数を、総カウント数の12.5%以上のものをHighとして分類した 結果を表 3.4-3 に示す。これに合致する θ 及び φ は次の通りであった。

検出器1:

 $\theta = 90^{\circ}$, $18 \leq \phi \leq 69$, $\pm c$, $\theta = 75^{\circ}$, $39 \leq \phi \leq 51$

<u>検出器 2</u>:

 $\theta = 90^{\circ}$, $\phi \leq 24$, $336 \leq \phi$, $\ddagger \hbar t$, $\theta = 75^{\circ}$, $\phi \leq 9$, $351 \leq \phi$



線源の実際の位置と、推測された範囲を図 3.4-11 に示す。

図 3.4-6 2つの検出器に搭載された各8つのシンチレータの応答関数

	検出器1	検出器2		
A	9.2E-05	0.000179		
В	1.22E-05	1.13E-05		
С	5.16E-06	1.31E-05		
D	1.25E-05	0.000181		
A'	9.21E-05	0.000182		
В'	1.2E-05	1.24E-05		
C'	4.44E-06	1.26E-05		
D'	1.15E-05	0.000179		

表 3.4-1 2 つの検出器に搭載された各 8 つのシンチレータのピークカウント数



	D/C	B/C	A/D	C/D	B/A	D/A	C/B	A/B
検出器1	2.426	2.372	7.345	0.412	0.133	0.136	0.422	7.513
検出器2	13.844	0.865	0.988	0.072	0.063	1.013	1.155	15. 799

図 3.4-7 2 つの検出器に搭載された各 8 つのシンチレータのピークカウントの比



図 3.4-8 線源の実際の位置と推測された範囲 (ピークカウントの比による方法) 検出器は実際の縮尺より大きく図示している。



図 3.4-9 2つの検出器のカウント数に1%のノイズを加算した場合の ピークカウントの比

	カウント数		High/Low		
	検出器1	検出器2	検出器1	検出器2	
А	9.20E-05	0.000179	High	High	
В	1.22E-05	1.13E-05	Low	Low	
С	5.16E-06	1.31E-05	Low	Low	
D	1.25E-05	0.000181	Low	High	
A'	9.21E-05	0.000182	High	High	
B'	1.20E-05	1.24E-05	Low	Low	
C'	4.44E-06	1.26E-05	Low	Low	
D'	1.15E-05	0.000179	Low	High	
最大値	9.21E-05	1.82E-04			
閾値	4.61E-05	9.10E-05			

表 3.4-2 2 つの検出器のカウント数の High/Low への分類結果① 最大値の 50%以上のものを High として分類



図 3.4-10 線源の実際の位置と推測された範囲 (最大値の 50%以上を High として分類) 検出器は実際の縮尺より大きく図示している。

	カウント数		High/Low		
	検出器1	検出器2	検出器1	検出器2	
А	9.20E-05	0.000179	High	High	
В	1.22E-05	1.13E-05	Low	Low	
С	5.16E-06	1.31E-05	Low	Low	
D	1.25E-05	0.000181	Low	High	
A'	9.21E-05	0.000182	High	High	
B'	1.20E-05	1.24E-05	Low	Low	
C'	4.44E-06	1.26E-05	Low	Low	
D'	1.15E-05	0.000179	Low	High	
合計値	2.42E-04	7.70E-04	—	—	
閾値	3.02E-05	9.63E-05		—	

表 3.4-3 2 つの検出器のカウント数の High/Low への分類結果② 総カウント数の 12.5%以上のものを High として分類



図 3.4-11 線源の実際の位置と推測された範囲 (総カウント数の平均値以上を High として分類) 検出器は実際の縮尺より大きく図示している。

小型ロボットに搭載した指向性検出器の情報により、3次元空間内での線源位置を探査するツールの基本設計の解析を行った。そこでは、¹³⁷Csを対象とし、662 keVのピークについて解析した結果、線源の方位とカウント数の High/Low の対応付けが明瞭であった。

3.5 研究推進(東北大学)

研究代表者の下で各研究項目間ならびに CLADS 等との連携を密にして、研究を進めた。また、研究実施計画を推進するための打合せや会議等を開催した。

(1) キックオフ会議

日時:令和3年11月4日

場所:リッチモンドホテルプレミア仙台駅前 会議室「杜」

内容:各研究項目の目標、実施内容に関する報告及び検討。

(2) 研究推進会議

日時:令和4年1月22日

場所:ボルファートとやま 会議室「エメラルド」

内容:各研究項目の研究進捗に関する報告及び検討。今後の研究計画検討。

4. 結言

本研究ではガンマ線の飛来方向を検出可能な検出器を開発し、これを搭載した複数のロボット の連携により、単一センサーでは得られない広視野・迅速・安価な放射線源探査を実現するロボ ットシステム(コラッセ)を開発することを目的として研究を行う。1F現場への投入に資するこ とを目的として、線源探査を行う小型ロボットに放射線計測機器を搭載したシステムを3年間の 計画終了時に完成させるための研究を行う。以下に3カ年計画の1年目である令和3年度の結果 をまとめる。

(1) 指向性検出器開発

① シミュレーションによる検出器設計

シミュレーションによる検出器応答の計算及び検出器ジオメトリの検討では、デススター と C3P0 の 2 種類の検出器ジオメトリについて検討し、デススターについては 3 次元 VPC 法と ルックアップテーブル法の 2 通りの解析手法について検討した。デススターに 3 次元 VPC 法を 適用した結果、角度分解能±10 度程度でガンマ線の入射角度を推定できる可能性が示唆され た。ルックアップテーブル法を適用した場合は、一度で全方位のイメージングが可能だが、 空間分解能は 3 次元 VPC 法に比べて劣ることが予想される。C3P0 について単一線源、二線源 の場合においてシミュレーションを行ったところ、単一線源であれば1分程度で、二線源の場 合であれば 10 分程度の測定でイメージングができる可能性が示された。

検出器の信号読み出し回路及びバイアス電源回路の設計と実装並びにその動作試験では、 フレキシブル基板を用いた基本的な信号読み出し回路と、バイアス電源回路を設計し、²²Na線 源を用いて動作確認を行った。また 3×3 のキューブアレイを一段とし、三段のリジット基板 を積層する設計を行った C3PO においても、全ての回路で問題なく動作することが確認できた ため、令和4年度はこの回路を用いた試作機を製作し、詳しい特性調査を実施する。

検出器に採用するシンチレータ結晶の比較検討では、検出器に採用するシンチレータを決 定するため、非潮解無機シンチレータ 14 種の特性を比較した。その結果、今回の用途では GAGG (Ce)、GFAG (Ce)、LYSO (Ce) が適していると結論付けた。

② 指向性検出器の製作と評価

ロボットに搭載することを念頭において、指向性検出器の重量やガンマ線イメージング性 能等の検討を JAEA (①シミュレーションによる検出器設計)と連携して行った。また、シン チレータの読み出し回路となる多チャンネル信号処理回路及び多チャンネル SiPM 読み出し回 路を整備した。シンチレータ、整備した読み出し回路、3.4.1 (遮蔽体の製作:福島大学)に より整備された検出器遮蔽体を組み合わせて最小単位の指向性検出器を製作し、その特性評 価を行った。今回製作した指向性検出器の特性評価結果はシミュレーション結果と良い一致 を示した。

(2) 画像·情報処理技術開発

放射線検出器による測定結果と LiDAR による自己位置推定結果をもとに、対象とする領域 の放射線源分布を推定するための基本的な考え方について整理した。測定を 2 段階に分け、1 段階目で環境地図作成と大まかな放射線強度分布を測定し、その結果をもとに絞り込んだ領 域において詳細測定することとした。

自己位置推定及び周囲環境測定システムの試作においては、広視野型及び狭視野型LiDARを それぞれ搭載したロボットによる周囲環境のスキャン結果を共有参照することによって、環 境地図生成及びロボットの自己位置推定を行うシステムを構築した。また、システムの評価 試験実施のための使用ハードウェア選定、整備を行い、富山高専本郷キャンパス建屋内にお いて評価試験を行った。

環境地図生成においては、大きな歪みや破綻なく良好な結果が得られた。一方で、自己位 置推定に関しては、推定結果全般で俯瞰すれば順当な結果を得たが、ロボットが狭隘なスペ ースへ入り込んだ場合、推定結果が安定しない事例が生じたため、処理方法について再検討 を行う予定である。また、自己位置推定処理には多くの時間を要するため、並列処理やGPUの 活用を検討し処理速度向上を図る予定である。

(3) ロボット制御システム開発

複数台のロボットに探索タスクを割り当てる手法、ならびに各ロボットの経路を計画する 手法の開発を行った。また、複数台のロボットを遠隔から操作するシステムの構築を行った。 複数台ロボットへの探索タスク割り当てについては、LiDAR ベースの環境地図をもとに、環境 をグラフ構造化し、グラフ分割の手法を用いることで複数台のロボットの負担が均等になる ような探索領域分割手法を開発した。また、割り当てられた各探索領域を各ロボットが効率 よく探索する経路を計画する手法を開発し、シミュレーションによってその有効性を確認し た。

(4) 実証試験

検出器遮蔽体等のツール類の整備、実証試験に向けて線源位置探査ツールの基本設計解析 を中心に実施した。小型ロボットに搭載した指向性検出器の情報により、3次元空間内での線 源位置を探査するツールの基本設計の解析を行った。そこでは、¹³⁷Csを対象とし、662 keV の ピークについて解析した結果、線源の方位とカウント数の High/Low の対応付けが明瞭であっ た。

今後、令和3年度に整備したツールを用いた実験的研究との比較検討により、最適な配置、 ピーク計数率に特化した計測を行い、実証評価していく必要がある。また、複数の検出器に よる連携計測の効果を確認していくことを検討する。

参考文献

- E. Caroli, J. B. Stephen, G. Di Cocco, L. Natalucci, and A. Spizzichino, Coded Aperture Imaging in X-ray and Gamma-ray Astronomy, Space Sci. Rev., vol. 45, no. 3-4, 1987, pp. 349-403.
- [2] M. Nogami, K. Hitomi, T. Torii, et al., Development of Thallium Bromide Gamma-ray Detectors for Intense Radiation Field, IEEE NSS & MIC 2019 RTSD Poster Session, R-04-410, 2019.
- [3] 北山佳治, 野上光博, 人見啓太朗, 符号化立体が作る三次元影を用いたガンマ線イメージ ング, 第 36 回「放射線検出器とその応用」研究会, 2022.
- [4] ICRP, Conversion Coefficients for Use in Radiological Protection against External Radiation, ICRP Publication 74, 1996.
- [5] M. Quigley, B. Gerkey, K. Conley, J. Faust, T. Foote, J. Leibs, E. Berger, R. Wheeler, A. Ng, ROS: An Open-source Robot Operating System, To Appear in Open-source Software Workshop of the International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2009, http://robotics.stanford.edu/~ang/papers/icraoss09-ROS.pdf (参照日:2022年4月7日).
- [6] P. Biber and W. Straβer, The Normal Distributions Transform: A New Approach to Laser Scan Matching, Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2003, pp. 2743-2748.
- [7] 田窪朋仁, 上撫琢也, 前泰志, 新井健生, 大原賢一, 高解像度 NDT グリッドマップを用い た環境地図生成, 日本機械学会論文集(C編), 2012, vol. 78, no. 793, pp. 3186-3201.
- [8] S. Kohlbrecher, J. Meyer, O. von Stryk, U. Klingauf, A Flexible and Scalable SLAM System with Full 3D Motion Estimation, Proceedings of the 2011 IEEE International Symposium on Safety, Security and Rescue Robotics, 2011, pp. 155-160.
- [9] G. Karypis and V. Kumar, Multilevel k-way Partitioning Scheme for Irregular Graphs, Journal of Parallel and Distributed Computing, vol. 48, no. 1, 1998, pp. 96-129.
- [10] S. Lin and B.W. Kernighan, An Efficient Heuristic Procedure for Partitioning Graphs, The Bell System Technical Journal, vol. 49, no. 2, 1970, pp. 291-307.
- [11] 倉林大輔,太田順,新井民夫,吉田英一,掃引作業における移動ロボット群の動作計画,日本ロボット学会誌,vol.16, no.2, 1998, pp.181-188.