



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 (委託研究)

－令和5年度 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業－

Human Resource Development Related to Remote Control Technology
for Monitoring Inside RPV Pedestal during Retrieval of Fuel Debris
(Contract Research)

－ FY2023 Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource
Development Project –

福島廃炉安全工学研究所 廃炉環境国際共同研究センター
東京大学

Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science,
Fukushima Research and Engineering Institute
The University of Tokyo

June 2025

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。（<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ja>）
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（<https://www.jaea.go.jp>）
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 研究開発推進部 科学技術情報課
〒 319-1112 茨城県那珂郡東海村大字村松 4 番地 49
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
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en>).

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 Library, Institutional Repository and INIS Section,
Research and Development Promotion Department, Japan Atomic Energy Agency.

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1112, Japan

E-mail: ird-support@jaea.go.jp

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
(委託研究)

ー令和 5 年度 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業ー

日本原子力研究開発機構 福島廃炉安全工学研究所
廃炉環境国際共同研究センター

東京大学

(2025 年 1 月 7 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 5 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はじ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、令和元年度に採択された研究課題のうち、「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」の令和元年度から令和 5 年度分の研究成果について取りまとめたものである。

本研究は、燃料デブリ取り出し時における炉内状況把握のためのモニタリングプラットフォームの構築及びプラットフォーム上を移動するセンサによる計測・可視化に関する研究開発を行う。また、このような研究課題に参画することによる研究教育、講義等の座学、施設見学の 3 つの柱で研究人材を育成することを目的とする。令和 5 年度は、各システムの検証とともに、模擬環境においてモニタリングプラットフォーム上の移動カメラから取得された画像を用いて立体復元モデルを生成し、可視化対象に対して最適視点からの映像提示が可能であることを、各研究項目協力のもと統合実験として実施した。

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、東京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

Human Resource Development Related to Remote Control Technology
for Monitoring Inside RPV Pedestal during Retrieval of Fuel Debris
(Contract Research)

— FY2023 Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource Development Project —

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

The University of Tokyo

(Received January 7, 2025)

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 FY2023.

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 FY2019, this report summarizes the research results of the “Human resource development related to remote control technology for monitoring inside RPV pedestal during retrieval of fuel debris” conducted from FY2019 to FY2023.

The present study aims to construct a monitoring platform for understanding the status inside a reactor during fuel debris removal, and measurement and visualization by sensors moving on the platform. In addition, to develop research personnel through research education by participating in such research projects, classroom lectures, and facility tours is also a goal of this project. In FY2023, along with the verification of each system, a three-dimensional reconstruction model was generated using images acquired from a moving camera on the monitoring platform in a simulated environment, and an integrated experiment was conducted to demonstrate that it is possible to present images from the optimal viewpoint for the visualization target, with the cooperation of each research theme.

Keywords: Monitoring Platform, Visualization, Teleoperation, Radiation Measurement, 3D Reconstruction

This work was performed by The University of Tokyo 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	10
6. 令和 4 年度 採択課題	12
7. 令和 5 年度 採択課題	14
付録 成果報告書	17

Contents

1. Outline of Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource Development Project	1
2. Accepted Proposal in FY2018.....	2
3. Accepted Proposal in FY2019.....	5
4. Accepted Proposal in FY2020.....	8
5. Accepted Proposal in FY2021.....	10
6. Accepted Proposal in FY2022.....	12
7. Accepted Proposal in FY2023.....	14
Appendix Result Report	17

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。

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）

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	山崎 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	渡邊 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 2 課題、日露 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 康一郎	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
一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DESTAL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	渡邊 大輔	日立GE ニュークリア・ エネルギー
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	慶應義塾大学

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	浅間 一	東京大学
化学計測技術とインフォマティ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 (～R3. 6. 30) 塚原 剛彦 (R3. 7. 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

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 課題）

国際協力型廃炉研究プログラム 2 課題（日英）

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
$\alpha/\beta/\gamma$ 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	渡邊 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
溶脱による変質を考慮した汚染コンクリート廃棄物の合理的処理・処分の検討	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）

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
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 啓太郎	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

課題名	研究代表者	所属機関
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	浅間 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

6. 令和4年度 採択課題

令和4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4年3月1日～令和4年5月6日（課題解決型）

令和4年4月7日～令和4年6月16日（国際協力型 日英共同研究）

課題数：8 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）

令和4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
革新的アルファダスト撮像装置と高線量率場モニタの実用化とその応用	黒澤 俊介	東北大学
3次元線量拡散予測法の確立と γ 線透過率差を利用した構造体内調査法の開発	谷森 達	京都大学
α 汚染可視化ハンドフットクロスモニタの要素技術開発	樋口 幹雄	北海道大学
高放射線耐性の低照度用太陽電池を利用した放射線場マッピング観測システム開発	奥野 泰希	京都大学 (～R5.3.31) 理化学研究所 (R5.4.1～)
障害物等による劣悪環境下でも通信可能なパッシブ無線通信方式の開発	新井 宏之	横浜国立大学
無線 UWB とカメラ画像分析を組合せたリアルタイム 3D 位置測位・組込システムの開発・評価	松下 光次郎	岐阜大学

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
耐放射線プロセッサを用いた組み込みシステムの開発	渡邊 実	岡山大学
マイクロ・ナノテクノロジーを利用したアルファ微粒子の溶解・凝集分散に及ぼすナノ界面現象の探求	塚原 剛彦	東京工業大学

7. 令和 5 年度 採択課題

令和 5 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 5 年 3 月 1 日～令和 5 年 4 月 14 日（課題解決型）

令和 5 年 4 月 12 日～令和 5 年 6 月 15 日（国際協力型 日英共同研究）

課題数：9 課題

課題解決型廃炉研究プログラム 7 課題

国際協力型廃炉研究プログラム 2 課題（日英）

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 5 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
遮蔽不要な耐放射線性ダイヤモンド中性子計測システムのプロトタイプ開発	金子 純一	北海道大学
簡易非破壊測定に向けた革新的な $n \cdot \gamma$ シンチレーション検出システムの開発	鎌田 圭	東北大学
ペデスタル部鉄筋コンクリート損傷挙動の把握に向けた構成材料の物理・化学的変質に関する研究	五十嵐 豪	名古屋大学
動画像からの特徴量抽出結果に基づいた高速 3 次元炉内環境モデリング	中村 啓太	札幌大学
放射性コンクリート廃棄物の減容を考慮した合理的処理・処分方法の検討	小崎 完	北海道大学

課題名	研究代表者	所属機関
高バックグラウンド放射線環境における配管内探査技術の開発	鳥居 建男	福井大学
PCV 気相漏洩位置及び漏洩量推定のための遠隔光計測技術の研究開発	椎名 達雄	千葉大学

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
革新的分光画像解析による燃料デブリの可視化への挑戦と LIBS による検証	牟田 浩明	大阪大学
燃料デブリ除去に向けた様々な特性をもつメタカオリンベースのジオポリマーの設計と特性評価	Yogarajah Elakneswaran	北海道大学

本報告書は、以下の課題の令和元年度から令和 5 年度分の研究成果を取りまとめたものである。

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	浅間 一	東京大学

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 5 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

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

(契約番号 R05I040)

成果報告書

令和 6 年 3 月

国立大学法人東京大学

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、国立大学法人東京大学が実施した「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」の令和元年度から令和5年度分の研究成果を取りまとめたものである。

目次

概略	vii
1. はじめに	1-1
2. 業務計画	2-1
2.1 全体計画	2-1
2.2 実施体制	2-2
2.3 令和5年度の成果の目標および業務の実施方法	2-3
2.3.1 モニタリングプラットフォームの構築	2-3
2.3.2 遠隔操作インタフェースの開発	2-3
2.3.3 放射線モニタリングデバイスの開発	2-3
2.3.4 炉内環境把握のための環境モデル立体復元手法の研究開発（連携先：原子力機構）	2-3
2.3.5 研究人材育成	2-3
2.3.6 研究推進	2-3
3. 実施内容および成果	3-1
3.1 モニタリングプラットフォームの構築【令和元年度～令和5年度】	3-1
3.1.1 軌道構造自動施工システム【令和元年度～令和5年度】	3-1
3.1.2 コンパクトに巻き取り可能な高剛性軽量アーム（再委託先：福島大学） 【令和元年度～令和5年度】	3-11
3.2 遠隔操作インタフェースの開発【令和元年度～令和5年度】	3-17
3.2.1 映像提示インタフェース【令和元年度～令和5年度】	3-17
3.2.2 高臨場感遠隔操縦システム（再委託先：神戸大学）【令和元年度～令和5年度】	3-23
3.3 放射線モニタリングデバイスの開発【令和元年度～令和5年度】	3-35
3.4 炉内環境把握のための環境モデル立体復元手法の研究開発（連携先：原子力機構） 【令和元年度～令和5年度】	3-38
3.5 研究人材育成	3-53
3.6 研究推進	3-54
4. 結言	4-1

執筆者リスト

研究代表者

国立大学法人東京大学	教授	浅間一
	教授	高橋浩之
	教授	山下淳
	准教授	福井類

再委託先

国立大学法人福島大学	教授	高橋隆行
国立大学法人神戸大学	教授	横小路泰義

連携先

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構	グループリーダー	川端邦明
---------------------	----------	------

表一覧

表 3.1.1-1	各条件における T_{late} の平均値	....	3-9
表 3.2.2-1	主画面と注目画面の一致率	....	3-33
表 3.4-1	BM アルゴリズムと TM アルゴリズムの比較	....	3-44
表 3.4-2	TM アルゴリズムと BM アルゴリズムの実行結果	....	3-45
表 3.4-3	開発システムのハードウェア構成	....	3-48
表 3.5-1	廃止措置特論 E の概要	....	3-53

図一覧

図 1.1-1	モニタリングプラットフォームを用いたペデスタル内部の計測と可視化	....	1-1
図 2.1-1	年度別全体計画	....	2-1
図 2.2-1	実施体制図	....	2-2
図 3.1.1-1	Rail Dragon の概念図	....	3-1
図 3.1.1-2	Rail Dragon の軌道延長手順	....	3-2
図 3.1.1-3	重力による軌道の傾きのモデル化	....	3-3
図 3.1.1-4	ループ切替手法の概念図	....	3-3
図 3.1.1-5	マイコンでの制御に関するブロック線図	....	3-4
図 3.1.1-6	マイコンによる信号線の切り替え手順の概要図	....	3-4
図 3.1.1-7	2 分岐電力線の外観	....	3-5
図 3.1.1-8	設計した GUI のスクリーンショット	....	3-5
図 3.1.1-9	切替許可から切替実行までのフローチャート	....	3-6
図 3.1.1-10	ペデスタル内部における Rail Dragon と障害物の位置関係	....	3-7
図 3.1.1-11	配線切替作業の様子	....	3-8
図 3.1.1-12	各関節角度の時系列変化	....	3-8
図 3.1.2-1	アーム関節の構造	....	3-12
図 3.1.2-2	関節構造, アーム形状の改良	....	3-12
図 3.1.2-3	自動化した巻き取り装置	....	3-13
図 3.1.2-4	アームの繰り出し動作	....	3-13
図 3.1.2-5	自動化した巻き取り・繰り出し動作	....	3-14
図 3.1.2-6	関節角度変更動作	....	3-15
図 3.1.2-7	温度測定装置の回路	....	3-15
図 3.1.2-8	温度測定装置の実験結果	....	3-16
図 3.2.1-1	映像提示インタフェースの概念図	....	3-17
図 3.2.1-2	令和 2 年度のカメラ軌跡（青線の円）と最適カメラ配置（赤点）の俯瞰図	....	3-17
図 3.2.1-3	強化学習で使うカメラ視点とリーチング達成までにかかる時間（コンセプト図）	....	3-18
図 3.2.1-4	レイキャスティングの概念図	....	3-18
図 3.2.1-5	可視化対象が大きく見える視点の例	....	3-19
図 3.2.1-6	レンダリングによる可視化対象の占める画像上の割合の取得	....	3-20
図 3.2.1-7	実験の全体像および復元された環境の 3 次元モデル	....	3-21
図 3.2.1-8	3 次元モデルにおける可視化対象の指定	....	3-21
図 3.2.1-9	レンダリングによる可視化対象の領域取得	....	3-21
図 3.2.1-10	檜葉モックアップ実験における最適視点結果	....	3-22
図 3.2.1-11	最適視点への観察ロボットの移動	....	3-22
図 3.2.2-1	令和 4 年度の実験環境プラットフォーム	....	3-23
図 3.2.2-2	令和 5 年度構築した実験環境プラットフォーム	....	3-24

図 3.2.2-3	遠隔操縦プラットフォームの操縦側コックピットの概観	....	3-24
図 3.2.2-4	自由視点変更の基本的考え方	....	3-26
図 3.2.2-5	多視点遠隔操縦システムにおける主画面と注目画面	....	3-26
図 3.2.2-6	作業モードと視線変更モード	....	3-27
図 3.2.2-7	作業アームに一致する姿勢で操作デバイスが拘束されている様子	....	3-28
図 3.2.2-8	Haption 社製 6 軸力覚フィードバック装置 virtuose6d35-45 の手 先姿勢の動作範囲	....	3-28
図 3.2.2-9	姿勢のインデキシングにより操作適正範囲内の姿勢で操作デバ イスが拘束されている様子	....	3-29
図 3.2.2-10	多視点遠隔操縦システムにおける主画面と注目画面	....	3-30
図 3.2.2-11	カメラアームがないときの操作者への提示画面	....	3-30
図 3.2.2-12	カメラアームがあるときの操作者への提示画面	....	3-31
図 3.2.2-13	作業時間	....	3-32
図 3.2.2-14	被験者アンケート結果	....	3-32
図 3.2.2-15	作業ミス回数	....	3-33
図 3.3-1	放射線モニタリングデバイスの開発の利用概念図	....	3-35
図 3.3-2	CeBr ₃ ガンマ線シンチレータ検出器と SOI 型中性子センサ小型基盤	....	3-36
図 3.3-3	FPGA を用いた信号同期型データ取得統合システムの開発	....	3-37
図 3.3-4	位置プローブとの情報統合の例	....	3-37
図 3.4-1	分割統治法の考えに基づいた局所立体復元結果統合	....	3-39
図 3.4-2	復元対象環境と QR コード	....	3-40
図 3.4-3	撮影軌道および QR コードに応じた軌道分割	....	3-40
図 3.4-4	撮影条件	....	3-40
図 3.4-5	SfM-MVS で獲得した高密度点群結果	....	3-41
図 3.4-6	QR コード特徴に基づいて得られた統合モデル	....	3-41
図 3.4-7	各最大許容量に対する適合率	....	3-42
図 3.4-8	最終的な復元結果を獲得できるまでの計算時間	....	3-43
図 3.4-9	撮影された画像の一例	....	3-44
図 3.4-10	画像選択アルゴリズムによる画像抽出	....	3-46
図 3.4-11	復元結果の一例（画像選択閾値:60 px）	....	3-46
図 3.4-12	画像選択アルゴリズムの計算時間	....	3-47
図 3.4-13	開発システムの構成	....	3-47
図 3.4-14	模擬環境を用いた動作検証実験における画像収集の様子	....	3-48
図 3.4-15	動作検証実験にて観察ロボットから収集された画像	....	3-49
図 3.4-16	閾値処理選択法により得られた環境モデル	....	3-49
図 3.4-17	多峰性検定選択法により得られた復元モデル	....	3-50

略語一覧

原子力機構	: 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構	
福島第一 原発	: 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	
ICP	: Iterative Closest Point	(2点群間の位置姿勢を求めるアルゴリズム)
IRID	: International Research Institute for Nuclear Decommissioning	(技術研究組合国際廃炉研究開発機構)
JAEA	: Japan Atomic Energy Agency	(国立研究開発法人日本原子力研究開発機構)
LMPA	: Low Melting Point Alloys	(低融点合金)
MVS	: Multi-View Stereo	(多視点ステレオ)
NDF	: Nuclear Damage Compensation and Decommissioning Facilitation Corporation	(原子力損害賠償・廃炉等支援機構)
PCV	: Primary Containment Vessel	(格納容器)
ROS	: Robot Operating System	(ロボット用のソフトウェアプラットフォーム)
SfM	: Structure from Motion	(複数枚の画像から3次元情報を復元する技術)
福島大学	: 国立大学法人福島大学	
神戸大学	: 国立大学法人神戸大学	

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、「福島第一原発」と略す。）1～3号機の格納容器（PCV：Primary Containment Vessel：以下、「PCV」と略す。）内部には大量の燃料デブリが存在しており，廃炉に向けてこれら燃料デブリを取り出すことが必須となる．燃料デブリ取り出し開始に向けては，これまでに遠隔操作ロボットの投入やミュオン測定等により，PCV内部の状況や燃料デブリの大まかな分布が徐々に明らかになりつつある．

NDF（Nuclear Damage Compensation and Decommissioning Facilitation Corporation：原子力損害賠償・廃炉等支援機構）の技術戦略プランによれば，燃料デブリの取り出しは，気中-横アクセス工法に軸足を置いて進めていくことになる．遠隔操作ロボットアーム等を用いて安全かつ確実に燃料デブリの取り出しを行うためには，各作業の前に格納容器内部の3次元的な状況を正確に把握することが必要である．また，取り出し作業中には，操作者が作業空間を適切に認知するために，適切な視点からのカメラ映像を提示する必要がある．したがって，作業に応じてペDESTAL内部にカメラやガンマ線および中性子検出器等のセンサを適切に配置し，活用することが必須となる．また，PCV内部は高線量であり，かつ燃料デブリの取り出し作業は長期にわたることが予想されるため，センサが故障することを前提にシステムを構築する必要がある．すなわち，センサ故障時またはセンサの積算線量が一定の閾値を超えた場合には容易に交換できることが必要である．

本研究では，福島第一原発の廃炉に向けて，遠隔技術分野を中心とした研究人材の育成を行う．燃料デブリ取り出し時における炉内状況把握のためのモニタリングプラットフォームの構築およびプラットフォーム上を移動するセンサによる計測・可視化についての研究を行う．このような研究課題に参画することによる研究教育，講義等の座学，施設見学の3つの柱で研究人材を育成することを目的とする．

以下に，5カ年計画の5年目である令和5年度の業務実績を述べる．

(1) モニタリングプラットフォームの構築

① 軌道構造自動施工システム

令和4年度に行った軌道構造施工システムとしての組み上げの試行過程で明らかになった課題について，それを解決する方法の具現化について取り組んだ．さらに，本プロジェクトの他の要素のいずれか一つ以上との連携試験を行い，システム統合の実現性や課題を明らかにした．

具体的には，組み上げの試行過程で明らかになった課題のうち，関節角度制御を維持したままのモジュール連結作業の実現に取り組み，その実現可能性を示した．また，「炉内環境把握のための環境モデル立体復元手法の研究開発」との連携試験を行い，問題なく連携可能なことを示した．

② コンパクトに巻き取り可能な高剛性軽量アーム（再委託先：福島大学）

令和4年度に設計した試作機を実際に試作するとともに，その評価を行った．そして，その結果に基づいて最終試作を行い，評価した後，これまでの成果をまとめた．

具体的には，試作機では，アームの巻き取り機構や加熱コイルの配置などの検討を実施し，自動での巻き取りおよび伸長が行えることを確認した．

(2) 遠隔操作インタフェースの開発

① 映像提示インタフェース

令和4年度に行ったモックアップ実験で得られた課題点を解決できるように映像提示手法の改良を行った．また，他の研究項目との統合的な試験を行った．

具体的には、可視化対象の“見やすさ”をカメラ画像上で可視化対象が大きく見える視点と定義し、提案手法を拡張した。また、他の研究項目との統合として軌道構造自動施工システムおよび炉内環境把握のための環境モデル立体復元手法を用いて最適視点からの映像提示が可能であることを確認した。

② 高臨場感遠隔操縦システム（再委託先：神戸大学）

ペデスタル内に設置するモニタリングプラットフォーム上の複数カメラを模擬したモックアップを完成させ、令和4年度までに開発した複数カメラ視点を利用した遠隔操縦手法を実装した。また、モックアップ上で検証実験を行い、開発した遠隔操縦手法の有効性を確認するとともに、必要に応じてシステムに改良を加えた。

具体的には、3台の固定カメラ、2台のロボットアームおよび手先カメラと自由視点カメラからなるモックアップを構築し、それと操縦側のコックピットとを接続した全体システムに令和4年度までの成果を全て実装した。検証実験として、燃料デブリ取り出しを模擬した積み木取り出し作業を行い、提案手法の有効性を確認した。また、操作者の身体的負荷を軽減するためにシステムの改良を行った。

(3) 放射線モニタリングデバイスの開発

最終的な放射線モニタリングデバイスおよびシステムの改良を行い、性能検証試験を実施し所望の性能が得られていることを確認した。

具体的には、高速応答型スペクトロスコープを行うことが可能なガンマ線、中性子検出用の小型センサヘッドを作成し高線量ガンマ線下でのスペクトル分離性能および中性子ピーク検出性能を確認した。

(4) 炉内環境把握のための環境モデル立体復元手法の研究開発（連携先：原子力機構）

令和4年度までに研究を行った画像からの環境モデル生成手法について統合を行い、模擬実験環境においてモデル生成の検証実験を行った。開発した各手法を統合し、軌道上を移動するカメラによって収集された画像群に基づいて環境モデルを生成するシステムを構築した。構築したシステムを模擬実験環境において並行して開発が進められているモニタリングプラットフォームと統合して実験を行うことで、修正すべき課題の抽出を行い、各手法やシステムの高度化を行った。

具体的には、画像群内の局所グループ群ごとに生成した局所立体復元モデルを環境内に配置した2次元コードに基づいて統合する手法の研究開発を行い、また、立体復元計算効率化のために画像選択アルゴリズムの実装形式の改善および見直しを行うことで計算時間の高速化を実験により示した。さらに、モニタリングプラットフォーム上を移動するカメラから取得された画像から立体復元モデル生成を行うプロトタイプシステムの構築を行い、模擬環境における実験によって動作検証を行った。

(5) 研究人材育成

福島第一原発の廃炉に向けて、廃止措置に関する講義を実施した。

具体的には、廃止措置に関する講義を13回にわたり大学院生向けに実施した。講義名は「廃止措置特論E」であり、受講者数は48人であった。

(6) 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。

具体的には、毎月 1 回のプロジェクト会議を実施するとともに、研究項目間での議論を行った。

前年度までの成果報告書：

- ・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
(委託研究) 令和元年度 英知を結集した原子力科学技術・人材育成事業

JAEA-Review 2020-028

<https://doi.org/10.11484/jaea-review-2020-028>

- ・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
(委託研究) 令和 2 年度 英知を結集した原子力科学技術・人材育成事業

JAEA-Review 2021-030

<https://doi.org/10.11484/jaea-review-2021-030>

- ・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
(委託研究) 令和 3 年度 英知を結集した原子力科学技術・人材育成事業

JAEA-Review 2022-032

<https://doi.org/10.11484/jaea-review-2022-032>

- ・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
(委託研究) 令和 4 年度 英知を結集した原子力科学技術・人材育成事業

JAEA-Review 2023-023

<https://doi.org/10.11484/jaea-review-2023-023>

1. はじめに

福島第一原発 1～3 号機の PCV 内部には大量の燃料デブリが存在しており，廃炉に向けてこれら燃料デブリを取り出すことが必須となる．令和 3 年の燃料デブリ取り出し開始に向けては，これまでに遠隔操作ロボットの投入やミュオン測定等により，PCV 内部の状況や燃料デブリの大まかな分布が徐々に明らかになりつつある．

NDF の技術戦略プランによれば，燃料デブリの取り出しは，気中-横アクセス工法に軸足を置いて進めていくことになる．遠隔操作ロボットアーム等を用いて安全かつ確実に燃料デブリの取り出しを行うためには，各作業の前に格納容器内部の 3 次元的な状況を正確に把握することが必要である．また，取り出し作業中には，操作者が作業空間を適切に認知するために，適切な視点からのカメラ映像を提示する必要がある．したがって，作業に応じてペDESTAL 内部にカメラやガンマ線および中性子検出器等のセンサを適切に配置し，活用することが必須となる．また，PCV 内部は高線量であり，かつ燃料デブリの取り出し作業は長期にわたることが予想されるため，センサが故障することを前提にシステムを構築する必要がある．すなわち，センサ故障時またはセンサの積算線量が一定の閾値を超えた場合には容易に交換できることが必要である．

そこで本研究では，ペDESTAL 内部にモニタリングのためのプラットフォームを構築することを提案する．カメラやガンマ線および中性子検出器等の各種センサはこのプラットフォーム上を移動し，燃料デブリ取り出しのために必要な計測・可視化を行う．図 1.1-1 に本研究で提案するモニタリングプラットフォームの概念図を示す．

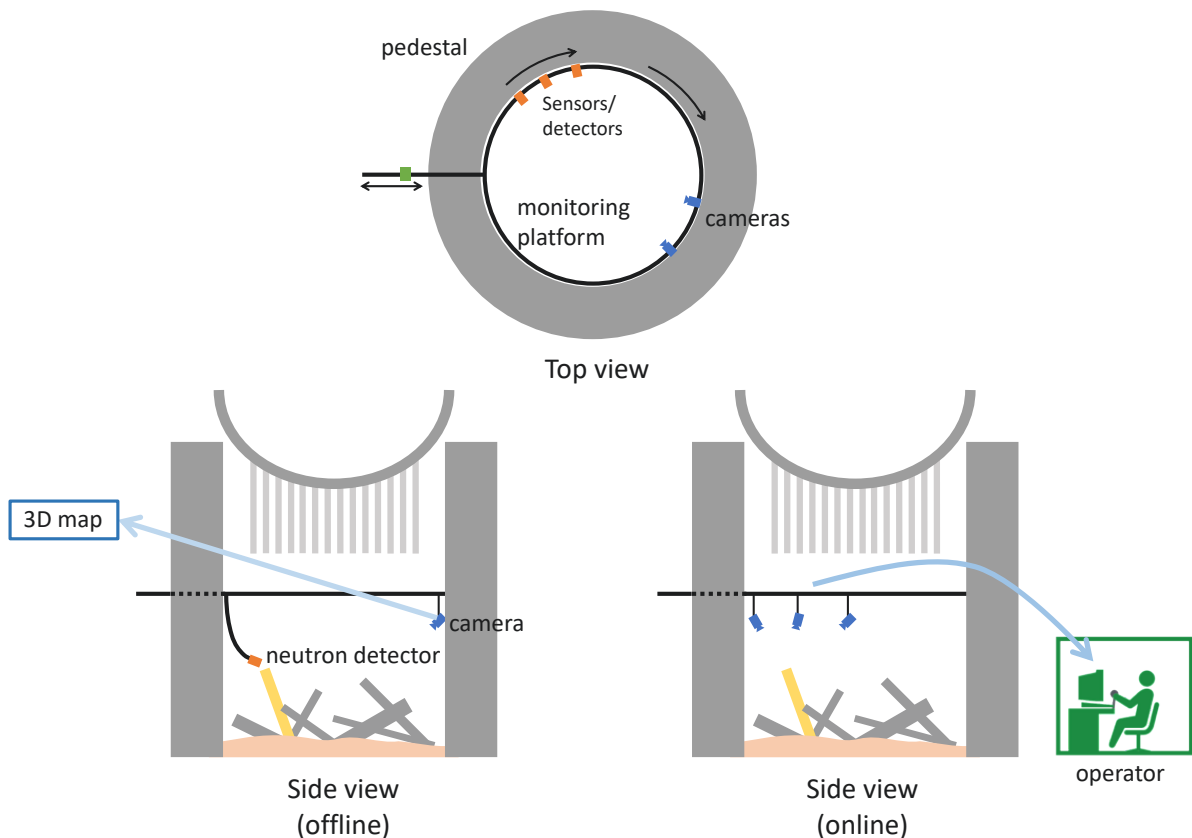


図 1.1-1 モニタリングプラットフォームを用いたペDESTAL 内部の計測と可視化

本研究は、以下の実施項目から構成される。

- (1) モニタリングプラットフォームの構築
 - ① 軌道構造自動施工システム
 - ② コンパクトに巻き取り可能な高剛性軽量アーム
- (2) 遠隔操作インタフェースの開発
 - ① 映像提示インタフェース
 - ② 高臨場感遠隔操縦システム
- (3) 放射線モニタリングデバイスの開発
- (4) 炉内環境把握のための環境モデル立体復元手法の研究開発

(1), (2), (3)については、国立大学法人東京大学（以下、「東京大学」と略す.）を中心とした連携ラボ（大学等）において実施し、(4)については、連携ラボ（原子力機構）において実施する。

本プログラムでは、上記の研究開発を通じて、連携ラボ（大学等）と連携ラボ（原子力機構）で適宜相互連携しながら遠隔技術分野を中心とした廃炉研究人材を育成する。

2. 業務計画

2.1 全体計画

福島第一原発の廃炉に向けて、遠隔技術分野に関する研究人材の育成を行う。燃料デブリ取り出し時における炉内状況把握という研究課題を通して研究教育を行うとともに、講義、施設見学等を通じた人材育成を行う。研究課題は、(1)モニタリングプラットフォームの構築、(2)遠隔操作インタフェースの開発、(3)放射線モニタリングデバイスの開発、(4)炉内環境把握のための環境モデル立体復元手法の研究開発、という4項目で構成される。(1)では、モジュール分割式のプラットフォーム構築技術およびコンパクトに巻き取り可能な高剛性軽量アームの開発、(2)では、操作者への映像提示インタフェースおよび高臨場感遠隔操縦システムの開発、(3)では、高線量率下で動作可能な中性子/ガンマ線計測デバイスおよび位置情報との融合によるイメージング技術の開発、(4)では、カメラから得られたデータによる環境モデルの立体復元技術の開発を行う。年度別全体計画を図2.1-1に示す。

項目 \ 年度	令和元年度	令和2年度	令和3年度	令和4年度	令和5年度
(1)モニタリングプラットフォームの構築 ①軌道構造自動施工システム	概念設計・先行要素開発	基本設計・要素開発	システム開発	モックアップ実験	システム統合実験
②コンパクトに巻き取り可能な高剛性軽量アーム (福島大学)	関節基本設計	アーム試作・システム構想設計	関節機構拡張	システム統合	改良・評価
(2)遠隔操作インタフェースの開発 ①映像提示インタフェース	概念設計	カメラ配置手法構築	情報提示手法構築	モックアップ実験	システム統合試験
②高臨場感遠隔操縦システム (神戸大学)	コンセプト立案・作業分析	シミュレータ構築・プロトタイプ開発	手法開発・シミュレータ検証	モックアップ構築・検証	システム改良・モックアップ検証
(3)放射線モニタリングデバイスの開発	要素開発・シミュレーション	基礎性能検証・試作開発	性能試験・改良	実証試験	改良・検証試験
(4)炉内環境把握のための環境モデル立体復元手法の研究開発 (原子力機構)	画像特徴の分析・有効条件の研究	画像選択手法、逐次的な立体復元手法の研究開発	画像収集・管理システムの研究開発、模擬環境整備	局所環境モデル統合手法の研究開発	環境モデル生成手法の統合検証実験
(5)研究人材育成				廃止措置に関する講義の実施	
(6)研究推進	研究推進	研究推進	研究推進	研究推進	研究推進・取りまとめ

図 2.1-1 年度別全体計画

2.2 実施体制

実施体制を図 2.2-1 に示す。

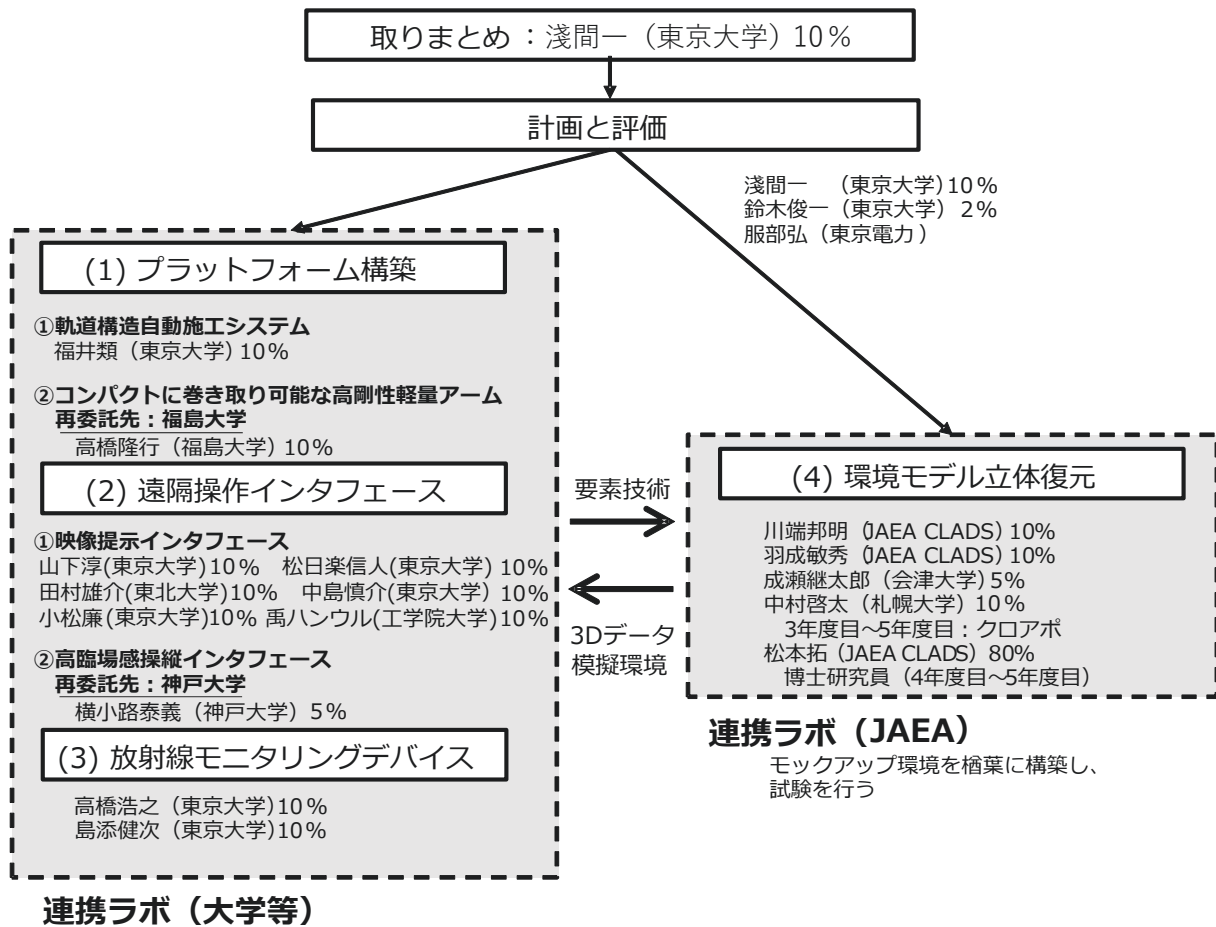


図 2.2-1 実施体制図

2.3 令和5年度の成果の目標および業務の実施方法

2.3.1 モニタリングプラットフォームの構築

(1) 軌道構造自動施工システム

令和4年度に行った軌道構造施工システムとしての組み上げの試行過程で明らかになった課題について、それを解決する方法の具現化について取り組む。さらに、本プロジェクトの他の要素のいずれか1つ以上との連携試験を行い、システム統合の実現性や課題を明らかにする。

(2) コンパクトに巻き取り可能な高剛性軽量アーム（再委託先：福島大学）

令和4年度に設計した試作機を実際に試作するとともに、その評価を行う。そして、その結果に基づいて最終試作を行い、評価した後、これまでの成果をまとめる。

2.3.2 遠隔操作インタフェースの開発

(1) 映像提示インタフェース

令和4年度に行ったモックアップ実験で得られた課題点を解決できるように映像提示手法の改良を行う。また、他の研究項目との統合的な試験を行う。

(2) 高臨場感遠隔操縦システム（再委託先：神戸大学）

ペダスタル内に設置するモニタリングプラットフォーム上の複数カメラを模擬したモックアップを完成させ、令和4年度までに開発した複数カメラ視点を利用した遠隔操縦手法を実装する。また、モックアップ上で検証実験を行い、開発した遠隔操縦手法の有効性を確認するとともに、必要に応じてシステムに改良を加える。

2.3.3 放射線モニタリングデバイスの開発

最終的な放射線モニタリングデバイスおよびシステムの改良を行い、性能検証試験を実施し所望の性能が得られていることを確認する。

2.3.4 炉内環境把握のための環境モデル立体復元手法の研究開発（連携先：原子力機構）

令和4年度までに研究を行った画像からの環境モデル生成手法について統合を行い、模擬実験環境においてモデル生成の検証実験を行う。開発した各手法を統合し、軌道上を移動するカメラによって収集された画像群に基づいて環境モデルを生成するシステムを構築する。構築したシステムを模擬実験環境において並行して開発が進められているモニタリングプラットフォームと統合して実験を行うことで、修正すべき課題の抽出し、各手法やシステムの高度化を行う。

2.3.5 研究人材育成

福島第一原発の廃炉に向けて、廃止措置に関する講義を実施する。

2.3.6 研究推進

研究代表者の下で各研究項目間ならびに廃炉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. 実施内容および成果

3.1 モニタリングプラットフォームの構築【令和元年度～令和5年度】

3.1.1 軌道構造自動施工システム【令和元年度～令和5年度】

(1) 令和4年度までの概要

令和3年度には屈曲モジュールのペデスタル内部での支持を実現するため、直線モジュールと根元支持部の開発を行った。直線モジュールの構造設計では、寸法と重量の関係性をもとに運搬可能な重量・十分な剛性・幅狭な断面という条件を満たす寸法を求めた。根元支持部は支持用のローラと固定用のブレーキ機構を搭載し、長尺片持ちの軌道の円滑な押し出しと固定を両立できることを実験によって示した。

令和4年度にはペデスタル内部への展開のための直線モジュールの改良と容易に交代可能な観察ロボットの開発を行い、軌道構造全体の組み上げと性能評価実験を行った。これにより、高い可搬性と大モーメント・荷重の支持、円滑な連結・押し出し作業といった一通りの要求を満たす、軌道構造の基本的な実現性を確認できた。また観察ロボットにおいて、マグネットカップリングを用いたトルク遮断機構により、袋による被覆と故障時の推進を両立できることがわかった。

上記の成果を創出する過程で明らかになった、軌道構造の展開をより現実的な設定で行うための課題を達成すべく、令和5年度の研究を実施した。

(2) 令和5年度実施内容および成果

①軌道構造体自動施工システムの研究背景

PCV内は50 Sv/h オーダーの高放射線環境[3.1.1-1]であるため人が直接立ち入って作業を行うことが困難であり、遠隔操作ロボットによる作業が行われてきた。しかし、作業現場では操作者のミスによってロボットが動作不能になるトラブルが発生している。浅間はこのような操作ミスが発生する原因の1つとして空間認識不良を挙げている[3.1.1-2]。そこで作業環境情報を操作者に提示しロボットが置かれている状況をより詳細に伝えることで、操作者のミスの低減が可能ではないかと示唆される。そこで、後藤らはPCV内部を常時観察することを目的としたモジュール分割型多関節軌道構造体“Rail Dragon”を開発した[3.1.1-3]。図3.1.1-1に概観を示す。

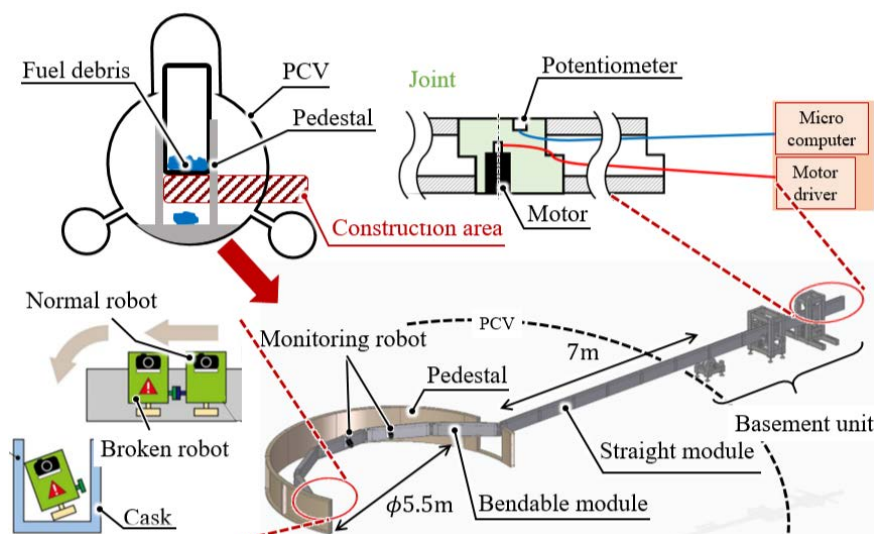


図 3.1.1-1 Rail Dragon の概念図

Rail Dragon の軌道は PCV の外部からモジュールの連結と押し出しを繰り返すことで延長され、直径 0.5 m の貫通孔を通り PCV 内部に挿入される。軌道は PCV 外部に設置する根本支持部と呼ばれる構造により片持ちで支持される。モジュールは屈曲モジュールと直線モジュールの 2 種類あり、軌道の先端を構成する屈曲モジュールはモータおよびポテンショメータを内蔵した関節を有し、ペDESTAL内部に展開される。直線モジュールは貫通孔からペDESTALまでの軌道を構成するモジュールである。関節の電気機器の配線は軌道外部の電源・制御装置までモジュール内部を通り接続している。観察ロボットは施工された軌道上を走行し、PCV 内部の観察を行う。ロボットが故障した場合は新たなロボットを投入し、故障したロボットを軌道から押し出すことで、観察を続行する。以降では、軌道の両端のうち、貫通孔側でモジュールを連結する側を“根元”，関節の回転によって姿勢が変化する側を“先端”と呼称する。また関節を先端から順に関節 1, 2, 3 と名づける。

Rail Dragon は図 3.1.1-2 に示すように、(1)連結するモジュールを台に載せる、(2)配線を接続する、(3)モジュールを連結する、(4)モジュール 1 つ分先端へ押し出す、という手順を繰り返すことで施工される。そして全てのモジュール、配線が連結・接続され軌道が施工されてから関節角度制御が開始される。しかし延長する軌道の途上に障害物が存在する場合、施工途中でも軌道の姿勢を変え障害物を回避しなければならない。すなわちモジュールの連結と配線の切り替えを同時に実行する必要がある。

類似する研究として、有線による制御、駆動が必要なモジュラーロボットが存在する。例えば Yamada らが開発した狭隘地進入のためのヘビ型ロボット“ACM-R8”[3.1.1-4]はロボットの軽量化および屋内環境での電波の遮断を避けるために各モジュールは有線で接続されている。

しかしながら、既にロボットと接続し負荷状態にある配線を切断することなくモジュールを連結するという課題はいまだ解決されていない。

Rail Dragon も電力線と信号線から構成される配線が根元のモジュール口を通過し電源・制御装置に接続しているため、軌道根元にモジュールを連結しようとする配線を挟んでしまう。

そこで、本研究の研究目的はモジュール連結と関節角度制御の両立を実現する手法を提案し、実現性を検証することおよびその手法が制御に与える影響を明らかにすることである。

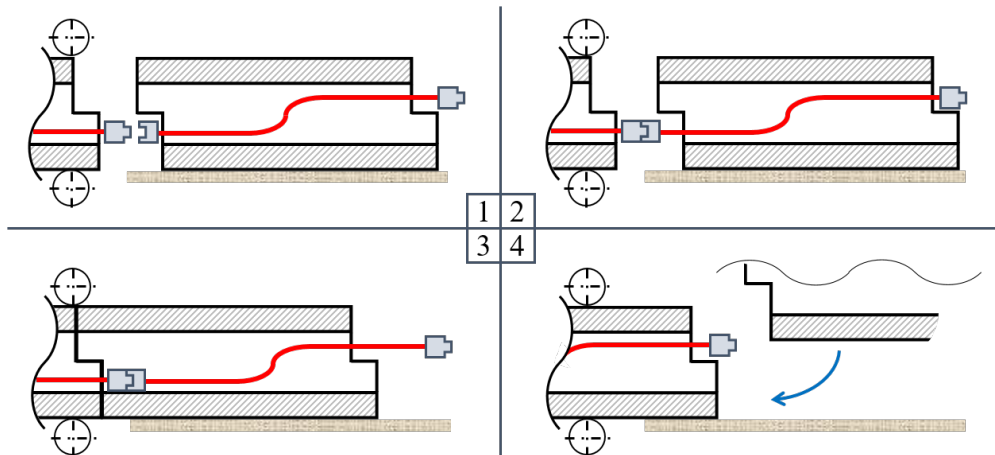


図 3.1.1-2 Rail Dragon の軌道延長手順

②モジュール連結と関節角制御両立の課題とアプローチ

連結と制御の両立においては(2-a)電力が関節部に常時供給されること、(2-b)関節角度変動が小さな瞬間に信号線を切り替えられることの 2 つの機能が求められる。以降でその実現アプローチを述べる。

②-1. ループ切替による電力の常時供給

Rail Dragon は根元支持部による片持ち軌道であるため、自重により先端に向かうにしたがって軌道が鉛直下向きに傾く。したがって、図 3.1.1-3 に示すように各関節においてモータトルクの他に重力によるトルクが働く。

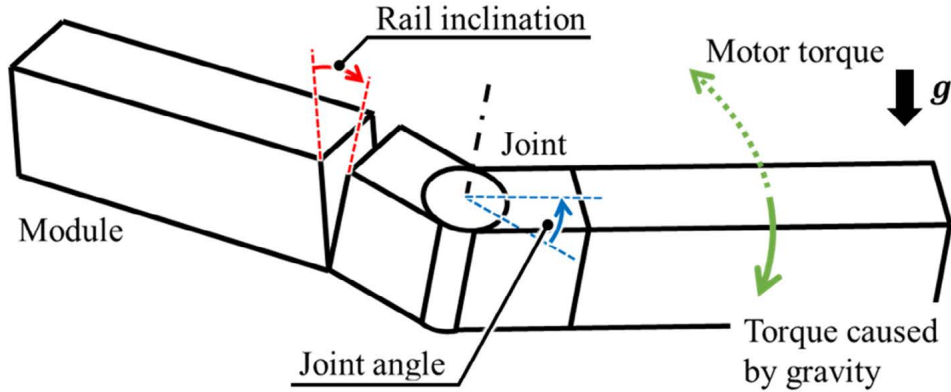


図 3.1.1-3 重力による軌道の傾きのモデル化

つまり、モータへの電力供給が断絶した場合、モータトルクが消失するため関節に重力によるトルクのみが働く。その結果自重によって関節が意図せず回転してしまう。したがって、モジュール連結を行う前後であってもモータへの電力供給を維持する必要がある。

しかし、モータへ電力を供給する電力線は軌道外部からモジュール内部を通り関節と接続するため、一時的に断線しなければモジュールを連結できない。この課題を解決するために“ループ切替手法”を考案した。図 3.1.1-4 に示すように、(1)電力線によってモータとモータドライバを接続する、(2)連結するモジュールの外部を迂回する電力線を接続する、(3)既存の電力線を切断する、(4)モジュールを連結する、という手順によって電力線を切り替え、モジュールを連結する。このように連結するモジュールの前後に 2 重の電力供給路を作製することで電力供給を維持したままモジュールを連結できる。

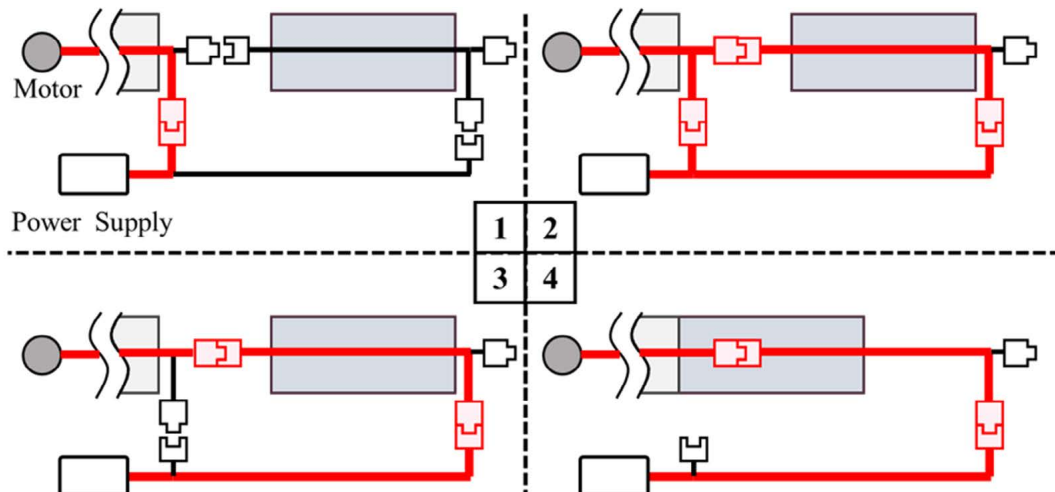


図 3.1.1-4 ループ切替手法の概念図

②-2. マイコンによる信号線切替タイミングの決定

信号電圧 $V_{\text{sig}}(\theta)$ が電源電圧より小さく、ループの生成によるノイズの影響を受けやすいという理由から信号線はループ切替手法を適用できない。そのため新しいモジュールを連結する際は一時的に信号線が切断され、 $V_{\text{sig}}(\theta)$ がマイコンに入力されない。

ここで図 3.1.1-5 に示すようにマイコンは取得した $V_{\text{sig}}(\theta)$ を角度 θ に変換した後、 θ と目標角度の偏差からモータ負荷電圧を決定する指令電圧 V_{dir} を計算している。

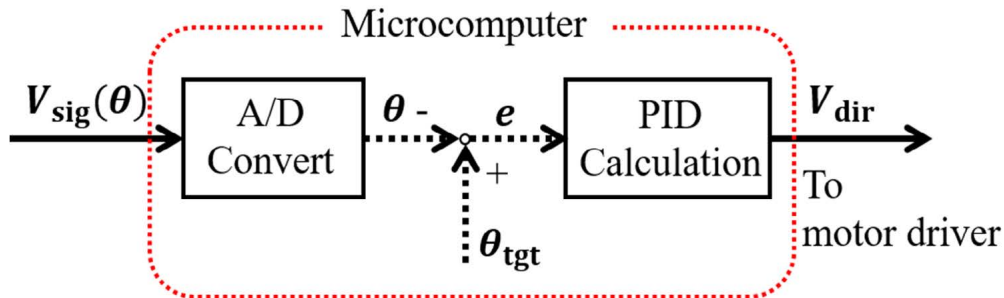


図 3.1.1-5 マイコンでの制御に関するブロック線図

つまり、マイコンは $V_{\text{sig}}(\theta)$ を取得できない瞬間は V_{dir} を制御できない。もし関節角度が大きく変動する瞬間に V_{dir} も大きく変化すると、関節が意図せず激しく動く恐れがある。したがって、変動の小さい瞬間を判断し信号線を切り替える必要がある。

しかし、遠隔操作者は $V_{\text{sig}}(\theta)$ からマイコンが変換した θ をもとに、Graphical User Interface (GUI) によって描画された画面を目視することで軌道姿勢を認識する。つまり、操作者が受け取る軌道姿勢の情報は実際の軌道姿勢に対して遅延しており、操作者が適切に関節角度変動の小さな瞬間を判断することは困難である。この課題を解決するためマイコンが自動で角度変動の小さな瞬間を判断し、信号線を切り替える仕組みを考案した。概要を図 3.1.1-6 に示す。

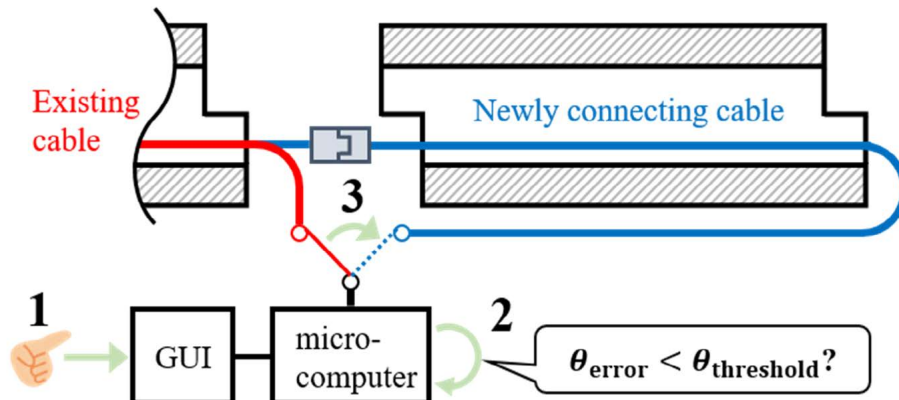


図 3.1.1-6 マイコンによる信号線の切り替え手順の概要図

まず、操作者が配線を付け替え、信号線が切替可能な状態になったら切替許可を、GUI を用いて操作者がマイコンに送る。次にマイコン内でループごとに関節角度変動の大きさを表す指標 θ_{error} と切替可否を判断する基準 θ_{th} を比較する。もし $\theta_{\text{error}} < \theta_{\text{th}}$ が成り立てば角度変動が小さいと見做し、信号線を切り替える。

③配線切替手法検証実験に用いる装置の実装

③-1. 配線切替手法の概観

本項では配線切替手法の実現性を検証するために実装した実験装置について述べる．ループ切替手法を実現するためには，(3-a)配線のループを作製できる 2 分岐配線が必要であり，マイコンによって切り替えタイミングを自動で判断するためには，(3-b)操作者が切替を許可したことをマイコンに伝達する GUI，(3-c)関節角度変動の大きさを表す指標 θ_{error} ，(3-d)信号線の切替を実行する電気要素がそれぞれ必要である．

③-2. 2 分岐配線の実装

図 3.1.1-6 に示す通り，2 分岐配線を 2 本組み合わせることによって電力線のループを作製することができる．分岐配線を作製するには 3 つの配線を電氣的に接続することが必要であり，接続方法としてははんだ付け，端子台による固定およびワンタッチコネクタによる接続の 3 種類の方法が考えられる．学外で実スケールの実験を行うことを考慮し，実装にあたって容易に接合部を着脱し配線の導通を確認できることを要求機能とした．3 種類の方法のうち高熱による，はんだの溶解が必要なはんだ付けおよびねじ締結が必要な端子台による固定と比較して，ワンタッチコネクタはツメの開閉のみで配線を接続することができ，より配線の着脱が容易だと考えられる．したがって接合部にはワンタッチコネクタ（ワゴ社製 WF-3）を採用した．作製した 2 分岐電力線の外観を図 3.1.1-7 に示す．

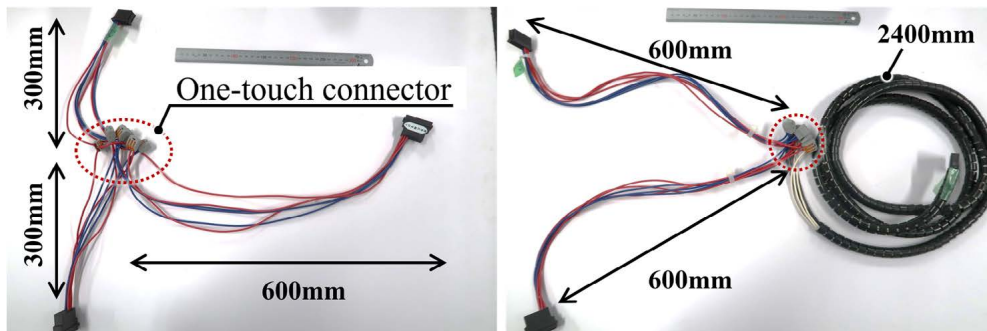


図 3.1.1-7 2 分岐電力線の外観

③-3. GUI の設計

GUI にはマイコンが取得した角度情報をもとに軌道姿勢の情報を操作者へ提示すること，操作者が変更する目標角度をマイコンへ伝達することおよび操作者がコネクタを着脱し終えた後に信号線の切替許可をマイコンに伝達することの 3 つの機能が求められる．MathWorks 社の提供する数値解析ソフトウェア Matlab の GUI 作成ツール“App Designer”を用いて設計を行った．

作成した UI 画面を図 3.1.1-8 に示す．

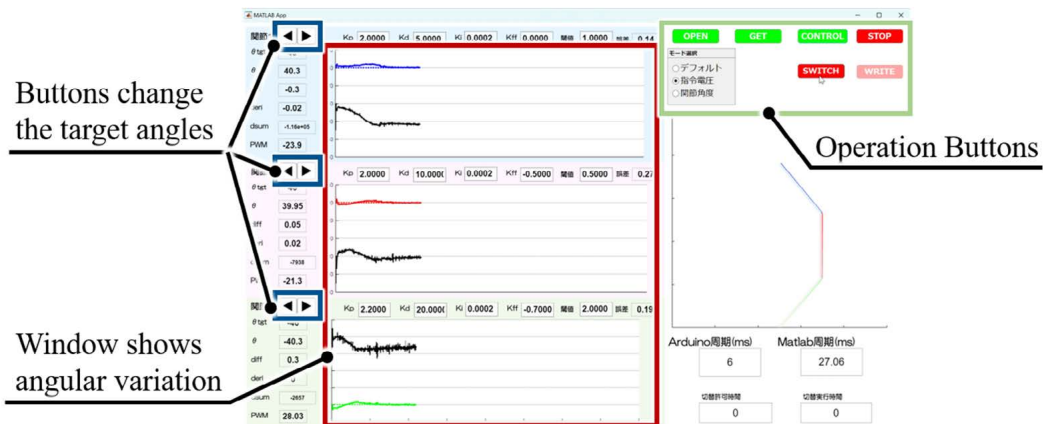


図 3.1.1-8 設計した GUI のスクリーンショット

制御は操作ボタンのうち“CONTROL”ボタンを押下することで開始する．Rail Dragon では目標角度と計測角度の偏差をもとに制御量を決定する Proportional-Integral-Differential (PID) 制御を採用しているため、画面左のウィンドウに目標角度と計測角度の時間変化を常に表示する．各関節について矢印のアイコンを有するボタンを押下し、目標角度を変更する．信号線の付け替えを完了した後に“SWITCH”ボタンを押下し、切替を許可する．

③-4. 関節角度変動の大きさを表す指標 θ_{error} の設計

マイコンによって関節角度変動を計算するには、その大きさを定量的に表現する指標 θ_{error} を定める必要がある．具体的に(1-a)偏差： $|\theta_n - \theta_{n-1}|$ ，(1-b)平均 2 乗誤差： $\frac{1}{n}\sqrt{\sum_{k=1}^n (\theta_k - \mu)^2}$ ，(1-c)平均絶対誤差： $\frac{1}{n}\sum_{k=1}^n |\theta_k - \mu|$ の 3 つの指標が考えられる．ただし、 μ は n ループ分の測定角度 θ の平均を表す．ここで θ_{error} の要求機能として目標角度の変化に追従した関節角度変動を反映できること、電磁ノイズに起因する信号電圧の外れ値に対して頑健であることが挙げられる．

まず偏差と平均誤差を比較すると、偏差は現ループで計測した関節角度と 1 つ前のループの関節角度の差分であるのに対して平均誤差は n ループ分の角度変動をもとに計算されるので、より目標角度変化に伴う関節角度の変化を反映できると考えられる．また、末吉によると絶対誤差は 2 乗誤差と比較して異常値に対して頑健であり [3. 1. 1-5]，計算結果に対する外れ値の影響がより小さい．以上の理由から平均絶対誤差を θ_{error} として採用した．切替が許可されてから実行されるまでのマイコンによる処理の流れ図を図 3. 1. 1-9 に示す．

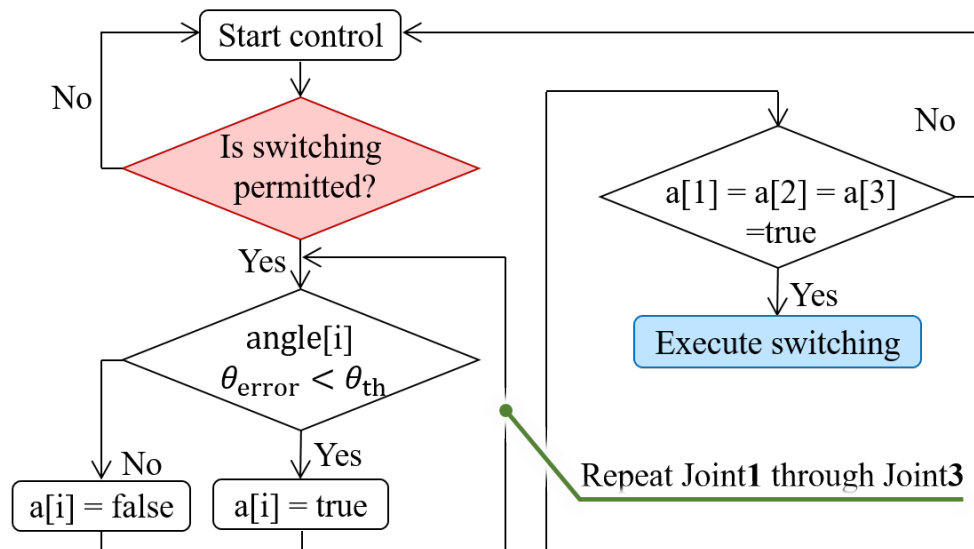


図 3. 1. 1-9 切替許可から切替実行までのフローチャート

③-5. 切替を実行する素子の実装

マイコンが出力した切替許可信号に応じて自動で信号線を切り替える素子が必要である．具体的に有接点リレー、半導体リレー、アナログスイッチ IC の 3 つの素子が考えられる．ここで、切替を実行する素子にはチャタリングが発生しないこと、消費電力が小さいことおよび切替速度が十分に早いことの 3 つの要求機能がある．有接点リレーは電磁気力によって機械的に接点を開閉するため、チャタリングが発生する恐れがある．半導体リレーおよびアナログスイッチ IC は MOSFET や光によって開閉を行うためチャタリングが発生しにくく、また有接点リレーと比較して切替速度も速いという点で一致している．一方で半導体リレーは駆動するために mA のオーダーで順方向電流が必要であるのに対してアナログスイッチ IC は nA オーダーの電流で駆動できる

[3.1.1-6]という違いがある．実際，関節角度を測定するポテンシオメータ（東京コスモス電機社製，RV24）は計測範囲において最大で $0.53 \text{ M}\Omega$ の可変抵抗であり，マイコンから供給される電圧 5 V を用いると信号線に流れる最小電流値は $5/0.53 \times 10^{-6} = 9.4 \text{ nA}$ と見積もれる．半導体リレーの駆動には電流が不足しているため，アナログスイッチ IC（東芝社製，TC74HC4066AP）を採用した．

④配線切替手法の実現性検証実験

④-1. 配線切替時の関節角度変動検証実験

②-2 で述べたようにアナログスイッチ IC によって信号線が切り替わる瞬間は信号電圧がマイコンに入力されず，関節角度が振動すると考えられる．ここで，図 3.1.1-10 に示すような軌道と障害物の位置関係を考える．ペデスタル内の軌道長さを L ，観察ロボットが移動する領域の幅を a ，観察ロボットと障害物間の緩衝領域の幅を b とおくと，第 3 関節がとり得る最大角度 $\theta_{\max}$ は， L が a ， b に比べて十分長いことを考慮すると $L \tan \theta_{\max} < a + b$ と，近似できる． $a = 150 \text{ mm}$ ， $b = 150 \text{ mm}$ ， $L = 4010 \text{ mm}$ を代入して $\theta_{\max} \cong 4.29^\circ$ を得る．この値をもとに配線を切り替える前後で偏差が $\pm 4^\circ$ の範囲に収めることを目標とした．

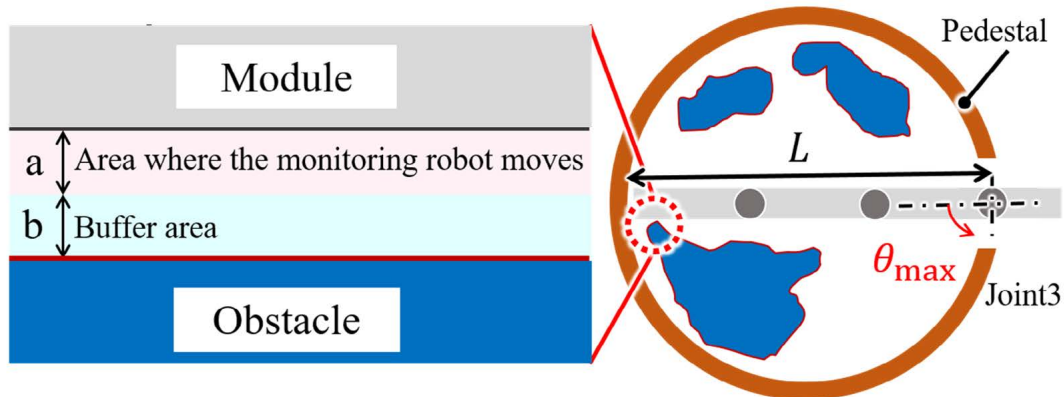


図 3.1.1-10 ペデスタル内部における Rail Dragon と障害物の位置関係

実スケールの Rail Dragon のモデルを用いて配線切替時の関節角度変動を計測した．目標角度は 1，2，3 のいずれの関節も 40° とした．関節角度が目標角度の近くに達したことを操作者が確認した後，図 3.1.1-11 に示すように，(1)新たに連結するモジュールに入る電力線を接続する，(2)既に電圧が負荷されている既存の電力線を外す，(3)新しい信号線を接続する，(4)操作者が GUI 上で切替許可を出し，切替が実行され LED が点灯するまで待つ，(5)既存の信号線を外すという手順で配線切替を実行する．

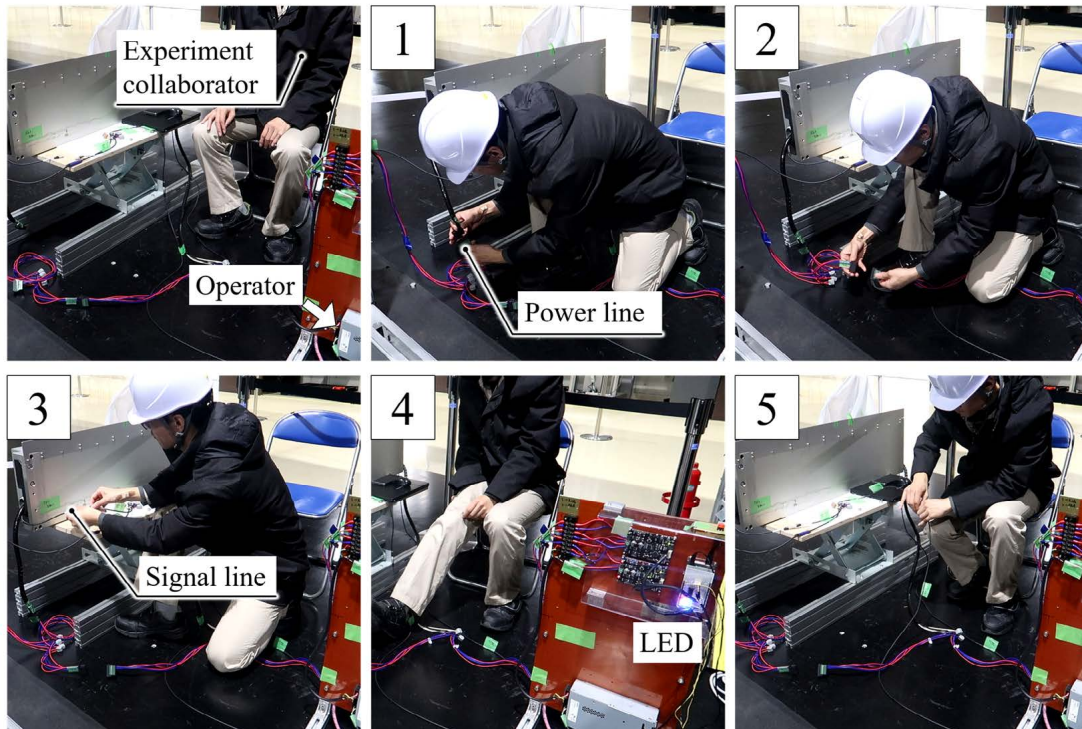


図 3.1.1-11 配線切替作業の様子

実験結果を図 3.1.1-12 に示す。左のグラフは各関節角度の時間変化を表しており、特に茶色の領域は信号線の切替が許可されてから実際に実行されるまでの時間を表す。右のグラフは各関節角度と目標角度との偏差の切替前後における時間変化を表す。グラフより全ての関節において切替前後であっても偏差が目標の範囲内である $\pm 1^\circ$ 以内に収まることがわかった。そもそも信号線に影響を与えるノイズには、信号線の切替に伴うノイズの他に電力線から漏れ出た電磁ノイズ等も存在する、全体のノイズに対して切替によるノイズの寄与が小さかったために、切替前後であっても関節角度に大きな振動が起きなかったと考えられる。

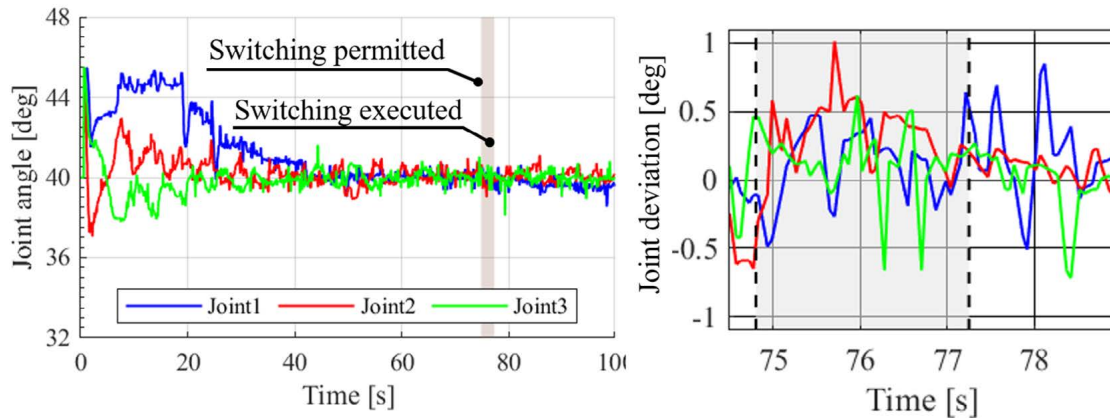


図 3.1.1-12 各関節角度の時系列変化

④-2. 閾値・P ゲインと待ち時間の関係の検証実験

閾値 θ_{th} および P ゲイン K_p を変更したとき、切替許可時刻と切替実行時刻の時間差で定義する待ち時間 T_{late} がどのように変化するか検証した。

まず閾値 θ_{th} は θ_{error} と値の大小を比較され、切替実行可否を判断する基準を表す。 θ_{th} の値が小さい場合 $\theta_{error} < \theta_{th}$ を満たしづらくなるため T_{late} は長くなり、逆に θ_{th} の値が大きい場合、不等式が成立しやすくなるので T_{late} は短くなる。つまり、 θ_{th} と T_{late} には負の相関があると考えられる。

次にPゲイン K_p は角度偏差から算出するP制御量の比例定数を表す。 K_p は角度振動の振幅に係するパラメータであり、 K_p の値が大きい場合、角度振幅が大きくなるので θ_{error} も増加する。その結果 T_{late} が長くなると考えられる。逆に K_p の値が小さい場合は振幅が小さくなるので T_{late} は短くなる。以上より、 K_p と T_{late} には正の相関があるという仮説を立てた。

θ_{th} 、 K_p とそれぞれについて予備実験から大、中、小の値の条件を設定し、マイコンのタイマ機能を用いて、 T_{late} を計測した。各条件は基本的に計6回の試行をしたが、一部の条件は試行によるばらつきが小さいと判断し、3回の試行に留めた。

θ_{th} と K_p の具体的な数値および各条件の T_{late} の平均を表3.1.1-1に示す。まず θ_{th} は値が小さくなるにしたがって T_{late} が小さくなっており、仮説通りの結果が得られた。 K_p については例えば θ_{th} が小の条件に着目すると、むしろ K_p が大の条件が最も T_{late} の値が小さく、 K_p と T_{late} に正の相関はない。

K_p が仮説と反する結果になったのは、 K_p の変化が関節角度の振幅に影響を与えなかったためだと考えられる。今回の実験において、操作者は目視により関節角度が目標角度の近傍に達した時点より配線切替を開始した。つまり、関節の制御がある程度安定し、P制御の制御量が小さくなってから切替が実行された。また、 θ_{th} について仮説通りの結果が得られたのは θ_{error} の値がほとんど一定であり、 θ_{th} のみが T_{late} の長さに影響を与えたためだと考えられる。

表 3.1.1-1 各条件における T_{late} の平均値

T_{late} [ms]		K_p		
		Large [3.0 3.0 3.3]	Medium [2.0 2.0 2.2]	Small [1.0 1.0 1.1]
θ_{th}	Large [0.4 0.4 0.6]	6.33	7.00	7.33
	Medium [0.3 0.3 0.4]	122	7.67	6.67
	Small [0.2 0.2 0.2]	172	612	373

⑤ 連携試験

他の要素として、「3.4 炉内環境把握のための環境モデル立体復元手法の研究開発」と連携試験を行った。軌道上にGoPro HERO9 Blackを搭載した観察ロボットを走行させ、カメラによる画像取得から立体復元計算処理までを自動的に実行する開発システムの動作検証実験を行い、環境モデルが生成および提示されることが確認された。詳細は3.4節を参照のこと。

(3) まとめ

福島第一原発の廃炉に向けたモジュール分割型多関節軌道構造体Rail Dragonの延長に際して、新たなモジュールを連結しながらであっても既にPCV内に展開されている軌道構造の関節角度制御が維持される手法として、配線切替手法を考案した。その実現可能性を検証する過程で次の3

つの知見を得た。(1)モジュール外部を迂回する電力供給路を作製することで、モジュール連結前後での常時電力供給を実現できた。(2)関節角度変動の大きさを計算し、変動が小さい瞬間に自動で切り替える仕組みを実装することで、関節角度を $\pm 1^\circ$ 以内に収めつつ信号線を切り替えることができた。(3)待ち時間とPゲインの間に負の相関があることがわかった。

配線を切り替えることでロボットの姿勢の制御中でも新しくモジュールを連結できるという考え方は、災害現場など過酷環境で有線による駆動を行わざるを得ないモジュラーロボット全般に広く活用できると考える。一方で今回の研究では、特に θ_{th} と T_{late} の傾向を解明したが、 θ_{th} が大きすぎると切替可否の判断基準として意味を成さないと考えられ、制御性を加味した最適な θ_{th} の探索には課題が残る。

また、「3.4 炉内環境把握のための環境モデル立体復元手法の研究開発」との連携試験を行い、問題なく連携可能なことを示した。

参考文献

- [3.1.1-1] 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2号機原子炉格納容器内部調査実施結果,
https://www.tepco.co.jp/decommission/common/images/progress/retrieval/unit2_meeting_20190228.pdf (参照: 令和6年2月20日)。
- [3.1.1-2] 浅間一, 福島第一原子力発電所の廃炉におけるロボット技術の活用と今後の課題, 日本ロボット学会誌, Vol. 36, No. 6, 2018, pp. 380-383.
- [3.1.1-3] 後藤雅貴ら, 事故炉格納容器を常時観察するための屈曲可能なモジュール分割型軌道の開発, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, 2A2-A17, 2023.
- [3.1.1-4] Yamada, H., Komura, H. and Hirose, S., Development of snake-like robot ACM-R8 with large and mono-tread wheel, Advanced Robotics, Vol. 29, No. 17, 2015, pp. 1081-1094.
- [3.1.1-5] 末吉俊幸, 最小絶対値法による回帰分析, 日本オペレーションズ・リサーチ学会論文誌, Vol. 40, No. 2, 1997, pp. 261-275.
- [3.1.1-6] Stephen Nugent, CMOスイッチとソリッドステート・リレーの性能を的確に比較 Analog dialogue,
<https://www.analog.com/jp/analog-dialogue/articles/how-to-compare-cmos-switches-with-solid-state-relays.html/> (参照: 令和6年2月23日)。

3.1.2 コンパクトに巻き取り可能な高剛性軽量アーム（再委託先：福島大学）

【令和元年度～令和5年度】

(1) 令和4年度までの概要

令和元年度は、低融点合金（Low Melting Point Alloys：以下、「LMPA」と略す。）を用いたコンパクトに巻き取り可能な高剛性軽量アームの関節機構の基本構造設計を行い、試作により強度、溶融・凝固時間などの性能評価を実施した。また、合金の溶融に用いる予定の誘導加熱法の基礎的な検討を実施した。

令和2年度は、LMPAを用いたコンパクトに巻き取り可能な高剛性軽量アームのたわみ解析、巻き取り装置の開発、関節の状態認識のためのセンサレス温度センシングを実施した。この中で、センサレス温度センシング[3.1.2-2]は、センサを用いることなく関節部の温度を計測することを可能としたもので、高線量下かつ水濡れ状態での運用可能性を高めることとなった。

令和3年度は、関節部 LMPA の溶融時間の短縮、アームのたわみ量の改善、伸長済みの関節の角度を変更する機構の基本構想について検討を行った。関節部 LMPA の溶融時間の短縮では、LMPA の溶融に時間がかかる理由として、発熱材からチェンプレートならびに発熱材から皿リベットを経由してチェンプレートの2経路で発熱材の熱が逃げていることを明らかにし、この対策を行った結果、対策前は約34秒かかっていた LMPA の溶融時間を約9秒まで短縮することに成功した[3.1.2-3]。また、アームのたわみ量の改善では、有限要素解析機能を使用して検討を行い、提案する新しい構造を用いることで、令和元年度の段階で4.38 m あった先端部のたわみ量を、0.412 m と約10%の大きさまで縮小できることを明らかにした。

令和4年度は、関節部のフリー・ロック状態遷移時間の最適化、巻き取り装置の改良、断熱材の耐放射線性の検証を行った。関節部のフリー・ロック状態遷移時間の最適化では、2種類の LMPA（融点80℃と約140℃）、断熱材の有無、2種類の皿リベットを評価し、最適な組み合わせについて検討した。その結果、溶融時間が2.08～2.506秒、凝固時間が1.34～4.43秒となった。また、関節の溶融・凝固・角度変更などの工程を並列処理可能な改良した巻き取り装置を用いることで、100関節のアーム（1リンクの長さが0.04 mとして4 mのアーム）の伸長・巻き取りを400秒程度で行える目途をつけた。さらに、断熱材の耐放射線性の検証では0.475 kGy、0.792 kGy、3.17 kGyの放射線を照射した紙の引張強度ならびに断熱性能を調査した。その結果、引張強度については、非照射の紙に対して約0.7倍に低下するという結果を得た。一方で、断熱性能については有意な違いは見られなかった。提案するアーム関節の構造では、紙の引張強度は要求されないため、断熱材として問題なく使用できると考えられた。

(2) 令和5年度実施内容および成果

① 関節構造、アーム形状の改良[3.1.2-1]

開発中のアーム関節の分解図を図3.1.2-1に示す。発熱材を誘導加熱により加熱することで、LMPAを溶かすことができる。LMPAが溶けると関節が自由に動くフリー状態になり、LMPAが固まると関節が固定されるロック状態になる。

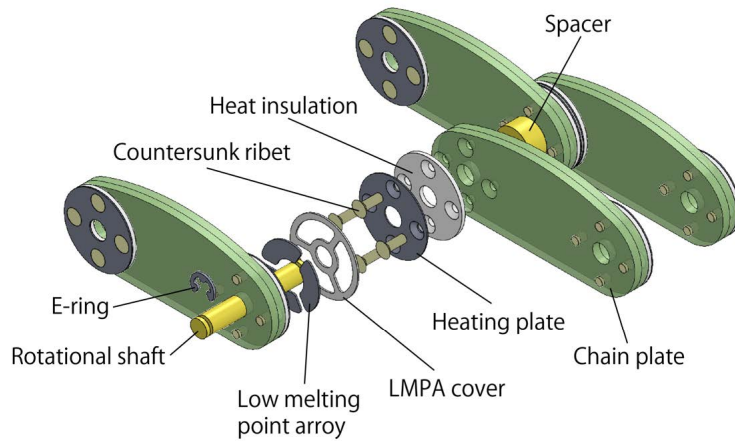


図 3. 1. 2-1 アーム関節の構造

図 3. 1. 2-1 の構造の関節において、以下に示す 2 点の改良を行った（図 3. 1. 2-2 を参照）。

1. 関節の LMPA の外側を覆う樹脂製のカバー（LMPA cover）を導入することで、LMPA の漏れ出しを防止した。
2. 巻き取ったときのアームの外側が円形になるように形状を変更することで、ローラによるアーム保持を低摩擦で実現した。

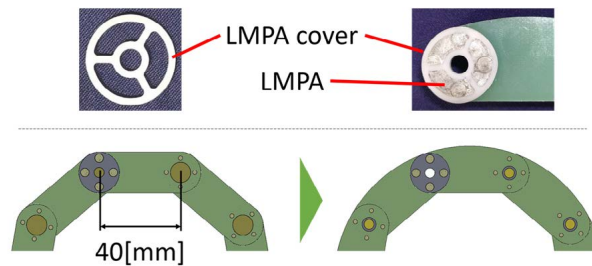


図 3. 1. 2-2 関節構造，アーム形状の改良

② 巻き取り装置の自動化[3. 1. 2-1]

これまで開発してきたアームの巻き取りと繰り出しを行う装置の自動化を進めた。試作した装置を図 3. 1. 2-3 に示す。

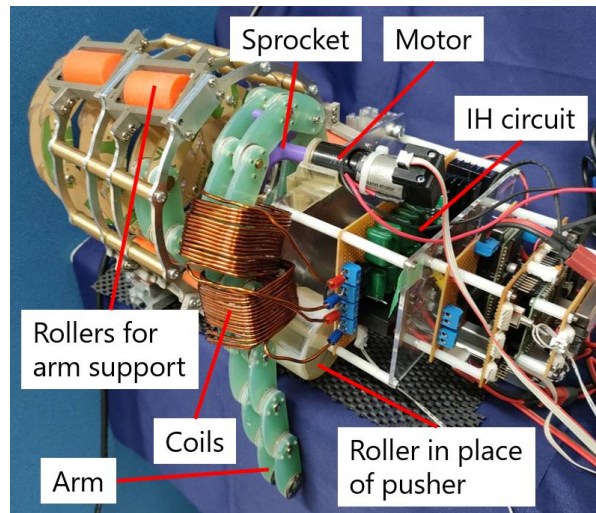


図 3.1.2-3 自動化した巻き取り装置

この装置を用いてアームを繰り出す場合の動作手順を、図 3.1.2-4 を用いて以下で説明する。

- Step1 : フリー状態になっている関節 i の角度を、プッシャにより変更する。
- Step2 : 関節 i がロック状態になってから、関節 $i+1$ をフリー状態にする。
- Step3 : スプロケットによりアームを1関節分移動させる（初期状態として関節 $i+1$ を直線状にする）。その後、Step1に戻る。

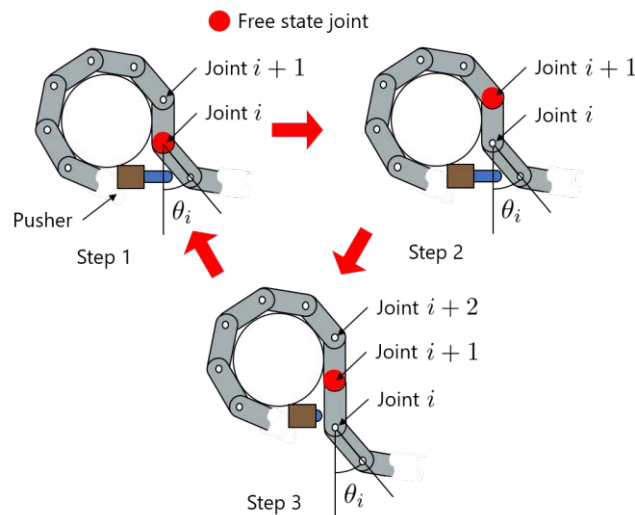


図 3.1.2-4 アームの繰り出し動作

改良した巻き取り装置でアームの巻き取りと繰り出しを行った様子を図 3.1.2-5 に示す。この動作確認では、1 関節当たり約 5 秒でアームの巻き取りと繰り出しを行うことができた。なお、この実験の段階ではプッシャが未実装であり、アームは鉛直下向きに繰り出される。

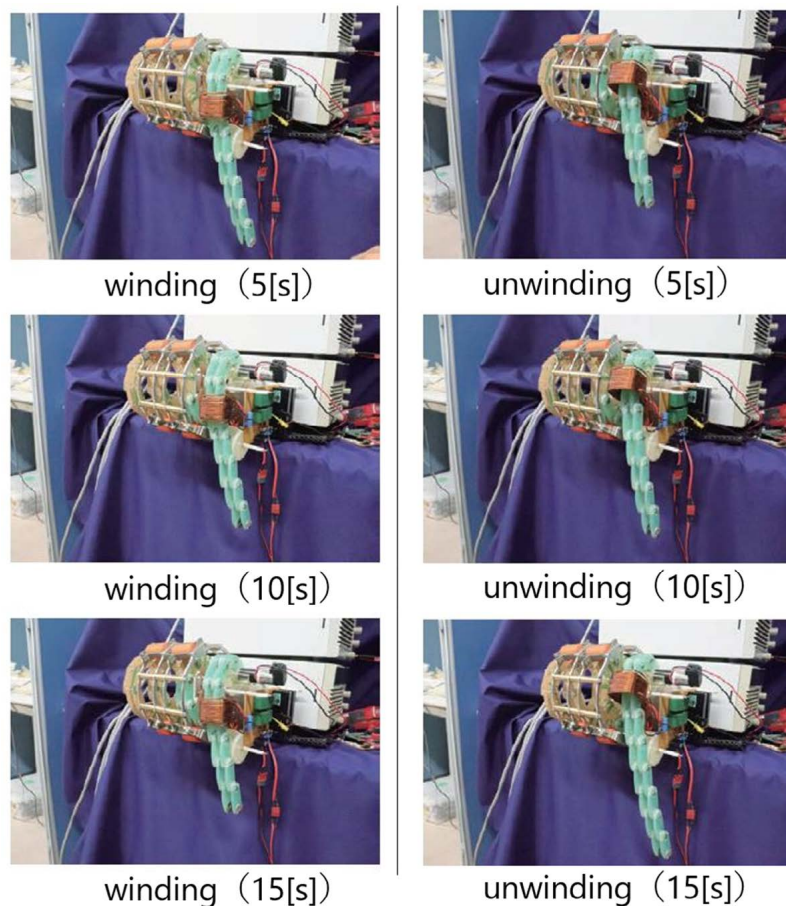


図 3.1.2-5 自動化した巻き取り・繰り出し動作

③ 関節角度変更装置の試作

モニタリングアームの先端を測定対象に近づけるために、アーム繰り出し時に関節の角度を変更する必要がある。そこで、図 3.1.2-4 に示すようなプッシャで押す方式の関節角度変更装置を試作した。その動作の様子を図 3.1.2-6 に示す。

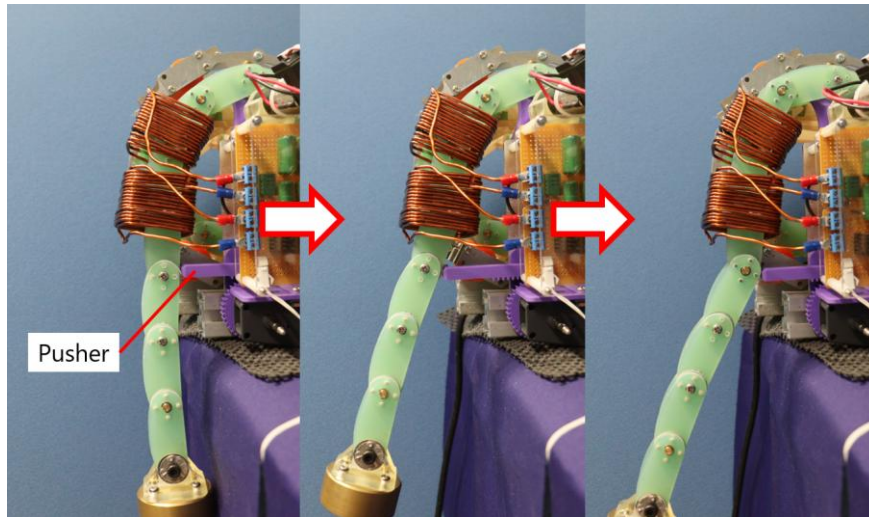


図 3.1.2-6 関節角度変更動作

④ 温度測定装置の試作

図 3.1.2-4 のアーム巻き取り・繰り出し動作の実験では、関節の加熱および冷却の時間は実験的に決めたものであった。この動作をより効率的に、また確実にを行うためには、関節の温度を測定しながら加熱と冷却を行う必要がある。そこで、LC 共振回路を用いた温度測定装置を試作する。瀬戸らにより、関節に埋め込まれた発熱材の温度が上がるとその透磁率が変化するため、関節の周りにコイルを配置して LC 共振回路を構成すると、その共振周波数が変化することが確認されており [3.1.1-2]、その原理を用いて共振周波数から温度を推定する。この方法は、放射線に晒される部分がコイルのみにできるため、高線量環境におけるセンシング法として優れている。

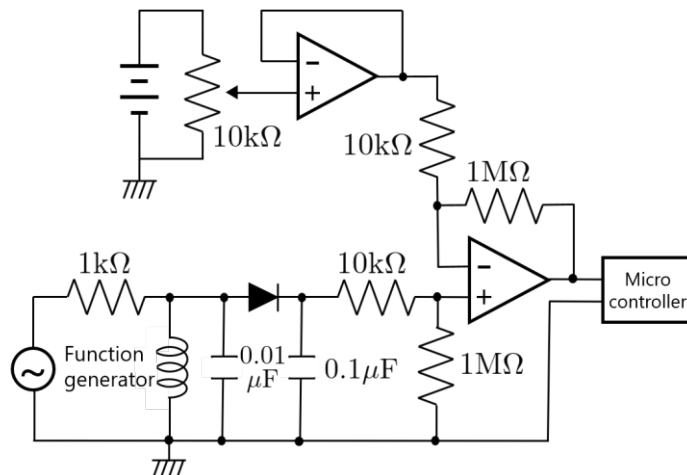


図 3.1.2-7 温度測定装置の回路

試作した温度測定装置の回路を図 3.1.2-7 に示す。関節に使用している発熱板をコアに用いたコイルを平板上に設置し、ホットエアガンを用いて発熱板を加熱しながら、発振器で入力する正弦波の周波数を変化させて共振周波数を調べる。図 3.1.2-8 に実験結果を示す。実験は、各温度で 3 回ずつ行った。実験結果より、発熱板の温度によって共振周波数が再現性良く変化していることがわかり、共振周波数の変化から温度を推定できると考えられる。なお、発熱板の温度は、サーモグラフィー（R550Pro、日本アビオニクス社製）で計測した。

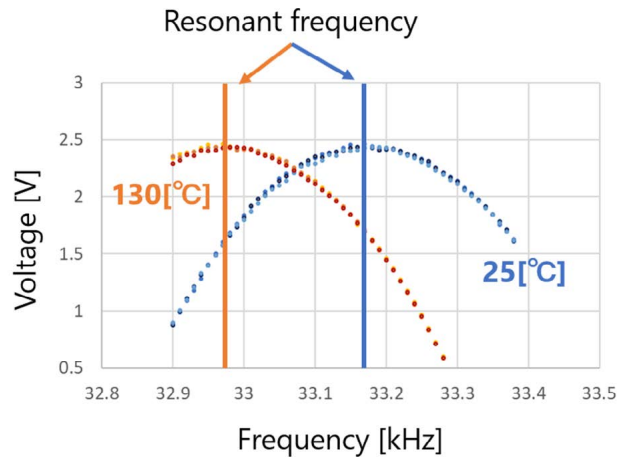


図 3.1.2-8 温度測定装置の実験結果

(3) まとめ

令和 5 年度は，アーム構造の改良と巻き取り装置の自動化，関節角度変更装置と温度測定装置の試作を行った．

関節の LMPA の外側を覆う樹脂製のカバーを導入することで，LMPA の漏れ出しを防止した．また，巻き取ったときのアームの外側が円形になるように形状を変更することで，ローラによるアーム保持を低摩擦で実現した．

自動化した巻き取り装置では，1 関節当たり約 5 秒でアームの巻き取りと繰り出しを自動的に行えることを確認した．なおこの時間は，関節温度の計測機能を付加することにより短縮が可能である．

そして，アームを繰り出すときに関節の角度を変更する装置を試作し，想定通りの動作を行えることを確認した．また，LC 共振回路を用いた関節温度測定装置を試作し，共振周波数の変化から温度を推定する方法の有効性を確認した．

参考文献

- [3.1.2-1] 横田開，高橋隆行，低融点合金を用いた巻取型高剛性長尺アーム -巻き取り装置の改良と自動化-，第 24 回計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会，2D2-11，2023.
- [3.1.2-2] 瀬戸徳文，情野瑛，高橋隆行，原子炉内部調査用モニタリングアームの開発 -関節状態判別方法の提案と状態遷移法の検討-，ロボティクス・メカトロニクス講演会概要集，2P1-P01，2020.
- [3.1.2-3] 鈴木悠太，情野瑛，高橋隆行，原子炉内部調査用モニタリングアームの開発 コンパクトなアーム巻取装置の試作と実アーム関節の非接触温度推定，ロボティクス・メカトロニクス講演会概要集，2A1-005，2021.

3.2 遠隔操作インターフェースの開発【令和元年度～令和5年度】

3.2.1 映像提示インターフェース【令和元年度～令和5年度】

(1) 令和4年度までの概要

本研究で想定しているモニタリングプラットフォームの映像提示インターフェースの概念図を図3.2.1-1に示す。本研究では、作業状況や環境の3次元モデル情報に応じて、複数台のカメラを適切な位置に配置し、遠隔操作に有効な映像を操作者へと提示する。

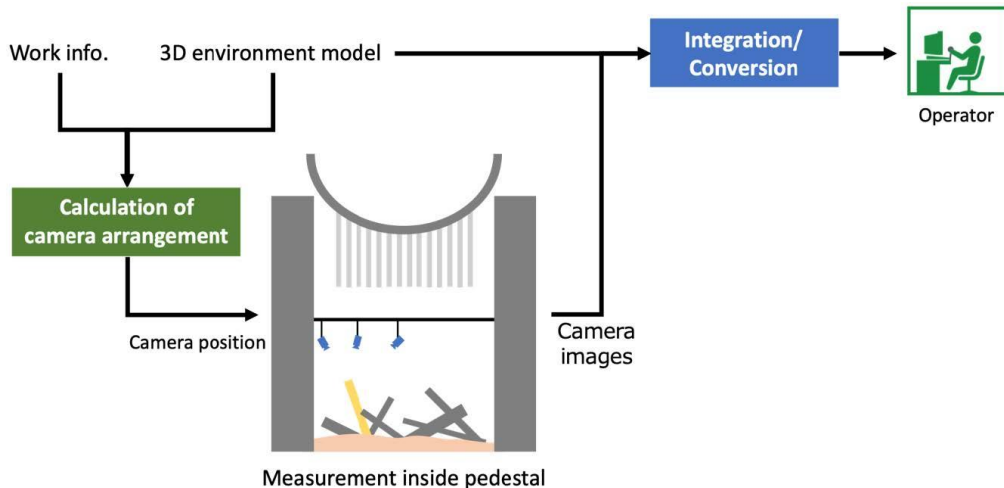


図 3.2.1-1 映像提示インターフェースの概念図

以下に、令和4年度までの実施内容を簡単に示す。

令和元年度には、複数台のカメラによる操作者への映像提示方法の概念検討を行った。燃料デブリ取り出しにおいて想定される炉内状況について検討するとともに、従来の遠隔操作における映像提示方法について調査し、カメラの仕様や台数等についての検討を行った。

令和2年度には、令和元年度に検討したカメラの仕様や台数に基づいて、カメラ配置設計手法の検討を行った。具体的には、環境の3次元モデルを与えられたときに、ある1つの対象物を指定したときの視認性の高いカメラ配置設計が2次元上で可能になった。ここでは、カメラおよび障害物が同平面上にあり、2次元におけるカメラ配置設計として近似できる環境を想定していた。また、カメラは360度の円状を移動できるという仮定をおいていた。令和2年度に想定したカメラ軌道図を図3.2.1-2に示す。

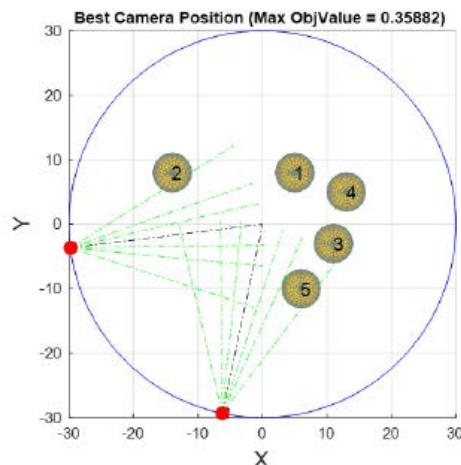


図 3.2.1-2 令和2年度のカメラ軌跡（青線の円）と最適カメラ配置（赤点）の俯瞰図

視認性としての指標として、以下の3項目で評価し、最も視認性の高いカメラ配置を出力するアルゴリズムを構築した。

- ・可視化対象が映像の中央に映るほど視認性が高い
- ・可視化対象が他の障害物に遮蔽されないほど視認性が高い
- ・2台のカメラが角度をつけて可視化対象を映すほど視認性が高い

実環境においても検証を行っており、カメラと三脚を用いた簡易なカメラシステムを構築し、円周上にカメラを動かして撮影した映像から環境の3次元モデルを復元することでカメラ配置を設計した。

令和3年度は動的環境に対応したカメラ配置設計手法に取り組んだ。令和2年度に構築したカメラ配置設計手法は、静的な環境を想定していた。今後ロボットアームを活用した、燃料デブリの取り出しや放射線量計測が行われる際に、環境の動的な変化やロボットアームによる作業を考慮した操作者への映像提示が重要になってくることが予想される。したがって、令和3年度の研究では、アームによる作業を考慮した動的環境におけるカメラ配置手法の提案を行った。具体的には、シミュレーション環境を構築し、強化学習を活用することで、被験者実験の必要性なしに作業効率のよい最適視点の提示が可能になった。最適視点提示手法のコンセプト図を図3.2.1-3に示す。図3.2.1-3に示すように様々なカメラ視点を用いて強化学習でリーチングを学習させ、最もリーチング達成までにかかる時間が短い視点を最適視点とした。

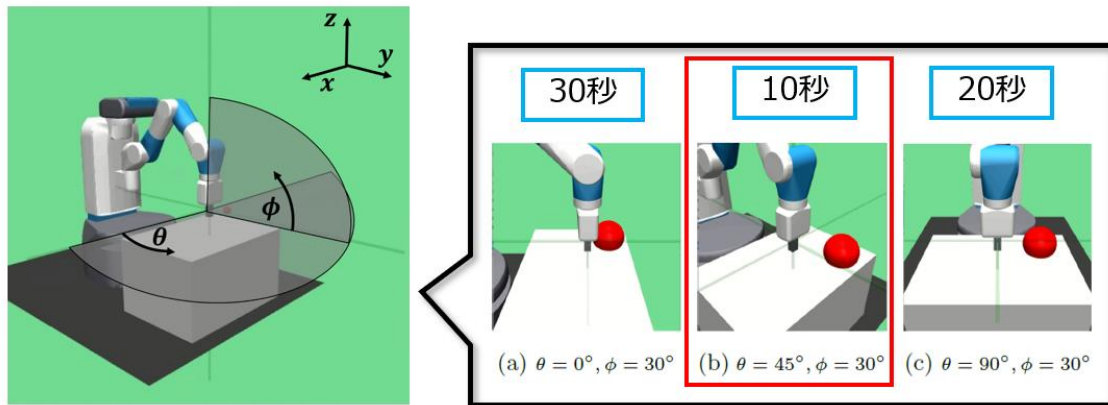


図 3.2.1-3 強化学習で使うカメラ視点とリーチング達成までにかかる時間（コンセプト図）

令和4年度は、令和2年度に行った2次元上のカメラ配置設計を拡張し、より現実に近い3次元上で、かつ、実際にカメラが動いた軌跡から最適なカメラ配置の探索が可能な手法を提案した。具体的には、視認性のよいカメラ配置とは、対象物体が障害物に遮蔽されていないカメラ視点であると定義し、レイキャスティングを用いて3次元環境で遮蔽判定を行った。レイキャスティング

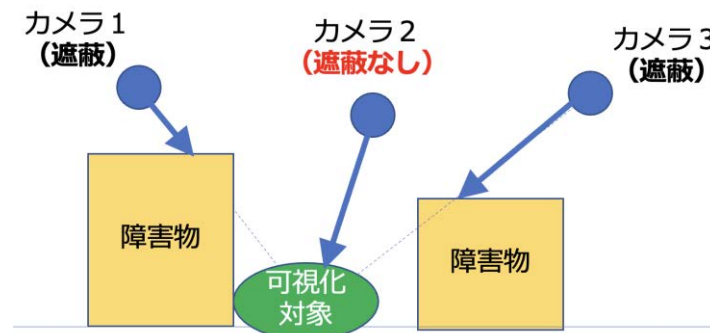


図 3.2.1-4 レイキャスティングの概念図

グの概念図を図 3.2.1-4 に示す。レイキャスティングでは、カメラ位置から可視化対象に光線、すなわち、レイを飛ばす。このレイが可視化対象にたどり着くまでに障害物に当たった場合は遮蔽（図 3.2.1-4 におけるカメラ 1 およびカメラ 3）と、障害物に当たることなく可視化対象に当たった場合は遮蔽なし（図 3.2.1-4 におけるカメラ 2）と判断できる。また、櫛葉モックアップ実験において、3 次元環境モデル上で可視化対象の指定し、提案手法により可視化対象が遮蔽されていないカメラ位置の提示を確認した。

(2) 令和 5 年度実施内容および成果

① “見やすさ” も考慮可能な手法へと拡張したカメラ配置設計

令和 4 年度の手法では、可視化対象が遮蔽されていないという点を考慮したカメラ配置設計を行った。しかし、櫛葉モックアップ実験において、遮蔽されていないという点だけではなく、例えば可視化対象に近い視点といった“見やすさ”も考慮したほうが良いという改善点が挙げた。したがって、令和 5 年度においては“見やすさ”も考慮可能な手法へと拡張したカメラ配置設計へと拡張を行った。

本研究では、“見やすさ”とは何かを議論を重ねたところ、「カメラ画像上で可視化対象が大きく見える視点」と定義することで、可視化対象とカメラの距離や、可視化対象の障害物による遮蔽等が一元的に扱えることがわかった。具体例を図 3.2.1-5 に示す。このように定義することで、以下の 3 つの点で考慮することができる。

図 3.2.1-5(a) 可視化対象とカメラの距離による見え方の違い。ここではカメラ 2 が見やすい視点。

図 3.2.1-5(b) 可視化対象とカメラの向きによる見え方の違い。ここではカメラ 1 が見やすい視点。

図 3.2.1-5(c) 遮蔽による見え方の違い。ここでは、カメラ 2 が見やすい視点。

したがって、対象の占める画像上の割合を評価指標にすることで遮蔽も含めた見やすさの考慮をすることができる。

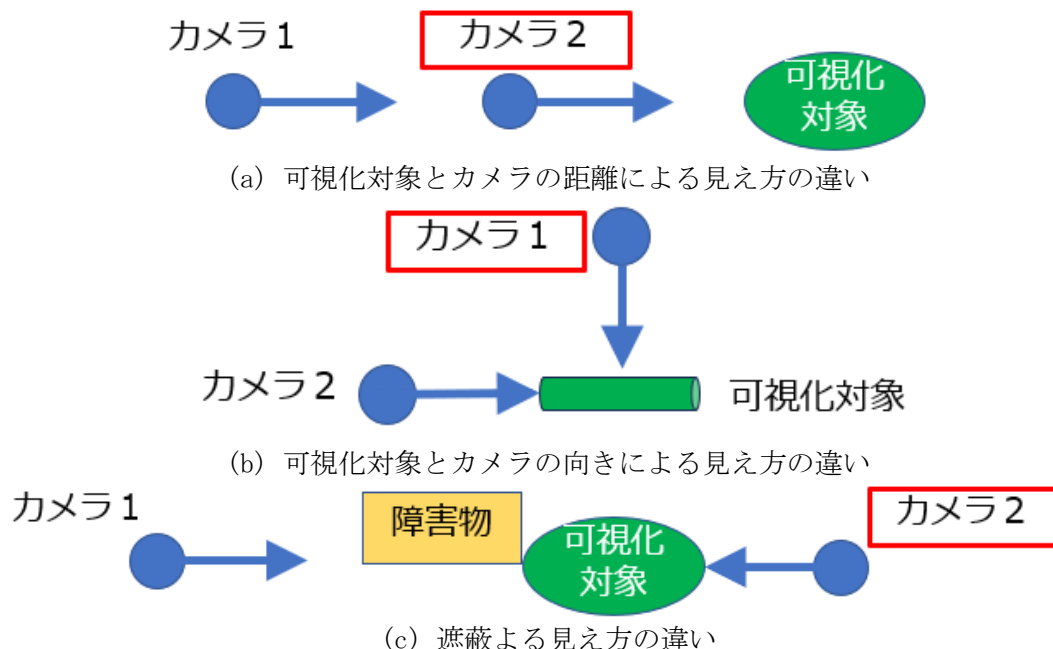
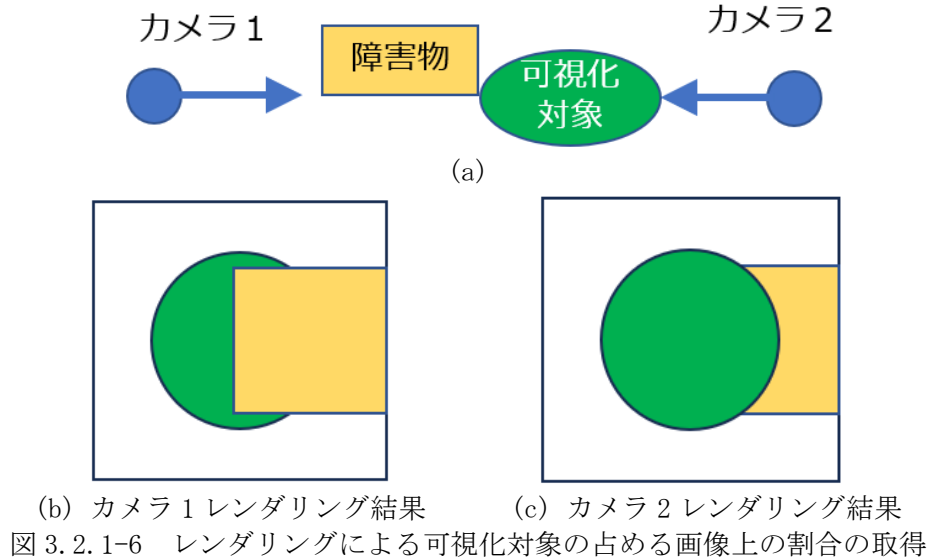


図 3.2.1-5 可視化対象が大きく見える視点の例

ここで、どのように可視化対象の占める画像上の割合を取得するかについて述べる。本研究では、環境の 3 次元モデル情報を得ることができるため、ある位置姿勢においたカメラ画像を仮想的にレンダリングで得ることができる。環境の 3 次元モデル情報とカメラの位置姿勢情報を入力

としたレンダリングによる仮想的なカメラ画像の取得は、一般的な 3 次元ソフトの機能であり、本研究では Open3D というライブラリを用いて実装した。図 3.2.1-6 に示すように、レンダリングを用いて任意の位置姿勢のカメラ画像を仮想的に求めることができ、レンダリング結果を用いて可視化対象の占める画像上の割合の取得が可能である。



環境中のどれを可視化対象にするかどうかは操作者の作業により変わるため、環境の 3 次元モデル情報に対して、操作者が手動でラベルづけをすることにした。効率的なラベル付けのためにインタフェースを作成した。詳細は次の檜葉モックアップ実験で述べる。

② 他の研究項目との檜葉モックアップ統合的な試験

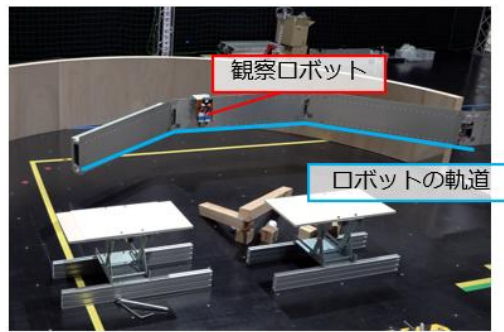
令和 5 年 10 月と 12 月に檜葉遠隔技術開発センターのモックアップ施設で軌道構造自動施工システムおよび炉内環境把握のための環境モデル立体復元手法との統合的な実験を行った。統合実験の流れとしては以下の通りである。

- (1) 軌道構造自動施工システムを配置し、観察ロボットを動かし軌道からの映像取得
- (2) 取得した映像を入力として環境モデル立体復元手法を用いて環境の 3 次元モデル情報および観察ロボットのカメラ軌道の位置姿勢情報の取得
- (3) 環境の 3 次元モデル情報、カメラ軌道の位置姿勢情報、可視化対象を入力としてカメラ配置設計手法を用いて最適カメラ配置の取得
- (4) 得られた最適カメラ配置に観察ロボットを移動

ここでは、主に(3)について詳細に説明を行い、それ以外の項目は軌道構造自動施工システムおよび炉内環境把握のための環境モデル立体復元手法で説明があるため軽く触れるだけに留める。

檜葉モックアップ実験の全体像を図 3.2.1-7(a)に示す。図 3.2.1-7(a)に示すように観察ロボットはレール状を移動し環境の撮影を行う。撮影した映像を用いて環境モデル立体復元手法で復元した環境の 3 次元モデルを図 3.2.1-7(b)に示す。

提案したカメラ配置設計手法を用いて得られた環境の 3 次元モデルから最適配置設計を行う。まずは操作者が環境の 3 次元モデルの中で可視化対象のラベル付けを行う。提案システムでは、マウスのクリック&ドラッグ操作でインタラクティブに可視化対象を指定可能である。図 3.2.1-8 に実際のカメラ画像および環境の 3 次元モデル上で可視化対象を指定した結果を示す。



(a) 実験の全体像



(b) 環境モデル立体復元手法で得られた 3 次元モデル

図 3.2.1-7 実験の全体像および復元された環境の 3 次元モデル



(a) 実際の画像上の可視化対象



(b) 3 次元モデル上の可視化対象（緑色領域）

図 3.2.1-8 3 次元モデルにおける可視化対象の指定

次に各カメラ視点の評価をするために可視化対象の占める画像上の割合を求める。提案手法ではレンダリングにより可視化対象を各カメラ視点映像上に仮想的に描画することで、評価値を決定する。レンダリングによる可視化対象の領域取得を図 3.2.1-9 に示す。図 3.2.1-9(a) で撮影したカメラの位置姿勢において可視化対象のみのレンダリングした結果を図 3.2.1-9(b) の白領域として示す。実際の画像上の可視化対象（左側の箱）の領域のみが取得できていることがわかる。



(a) 実際の画像



(b) 可視化対象のみのレンダリング結果

図 3.2.1-9 レンダリングによる可視化対象の領域取得

レンダリングによる可視化対象の占める画像上の割合を評価値としてカメラの最適配置を求めた結果を図 3.2.1-10 に示す。図 3.2.1-10(a)では、環境の 3 次元モデル上にカメラの軌跡および最適視点を表示した。水色の矢印がカメラ視点の軌跡を表しており、赤色の矢印がその中で最も高い評価値を示した最適視点である。わかりやすさのために最適視点を緑丸で囲っている。図 3.2.1-10(b)は、最適視点から得られたカメラ画像であり、実際に可視化対象が遮蔽されことなく見やすい位置で映っていることがわかる。最後に図 3.2.1-11 に、操作者による最適視点への観察ロボットの移動を示している。これらの榎葉モックアップ実験を通じて、カメラ配置設計手法は、軌道構造自動施工システムおよび炉内環境把握のための環境モデル立体復元手法と統合可能であり、最適視点からの映像提示が可能であることがわかった。

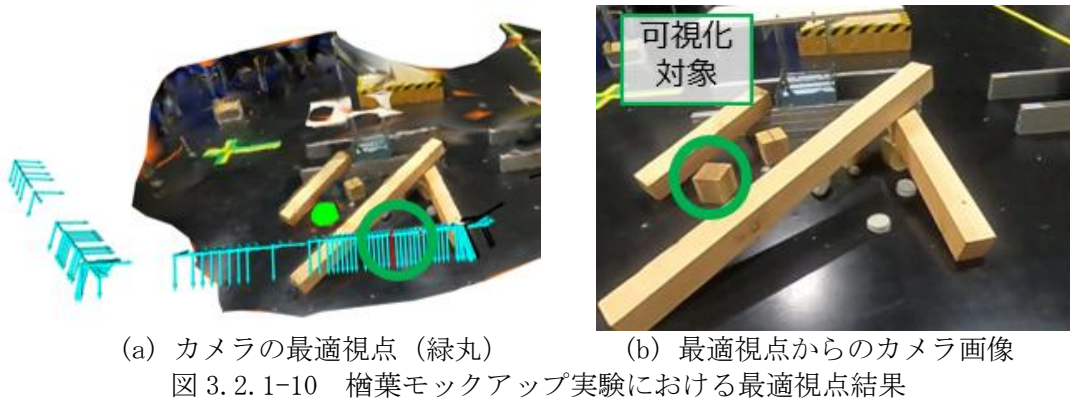


図 3.2.1-11 最適視点への観察ロボットの移動

(3) まとめ

令和 4 年度においては可視化対象が遮蔽されことなく見えることに着目したが、令和 5 年度はカメラとの可視化対象の“見やすさ”も考慮可能な手法へと拡張した。

他の研究項目との統合として、軌道構造自動施工システムおよび炉内環境把握のための環境モデル立体復元手法を用いて、最適視点からの映像提示が可能であることを確認した。

3.2.2 高臨場感遠隔操縦システム（再委託先：神戸大学）【令和元年度～令和5年度】

(1) 複数画面を有する遠隔操縦プラットフォームの開発

【令和4年度までの概要】

令和元年度には、IRIDで開発・検討中の燃料デブリ取り出し用ロボットアームの調査を行い、本研究で構想中のプラットフォームとの整合性が高いことを確認し、作業アームの可動範囲を拡大するためのプラットフォームの設計を行った。令和2年度は、操作者に複数の視点からの映像を提示するための複数画面を有する遠隔操縦コックピットを開発し、遠隔操縦用高解像度カメラの検討を行った。令和3年度には、カメラアームによる自由視点カメラの追加による遠隔操縦プラットフォームの拡張を行った。

令和4年度には、カメラアームに搭載された自由視点カメラの視点変更が可能なように遠隔操縦プラットフォームを拡張するとともに、令和5年度に向けてペDESTAL内での複数カメラを利用した遠隔操縦を模擬するモックアップを構築するために、シミュレーション環境での事前検討を行った。

【令和5年度実施内容および成果】

① 廃炉内モニタリングプラットフォームを想定した全方向に視点配置可能な実機環境プラットフォームの構築

ペDESTAL内に設置するモニタリングプラットフォームを想定し、全方位にカメラの配置を可能とするプラットフォームを構築した。令和4年度までは、図3.2.2-1に示すような原子力プラント内の操作パネルを模擬したような環境で、左右および背面からカメラを配置していた。令和5年度は、より廃炉環境下に近い状況での検証を行うために、図3.2.2-2に示したような実機環境プラットフォームを構築し、作業対象を全方位からとらえられるようにカメラを配置した。カメラの台数も、令和4年度の4台から1台増設して5台とした。その内訳は、作業アーム手先カメラ1台と環境に固定されたカメラ3台、カメラアーム手先カメラ（自由視点カメラ）の1台となっている。

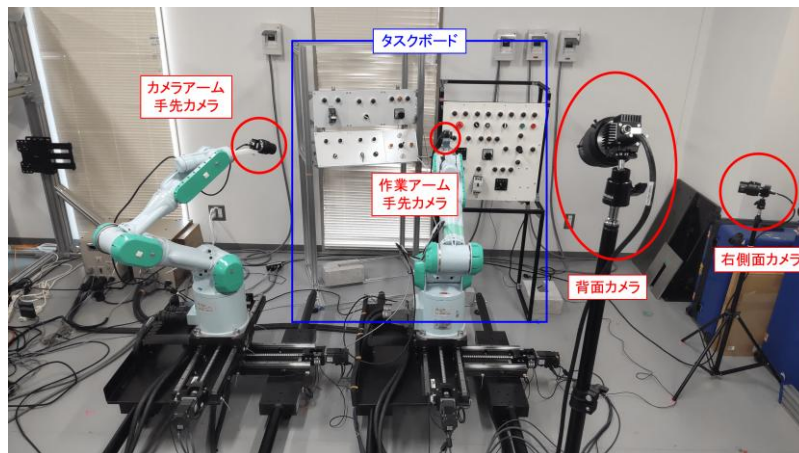


図 3.2.2-1 令和4年度の実験環境プラットフォーム

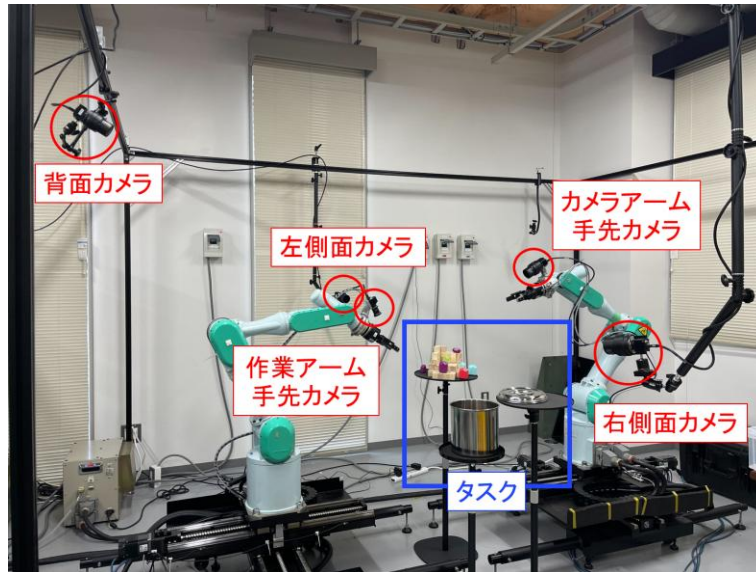


図 3.2.2-2 令和 5 年度構築した実験環境プラットフォーム

実験でのタスクの内容は、令和 4 年度までのプラント内の操作パネル上のスイッチのひねりと押し作業から、デブリ回収作業を模した作業として、積み上げられた積み木ブロックを崩すことなく、目標のブロックを回収して容器内に入れ、最後に容器に蓋をするような作業に変更した。

図 3.2.2-3 に、令和 5 年度構築した遠隔操縦プラットフォームの操縦側コックピットの概観を示す。

遠隔操縦プラットフォームの構築に使用した機材としては、2 台の三菱重工業社製の汎用多軸マニピュレータ PA10 をそれぞれ「作業用アーム」と「カメラアーム」に使用している。「作業アーム」とは、主に作業を行うアームのことであり、「カメラアーム」とはロボットアーム手先に搭載したカメラを自由に移動させることで、タスクに適した視点を確保することを目的としたアームのことである。ただし、どちらのロボットアームにも手先には Robotiq 社製 2 指ロボットハンド 2F-85 を搭載しており、状況に応じて作業アームとカメラアームの役割を入れ替えることも可能となっている。またこれらのアームは、本研究プロジェクトで令和元年度に製作した XY ステージ上に設置されており、可動範囲の拡大を実現している。



図 3.2.2-3 遠隔操縦プラットフォームの操縦側コックピットの概観

(2) 格納容器内での作業を想定した遠隔操縦方法の検討

【令和4年度までの概要】

令和元年度は、複数画面の遠隔操縦システムの基本コンセプトを策定した。また高剛性アームの動作計画法の基礎的検討を行った。令和2年度は、複数画面を有する遠隔操縦システムの直感的なインタフェースの構成法を提案し、予備的な評価実験を行った。また、高剛性軽量アームのコンフィグレーション計画の基本コンセプトを検証した。令和3年度には、移動可能なカメラ視点を有する遠隔操縦ロボットシステムの作業性評価を行った。また、高剛性軽量アームを展開した際に、実際の関節角度が事前に計画した角度からずれた場合でも、そのような誤差の影響を後段の関節角度の修正で補正するフィードバック補償を検討し、その有効性を確認した。

令和4年度には、カメラアームに搭載された自由視点カメラの視点を変更する手法を提案その作業性を評価した。また、高剛性軽量アームのコンフィグレーション制御について、開発中の高剛性軽量アームの仕様に合わせた検証を行った。

【令和5年度実施内容および成果】

① 多視点遠隔操縦システム上でのカメラアームの視点変更手法の実現

神戸大学・機能ロボット学研究室での先行研究[3.2.2-1][3.2.2-2][3.2.2-3]では、作業環境に設置されたカメラは、作業アームの手先カメラ以外は全て固定されていたため、視野が限定されていた。作業するポイントが一か所に固定されている場合は、固定カメラを注意深く設置すれば対応できる可能性があるが、作業ポイントや作業内容がダイナミックに変化する場合では、固定カメラのみでは限界があり、自由視点カメラを導入することが望ましい。自由にカメラ視点を変更するためには、ロボットアーム等の先端にカメラを取り付ければよいが、その際どのようにすれば直感的に視点変更が可能なのか、という問題に対して令和4年度から取り組んできた[3.2.2-4]。

直感的な自由視点カメラの視線変更のための基本的考え方を図3.2.2-4に示す。図に示したように、作業にはその作業中に注目すべき点（以下、「注視点」と略す。）が存在する。また、カメラには画角や焦点距離などの仕様や対象作業の内容から、作業の注視点からカメラまでにはある適当な距離が存在する。視点変更をする際には、自由視点カメラは注視点からこの距離を保ちながら、常に注視点に向くように自由視点カメラの位置と姿勢を変更できるようにした。また、このような視線変更をするときでも、図3.2.2-5に示すように操縦アームの姿勢と画面内の作業アームの姿勢とが整合性を保つようにすることで、視線変更を直感的に指令することができる。

1 台の操縦デバイスで作業アームと自由視点カメラを搭載したカメラアームを操作するために、作業アームを操作する「作業モード」とカメラアームを操作する「視線変更モード」の2つのモードを導入する。図3.2.2-6にこれら2つのモード間の遷移を含む一連の作業の流れを時系列的に示す。青色で表わした区画は作業モード、オレンジで表わした区画は視線変更モードである。モード切り替えはフットスイッチで行う。図3.2.2-6において、2台のアームのうち枠で囲まれているアームがそのときのモードで操縦対象となるアームである。まず操作者は作業モードを選択し、作業を行うべき地点まで作業アームを移動させる。このときカメラアームは作業アームの動きに合わせて一定の距離を保ちながら自動追従する。作業モード時にカメラアームが作業アームに自動追従するのは、操作者に2台アームの同時操作の負担をかけないためである。目的の作業ポイントに達した後は、適切に主画面を選択しながら作業を開始して良いが、このとき自由視点カメラの視線を変更したい場合は、視線変更モードへ遷移して自由視点の視線を適当に変更する。その場合作業アームは、視線変更モードに入る直前の位置と姿勢を保持し静止する。自由視点を適切な視点に変更し終えたら、再び作業モードに遷移させ作業を再開する。

視線変更モードでは、カメラアームの手先カメラから見た作業アームの手先姿勢が見たい方向からの姿勢になるように操縦デバイスの手先姿勢を操作することで、自由視点カメラを搭載したカメラアームの位置と姿勢が制御され、姿勢の整合性が保たれた直感的なカメラアームの視点変更を行うことができる。

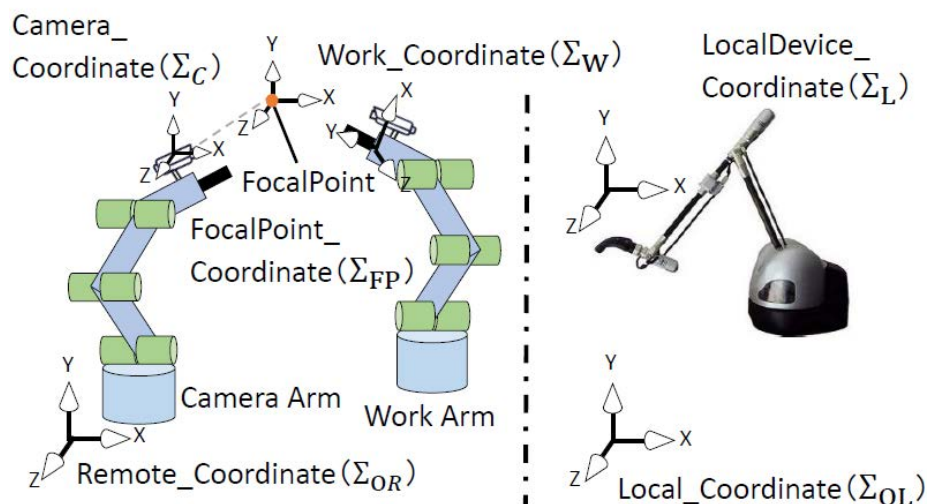


図 3. 2. 2-4 自由視点変更の基本的考え方



(a) 視点変更前



(b) 視点変更後

図 3. 2. 2-5 多視点遠隔操縦システムにおける主画面と注目画面

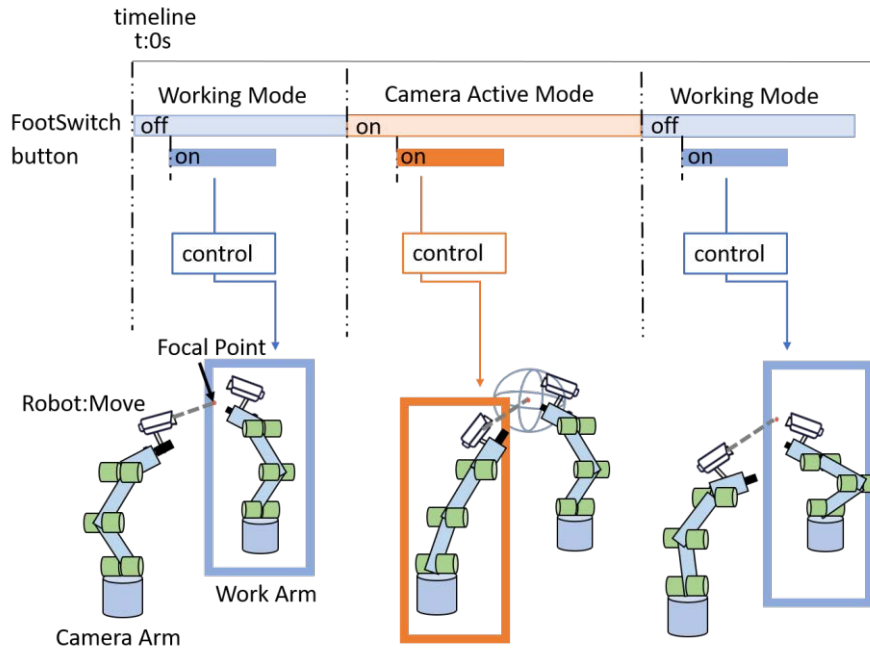


図 3. 2. 2-6 作業モードと視線変更モード

② 人間の手首操作姿勢を考慮した操作デバイスの姿勢拘束手法の拡張

神戸大学・機能ロボット学研究室ではこれまで複数画面から操作者が注目する画面（主画面）を切り替える際に、操縦デバイス（ローカルアーム）の操作と主画面内の作業アーム（リモートアーム）の姿勢と指令方向が整合性を保つために、インデキシング OFF 時には操作者手元のローカルアームの手先姿勢が主画面内のリモートアームの手先姿勢に一致するようにローカルアームにトルクを与えて手先姿勢の拘束を行っている（図 3. 2. 2-7 参照）。しかし、令和 5 年度新たに構築した作業環境（図 3. 2. 2-2 参照）のように、カメラが作業アームに対向する側にも配置される場合、主画面として選択される画面によっては、目標となる主画面内のリモートアームの手先姿勢が操縦デバイスの動作範囲外となったり、動作範囲限界付近になったりするために以降の操作に支障をきたす恐れがある。

例えば本研究では、ローカルアームの操縦デバイスとして Haption 社製 6 軸力覚フィードバック装置 virtuose6d35-45 を使用しているが、手先のヨー角の回転動作範囲は、手先の姿勢により多少異なるが、図 3. 2. 2-8 に示しているように動作範囲の中心付近においても ± 110 deg 前後であり、操縦デバイスとしては十分広い動作範囲を有してはいるものの、図 3. 2. 2-9 の左に示したような、作業アームと対向した自由視点カメラを主画面として選択した場合、画面内の作業アームの手先姿勢と整合するような操縦デバイスの姿勢を取ることはできない。また、たとえ主画面選択時に目標姿勢が操縦デバイスの動作範囲内であっても、以降の作業中に操縦デバイスの姿勢が動作限界に達し、それ以上の姿勢の指令ができなくなる可能性がある。

この手先姿勢拘束に伴う問題は、自由視点カメラの視線変更の場合においても発生する。自由視点カメラの視線変更をする際には、前述したようにローカルアームの手先姿勢を「自由視点カメラから見た作業アームの手先姿勢」に一致させるように指令することとしている。よって、「自由視点カメラから見た作業アームの手先姿勢」はローカルアームの姿勢の動作範囲内に限定され、動作範囲を超えるような姿勢に自由視点カメラの視線を変更することができなくなってしまふ。

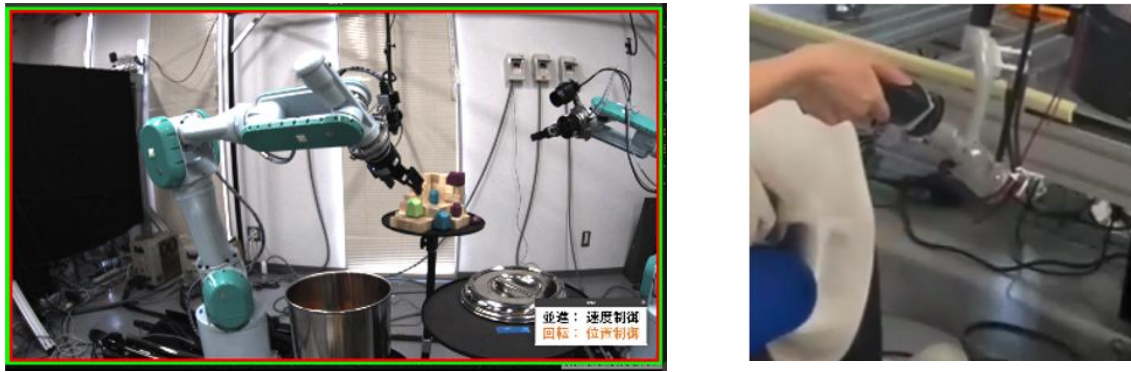


図 3.2.2-7 作業アームに一致する姿勢で操作デバイスが拘束されている様子



図 3.2.2-8 Haption 社製 6 軸力覚フィードバック装置 virtuose6d35-45 の手先姿勢の動作範囲

また、そもそも操作者がそのような姿勢の動作限界付近で操作することは身体的に大きな負担となる。このような操作者の身体的に適正な手首の操作範囲と、操縦デバイスの手首の動作範囲との積集合を「姿勢の適正範囲」と定義する。操縦デバイスの姿勢は、常にこの「姿勢の適正範囲」内で操作されるべきである。

この課題を解決するため、令和 5 年度では「拡張手先拘束」と「姿勢のインデキシング」という手法を導入した。これらの手法を用いての操作の流れは次のようになる。図 3.2.2-9 の左画面のような視点を主画面とした場合を例として説明する。図 3.2.2-9 の左画面を主画面とした場合、この画面内の作業アームの姿勢に操縦デバイスの姿勢を整合させようとする、デバイスの姿勢は姿勢の適正範囲から外れる。このような場合には、図 3.2.2-9 に示すように、主画面内の作業アームの姿勢と操縦デバイスの姿勢との不整合を許し、適正範囲内の姿勢になるように適当な姿勢のオフセットを加えた上で姿勢拘束する。本研究では、適正範囲内の姿勢の中で、操作者が一番操作しやすい姿勢として 0 度の姿勢とすることとした。このように、操作者の操作性を重視し、主画面上の作業アームと操縦デバイスの姿勢との不整合を許容した上での姿勢拘束を「拡張手先拘束」と呼ぶ。

このように、主画面上の作業アームと操縦デバイスの姿勢との不整合を許容するのであれば、操作者が自由に姿勢の拘束関係を変更するようにすることができる。つまり、作業アームとローカルアームの手先拘束の関係を一度切断し、新たな姿勢拘束の関係で再接続させるという機能であり、これを「姿勢のインデキシング」と呼ぶ。つまり、姿勢のインデキシングは、操縦デ

バイスの姿勢が適正範囲外になったときに、操縦しやすい姿勢に拘束関係を変更するときのように手先拘束状態を拡張手先拘束にしたり、ある拡張手先拘束（0 度姿勢を含む）から別の拡張手先拘束へ変更したりするための手法である。

姿勢のインデキシングの際、意図しているのは姿勢の拘束関係を変化させることのみであるため、操縦デバイスの位置はそのまま拘束させておく必要がある。また、拡張手先拘束である間は図 3.2.2-9 に示すように画面右上に赤丸を表示させ、拡張手先拘束であることを操作者に明示する。

このように、従来の姿勢を整合させる手先拘束手法だけでは対応しきれなかった場合においても、姿勢のインデキシングを導入して意識的に持ち替えを行えるように手先拘束手法を拡張した。これは姿勢の整合性の確保を放棄することになるが、操作者が意識的に姿勢の拘束関係を変更しており、姿勢のオフセットは把握できているため何ら問題はない。

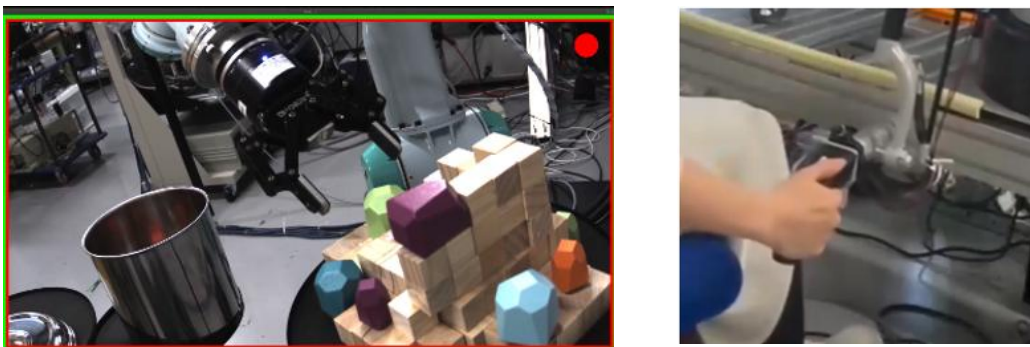


図 3.2.2-9 姿勢のインデキシングにより操作適正範囲内の姿勢で操作デバイスが拘束されている様子

③ 廃炉作業を簡易的に模したピック&プレイス作業による評価実験

以上のように、提案した手法の有効性を検証するために、令和 5 年度構築した環境内での実機実験を行った。被験者数は 3 名である。比較した手法は「従来手法」、「先行手法」、「提案手法」の 3 つであり、「従来手法」は作業アームの手先カメラからの視点以外は全て固定視点であり、作業アーム手先視点を常に主画面として操縦する場合、「先行手法」は従来手法と同様の多視点を有し、かつ、それらの視点から主画面を自由に選択できる場合、「提案手法」は従来手法では固定視点として扱ったカメラアーム先端に搭載された対向視点のカメラを自由移動視点とし、姿勢のインデキシングも導入した場合である。

図 3.2.2-10 に示すように、現在注目している画面（注目画面）をヘッドトラッカーによって選別し、画面の枠をハイライト表示する。そのときフットスイッチを踏むことで、注目画面が主画面とすることができ、画面枠が赤色に強調される。図 3.2.2-3 に示したように、操縦用コックピットには 5 台のモニターが設置されており、リモート側にある 5 つのカメラからの画像を提示可能である。図 3.2.2-11 はカメラアームを用いない「従来手法」、「先行手法」における提示画面であり、操作者から見て中央下が俯瞰視点、右手側が左固定カメラ視点、左手側が右固定視点、中央が作業アームの手先視点、中央上部が対向視点となる。図 3.2.2-12 はカメラアームを用いて自由に視点が移動できる「提案手法」における提示画面であり、中央上部の対向視点を自由移動視点に置き換えている。

「従来手法」と「先行手法」では、視覚提示は作業アームの手先カメラ以外は全て固定カメラからとなるが、図 3.2.2-11 に示したように、中央上の対向画面において作業アームの手先が積

み木で隠れてしまっているのに対し、自由移動視点を導入した「提案手法」では、図 3.2.2-12 に示したように、操作者が適切に視点を変更した結果、作業アームの手先を視認できるようになっている。

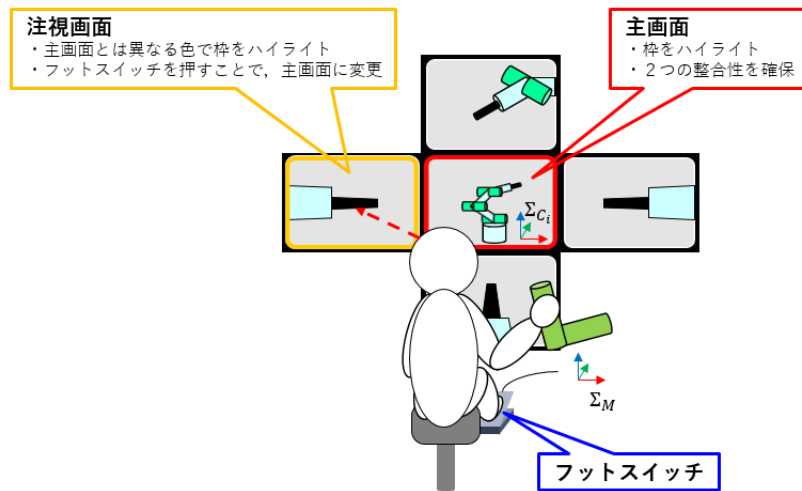


図 3.2.2-10 多視点遠隔操縦システムにおける主画面と注目画面

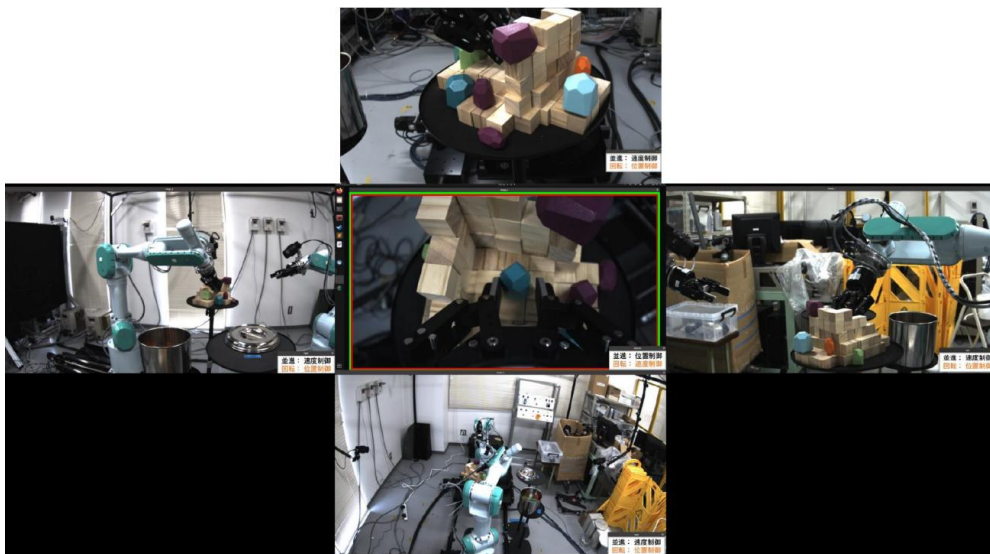


図 3.2.2-11 カメラアームがないときの操作者への提示画面

評価実験におけるタスク内容は、格納容器内での燃料デブリ取り出し作業を模擬したもので、作業アーム前方のブロックの山の中から、他のブロックに干渉しないように指定したブロックのみを作業アーム先端に取り付けた 2 指ハンドで把持し、ブロックの山からやや離れたところに置かれた回収容器内に把持したブロックを収納し、回収容器の横に置かれた容器の蓋を持ち上げ、容器に蓋をするまでとする。ブロックを把持するには、適切な視点選択による作業アームの手先位置の確認や把持対象物までの距離認識が重要となり、容器に蓋をする際には力覚フィードバックが重要となる。

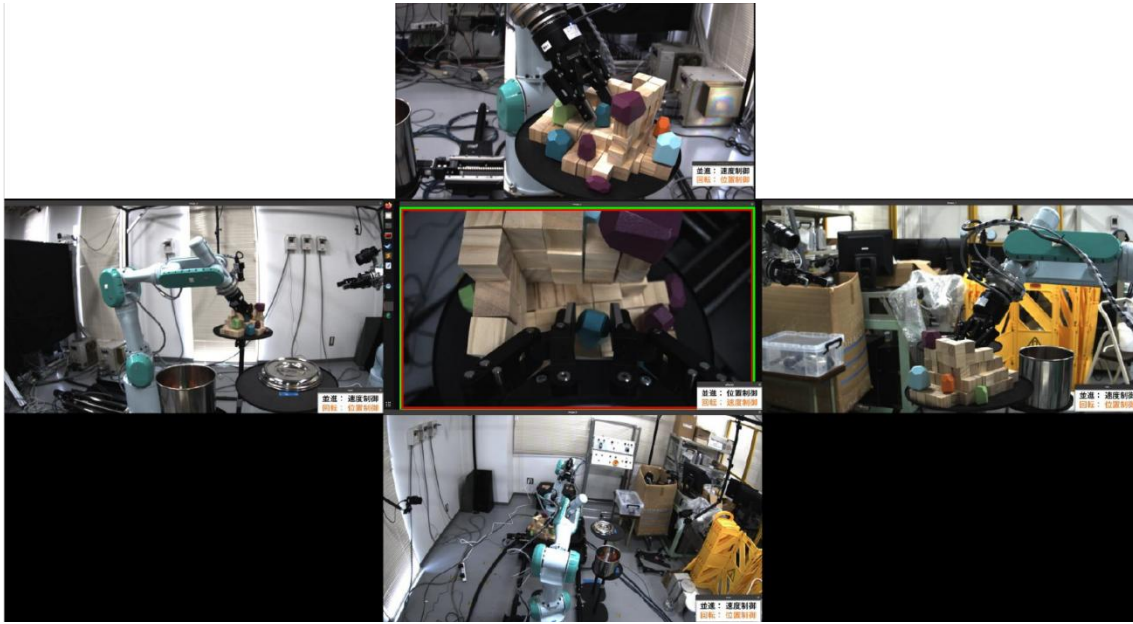


図 3.2.2-12 カメラアームがあるときの操作者への提示画面

実験では把持対象となるべきブロックは 2 か所に設置し、試行ごとに把持対象ブロックを交互に指定した。「従来手法」、「先行手法」、「提案手法」の 3 手法において、それぞれ 4 セットの試行を行った。評価項目は、タスク達成時間、作業ミス回数、操作者が主画面に選んだ視点と実際に注目している画面の一致率であり、これに加えて実験後の被験者アンケートをもとに作業性や操縦負荷を評価した。ここでの作業ミスとは、周囲環境への干渉、掴み損ね、蓋のはめ損ないを指す。

図 3.2.2-13 に各手法での 4 セットの試行の被験者ごとの平均作業時間を示す。全ての被験者において、従来手法で作業時間が短く、提案手法が最も長くなる傾向が見られた。これは提案手法では主画面の選択に加え、自由視点の変更や姿勢のインデキシング操作が追加され、操作量が増えたことによるものである。次に図 3.2.2-14 に被験者アンケートの結果を、3 名の評価の平均値で示している。直感性では先行手法と提案手法で高い評価を得た。先行手法に比べて提案手法がやや低いのは、姿勢のインデキシングにより姿勢の整合性が失われ、直感性も損なわれたと一部の被験者が回答したためである。一方、精神的負荷は従来手法が最も高く、提案手法が最も低くなっている。これは、主画面が手先カメラ映像に固定されている従来手法では、他のカメラ映像を見て操作する場合に、画面内のアームと手元の操縦デバイスとの間の整合性が失われてしまうことが原因であると考えられる。また、身体的負荷は、先行研究が最も高い結果となった。これは、先行研究においては主画面を適切に切り替えることで、常に画面内のアームと手元の操縦デバイスとの間の整合性を保って操縦ができるものの、姿勢のインデキシングが使えないので、姿勢拘束によって手元の操縦アームの姿勢は許容姿勢の範囲外で拘束される場合があり、操作者に身体的負荷を与えてしまったためと説明できる。

主画面切り替えの平均回数は、先行手法で 7 回、提案手法で 12 回となり、提案手法で増加が見られた。次に、表 3.2.2-1 に各手法での主画面と実際に操作者が見ている画面との一致率を、被験者ごとに 4 セットの試行全てから計算したものを示す。3 名の被験者においていずれも従来手法が最も一致率が低く、提案手法で最も一致率が高いという結果となった。これら 2 つの結果について考察を加える。まず従来手法は主画面が固定なので、切り替え回数は 0 回であり、

固定された主画面以外の画面を見れば一致率は下がることになるので、一致率が最も低くなるのは頷ける。一方、先行手法と提案手法の比較においては、両者とも自由に主画面は選択できるものの、先行手法では操作者が主画面として選択したい視点があっても、場合によっては姿勢の整合性を保つために操縦デバイスの姿勢が操作しづらい姿勢に拘束されてしまうことを危惧し、主画面選択が消極的になったことが示唆される。一方、拡張手先拘束と姿勢のインデキシングを導入した提案手法では、そのように操作しづらい姿勢を回避できるため、操作者は躊躇なく主画面としたい画面を主画面として選択できたのではないかとと思われる。

図 3.2.2-15 に 4 セットの試行のトータルでの作業ミス回数を被験者ごとに示す。2 名の被験者（被験者 1, 3）は従来手法や先行手法でミスがあったが、提案手法ではミスなく作業することができた。1 名（被験者 2）のみ提案手法で 2 回ミスしたが、これは視覚情報の欠如によるミスではなく、実験時間が長時間であったことによる疲労によるものであることが実験後の聞き取りからわかっている。

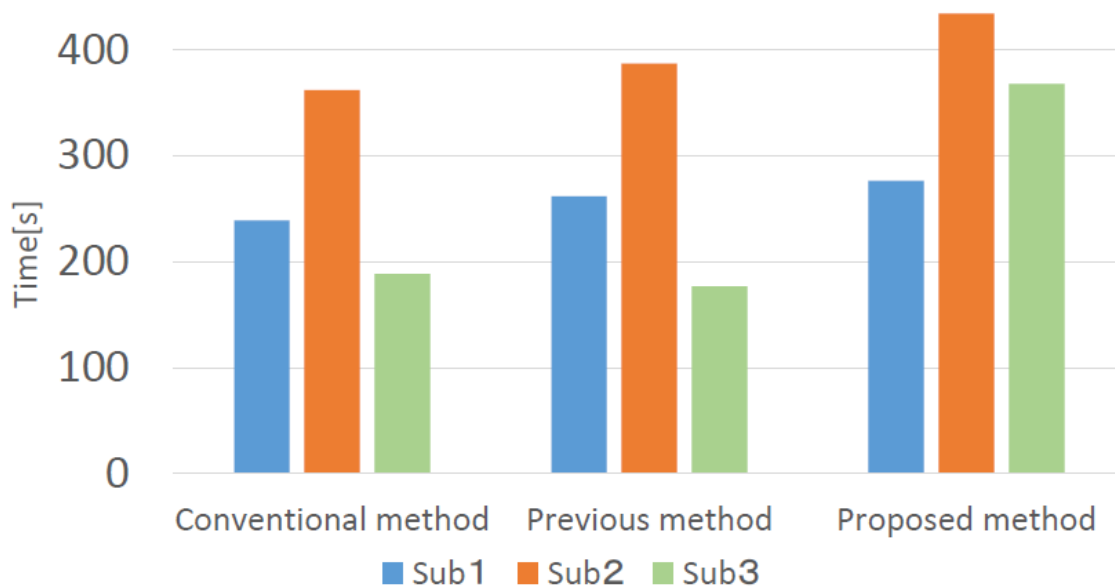


図 3.2.2-13 作業時間

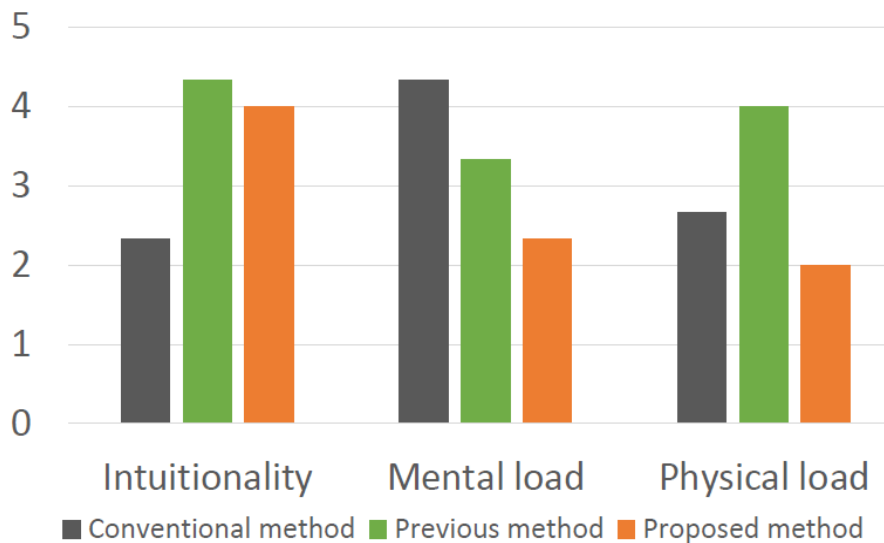


図 3.2.2-14 被験者アンケート結果

表 3.2.2-1 主画面と注目画面の一致率

	Conventional	Previous	Proposed
Sub1	65.0%	70.4%	74.5%
Sub2	51.8%	55.8%	67.4%
Sub3	19.6%	45.8%	69.1%

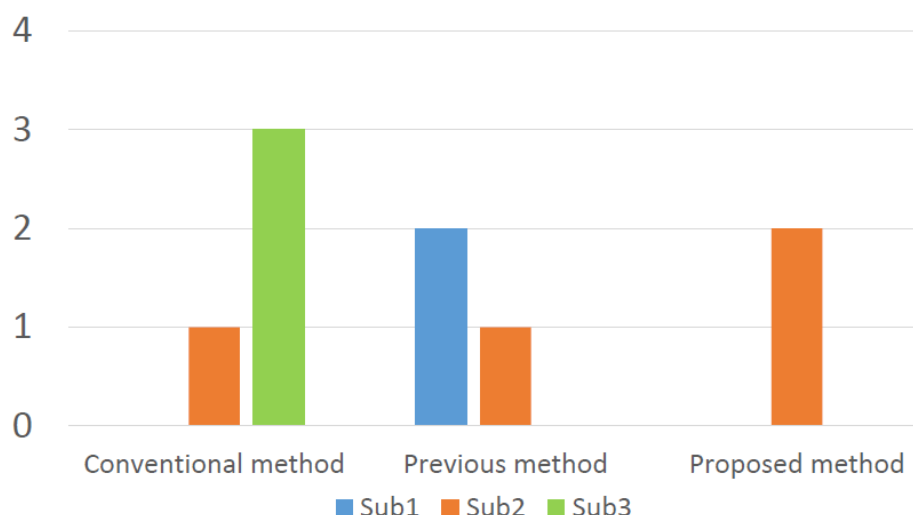


図 3.2.2-15 作業ミス回数

(3) まとめ

以上述べたように、最終年度である令和 5 年度は、複数画面を有する遠隔操縦プラットフォームの開発においては、令和 4 年度までの成果をベースとして、廃炉内モニタリングプラットフォームを想定した全方向に視点配置可能な実機環境プラットフォームを構築した。格納容器内での作業を想定した遠隔操縦方法の検討においても、令和 4 年度までの成果をベースとして多視点遠隔操縦システム上でのカメラアームの視点変更手法を実現するとともに、人間の手首操作姿勢を考慮した操作デバイスの拘束姿勢手法を拡張し、廃炉作業を簡易的に模したピック&プレイス作業による評価実験を実施した。

評価実験では、3名の被験者により、「従来手法」、「先行手法」、「提案手法」の3つの手法で比較を行い、作業時間の面では主画面の変更や姿勢拘束の変更のために提案手法のほうがより多くの時間を要する結果となったが、アンケート結果による直感性、精神的負荷、身体的負荷の面で、提案手法が最も良い結果となった。また、主画面の選択回数や主画面と注目画面の一致度でも、提案手法の有効性が確認できた。

廃炉作業では、作業の効率性よりも作業の確実性が重視されるので、操作者の精神的負荷や身体的負荷が低いこと、また作業ミスがないことが重要であると考え。今回の実験では、多くの手法を被験者に強いたため、実験時間が長時間となり、その疲労のために提案手法でも作業ミスが見られた。よって今後の課題としては、被験者数を増やすとともに、作業内容および実験手順も再考した上での、提案手法の再評価が必要であると考え。

参考文献

- [3.2.2-1] 辻廣樹, 片山雷太, 永野光, 田崎勇一, 横小路泰義, マスタ・スレーブ方式の遠隔操縦における接続の繰り返しの伴う手先姿勢誤差の修正法の提案と評価, 第37回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 2A1-01, 2019.
- [3.2.2-2] 辻廣樹, 片山雷太, 永野光, 田崎勇一, 横小路泰義, マスタ・スレーブ型遠隔操縦における複数の参照座標系に応じた直感的指令法の提案, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, 2P1-P07, オンライン開催 (2020/5/27-29) .
- [3.2.2-3] Tsuji, H., Katayama, R., Nagano, H., Tazaki, Y. and Yokokohji, Y., Primary-View-Consistent Operation Method of Master Controller in Multiple Screen Teleoperation System, Proc. 2021 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII) , pp.110-115, January 11-14, 2021, Iwaki, Fukushima, Japan, 2021.
- [3.2.2-4] 奥田珠貴, 片山雷太, 永野光, 田崎勇一, 横小路泰義, 自由移動視点を含む多視点遠隔操縦システムにおける主画面選択手法に適した操縦デバイスの制御方法, 第41回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 3C4-02, 2023.

3.3 放射線モニタリングデバイスの開発【令和元年度～令和5年度】

本研究開発課題では、モニタリングプラットフォーム上に搭載し、ガンマ線光子や中性子をモニタリング可能な放射線モニタリングデバイスの開発を実施した（図3.3-1）．特に未臨界モニターとして利用可能な高ガンマ線線量率下で利用可能な中性子検出器および ^{154}Eu 等の指標となる核種を ^{60}Co 等の存在下で認識可能なガンマ線検出器の開発を1つの目標とした．これまでの廃炉計測の開発においては、線量のみをモニターを目的とした線量計などが開発されているが、核種の弁別は不可能であった．またCdTeやCZT等の半導体検出器を用いたスペクトロスコピーシステムの研究開発も行われているが、応答速度等の問題が存在するため重い遮蔽材とともに用いられることが多い．本研究では、高速の応答を示す、数十ナノ秒程度の短い蛍光寿命を有するシンチレータ型のガンマ線、中性子検出器に着目し、小型モジュールの開発を実施した．加えて中性子検出においては、パターン識別により中性子とガンマ線の弁別性能についても検討を実施した．

また、開発した小型検出器からの信号を用いてガンマ線や中性子の分布を描画するために、放射線信号と外部装置から得られる位置信号などを同期して取得可能なデータ処理システムの研究開発を実施した．位置信号との同期を行うことで3次元のトモグラフィを行う技術を開発した．

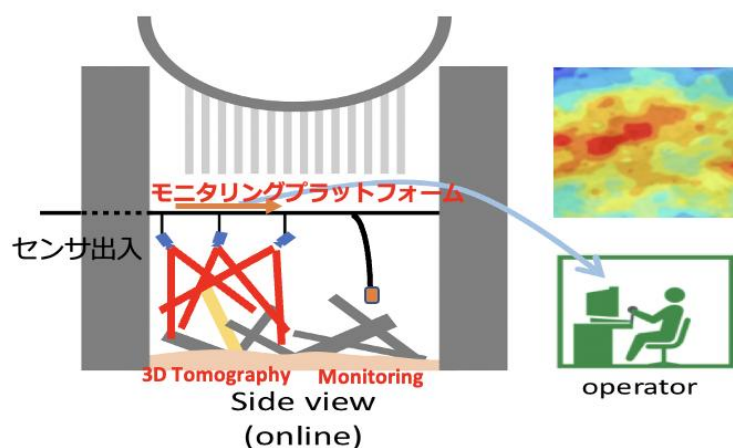


図3.3-1 放射線モニタリングデバイスの開発の利用概念図

(1) 令和4年度までの概要

令和元年度には、高速応答を行うガンマ線検出器および中性子検出器の要素開発・概念設計を実施した．小型ガンマ線検出器と光センサを接合し読出、スペクトロスコピー性能を確認した．

令和2年度には、令和元年度に設計開発した高速の応答性能を有する中性子、ガンマ線検出器を、模擬線源などを用いて光センサ、信号読み出し回路と合わせてスペクトロスコピー性能の改良を行った．また、トモグラフィ手法実装のための概念設計を実施した．

令和3年度には、3次元トモグラフィ手法を用いた試作開発品の性能試験および改良を実施した．また、模擬体系を用いたイメージングの性能試験を実施した．

令和4年度には、ガンマ線バックグラウンド下での中性子検出試験を実施した．開発システムの模擬体系を用いた3次元可視化実証試験、放射線モニタリングデバイス以外のセンサとの情報統合、連動試験を行った．

(2) 令和 5 年度実施内容および成果

最終的な放射線モニタリングデバイスおよびシステムの改良を行い、性能検証試験を実施し所望の性能が得られていることを確認した。

具体的には、高速応答型スペクトロスコープを行うことが可能なガンマ線、中性子検出用の小型センサヘッドを作製し高線量ガンマ線下でのスペクトル分離性能および中性子ピーク検出性能を確認した。

① ガンマ線・中性子検出器、システムの改良

令和 4 年度までに、数 Gy/h 程度までの線量率下での CeBr_3 を用いたガンマ線スペクトロスコープの実現および 1 Gy/h 程度までの線量率下における中性子ピークの識別とガンマ線弁別性能の確認を行った。また、SOI 型中性子センサによる、電荷付与パターンの識別による中性子イベントとガンマ線イベントの弁別を確認した。令和 5 年度はこれらのセンサの改良を継続的に実施した。具体的には CeBr_3 においては強い潮解性を有するため、パッケージング技術が重要であるが、図 3.3-2 に示すようなパッケージ技術により、年単位でも大きな性能の劣化がなく動作が可能であることがわかった。また、SOI 型中性子センサにおいては、20 cm×30 cm 程度の非常に大型の基盤から実際の現場で利用可能な小型基盤への設計変更を行い、図 3.3-2 に示すような 5 cm 角程度の小型基盤を実現した。

以上、高線量ガンマ線下でのスペクトル分離性能および中性子ピーク検出性能を確認した。



図 3.3-2 CeBr_3 ガンマ線シンチレータ検出器と SOI 型中性子センサ小型基盤

② 並列データ同期システムの開発

開発した放射線モニタリングデバイスで取得される放射線信号をモニタリングプラットフォーム上で利用するためには、外部の様々な信号との同期が必須となる。例えば、モニタリングプラットフォーム上での 3 次元の位置情報や、他の CCD や CMOS カメラからの可視光画像などと同期することが想定される。このような応用のため、本研究では様々な信号を、信号の到着時間、パルスの幅、信号チャンネル番号 (MAX:128ch) をリストモード形式で連続的に保存可能なデータ取得システムを開発した。開発した基盤は Field Programmable Gate Array (FPGA) を搭載し、FPGA 内に Time to Digital Converter (TDC) 機能を持つプログラムを開発・実装した (図 3.3-3)。これにより 100 ピコ秒以下の精度で信号の到着時間と場所を記録することが可能である。読出は Ethernet (イーサネット) 出力を有しており、LEMO コネクタを用いた同期信号入力を外部から入力することで複数台のデータ取得基盤を接続することが可能となる。図 3.3-4 には、開発した信号同期型データ取得統合基盤を用いて同期させた複数のピクセルからの信号と位置トラッキングを用いた 3 次元画像の再構成プログラムを用いた可視化の例を示している。本システムの

開発により，単純にトリガー等のデジタル信号を本基盤に入力することで複数システムの同期が可能となった．



図 3.3-3 FPGA を用いた信号同期型データ取得統合システムの開発

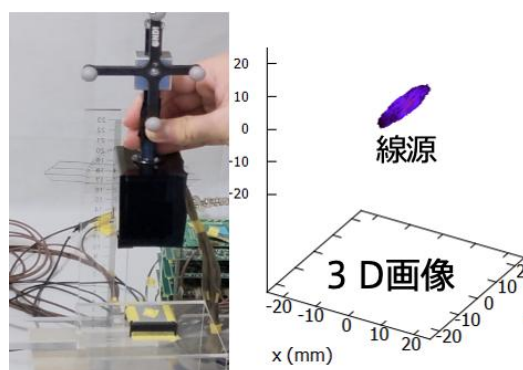


図 3.3-4 位置プローブとの情報統合の例

以上により，本研究においては廃炉モニタリングプラットフォーム上で利用可能なガンマ線・中性子小型プローブの開発を実施し，高線量下で動作可能なシンチレータ型ガンマ線スペクトロスコープシステム，シンチレータ型中性子検出システム，半導体パターン識別型中性子検出システムを実装した．また，外部信号との統合情報データ取得システムを開発し，位置情報との同期，統合を行うことで3次元画像，トモグラフィ画像の取得を実施した．

3.4 炉内環境把握のための環境モデル立体復元手法の研究開発（連携先：原子力機構）

【令和元年度～令和5年度】

(1) 令和4年度までの概要

令和元年度は、福島第一原発で撮像された画像データを分析し、立体復元計算に有用な画像特徴量抽出に関する研究開発および画像処理に基づいて、立体復元計算に有効な画像を選定するための手法開発の基盤となる画像解析のテストデータ取得を目的として画像を作成した。

令和2年度は、画像群から立体復元処理により生成された環境モデル上の欠落部分を抽出、補完のためのカメラ位置を推定する手法の研究開発を行うとともに、立体復元計算に有効な画像を自動的に選定する条件の抽出、設定についても調査およびその検証を行った。また、実験環境整備のために、プラットフォーム開発を行うグループより情報を得て基礎的な設計開発を行った。

令和3年度は、令和2年度までに研究開発を行った立体復元手法の研究開発を継続して行い、画像移動量に対する閾値処理に基づいた、立体復元計算に寄与する画像選択する手法の研究とともに、開発手法による立体復元処理を適用する画像の収集・管理を行うためのシステムの設計および開発に着手した。また、具体的な検証実験等を行うための模擬実験環境の整備および動作検証実験を行った。

令和4年度は、令和3年度までに研究開発を行ってきた立体復元手法に関わる技術として、重複画像や似かよった画像等の立体復元計算に寄与しない画像を、選択的に除外する手法について研究開発の実施および複数の局所復元環境モデルを統合する手法の研究開発を行った。さらに、画像収集・管理システムの改良、拡張を行い、カメラ画像の取得、立体復元計算処理のプロセスを逐次的に実行するプロトタイプを開発した。また、並行して進められているプラットフォームの開発状況を反映させて模擬実験環境の改良、拡張を行い、検証実験を実施した。

(2) 令和5年度実施内容および成果

令和5年度は、令和4年度までに研究を行った画像からの立体復元手法に関する手法の研究開発を継続して行うとともに、開発してきた手法やシステムを統合し、模擬実験環境において環境モデル生成の検証実験を行った。実験では、軌道上を移動するカメラによって収集された画像群に基づいて、環境モデルを生成するシステムを構築した。構築したシステムを模擬実験環境において、並行して開発が進められているモニタリングプラットフォームと統合して、プラットフォーム上を移動する観察ロボットに搭載したカメラからの画像取得から立体復元計算処理までを、自動的に行う実験を行った。以下にそれぞれの実施内容、結果について述べる。

画像からの立体復元手法の研究課題では、令和4年度に続いて複数の局所的な環境モデルを統合するための手法について開発を実施した。提案手法は、図3.4-1に示すような分割統治の考え方に基づいて、複数の局所な撮像区間から Structure from Motion (SfM) と Multi-View Stereo (MVS) による、立体復元処理で得られる局所復元モデル（密な点群）を相互に統合することで全体を表現する密な点群を獲得するものである。令和4年度では、仮想実験環境内に復元対象物モデルおよび2次元コード（具体的には、QRコード）を復元対象物モデル上に配置して、撮影シミュレーションを行うことで得られた仮想画像から生成された局所復元モデルに対して、QRコードを手がかりにマニュアルにて統合することで、全体モデルが精度高く得られることを確認した。これをうけて令和5年度は、QRコードに基づいて複数の局所復元モデルを自動で統合する手法について開発を行った。開発した手法を実画像に適用し、統合手法の有効性を検証した。

ここで、局所復元モデルを表現する密な点群を自動的に統合するために、以下の統合計算シーケンスを設定した。

1. SfM で得られたパラメータに基づいて、ゆがみ補正を行った画像から QR コードを検出
2. SfM で推定された回転移動行列を用いて、検出できた画像のピクセルと獲得した 3 次元復元点群の対応付け
3. 検出できた画像から QR コードのマーカー点を抽出
4. 処理 3 で求めたマーカー点に対応する 3 次元復元点の座標を獲得
5. 検出できた画像に対応付けされた 3 次元復元点の中で、最も QR コードの正方形の形を構成している点群を抽出
6. 処理 5 で求めた点群距離と設置した QR コードの大きさに基づいて、局所復元モデルを実サイズにスケーリング
7. 各局所復元モデルにおける移動回転行列に基づいて、スケーリングした局所復元モデルの統合

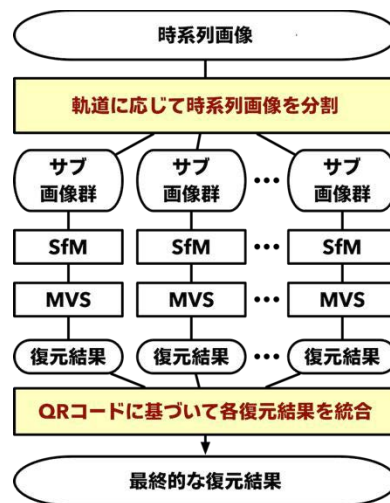


図 3.4-1 分割統治法の考えに基づいた局所立体復元結果統合

続いて、実空間での検証として復元対象環境内に QR コードを設置した条件で撮影を行った画像に対して、前述の統合計算シーケンスを適用する実験を行った。図 3.4-2 は検証実験で設定した木製の復元対象物と復元対象物の中央に設置した QR コードを示す。また、撮影のためのカメラ軌道は図 3.4-3 に示すように、ルール上で右回りに一周しながら復元対象物を撮影するものとした。本検証では、図 3.4-3 で示した QR コードを設置した復元対象物の周辺に周回撮影軌道を設置した。軌道はスタート地点から前半部の軌道 A と後半部の軌道 B に分割され、それぞれの軌道部において得られた時系列画像に対して SfM-MVS を適用して局所復元モデルを生成し、統合した。評価は、生成した 2 つの局所復元モデルが、統合された全体復元モデルと周回移動によって得られた全画像を適用して生成された全体モデルを用いて、後者に対する前者の復元精度および復元計算時間を比較することで行った。

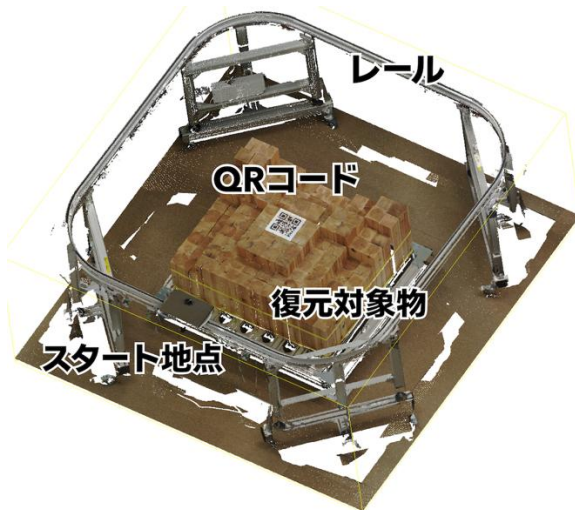
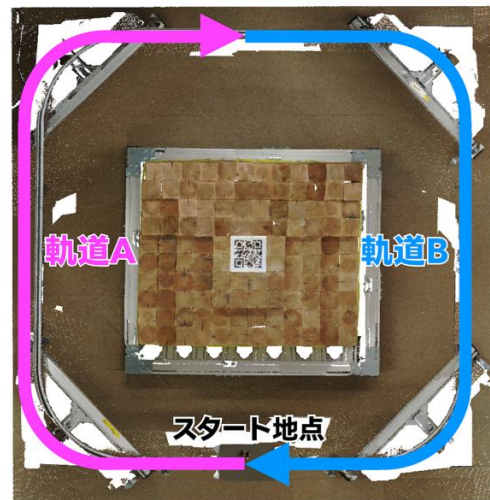


図 3.4-2 復元対象環境と QR コード

図 3.4-3 撮影軌道および
QR コードに応じた軌道分割

検証実験では GoPro HERO9 Black を用いて解像度を 1920 px × 1080 px と設定して撮影を行った。カメラの撮影角度 θ は図 3.4-4 に示すように $\theta = 30$ 度, 45 度, 60 度, の 3 種類を用意して動画を撮影し, 撮影動画一周 40.2 秒から 0.1 秒ごとに画像を抽出した。

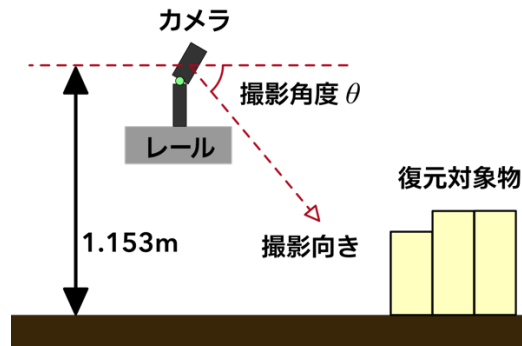


図 3.4-4 撮影条件

本検証実験では, COLMAP[3.4-1]による SfM 処理と OpenMVS[3.4-2]による組み合わせを SfM-MVS 処理として適用した。ここで, 図 3.4-5 は軌道 A, 軌道 B で分割された時系列画像から獲得した局所復元モデルを示す。これらの結果から, それぞれの軌道において QR コードを含む対象物の局所復元モデルが生成されていることが確認できる。また, 図 3.4-6 は開発手法によって QR コードのパターンを手がかりに, 局所復元モデルが統合された結果を示している。この結果から復元対象全体を表現する密な点群が合成できていることがわかる。



(a) 軌道 A における局所復元モデル



(B) 軌道 B における局所復元モデル

図 3.4-5 SfM-MVS で獲得した高密度点群結果



図 3.4-6 QR コード特徴に基づいて得られた統合モデル

さらに、統合して得られた密な点群（統合モデル）の精度を定量的に評価するために、3D レーザースキャナ Focus Laser Scanner S350 によって取得した復元対象物を点群化したデータをリファレンスとし、開発手法により得られた統合モデルとの比較を行った。比較には、リファレンスデータと統合モデル間で Iterative Closest Point (ICP) アルゴリズム[3.4-3]によるマッチング処理を行った後に、データ間の差異およびずれ量に基づいて立体復元結果の精度を算出した。ここで参考のために、前述の周回軌道を移動中に撮影された全画像から生成した密な点群（非統合モデル）についても、上記リファレンスデータと比較を行った。精度を見るためにリファレンスデータを構成する各点に対し、統合モデルおよび非統合モデルを構成する点群の中で最も距離が近い点を求め、その 2 点の距離が最大許容量の範囲内で納まっている点群数の比率を適合率として評価する。図 3.4-7 は、SfM-MVS 処理による復元精度の最大許容量 6 パターン（5 mm, 10 mm, 20 mm, 30 mm, 40 mm, 50 mm）に対する適合率を示している。

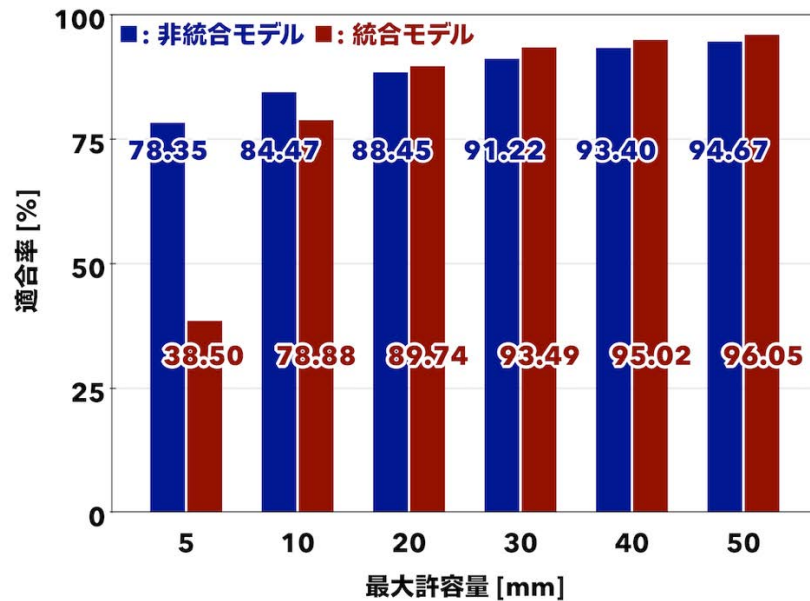


図 3.4-7 各最大許容量に対する適合率

この結果から、最大許容量が 20 mm 以上の場合、分割統治法に基づいて撮影軌道に応じて時系列画像を分割し、QR コードに基づいて局所復元結果を統合することで、全画像に対して得られた非統合モデルと同等の精度を持つ結果が得られることを確認できる。また、最大許容量が 5 mm の場合、非統合モデルと比較して著しく精度が下がることが明らかになった。さらに、最大許容量が 10 mm 以上と設定することができれば有効であると言える。次に、最終的な結果が得られるまでの計算時間を図 3.4-8 に示す。今回の検証実験の場合、本提案手法は非統合モデルと比較して、最終的な復元結果を得るために要する計算時間が、約 33.8%減少することがわかる。

一般的に SfM-MVS による立体復元は、画像枚数に対して画像間の特徴量を計算するため、復元に要する計算時間が指数関数的に増加する傾向にある。本提案手法は QR コードのような画像処理で、特徴量を抽出しやすい視覚的パターンを持つものを復元対象環境に配置し、これを含んで時系列画像を撮影することができれば、時系列画像を分割して統合することで、一定の精度を維持しつつ復元時間を減少することが可能になる。このことから、復元対象物や作業環境内に特徴量を抽出しやすい視覚パターンを配置するアプローチは、立体復元を効果的に行うための有効な手段となりうることがわかった。さらに言えば、QR コード自体に情報そのものを埋め込むことができ、本提案手法のような SfM-MVS の時短化に利用するだけでなく、ロボットのナビゲーションなどの様々な手法に応用可能であるため、QR コードを廃炉現場に設置することで廃炉計画を進める手段になる可能性を持つと考える。

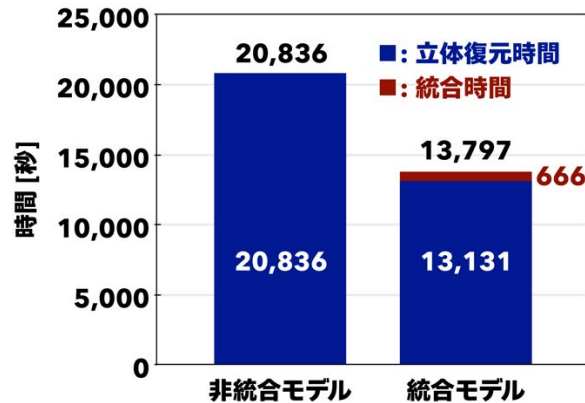


図 3. 4-8 最終的な復元結果を獲得できるまでの計算時間

また、画像からの立体復元手法の研究課題において、これまでに立体復元に寄与する画像を選択することで立体復元処理を効率化する手法の研究開発にも取り組んできた。令和 5 年度はさらなる効率化を行うために、令和 4 年度までに開発した画像選択手法において、計算負荷のかかるプロセスについて計算アルゴリズムの見直しを行い、高速化に取り組んだ。

これまでの研究開発では、画像選択手法[3. 4-4]の導入により、重複画像や類似画像等の立体復元計算に寄与しない画像を選択的に除外することにより、計算時間を短縮することを実験的に示してきた。一方で、立体復元計算において画像選択プロセスが、処理時間の大部分を占めることも明らかになり[3. 4-4][3. 4-5]、これを短縮することができれば、より効率的な立体復元計算を実現できる可能性がある。そこで、令和 5 年度は画像選択プロセスの計算時間低減を目的として、より高速な処理が可能な画像選択アルゴリズムの導入を試みた。前述のように、これまで開発してきた画像選択アルゴリズムにおいて時間がかかるプロセスは、オプティカルフロー（画像間の見かけの移動量）の計算となっている。これまでは、オプティカルフローの計算にブロックマッチング法を用いていたが、コンピュータビジョンのライブラリである OpenCV[3. 4-6]を用いて、ブロックマッチング法として実装していたアルゴリズムは、プログラム開発言語としては既に開発が終了している python2 系でのみ実行可能な状態で、ソースコードの最適化阻害要因であった。そこで今回、ブロックマッチング法の代替として、テンプレートマッチングをベースにしたアルゴリズムへ変更して python3 系で実装することとし、ソースコードの最適化を行った。ブロックマッチング法では、基準画像と比較画像のペアからオプティカルフローを計算していたが、新規アルゴリズムでも同様に、基準画像と比較画像の 2 枚の入力画像を用いる。ブロックマッチング法の基本ブロック（参照範囲）は、テンプレート画像として基準画像からトリミングして抽出し、その基本ブロック周辺の探索範囲は比較画像からトリミングした部分を用いて代替した。そして、オプティカルフロー計算には、テンプレートマッチングにより検出された類似度が最も高い点（比較画像の座標）とテンプレート画像の中心（基準画像の座標）をつなぐことで計算を行った。さらに、テンプレート画像のトリミング範囲をシフトすることで、基本ブロックの座標シフトを再現した。具体的なアルゴリズムの実装形式は、これまでブロックマッチング法として OpenCV1.0（2.4.11 のレガシーコード）で実装されていた関数 `cv.CalcOpticalFlowBM()` [3. 4-7]を用いていたもの（BM アルゴリズム）から、OpenCV4.1.1 の関数 `cv2.matchTemplate()` [3. 4-8]によるテンプレートマッチングをベースにしたアルゴリズム（TM アルゴリズム）に実装形式を変更した。また、BM アルゴリズムではブロックマッチングの関数内で処理されていた基本ブロックの初期位置や座標シフトの回数を計算する部分は、テンプレートマッチングの関数には実装されていないため、TM アルゴリズムでは入力画像の解像度と指定されたシフトサイズ等のパラメータか

らオプティカルフローの計算に必要な基本ブロックの初期位置や座標シフトの回数を求める部分を別途追加した。その際、ブロックマッチング法の探索が画像端から開始されることで、座標シフトと画像解像度の関係から画像中の未計算領域に偏りが生じていたため、TM アルゴリズムではこの偏りを解消することを目的として、未計算領域を上下端、左右端に均等に配置するようにした。

性能検証を行うために、画像選択プロセスにおける計算時間について TM アルゴリズムと BM アルゴリズムとの比較を行った。計算条件として、ブロックサイズを 180 px × 180 px、シフトサイズを 270 px、探索範囲を ±100 px、画像選択の閾値を 30 px, 60 px, 90 px と設定した。また、テンプレートマッチングの類似度の計算には正規化相互相関法を採用した。それぞれのアルゴリズムの実装に用いた python のバージョン等を表 3.4-1 に示す。

表 3.4-1 BM アルゴリズムと TM アルゴリズムの比較

	Python バージョン	OpenCV バージョン	OpenCV 使用関数
BM アルゴリズム	2.7.18	1.0 (2.4.11)	cv.CalcOpticalFlowBM()
TM アルゴリズム	3.7.8	4.1.1	cv2.matchTemplate()

画像選択プロセスの計算には、Apple MacBook Pro (CPU: Corei9 (2.4 GHz, 8-core), Memory: 64 GB RAM (2,667 MHz, DDR4), macOS 12.7.1) を用いた。画像選択の対象として、檜葉遠隔技術開発センター試験棟の南側壁面 (図 3.4-9) を撮影した動画を使用した。動画の撮影には、アクションカメラ (GoPro 製 HERO5 Black, 1,920 px × 1,080 px, 30 fps) を使用し、クローラ型ロボット (iXs 製, iTs08) に搭載した。アクションカメラはロボットの進行方向に対して垂直となるようにロボット上面に設置した。ロボットは遠隔操作により、壁面に沿って水道管の支持金具の位置からダクトまでほぼ平行に移動させた。撮影時間は約 30 秒で取得した画像は 901 枚となった。



図 3.4-9 撮影された画像の一例

画像選択アルゴリズムを新規実装した結果を以下に示す。

表 3.4-2 TM アルゴリズムと BM アルゴリズムの実行結果

	画像選択 閾値 [px]	選択画像 枚数 [枚]	画像平均抽出 間隔 [枚]	処理速度 [s/回]	合計計算 時間 [s]
BM アルゴリズム	30	48	18.9	5.821	5518.414
	60	26	35.3	6.531	6047.901
	90	19	53.1	7.199	6601.710
TM アルゴリズム	30	49	18.4	0.064	60.271
	60	25	36.7	0.053	49.106
	90	17	53.8	0.053	48.747

表 3.4-2 より TM アルゴリズムによって選択された画像枚数は、BM アルゴリズムと同程度であることが確認できる。図 3.4-10 に画像選択アルゴリズムによる画像選択閾値ごとに抽出された画像をプロットしたものを示す。取得した画像（901枚）に対して画像IDを0～900と割り振り、横軸とした。TM アルゴリズムによって抽出された画像は、BM アルゴリズムにより抽出されたものと比べると抽出位置が若干ずれているものの、表 3.4-2 の画像平均抽出間隔と合わせて考えると、ほぼ同程度の間隔で抽出されていると言える。この画像抽出位置のずれは、オプティカルフローを求めるための画像間の類似度の計算方法および画像中の未計算領域の配分に伴う探索範囲の違いに起因しているものと考えられる。ここで、図 3.4-11 は各アルゴリズムを適用した SfM 処理による復元結果を示している。復元された点群数は、それぞれ約 9,000 点と同程度になっており、水道管および水道管支持金具やダクト、壁の一部が復元されていることがそれぞれ確認できる。このことから TM アルゴリズムによる復元結果は、BM アルゴリズムによるものと比較して遜色なく復元されていると言える。また、表 3.4-2 から画像選択プロセス 1 回当たりの処理時間は約 0.06 秒と BM アルゴリズムの約 6.5 秒から大幅に改善した。この改善の結果、TM アルゴリズムの画像選択プロセス全体の計算時間は、BM アルゴリズムの約 1%まで低減できた（図 3.4-12）。BM アルゴリズムは画像選択閾値の増加に伴って合計計算時間が増加する傾向が見られるが、TM アルゴリズムの合計計算時間は漸減する傾向が見られる。これは、BM アルゴリズムと TM アルゴリズムの類似度の計算部分の差異によって生じていると考えられる。これらの結果から、TM アルゴリズムの導入によって画像選択プロセスがより高速に実施可能となることが確認できた。

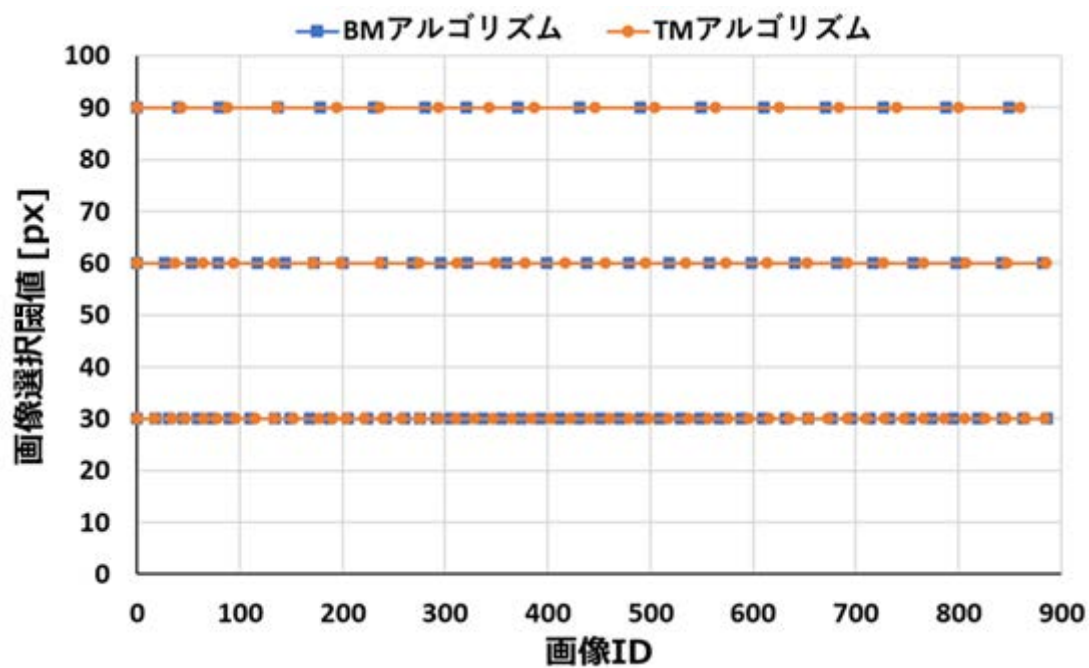
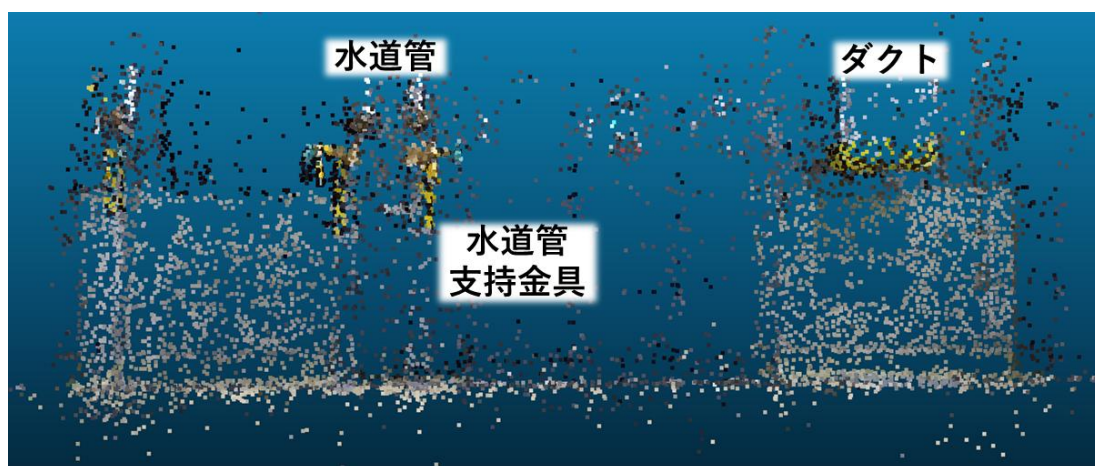
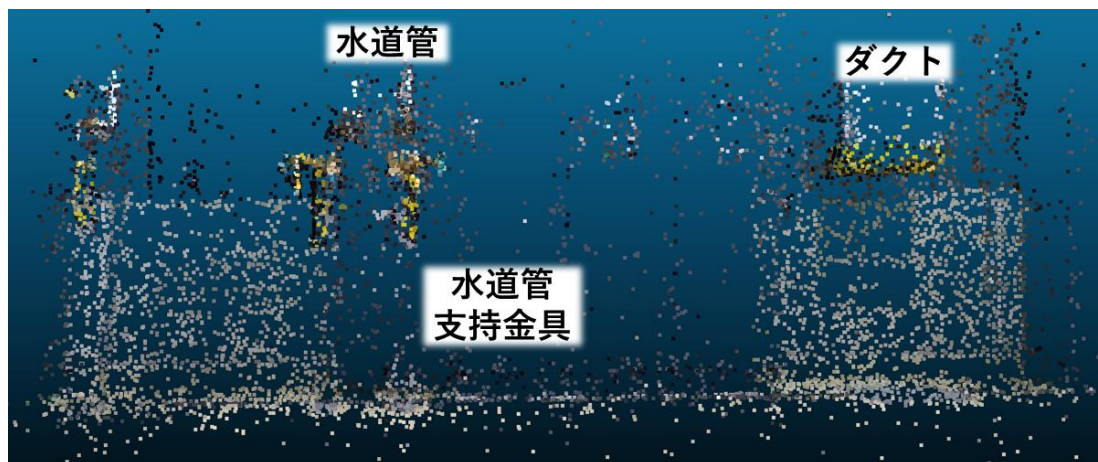


図 3.4-10 画像選択アルゴリズムによる画像抽出



(a) BM アルゴリズム (復元点数:9,254)



(b) TM アルゴリズム (復元点数:8,916)

図 3.4-11 復元結果の一例 (画像選択閾値:60 px)

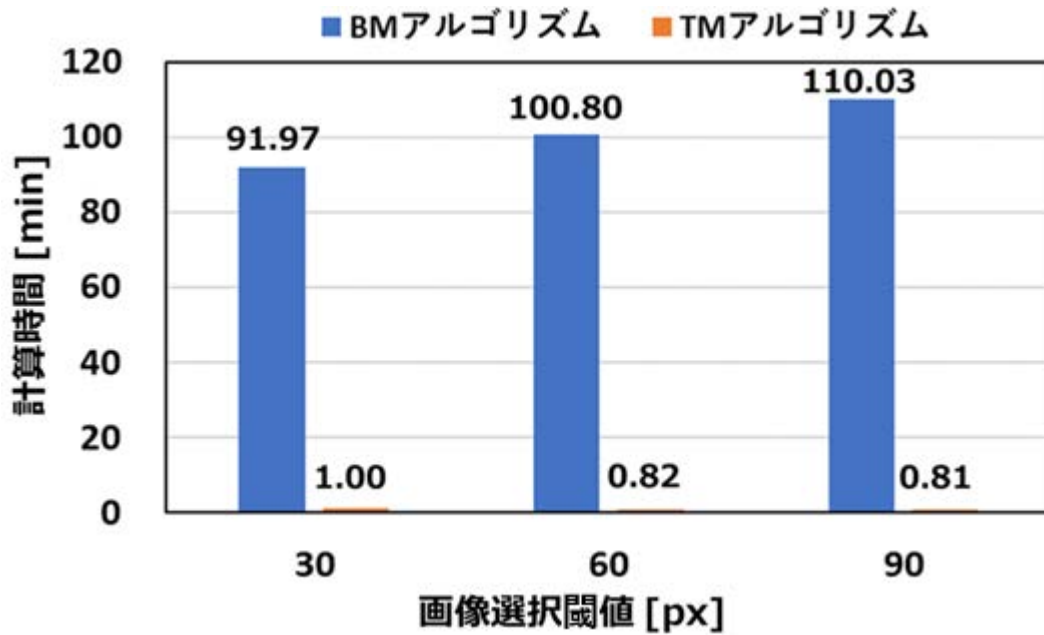


図 3. 4-12 画像選択アルゴリズムの計算時間

さらに、令和 4 年度までに開発を行ってきた画像移動量に対する閾値処理により、立体復元計算に寄与する画像を選択する手法[3. 4-4]（以下、「閾値処理選択法」と略す.）が組み込まれた画像収集・管理システム[3. 4-9]（以下、「従来システム」と略す.）の拡張および改良について述べる。令和 4 年度に行われたペDESTAL模擬実験環境内における従来システムの動作確認実験では、カメラと計算機間の無線による通信距離が長くなるにつれ、カメラから計算機に対して画像が伝送されないもしくは伝送された画像にブロックノイズが生じる状況があった。この状況により立体復元に寄与する画像が取得できず、従来システムによる取得画像からの環境モデルの生成を確認することができなかった。そこで、カメラと計算機間の無線通信における通信品質を安定化するために、カメラ、計算機間の無線通信に中継器を導入した。図 3. 4-13 は中継器を導入した際の画像収集・管理システム（以下、「開発システム」と略す.）の構成を示している。

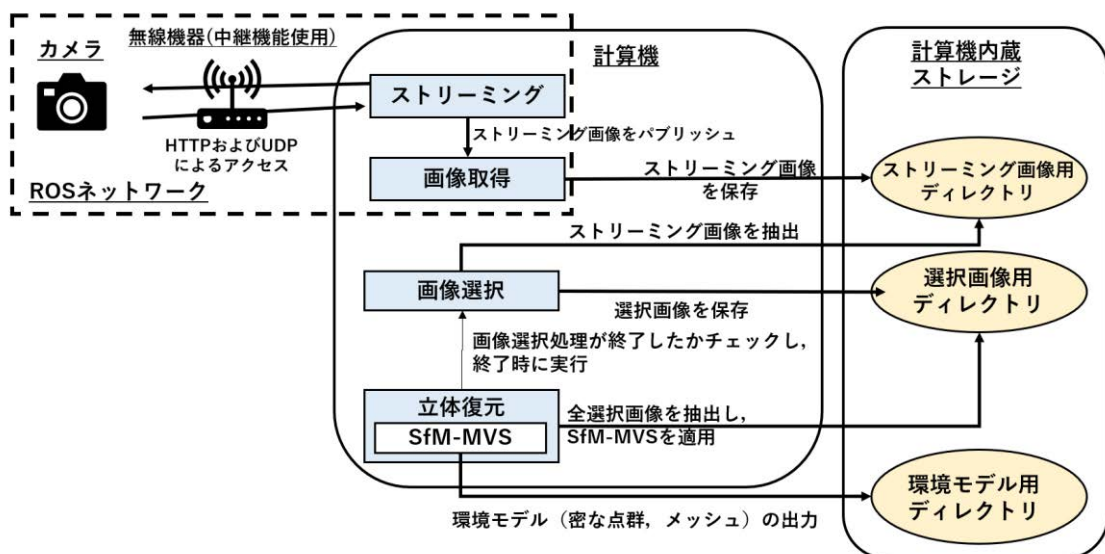


図 3. 4-13 開発システムの構成

ここで、開発システムを構成する基本的なハードウェアは、画像取得用カメラ、収集された画像の保存・管理を行うストレージおよび立体復元計算を行う計算機である。表 3.4-3 は開発システムのハードウェア構成を示している。開発システムの基本的な構成および動作確認については、本プロジェクトの令和 4 年度の報告書[3.4-10]において報告している。画像取得に関しては Robot Operating System (ROS) [3.4-11]を使用している。令和 4 年度と同様に画像からの立体復元として SfM-MVS を適用するために、OpenSfM[3.4-12]と OpenMVS[3.4-2]を開発システムに導入している。また、画像選択処理には、前述のソフトウェアの改良により高速化された閾値処理選択法が導入されている。

表 3.4-3 開発システムのハードウェア構成

ハードウェア	品名・型式
カメラ	GoPro HERO9 Black(ストリーミングレート: 15 fps, 解像度: 640 px × 480 px)
計算機	Intel Xeon Gold 5222 CPU 4 cores (3.8 GHz) × 2, RAM 96 GB, OS Ubuntu LTS 20.04
ストレージ	内蔵 HDD/SATA 接続 1 TB
無線 LAN 機器	ROG Rapture GT-AX11000

さらに、令和 3 年度に開発を行ったペDESTAL模擬実験環境内に、東京大学において研究開発が実施されているモニタリングプラットフォームである PCV 内部観察用軌道構造体（以下、「軌道構造体」と略す。）を展開し、軌道上に GoPro HERO9 Black を搭載した観察ロボットを走行させ、カメラによる画像取得から立体復元計算処理までを自動的に行う開発システムの動作検証実験を行った。実験では、軌道構造体の根元部分に観察ロボットが設置された後に開発システムを手動で稼働させた。画像取得開始時に XBee（無線モジュール）を用いた無線通信により送信された制御信号をもとに観察ロボットが走行を開始し、軌道構造体の根本部分から先端まで観察ロボットが移動した後停止させた。図 3.4-14、図 3.4-15 は軌道構造体上を走行する観察ロボットによる画像収集の様子および収集された画像の一部である。開発システムに中継器を導入したことにより、従来システムにおける無線通信の問題が解決され、カメラおよび計算機間の画像伝送が行われることを確認できた。

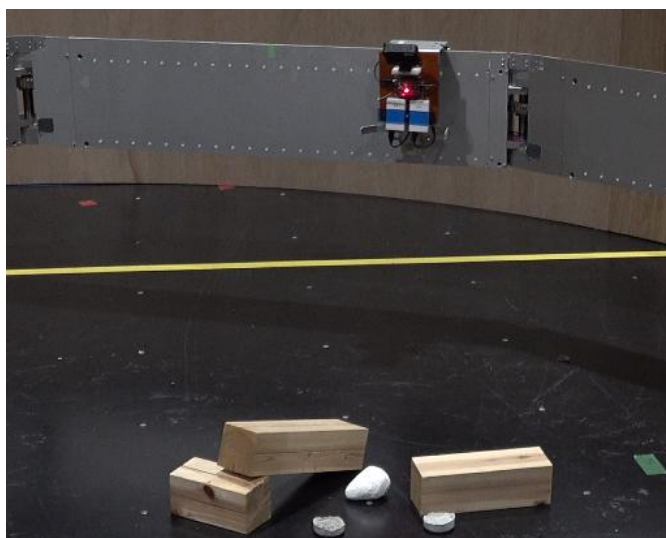


図 3.4-14 模擬環境を用いた動作検証実験における画像収集の様子



(a) 視点 1



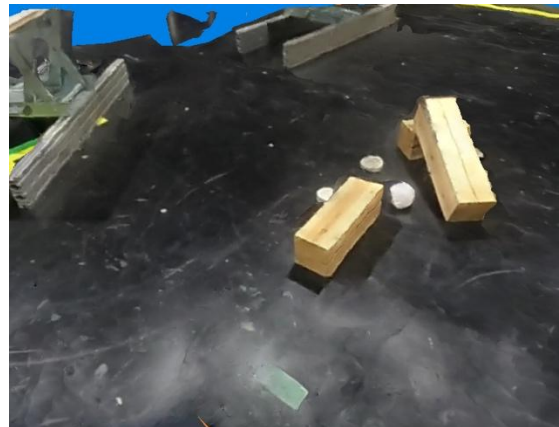
(b) 視点 2

図 3.4-15 動作検証実験にて観察ロボットから収集された画像

この実験の場合、カメラから収集された画像は 322 枚であり、これに対して閾値処理選択法を適用することで 264 枚の画像が抽出されて立体復元計算の入力になった。図 3.4-16 は、閾値処理選択法により得られた 264 枚の画像から生成された環境モデル（密な点群およびメッシュ）を図 3.4-15 の視点 1 から俯瞰したものである。開発システムの実行から画像選択終了までの時間は約 1 分、密な点群生成までの時間は約 20 分、メッシュ提示までの時間は約 24 分であった。これらの結果から、軌道構造体と我々が開発した開発システムを連携することにより、軌道上を走行する観察ロボットに搭載されたカメラからの画像取得、画像選択、立体復元モデリングの一連の処理を逐次的に行うことで環境モデルを計算機モニター上に提示することが確認できた。



(a) 密な点群

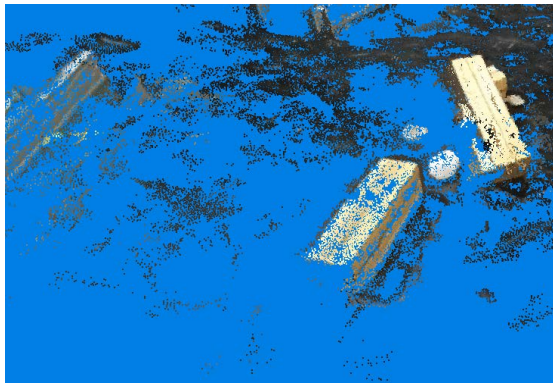


(b) メッシュ

図 3.4-16 閾値処理選択法により得られた環境モデル

続いて、令和 4 年度開発した多峰性検定に基づいた画像選択手法[3.4-5]（以下、「多峰性検定選択法」と略す.）を開発システムへの適用について試みた。具体的には、前述の開発システム内の画像選択処理に実装されているしきい値処理選択法から多峰性検定選択法へ変更した。多峰性検定選択法は、ブロックマッチング法に基づいて計算された画像間のオプティカルフロー長さの分布（ヒストグラム）が多峰性であるかを多峰性検定により検知し、環境モデルの生成に寄与する画像として多峰性検定により検知された画像を選択する。画像間の移動量に対して統計的処理が適用される多峰性検定選択法は、閾値処理選択法のように閾値の事前設定を必要と

せず、よりパラメータに依存しない画像選択を行うことが可能であることが実験によりわかっている。前述した閾値処理選択法の高速化に用いられたテンプレートマッチングは、多峰性検定選択法に実装することが可能である。開発システムに多峰性検定選択法を導入した効果を検証するために、前段落の動作検証実験時に得られた rosbag ファイル形式のデータを用いてオンライン処理を模擬した実験を行った。rosbag は ROS システム内に流れるトピックおよびその取得頻度を保存する ROS の機能の一つであり、rosbag ファイルが得られたときと同じ画像取得頻度を再現することが可能となる。多峰性検定選択法によって、前述の実験でも用いた 322 枚の画像から 34 枚が抽出されて立体復元計算の入力になった。そのうち 18 枚の画像が、SfM によって撮像姿勢が推定され MVS の入力になった。図 3.4-17 は、多峰性検定選択法により選択された 34 枚の画像から復元された密な点群およびメッシュを図 3.4-15 の視点 1 から俯瞰したものである。開発システムの実行から、画像選択終了までの時間は約 22 分、密な点群生成までの時間は約 23 分、メッシュ提示までの時間は約 24 分であった。この結果から、多峰性検定選択法が導入された開発システムは前述の実験と同様に、開発システムが自動的に動作し、環境モデルが生成および提示されることが確認された。



(a) 密な 3 次元点群



(b) メッシュ

図 3.4-17 多峰性検定選択法により得られた復元モデル

開発システムおよび軌道構造体を用いた上記の動作検証実験により、従来システムにおける無線通信の問題を解決し、開発システムが取得画像から環境モデルを生成できることが確認された。また、高速化された閾値処理選択法または多峰性検定選択法を開発システムに導入した場合、カメラからの取得画像枚数が画像選択処理により削減され、立体復元計算処理にかかる計算時間を削減する効果が得られることも確認された。さらに、2 つの画像選択法には、選択される画像枚数を調節可能なパラメータとして、閾値、テンプレートマッチングに用いられるブロックサイズ等が存在している。しかしながら、2 つの画像選択法を導入する際に生成される環境モデルの品質、画像選択処理および立体復元計算処理にかかる時間におけるトレードオフを考慮した画像選択法内部のパラメータの調節が必要となる。そこで、開発システムを利用することにより、rosbag を利用した実験を反復的に行うことが可能となり、これまでに開発した手法内のパラメータの調節による計算時間および環境モデルの品質への影響を容易に検証できることが期待される。

(3) まとめ

令和 5 年度の研究では、令和 4 年度までに研究を行った画像からの立体復元手法に関する手法の研究開発を継続した。また、これまでの開発手法やシステムを統合したプロトタイプを構成し、模擬実験環境においてオンラインで環境モデルの生成の検証実験を行った。具体的には、2 次元コードを対象環境に設置することで、局所復元モデルの統合による立体復元計算処理の効率向上やスケール復元も含む立体復元が可能になることを示した。また、画像選択手法の実装方式を改良することで選択計算処理の高速化を行った。さらに、画像移動量に対する閾値処理により立体復元計算に寄与する画像を選択する閾値処理選択法を、令和 4 年度開発した画像収集・管理システムのプロトタイプに実装した。このシステムを用いて行った模擬環境での検証実験では、並行して開発が進められた軌道構造体上を移動するカメラによって収集された画像群に基づいて環境モデルの生成が可能であることを示した。検証実験は原子力機構櫛葉遠隔技術開発センターにおいて行われた。

続いて、今後検討していくべきいくつかの点について述べる。オンデマンドで環境モデルの立体復元を行うためには、立体復元計算のさらなる高速化が必要になる。この点については、より性能の高い計算機を用いるアプローチを行いつつ、プログラム実装形式として計算処理の並列化についても検討をすることが考えられる。また、カメラから取得画像を立体復元用計算機への転送に一般的な無線通信が用いられているが、通信の信頼性確保かつケーブルマネジメントの観点から、有線ケーブルから電波を漏洩させ、局所的な無線ネットワーク環境を提供する漏洩同軸ケーブル等を軌道構造体に沿わせことによる、通信環境の構築についての検討が考えられる。さらに、シミュレーション技術を活用して環境モデル上を補完するために必要な画像取得位置や軌道等について推定し、実環境での画像取得戦略を立案することも考えられる。

参考文献

- [3.4-1] Schönberger, J.L. and Frahm, J.M., Structure-from-Motion Revisited,
In Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition,
2016, pp.4104-4113.
- [3.4-2] Cernea, D., OpenMVS: Multi-View Stereo Reconstruction Library,
<https://github.com/cdcseacave/openMVS> (参照：令和 6 年 1 月 29 日)。
- [3.4-3] Besl, P.J. and McKay, N.D., Method for registration of 3-D shapes, In Sensor
fusion IV: control paradigms and data structures, Vol.1611, 1992, pp.586-606.
- [3.4-4] Hanari T., Kawabata K., Nakamura K., Image Selection Method from Image Sequence
to Improve Computational Efficiency of 3D Reconstruction: Analysis of Inter-
image Displacement Based on Optical Flow for Evaluating 3D Reconstruction
Performance, 2022 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII),
2022, pp.1041-1045,
<https://doi.org/10.1109/SII52469.2022.9708603>
- [3.4-5] Hanari T., Kawabata K., Nakamura K., Image Selection Method from Image Sequence
to Improve Computational Efficiency of 3D Reconstruction: Application of Robust
Threshold Based on Multimodal Test to Images, IFAC-Papers On Line, Vol.56, No.2,
2023, pp.10787-10792,
<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2023.10.749>

- [3.4-6] OpenCV – Open Computer Vision Library,
<https://opencv.org/> (参照：令和6年3月11日) .
- [3.4-7] OpenCV2.4: The block matching method,
https://docs.opencv.org/2.4/modules/legacy/doc/motion_analysis.html
 (参照：令和6年3月11日) .
- [3.4-8] OpenCV4.1.1: Template Matching,
https://docs.opencv.org/4.1.1/d4/dc6/tutorial_py_template_matching.html
 (参照：令和6年3月11日) .
- [3.4-9] Matsumoto, T., Hanari, T., Kawabata, K., Yashiro, H., Nakamura, K., Automatic process for 3D environment modeling from acquired image sequences, in International Symposium on Artificial Life and Robotics (AROB2023) , 2023, pp.768-773.
- [3.4-10] 日本原子力研究開発機構, 東京大学, 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(委託研究)–令和4年度英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業–, JAEA-Review 2023-023, (2024), 99p.
- [3.4-11] Robot Operating System, <https://www.ros.org/> (参照：令和6年3月11日) .
- [3.4-12] Mapillary, OpenSfM, <https://opensfm.org/> (参照：令和6年3月11日) .

3.5 研究人材育成

本研究では、産学連携講座として「統合廃炉工学講座」を開設しており、その一環として福島第一原発の廃炉に向けての廃止措置に関する講義を 13 回にわたり大学院生向けに実施した。講義名は「廃止措置特論 E」であり、受講者数は 48 人であった。講義内容としては、福島第一原発廃炉の現状から将来の課題まで、技術のみならず社会科学的知見も含めた幅広くかつ深掘した講義を実施した。具体的には、福島第一原発事故の概要についての講義の後、通常発電所の廃止措置とは何か、また、事故炉の廃止措置との相違点は何かについて講義を行った。

また、現在および将来行われる福島第一原発の廃止措置に関する研究開発の取り組みと課題、オンサイトの高線量現場で必須技術となるロボット技術（遠隔操作技術）の適用、核種分析技術・放射線計測技術、オフサイトを含んだ環境影響評価、バックエンドとして極めて重要となるデブリ燃料管理技術や廃棄物管理について講義を行った。講義の概要を表 3.5-1 に示す。

表 3.5-1 廃止措置特論 E の概要

年	月日	時間	担当教官	講義内容
令和 5 年	10 月 4 日（水）	14:55-16:40	岡本教授	福島第一原発事故の概要
	10 月 11 日（水）	同上	岡本教授	原子力発電所の廃止措置の現状
	10 月 18 日（水）	同上	鈴木上席 研究員	福島第一原発の現状と廃炉プログラム(1)
	10 月 25 日（水）	同上	鈴木上席 研究員	福島第一原発の現状と廃炉プログラム(2)
	11 月 1 日（水）	同上	斉藤教授	放射性廃棄物管理
	11 月 8 日（水）	同上	松崎教授	環境影響評価 （オフサイト含み）
	11 月 29 日（水）	同上	長谷川教授	原子核分析技術
	12 月 6 日（水）	同上	浅間教授	福島第一原発事故対応と廃炉におけるロボット技術
	12 月 13 日（水）	同上	松日楽特任 研究員	ネットワーク化協働 ロボット
	12 月 20 日（水）	同上	山下教授	極限環境におけるロボット センシング技術
	12 月 27 日（水）	同上	寿楽教授	福島第一原発電および他の施設における原子力発電所廃止措置に対する社会的影響
令和 6 年	1 月 10 日（水）	同上	岡本教授	リスク評価とリスク管理
	1 月 17 日（水）	同上	高橋教授	放射線計測技術

以上のように、本講義では、福島第一原発廃止措置の現状の課題のみならず、将来何を行う必要があるかなど、様々の視点から幅広く盛り込まれて議論され、福島第一原発廃止措置に対する学生の理解度を深めることができた。

クロスアポイントメント制度を活用し、会津大学の中村准教授が連携ラボ（原子力機構）に参画し、研究人材育成に従事した。

3.6 研究推進

毎月1回程度のプロジェクト会議を実施するとともに、研究項目間での議論を行った。

- 第38回プロジェクト会議
開催日：令和5年4月10日
場所：オンライン（Zoom）
出席者：連携ラボ（東京大学）10名，連携ラボ（原子力機構）4名，再委託（福島大学，神戸大学）2名
主な議題：
 - ✧ 令和5年度，積算，契約について
 - ✧ 櫛葉実験結果について
 - ✧ 令和4年度成果報告書提出について

- 第39回プロジェクト会議
開催日：令和5年5月10日
場所：オンライン（Zoom）
出席者：連携ラボ（東京大学）7名，連携ラボ（原子力機構）5名，再委託（福島大学，神戸大学）2名
主な議題：
 - ✧ 櫛葉実験結果について(2)
 - ✧ 令和4年度成果報告書の技術説明
 - ✧ 成果報告書提出報告

- 第40回プロジェクト会議
開催日：令和5年6月22日
場所：オンライン（Zoom）
出席者：連携ラボ（東京大学）8名，連携ラボ（原子力機構）5名，再委託（福島大学，神戸大学）2名
主な議題：
 - ✧ 令和4年度成果報告書の技術説明(2)
 - ✧ NDF シンポジウムについて
 - ✧ IFAC2023, SII2024 の廃炉セッションについて

- 第41回プロジェクト会議
開催日：令和5年7月26日
場所：オンライン（Zoom）
出席者：連携ラボ（東京大学）8名，連携ラボ（原子力機構）4名，再委託（福島大学，神戸大学）2名
主な議題：
 - ✧ 令和4年度成果報告書の技術説明(3)
 - ✧ ドイツ KHG 災害支援ロボットについて
 - ✧ NDF ワークショップについて

● 第 42 回プロジェクト会議

開催日：令和 5 年 9 月 5 日

場所：オンライン（Zoom）

出席者：連携ラボ（東京大学）7 名，連携ラボ（原子力機構）5 名，再委託（福島大学，神戸大学）2 名

主な議題：

- ✧ 美浜原子力緊急事態支援センターの紹介
- ✧ 中間フォローについて
- ✧ 中間フォロー時のデモについて

● 第 43 回プロジェクト会議

開催日：令和 5 年 10 月 18 日

場所：オンライン（Zoom）

出席者：連携ラボ（東京大学）7 名，連携ラボ（原子力機構）4 名，再委託（福島大学，神戸大学）3 名

主な議題：

- ✧ 令和 4 年度成果報告書の技術説明(4)
- ✧ 楢葉実験（10/24-27）について
- ✧ 統合化について
- ✧ NDEC-9 について

● 第 44 回プロジェクト会議

開催日：令和 5 年 11 月 13 日

場所：オンライン（Zoom）

出席者：連携ラボ（東京大学）7 名，連携ラボ（原子力機構）4 名，再委託（福島大学，神戸大学）2 名

主な議題：

- ✧ 楢葉実験報告について
- ✧ 統合デモ案について
- ✧ 中間フォローについて
- ✧ NDEC-9 について(2)

● 第 45 回プロジェクト会議

開催日：令和 5 年 12 月 6 日

場所：オンライン（Zoom）

出席者：連携ラボ（東京大学）7 名，連携ラボ（原子力機構）4 名，再委託（福島大学，神戸大学）2 名

主な議題：

- ✧ 中間フォローの確認
- ✧ 中間フォロー時のデモの確認
- ✧ 楢葉実験について

- 第46回プロジェクト会議

開催日：令和6年1月15日

場所：オンライン（Zoom）

出席者：連携ラボ（東京大学）7名，連携ラボ（原子力機構）3名，再委託（福島大学，神戸大学）2名

主な議題：

- ✧ 中間フォロー結果について
- ✧ 各課題の進捗確認
- ✧ NDEC-9, SI2024, ROBOMECH2024 について

- 第47回プロジェクト会議

開催日：令和6年2月22日

出席者：連携ラボ（東京大学）7名，連携ラボ（原子力機構）4名，再委託（福島大学，神戸大学）2名

主な議題：

- ✧ 成果動画提出報告
- ✧ 令和5年度成果報告書について
- ✧ FDR2024 について
- ✧ 来年度への協力依頼について

- 第48回プロジェクト会議

開催日：令和6年3月19日

出席者：連携ラボ（東京大学）5名，連携ラボ（原子力機構）4名

主な議題：

- ✧ 完了届提出について
- ✧ 令和5年度成果報告書について
- ✧ FDR2024 について(2)

最後に，令和5年度の対外発表（国内/国際会議発表，論文投稿）について以下に示す．

【国内学会発表】

- [1] 後藤雅貴，横村亮太，吉田健人，割澤伸一，福井類，事故炉格納容器を常時観察するための屈曲可能なモジュール分割型軌道の開発—軌道の展開と観察ロボットの交代の実現—ロボティクス・メカトロニクス講演会，2023. 6.
- [2] 陳博源，吉田健人，横村亮太，寺島玄，羽成敏秀，川端邦明，福井類，モジュール分割型多関節軌道の関節制御中における配線切替を伴う連結の実現，ロボティクス・メカトロニクス講演会 2024.
- [3] 横田開，高橋隆行，低融点合金を用いた巻取型高剛性長尺アーム～関節の溶融・凝固時間の最適化と巻き取り装置の改良～，日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス 講演会，2023. 6.
- [4] 横田開，高橋隆行，低融点合金を用いた巻取型高剛性長尺アーム～巻き取り装置の改良と自動化～，第24回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会，2023. 12.

- [5] 森田英嗣, 小松廉, 中島慎介, 安琪, 山下淳, 浅間一, 非指向性検出器と自己遮蔽を搭載した移動ロボットによる放射線分布推定, 第 24 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 2023. 12.
- [6] 劉子萱, 中島慎介, 小松廉, 松日楽信人, 浅間一, 安琪, 山下淳, マニピュレータの自己遮蔽を考慮した軌道上観察ロボットによる視点自動提示, 第 29 回ロボティクスシンポジア, 2024. 3.
- [7] 馬場啓多, 渡部有隆, 中村啓太, 松本拓, 羽成敏秀, 川端邦明, 写真測量法による 3 次元復元結果の 2 次元コードを用いた統合の検証, ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2023. 6.
- [8] 川端邦明, 松本拓, 羽成敏秀, 八代大, 中村啓太, 原子炉内状況把握のための時系列画像群に基づいた立体モデリング手法及びシステムの開発, 2023 年電気学会 電子・情報・システム部門大会, 2023. 8.
- [9] 中村啓太, 馬場啓多, 渡部有隆, 松本拓, 羽成敏秀, 川端邦明, QR コードを使用した写真測量における推定パラメータに基づく複数局所点群統合, 第 23 回複雑系マイクロシンポジウム, 2024. 3.

【国際会議発表】

- [1] Hanari, T., Kawabata, K., Nakamura, K., Image Selection Method from Image Sequence to Improve Computational Efficiency of 3D Reconstruction: Application of Robust Threshold Based on Multimodal Test to Images, IFAC2023.
- [2] Matsumoto, T., Hanari, T., Kawabata, K., Yashiro, H., Nakamura, K., Integration of 3D environment models generated from the sections of the image sequence based on the consistency of the estimated camera trajectories, IFAC2023, 2023.7.
- [3] Matsuhira, N., Komatsu, R., Nakashima, S., Yamashita, A., Fukui, R., Takahashi, H., Shimazoe, K., Woo, H., Tamura, Y., Takahashi, T., Yokokohji, Y., Nakamura, K., Naruse, K., Hanari, T., Kawabata, K., Suzuki, S. and Asama, H., Remote Control Technology for Monitoring inside RPV Pedestal during Retrieval of Fuel Debris, The 7th International Forum of the Decommissioning of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station(1FD7), 2023. 8.
- [4] Nakashima, S., Komatsu, R., Moro, A., Faragasso, A., Woo, H., Matsuhira, N., Kawabata, K. and Asama, H., Navigation and Control of a Novel Shock-resistant Mechanical Manipulator for Fuel Debris Retrieval, The 7th International Forum of the Decommissioning of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station(1FD7), 2023.8.
- [5] Matsumoto, T., Hanari, T., Kawabata, K., Yashiro, H., Nakamura, K., Automatic system for sequential reconstruction from image sequences acquired from a camera by SfM-MVS, ROBO2023, 2023. 12.
- [6] Baba, K., Watanobe, Y., Nakamura, K., Matsumoto, T., Hanari, T., Kawabata, K., Integration of multiple partial point clouds based on estimated parameters in photogrammetry with QR codes, AROB2024, 2024.1.

【論文発表】

- [1] Terashima, H., Honda, K., Yokomura, R., Fukui, R., Development of Remote Construction System of Modularized Rail Structure for Inexperienced Operators, Journal of Robotics and Mechatronics., Vol.36, No.1, 2024.2, pp.39-48, doi:10.20965/jrm.2024.

- [2] Yokomura, R., Goto, M., Yoshida, T., Warisawa, S., Hanari, T., Kawabata, K., Fukui, R., Rail Dragon: Long-Reach Bendable Modularized Rail Structure for Constant Observation Inside PCV, IEEE Robotics and Automation Letters, Vol.9, No.4, 2024.2, pp.3275-3282, doi:10.1109/LRA.2024.3366022
- [3] Liu, H., Komatsu, R., Nakashima, S., Hamada, H., Matsuhira, N., Asama, Hajime. and Yamashita, A., Viewpoint Selection for the Efficient Teleoperation of a Robot Arm Using Reinforcement Learning, IEEE Access, Vol.11, 2023.12, pp.119647-119658p, doi:10.1109/ACCESS.2023.3327826

4. 結言

本研究では、福島第一原発の廃炉に向けて、遠隔技術分野を中心とした研究人材の育成を行う。燃料デブリ取り出し時における、炉内状況把握のためのモニタリングプラットフォームの構築およびプラットフォーム上を移動するセンサによる計測・可視化についての研究を行う。このような研究課題に参画することによる研究教育、講義等の座学、施設見学の3つの柱で研究人材を育成することを目的とする。

以下に、5カ年計画の5年目である令和5年度の業務実績を述べる。

(1) モニタリングプラットフォームの構築

① 軌道構造自動施工システム

令和4年度に行った、軌道構造施工システムとしての組み上げの試行過程で明らかになった課題について、それを解決する方法の具現化について取り組んだ。さらに、本プロジェクトの他の要素のいずれか一つ以上との連携試験を行い、システム統合の実現性や課題を明らかにした。

具体的には、組み上げの試行過程で明らかになった課題のうち、関節角度制御を維持したままのモジュール連結作業の実現に取り組む、その実現可能性を示した。また、「炉内環境把握のための環境モデル立体復元手法の研究開発」との連携試験を行い、問題なく連携可能なことを示した。

② コンパクトに巻き取り可能な高剛性軽量アーム（再委託先：福島大学）

令和4年度に設計した試作機を実際に試作するとともに、その評価を行った。そして、その結果に基づいて最終試作を行い、評価した後、これまでの成果をまとめた。

具体的には、試作機では、アームの巻き取り機構や加熱コイルの配置などの検討を実施し、自動での巻き取りおよび伸長が行えることを確認した。

(2) 遠隔操作インタフェースの開発

① 映像提示インタフェース

令和4年度に行った、モックアップ実験で得られた課題点を解決できるように映像提示手法の改良を行った。また、他の研究項目との統合的な試験を行った。

具体的には、可視化対象の“見やすさ”をカメラ画像上で可視化対象が大きく見える視点と定義し、提案手法を拡張した。また、他の研究項目との統合として軌道構造自動施工システムおよび炉内環境把握のための環境モデル立体復元手法を用いて、最適視点からの映像提示が可能であることを確認した。

② 高臨場感遠隔操縦システム（再委託先：神戸大学）

ペDESTAL内に設置するモニタリングプラットフォーム上の複数カメラを模擬したモックアップを完成させ、令和4年度までに開発した複数カメラ視点を利用した遠隔操縦手法を実装した。また、モックアップ上で検証実験を行い、開発した遠隔操縦手法の有効性を確認するとともに、必要に応じてシステムに改良を加えた。

具体的には、3台の固定カメラ、2台のロボットアームおよび手先カメラと自由視点カメラからなるモックアップを構築し、それと操縦側のコックピットとを接続した全体システムに、令和4年度までの成果を全て実装した。検証実験として、燃料デブリ取り出しを模擬した積み木取り出し作業を行い、提案手法の有効性を確認した。また、操作者の身体的負荷を軽減するためにシステムの改良を行った。

(3) 放射線モニタリングデバイスの開発

最終的な放射線モニタリングデバイスおよびシステムの改良を行い、性能検証試験を実施し、所望の性能が得られていることを確認した。

具体的には、高速応答型スペクトロスコープを行うことが可能なガンマ線、中性子検出用の小型センサヘッドを作製し、高線量ガンマ線下でのスペクトル分離性能および中性子ピーク検出性能を確認した。

(4) 炉内環境把握のための環境モデル立体復元手法の研究開発（連携先：原子力機構）

令和4年度までに研究を行った画像からの環境モデル生成手法について統合を行い、模擬実験環境においてモデル生成の検証実験を行った。開発した各手法を統合し、軌道上を移動するカメラによって収集された画像群に基づいて、環境モデルを生成するシステムを構築した。構築したシステムを模擬実験環境において並行して開発が進められているモニタリングプラットフォームと統合して実験を行うことで、修正すべき課題の抽出を行い、各手法やシステムの高度化を行った。

具体的には、画像群内の局所グループ群ごとに生成した局所立体復元モデルを、環境内に配置した2次元コードに基づいて統合する手法の研究開発を行い、また、立体復元計算効率化のために画像選択アルゴリズムの実装形式の改善および見直しを行うことで、計算時間の高速化を実験により示した。さらに、モニタリングプラットフォーム上を移動するカメラから取得された画像から、立体復元モデル生成を行うプロトタイプシステムの構築を行い、模擬環境における実験によって動作検証を行った。

(5) 研究人材育成

福島第一原発の廃炉に向けて、廃止措置に関する講義を実施した。

具体的には、廃止措置に関する講義を13回にわたり大学院生向けに実施した。講義名は「廃止措置特論E」であり、受講者数は48人であった。

(6) 研究推進

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。

具体的には、毎月1回のプロジェクト会議を実施するとともに、研究項目間での議論を行った。

本研究のアウトカムとしては、PCV上部空間に新たに設置するプラットフォーム上に遠隔モニタリング装置を配置することにより、遠隔機能と取り出し作業とを機能分離し、継続的なモニタリングを可能とする本技術のコンセプトを廃炉関連企業に広く情報提供するとともに、本コンセプトの活用を希望する企業と将来的にはタイアップすることを想定している。研究成果のアウトプットとしては、国内外での講演会などでの発表や学術誌への投稿を進めている。各連携ラボの研究成果は、モニタリングプラットフォーム上での実装可能性について検討し、櫛葉遠隔技術開発センターで評価実験を行い、その有効性を検証した。

