

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 (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—

Novel Mechanical Manipulator for Efficient Fuel Debris Retrieval
(Contract Research)

-FY2022 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
東京大学

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

July 2024

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。（<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
(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—

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

東京大学

(2024年3月19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 (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・基盤的研究およ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3年度に採択された研究課題のうち、「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」の令和4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、未知環境での衝突対応のための機械的可変インピーダンスアクチュエータを用いたロボットマニピュレータの開発および効率的な探査・廃止措置のための人工知能を使った制御手法の構築に取り組む。従来調査では困難だった開口部から奥の領域における調査を行う他、先端部のグリッパーで、ペDESTALの底部に存在する小石状の燃料デブリの回収を目指す。ペDESTAL内部の環境制約に対応するためのマニピュレータ機構と遠隔操作システムの開発に取り組む。

令和4年度は、最適なマニピュレータのパラメータ設計とナビゲーションアルゴリズムの開発に取り組んだ。令和3年度に開発したシミュレーション環境を活用し、廃炉措置に最適なマニピュレータやアクチュエータのパラメータの設計をライテックスと共同で行った。構築したシミュレーション環境において適したマニピュレータの寸法・速度伝達比および効率的な把持力の推定を目指した。

得られた情報・最適なマニピュレータのパラメータは英国と情報交換をすることで、最終的なマニピュレータ設計へと反映させた。並行して、ナビゲーションアルゴリズムの開発をライテックスと共同で進めた。特に、機械学習手法等を活用した手法の構築、二次元画像からの目標点のオペレータ提示に基づく高信頼性ビジュアルサーボの実現を目指した。Deep Deterministic Policy Gradient (DDPG) アルゴリズム等をベースとした手法を提案し、位置センサに頼らないマニピュレータ操作の手法を開発した。英国側や外部専門家との隔週会合など密な連携のもと、研究を推進した。東京大学とミュンヘン工科大学 (TUM) 主催の国際ワークショップにて、プロジェクト紹介の口頭発表を行った。

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

Novel Mechanical Manipulator for Efficient Fuel Debris Retrieval
(Contract Research)

— FY2022 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

The University of Tokyo

(Received March 19, 2024)

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 FY2022.

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 “Novel mechanical manipulator for efficient fuel debris retrieval” conducted in FY2022.

The present study aims to the development of a collision-tolerant robotic manipulator with mechanical variable impedance actuators in an unknown environment. Another research target is the system architecture of an artificial intelligence-based control method for efficient exploration and decommissioning. In addition to investigating the area deep inside the aperture, which has been difficult with conventional investigations, we aim to retrieve pebble-shaped fuel debris at the bottom of the pedestal using a gripper at the tip of the manipulator. We will establish a manipulator mechanism and remote-control system to cope with the environmental constraints inside the pedestal.

In the fiscal year, we focused on designing optimal parameters for a robot arm and developing navigation algorithms. Collaborating with RITECS Inc, we determined ideal dimensions, velocity ratio, and grasping force using a simulation environment. The obtained information was shared with the UK, and we proposed a position-sensor-independent method for arm manipulation which exploits the operator input from 2D images. The method is based on machine-learning techniques such as Deep Deterministic Policy Gradient (DDPG) .

The research was promoted in close collaboration with the UK team and external advisors, including bi-weekly meetings. At the end of the fiscal year, an oral presentation introducing the project was given at an international workshop organized by the University of Tokyo and Technical University of Munich (TUM).

Keywords: Decommission, Manipulator, Debris, CVT, VIA, Navigation, Visual Servo, Artificial Intelligence

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
付録 成果報告書	15

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
Appendix Result Report	15

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
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号機ペダ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	渡邊 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	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ティアップ型人材育成	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）

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
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）

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
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

課題名	研究代表者	所属機関
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

本報告書は、以下の課題の令和4年度分の研究成果について取りまとめたものである。

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
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

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 4 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

(契約番号 R04I035)

成果報告書

令和 5 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のための機械式マニピレータのナビゲーションおよび制御」の令和4年度分の研究成果を取りまとめたものである。

目次

概略	v
1. はじめに	1-1
1.1 研究目的	1-1
1.2 研究概要	1-2
2. 業務計画	2-1
2.1 全体計画	2-1
2.2 令和4年度における成果の目標および業務の実施方法	2-2
2.3 実施体制	2-3
3. 実施内容および成果	3-1
3.1 最適なマニピュレータのパラメータ設計（東京大学、再委託先：ライテックス）	3-1
3.2 マニピュレータのナビゲーションアルゴリズムの開発（東京大学、再委託先：ライテックス）	3-7
3.3 CVT-VIA 構築(英国チーム成果)	3-13
3.4 研究推進	3-15
4. 結言	4-1
参考文献	5-1

執筆者リスト

事業代表者 国立大学法人東京大学	教授	浅間一
事業参画者 国立大学法人東京大学	客員研究員 特任助教 助教 特任助教 特任研究員	禹ハンウル Angela Faragasso 小松廉 中島慎介 松日楽信人
委託先 有限会社ライテックス	最高技術顧問 (CTO)	Alessandro Moro
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

図一覧

図 1. 1-1	提案システムの概要図	....	1-1
図 2. 1-1	年度別全体計画	....	2-1
図 2. 2-1	月別全体計画	....	2-2
図 2. 3-1	実施体制	....	2-3
図 3. 1-1	燃料デブリサンプル	....	3-1
図 3. 1-2	ばね関節のための靱帯拘束	....	3-2
図 3. 1-3	燃料デブリ回収グリッパ試作機	....	3-3
図 3. 1-4	デブリ回収グリッパの構成部品	....	3-4
図 3. 1-5	YALE Open Hand	....	3-5
図 3. 1-6	YALE Open Hand 実機	....	3-6
図 3. 2-1	PCV 周囲環境の寸法	....	3-7
図 3. 2-2	PCV 環境モデル	....	3-8
図 3. 2-3	ナビゲーションシステム構成図	....	3-8
図 3. 2-4	ソフトウェアシステムと評価対象	....	3-9
図 3. 2-5	ロボット幾何モデル	....	3-10
図 3. 2-6	自由空間におけるロボット可到達域	....	3-11
図 3. 2-7	PCV 詳細モデルにおけるロボット可到達域	....	3-11
図 3. 2-8	実空間におけるロボットナビゲーション実験	....	3-12
図 3. 3-1	英国考案マニピュレータおよび CVT-VIA のコンセプト図	....	3-13
図 3. 3-2	CVT-VIA の駆動原理図	....	3-14
図 3. 4-1	IROS 2022 Workshop の模様	....	3-19

略語一覧

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 (廃炉環境国際共同研究センター) Advanced Decommissioning Science
東電	: 東京電力ホールディングス株式会社
NARREC	: JAEA 櫛葉遠隔技術開発センター
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
CVT	: Continuously Variable Transmission 無段変速機
VIA	: Variable Impedance Actuator 可変インピーダンスアクチュエータ
IVT	: Infinitely Variable Transmission 変速比無限大変速機
PCV	: Primary Containment Vessel 原子炉格納容器
API	: Application Programming Interface
ROS	: Robot Operating System
URDF	: Universal Robot Description Format
LMPA	: Low Melting Point Alloy 低融点金属

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。）1-3号機の原子炉格納容器（Primary Containment Vessel：以下、「PCV」という。）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。これまでの調査により、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が、確認できていない領域が存在しており、内部環境の完全な把握には至っていない状況である。特にペDESTALの内部においては、開口部付近やその直下付近までしか調査が行われておらず、それ以外の開口部付近よりも奥の領域に関しては不明なままである。

そこで本研究では、未知環境での衝突対応のための機械的可変インピーダンスアクチュエータを用いたロボットマニピュレータの開発および効率的な探査・廃止措置のための人工知能を使った制御手法の構築に取り組む。ロボットアームが取り付けられたマニピュレータの移動レールをX-6ペネからペDESTAL開口部まで挿入する。マニピュレータはこのレール上を移動することでペDESTALの内部に入る。ロボットアームの先には周りを計測することが可能なセンサ類を取り付け、これまでの調査では確認できなかった開口部から奥の領域における調査を行う。また、ロボットアームの先にグリッパを取り付け、ペDESTALの底部に存在する小石状の燃料デブリの回収を目指す。

ロボットアームを安全かつ確実に目標位置まで伸ばし調査を行うためには、信頼性の高いマニピュレータの機構と制御手法が求められる。特にペDESTALの内部は高線量、上部からの水漏れ、照明のない暗闇環境等の制約があるため、従来のシステムでは確実に調査を行うことが困難である。そこで本研究ではVariable Impedance Actuator (VIA) 式マニピュレータ機構を開発し、センサの計測精度が保証される局所領域内におけるマニピュレータの遠隔操作システムの開発に取り組む。

以下に、3カ年計画の2年目である令和4年度の業務実績を述べる。

(1) 最適なマニピュレータのパラメータ設計（国立大学法人東京大学（以下、「東京大学」という。）、再委託先：有限会社ライテックス（以下、「ライテックス」という。））

前年度に開発したシミュレーション環境を活用し、廃炉措置に最適なマニピュレータやアクチュエータのパラメータの設計をライテックスと共同で行った。構築したシミュレーション環境において適したマニピュレータの寸法・速度伝達比および効率的な把持力の推定を目指した。得られた情報・最適なマニピュレータのパラメータは英国側の共同研究先と情報交換をすることで、最終的なマニピュレータ設計へと反映させた。

(2) マニピュレータのナビゲーションアルゴリズムの開発（東京大学、再委託先：ライテックス）

① 局所領域におけるマニピュレータの遠隔操作システムの開発

前年度に準備した計算機等を活用し、ナビゲーションアルゴリズムの開発をライテックスと共同で進めた。特に、機械学習手法等を活用した手法の構築、二次元画像からの目標点のオペレータ提示に基づく高信頼性ビジュアルサーボの実現を目指した。

DDPGアルゴリズムなどをベースとした手法を提案し、位置センサに頼らないマニピュレータ操作を可能とするナビゲーション手法を開発した。

(3) 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（以下、「CLADS」という。）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ち合わせや会議等を開催した。

隔週で英国側とのミーティングを実施した。また、日本側のミーティングにおいても現場との連携を密にして隔週で議論を行った。年度末に、東京大学とミュンヘン工科大学（Technische Universität München：以下、「TUM」という。）主催の国際ワークショップにて、プロジェクト紹介の口頭発表を行った。

(4) 英国側

無段変速機（以下、「CVT」という。）を用いた可変インピーダンスアクチュエータ（以下、「VIA」という。）の、1F およびセラフィールド対応ロボット搭載のための駆動モデルに向けて、設計を行った。1F およびセラフィールドといった環境に応じて要求されるトルクの計算および CVT-VIA の構造の検討を行った。

前年度までの成果報告書：

JAEA-Review 2022-040

<https://doi.org/10.11484/jaea-review-2022-040>

以下に、前年度の令和 3 年度の業務実績を述べる。

(1) 最適なマニピュレータのパラメータ設計（東京大学、再委託先：ライテックス）

令和 3 年度はシミュレーション環境を構築した。1F のペDESTAL およびセラフィールドを模擬するために必要な要件を確認し、どのシミュレーションソフトを使うかの決定を行った。その後、マニピュレータのパラメータ設計に必要なシミュレーション環境の構築を行った。東京大学はグリッパのシミュレータ作成を重点的に、ライテックスはアームのシミュレータ作成を重点的に行った。

シミュレータ構築を行い、マニピュレータの動作確認・トルク計算をシミュレーション上で実施可能とするとともに、グリッパのシミュレータを構築した。また、燃料デブリ取り出しに必要な要件として、マニピュレータの全体の長さおよびグリッパのペイロードを決定した。さらに、仮のパラメータとして 3 自由度マニピュレータの CAD モデルを作成した。

(2) マニピュレータのナビゲーションアルゴリズムの開発（東京大学、再委託先：ライテックス）

① 局所領域におけるマニピュレータの遠隔操作システムの開発

令和 4 年度に行うナビゲーションアルゴリズムの開発のためにパソコンおよびカメラを購入し準備を行った。東京大学は画像ベースのビジュアルサーボを実現する準備を、ライテックスは遠隔操作のインタフェースの検討準備を行った。

購入したパソコンおよびカメラと今後製作予定のマニピュレータをいかに接続するかといった全体構成を決定した。具体的には、電装系およびソフトウェア系の構成を決めた。また、遠隔操作インタフェースの検討のため、Robot Operating System（ROS）の接続を確認した。

(3) 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ち合わせや会議等を開催した。

隔週で英国側とのミーティングを実施した。また、日本側のミーティングにおいても現場との連携を密にして隔週で議論を行った。令和 3 年度末に、東京大学と TUM 主催の国際ワークショップにて、プロジェクト紹介の口頭発表を行った。

(4) 英国側

CVT を用いた VIA の初期モデルに向けて、設計を行った。1F およびセラフィールドといった環境に応じて要求されるトルクの計算および CVT-VIA の構造の検討を行った。

1. はじめに

1.1 研究目的

1F1-3 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。これまでの調査により、PCV 内部の状況や燃料デブリの大きな分布が徐々に明らかになりつつあるが、確認できていない領域が存在しており、内部環境の完全な把握には至っていない状況である。特にペDESTALの内部においては、開口部付近やその直下付近までしか調査が行われておらず、それ以外の開口部付近よりも奥の領域に関しては不明なままである。

そこで本研究では、機械的可変インピーダンスアクチュエータを用いたロボットマニピュレータの開発および効率的な探査・廃止措置のための人工知能を使った制御手法の構築に取り組む。図 1.1-1 に示すように、ロボットアームが取り付けられたマニピュレータの移動レールを X-6 ペネからペDESTAL開口部まで挿入する。マニピュレータはこのレール上を移動することでペDESTALの内部に入る。ロボットアームの先には周りを計測することが可能なセンサ類を取り付け、これまでの調査では確認できなかった開口部から奥の領域における調査を行う。また、ロボットアームの先にグリップを取り付け、ペDESTALの底部に存在する小石状の燃料デブリの回収を目指す。

ロボットアームを安全かつ確実に目標位置まで伸ばし調査を行うためには、信頼性の高いマニピュレータの機構と制御手法が求められる。特にペDESTALの内部は高線量、上部からの水漏れ、照明のない暗闇環境等の制約があるため、従来のシステムでは確実に調査を行うことが困難である。そこで本研究では VIA 式マニピュレータ機構を開発し、センサの計測精度が保証される局所領域内におけるマニピュレータの遠隔操作システムの開発に取り組む。

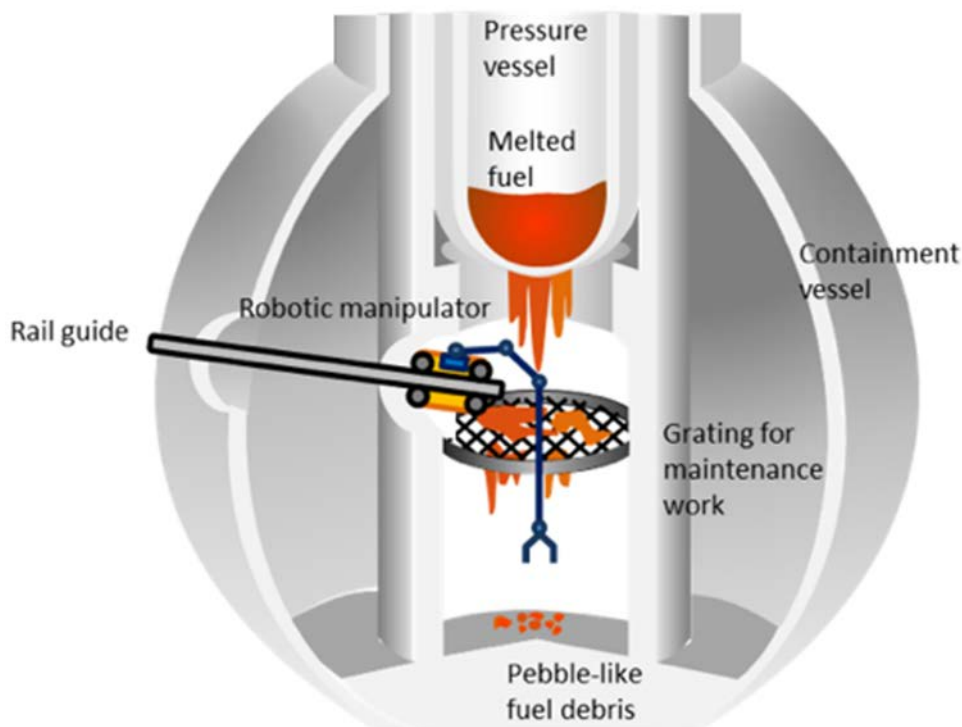


図 1.1-1 提案システムの概要図

1.2 研究概要

本研究は以下の実施項目から構成される。

(1) 最適なマニピュレータのパラメータ設計（東京大学、再委託先：ライテックス）

ここでは、シミュレーション環境を構築し、その環境において適したマニピュレータのリンクの長さ、全体の自由度、速度伝達比および効率的な把持力の推定を目指す。マニピュレータがPCV内のペDESTALにレールを通じて設置され、マニピュレータで燃料デブリを把持した後にレールを通じて戻るといったシナリオを想定する。得られたマニピュレータのパラメータは英国側の共同研究先と情報交換をすることで、最終的なマニピュレータ設計へと反映させる。

(2) マニピュレータのナビゲーションアルゴリズムの開発（東京大学、再委託先：ライテックス）

① 局所領域におけるマニピュレータの遠隔操作システムの開発

マニピュレータのナビゲーションアルゴリズムの開発に取り組む。オペレータはマニピュレータの先端に搭載したカメラの画像を見ながら遠隔操作を行う。具体的には、オペレータがセンサの信頼性の高い局所的な目標点を画像中で選択することで、その目標点に画像の中心が合わさるように移動可能な画像ベースのビジュアルサーボを実現する。

② 可変インピーダンスコントローラ的设计

このコントローラによって、動作や把持対象に応じたインピーダンスの自動最適化が可能になる。例えば、ある目標姿勢に到達するために現在のインピーダンス値が足りない場合は、自動的に必要なインピーダンス値まで上昇させることができる。それ以外の状況においてはインピーダンス値を低く保つことで未知の環境における適応性を高めることができる。

(3) マニピュレータの制御性能の評価実験（東京大学、連携先：国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（以下、「JAEA」という。））

提案手法の制御システムおよびナビゲーションシステムを組み合わせることで、マニピュレータの特性を評価する。評価する特性は、例えば遠隔操作タスクにおける軌道追跡の精度と再現性やインピーダンス調整による速度とペイロード（手先搬送負荷）に与える影響等である。

また、グリッパにおいては、形状や弾性特性、重量が異なる物体を把持する性能を評価する。具体的には、ロボットによるマニピュレーション手法の研究において用いられる、多様な物体を実計測した3次元形状データからなるYCBデータセット（Yale-CMU-Berkeley という策定を主導した3団体から取られた）の活用に加えて、廃炉において想定される物体（ガラスの破片、鉛ペレット等）を用いて、標準的なグリッパ評価プロトコルに基づいてベンチマーク試験を行い、性能を評価する。

(4) 現場の使用シーンを想定した実証実験（東京大学、連携先：JAEA）

シミュレーション環境ではないさらに現実的な環境において提案システムの実証試験を行うことで実際の手法およびシステムの研究開発を進めていく。特に、初期段階の検証実験においては、1FのPCVの部分モックアップを東京大学に設置し、提案手法の評価および改良を行う。また、規模を拡大した検証実験やより現実的なシナリオに基づいた実証実験については、JAEA 櫛葉遠隔技術開発センター（以下、「NARREC」という。）の試験棟において行うことを想定している。

2. 業務計画

2.1 全体計画

機械的可変インピーダンスアクチュエータを用いたロボットマニピュレータの開発および効率的な探査・廃炉のための人工知能を使った制御手法の構築のために、図 2.1-1 で示す年度別全体計画に従って研究を進める。

日本側と英国側の役割分担として、主に日本側ではシミュレータ構築やナビゲーションアルゴリズムといったソフトウェア関係の知見が深く、英国側では CVT をベースとした独自の負荷適応アクチュエータ CVT-VIA やマニピュレータのデザインといったハードウェア関係の知見が深いことから、マニピュレータ設計においては、日本側でシミュレータを用いてマニピュレータのパラメータ設計を行い、英国側で設計を進めている機械式インピーダンスマニピュレータの設計へと情報共有を行う。

システムの評価においては、まずは英国側で CVT-VIA 単体の評価（トルク性能等）を行う。その後、マニピュレータとして組み上げた後に日本側でマニピュレータシステムとしての評価（遠隔操作タスクにおける軌道追跡の精度と再現性等）を行う。

最後の現場の使用シーンを想定した実証実験においては、日本側では 1F を、英国側ではセラフィールドを想定して、それぞれ行い、実証実験で得られた知見を共有し合うことを考えている。

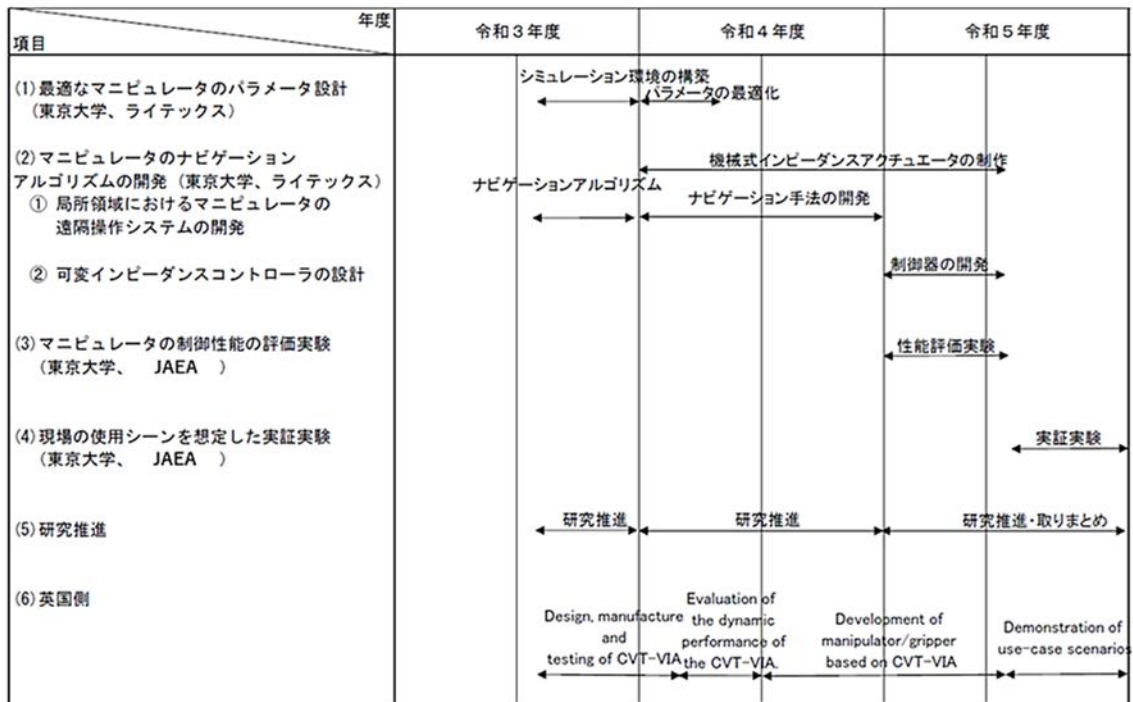


図 2.1-1 年度別全体計画

2.2 令和4年度における成果の目標および業務の実施方法

(1) 最適なマニピュレータのパラメータ設計 (東京大学、再委託先: ライテックス)

前年度に開発したシミュレーション環境を活用し、廃炉措置に最適なマニピュレータやアクチュエータのパラメータの設計をライテックスと共同で行う。構築したシミュレーション環境において適したマニピュレータの寸法・速度伝達比および効率的な把持力の推定を目指す。得られた情報・最適なマニピュレータのパラメータは英国側の共同研究先と情報交換をすることで、最終的なマニピュレータ設計へと反映させる。

(2) マニピュレータのナビゲーションアルゴリズムの開発 (東京大学、再委託先: ライテックス)

① 局所領域におけるマニピュレータの遠隔操作システムの開発

前年度に準備した計算機等を活用し、ナビゲーションアルゴリズムの開発をライテックスと共同で進める。特に、機械学習手法等を活用した手法の構築、二次元画像からの目標点のオペレータ提示に基づく高信頼性ビジュアルサーボの実現を目指す。DDPG アルゴリズムなどをベースとした手法を提案し、位置センサに頼らないマニピュレータ操作を可能とするナビゲーション手法を開発する。

(3) 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、研究を進める。また、研究実施計画を推進するための打ち合わせや会議等を開催する。

(4) 英国側

CVT を用いた VIA の初期モデルに向けて、設計を行う。1F およびセラフィールドといった環境に応じて要求されるトルクの計算および CVT-VIA の構造の検討を行う。

月別全体計画を図 2.2-1 で示す。

実施日程	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
項目												
(1) 最適なマニピュレータのパラメータ設計 (東京大学、ライテックス)			パラメータ設計									
(2) マニピュレータのナビゲーション アルゴリズムの開発 (東京大学、ライテックス)					マニピュレータ遠隔操作システムの開発							
① 局所領域におけるマニピュレータの 遠隔操作システムの開発												
② 可変インピーダンスコントローラの設計												
(3) マニピュレータの制御性能の評価実験 (東京大学、 JAEA)												
(4) 現場の使用シーンを想定した実証実験 (東京大学、 JAEA)												
(5) 研究推進				プロジェクト会議の開催								
												まとめ

図 2.2-1 月別全体計画

2.3 実施体制

本課題の実施体制を図 2.3-1 に示す。

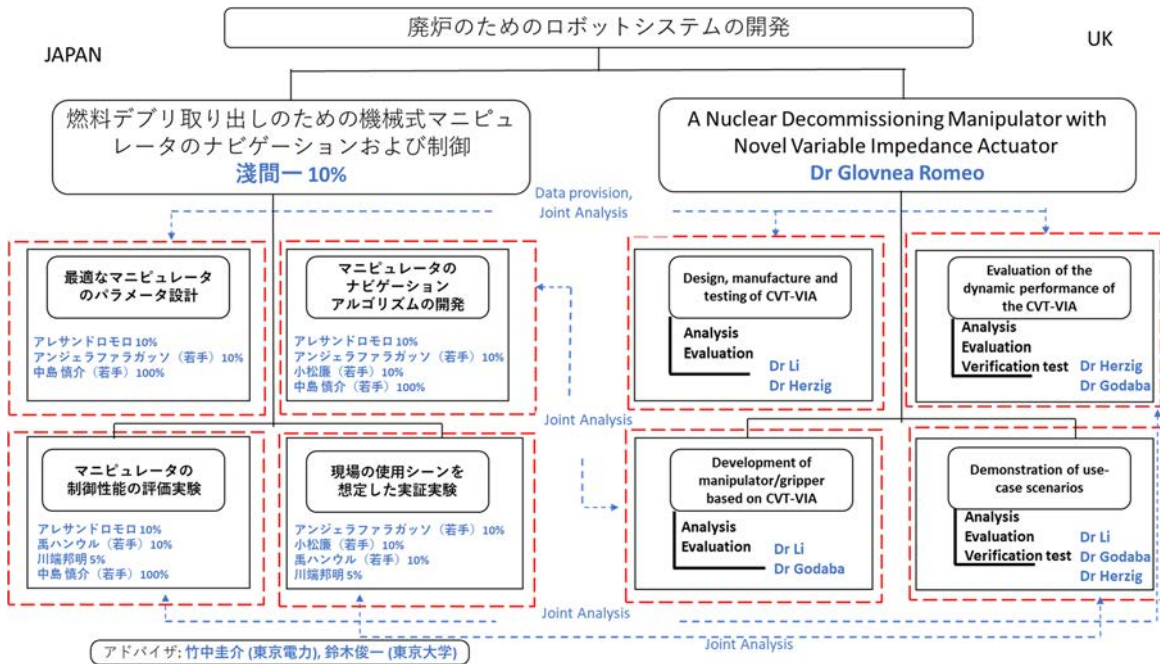


図 2.3-1 実施体制

3. 実施内容および成果

3.1 最適なマニピュレータのパラメータ設計 (東京大学、再委託先：ライテックス)

シミュレーション環境を活用したパラメータ設計の詳細は 3.2 節に、マニピュレータの寸法・速度伝達比の詳細は 3.3 節に、最終的なマニピュレータ設計を 3.3 節に、各々言及した。

最適なマニピュレータのグリッパ部構築に向けた燃料デブリ模擬物質の構成について説明する。燃料デブリ模擬物質を図 3.1-1 に示す。

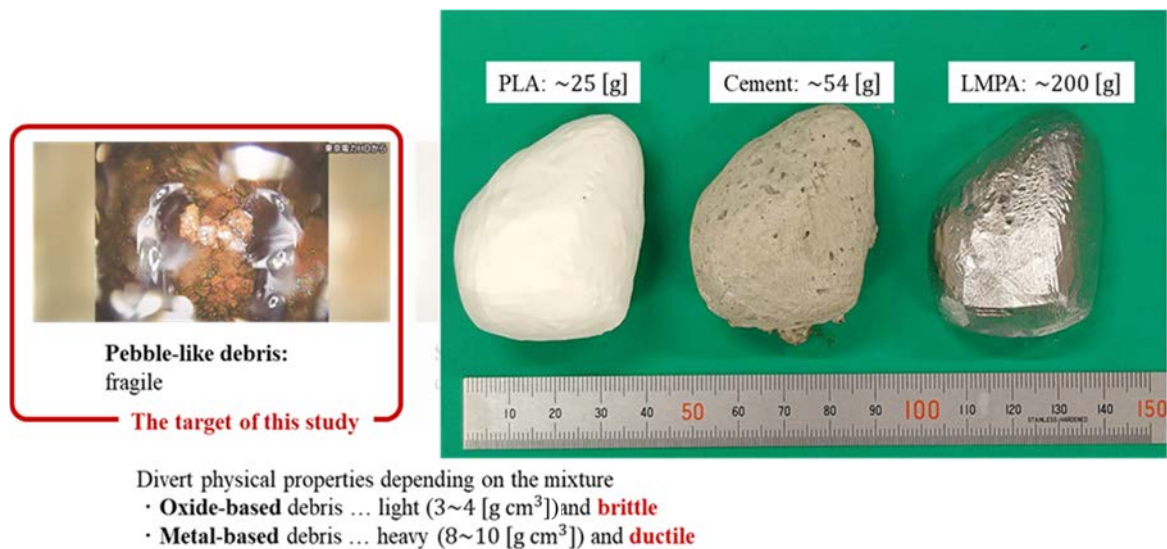


図 3.1-1 燃料デブリサンプル

燃料デブリ模擬物質の作製について報告する。原子力発電所の燃料デブリを回収するロボットの開発に向けて、燃料デブリを模擬した物質の作製について述べる。具体的には、燃料デブリの密度と強度を再現可能と思われるセラミック・セメントと低融点金属 (LMPA) でサンプルを作製した方法となる。

燃料デブリは、原子力発電所内で燃料として使用された燃料棒が損傷し、高温高圧下で融解、気化、再凝固して生成された混合物である [1]。このため、燃料デブリの詳細な物性が把握されていない。従って、実環境でのロボットの把持や切断の操作を、シミュレーションのみならず、実機を用いて訓練するためには、特にロボットマニピュレータによる把持タスクへの知見を提供する点において、燃料デブリに類似した物質が必要であることは明らかである。

今回、我々は、燃料デブリに代表される高温で硬化する材料であるセラミック・セメントと、低温で融解可能な LMPA を使用して、燃料デブリ模擬物質を作製した。燃料デブリには、放射性線物質を含む様々な元素が含まれているため、その化学組成を完全に再現することは困難である。しかし、セラミック・セメントは、シリカやアルミナ、石灰などの酸化物を主成分とし、高温で硬化するため、例えば燃料デブリの一部としての酸化物ベースの物体を代表することができる。また、LMPA は、鉛やビスマスなどの低融点金属を主成分とするため、燃料デブリの中でも金属組成の部分再現することが可能である。

サンプルの作製には、キャスティング法を使用した。まず、Blender [2] ソフトウェアの Add-on である Rock generator [3] を活用し、ランダム形状を生成した。続いて、当該形状を 3D プリンタで出力し、樹脂モデル (PLA) を得た。樹脂モデルから、シリコーンゴムで燃料デブリの形状に合わせた型を作製した。次に、型にセラミック・セメントや LMPA を個別に流し込み、凝固させた。この方法で作製したサンプルは、同一形状でも全く異なる密度や強度特性を有し、燃料デブリの把持対象物体としての性質をよく再現する。

続いて、提案グリップを構成するばね関節の模式図を図 3.1-2 に示す。PCV 内部環境におけるデブリ回収タスクの実行のためには、以下の 3 つの特性が重要となる。

- ・ 防水性
- ・ 耐衝撃性
- ・ 耐放射線性

特に耐衝撃性をグリップに付与するにあたり、従来の軸関節に代わり、ばね関節や靭帯のような面接触関節を実装することが有効である。軸関節は、軸の回転方向以外の負荷による機構へのダメージに対して脆弱であるという弱点が存在するが、ばね関節や面接触関節等ではこれらが軽減される。ばね関節は、連続体ロボットの形態の典型的な一例である。

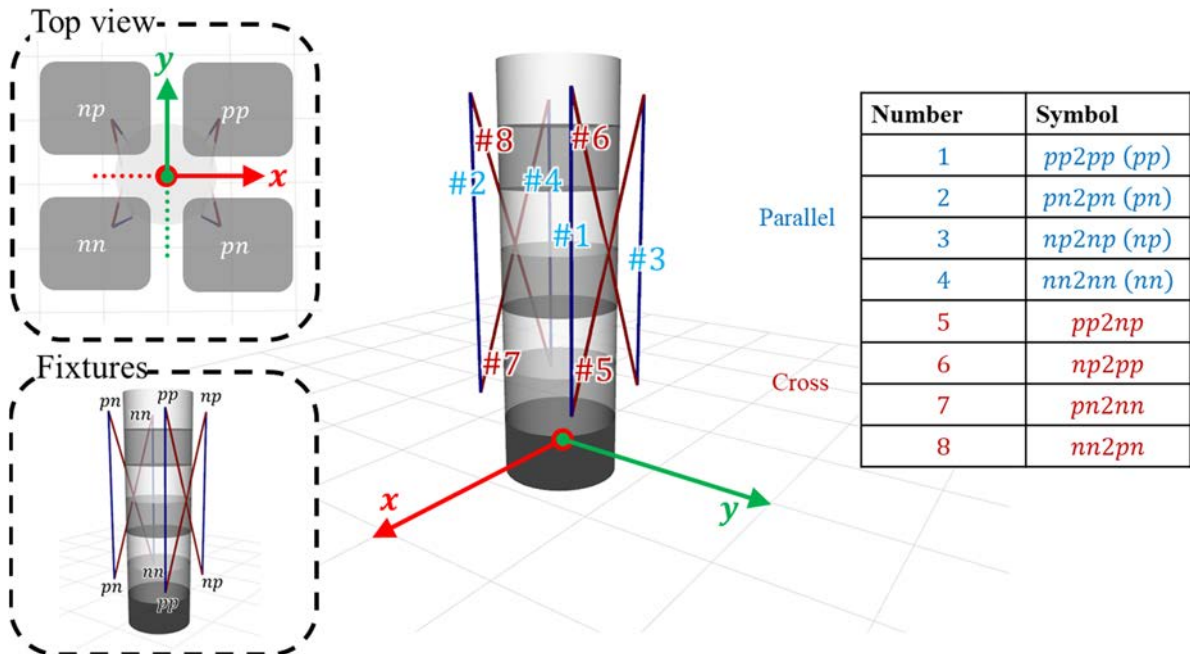


図 3.1-2 ばね関節のための靭帯拘束

連続体ロボットは、柔軟な材料から構成されたロボットであり、一般的な剛体ロボットに比して自由度が高く、複雑な動作が可能である。しかし、その柔軟性は制御に課題をもたらすことから、必要に応じて拘束を加える必要性が生じる。今回はロボット指としての活用であり、単一方向の曲げ動作に変形方向を絞るための拘束を加えることで、意図しない方向への運動を制限させることが可能となる。今回は、先行研究および生体構造を参考とした靭帯拘束の手法を活用した。

靭帯拘束とは、柔軟な材料でできた連続体を、所望の形状に保つために、随所に配置されたひもなどの拘束部材によって抑制する手法を指す。今回は、機械ばねを連続体変形部として用い、ひもによって拘束する構成を考える [4]。

機械ばねは、外力が加わると変形し、その変形に比例して反力が発生する。拘束を持たない機械ばねは、全方向に変形する要素として作用する。一方、ひもは初期長に対して、弛むことはできるが、伸展させることは困難である。この性質を利用して、ひもによって機械ばねの変形を所望の方向、大きさに拘束することが基本的な原理となる。この拘束によって、連続体ロボット（この場合は機械ばね）の形状が所望のものに保たれ、制御が容易になるというメリットが存在する。欠点として、靭帯拘束は、靭帯本数によっては部品点数が多くなること、解析や制御が困難な場合がある。所望の変形特性に合わせた靭帯配置の自動決定アルゴリズムは、今後の課題とする。

図 3.1-3 に、グリップ試作機を示す。腱駆動グリップであり、関節部には軸-ベアリングでなく、ばね関節を用いている。

腱駆動方式は、モータの回転力をひも（腱）を牽引する張力を介して関節に伝達する駆動方式であり、モータ回転力が直接、ないし歯車等を介して伝達される軸駆動方式と対比される。

腱駆動のメリットの一つとして、駆動系の分離が挙げられる。軸関節を使用する場合、設計によっては駆動系をグリップ内部に組み込む必要があるため、グリップ全体が大きくなる。一方で、腱駆動を採用することで、駆動系をグリップ構造から分離することができる。これにより、グリップのサイズを小さくすることができる。この腱駆動グリップは、一本の腱を使用して指の動きを制御する。腱は、指の根元にあるモータから伝達される張力によって引っ張られる。そして、ばね関節を介して、指の開閉やグリップ力の調整などの操作が実行される。

腱駆動グリップにおけるばね関節の採用は、従来の軸関節を使用するグリップに比べて、多くのメリットを持つ。例えば、軸関節を使用するグリップでは、軸関節自体が軸の回転以外の方向に加わる荷重に対して強度不足である場合が存在し、グリップ全体の耐久性を損なうという問題点がある。ばね関節を使用することで、駆動される方向以外にもばねが変形し、軸関節に比べてグリップ全体の耐久性が向上するため、衝撃や振動などの環境条件に対する耐性が向上する。ばね関節は、ばね定数やばねの長さ、角度の制御などを調整することによって、グリップの剛性や発揮力・可動範囲などを調整可能である。また、グリップの形状や指の数、腱の配置などもグリップの性能に影響を与える。

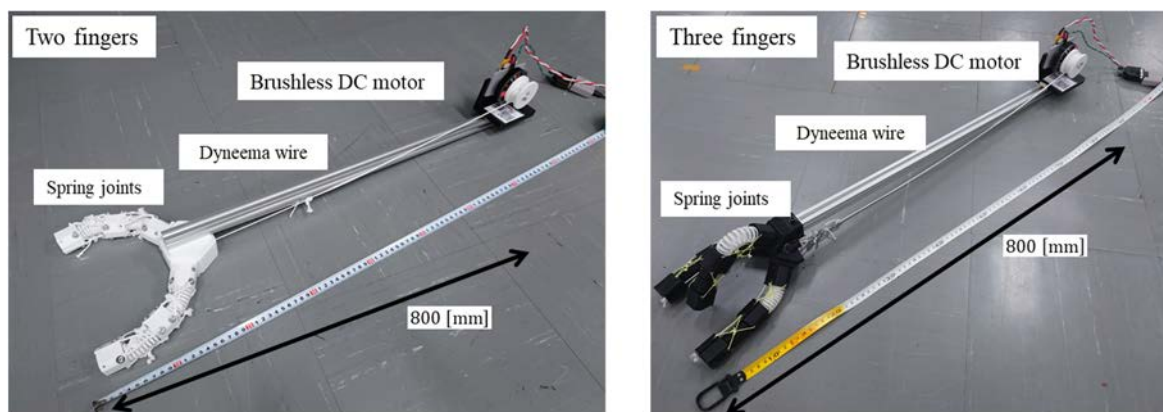


図 3.1-3 燃料デブリ回収グリップ試作機

腱駆動グリップの構造は、図 3.1-4 の通りである。現状では、すべての構成要素が 3D プリント部品で構成されている。

手首に取り付ける骨格部分は、アルミフレームとの接合に必要となる。ワイヤ経路を構成するための穴があいており、端部におけるワイヤ摩耗・切断を防ぐべく丸み付けがなされている。

指に相当する部分には、ばね形状の関節部と、ばね同士を接合する骨格部、そしてワイヤ経路を構成する指の腹に相当する部品が存在する。この機構が、ばね変形を介して、指の開閉を調節する。グリップの中央部分にはワイヤが通っており、これが生体における腱のような役割を果たす。ワイヤを引っ張ることで、ばねに力が加わり、指を開閉することができる。なお、ばねと骨格等を接合するためのねじは、実際には靭帯ワイヤの固定点としても作用する。靭帯ワイヤの初期長を手作業で変更することで張力を調整し、ばね変形を所望の曲げ方向に拘束することが可能となる。

組み立てには、プラスチック部品を 3D プリントで作製し、必要なばねや靭帯・腱に相当するワイヤを用意する必要がある。組み立てにかかる時間は、およそ 2 時間程度である。

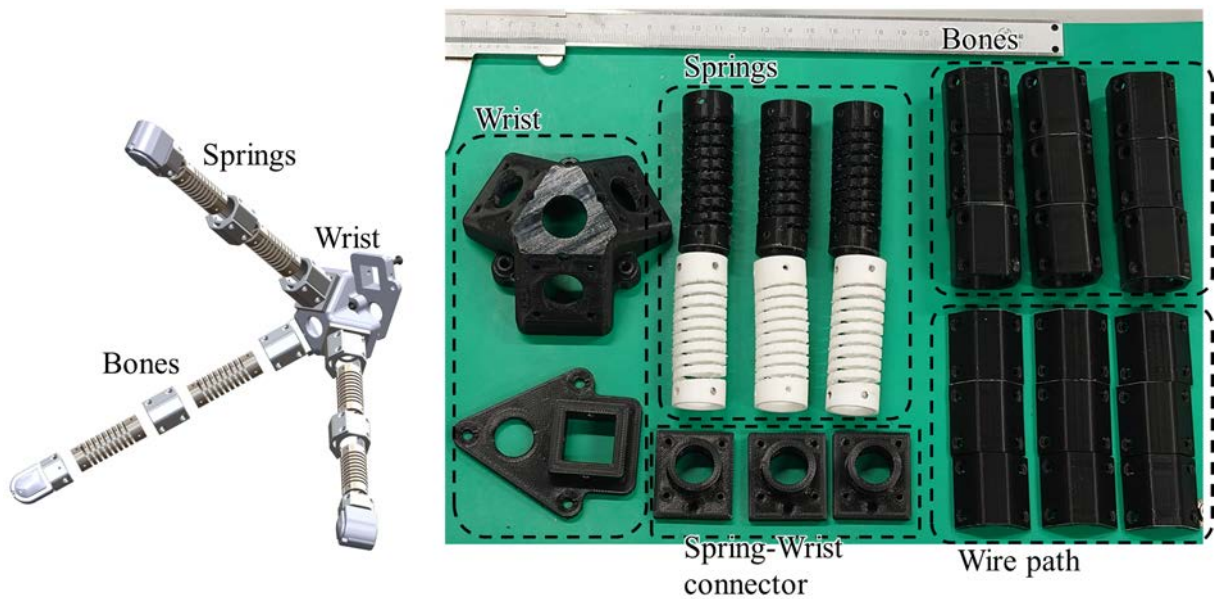


図 3.1-4 デブリ回収グリップの構成部品

ばね関節を搭載するモデルと並行に、ロボットによる日用品マニピュレーション等で一般に活用されるオープンソースロボットハンドとの比較検討を進めている。

図 3.1-5 に示すのは、そのような実機ハンドの一つとして知られる YALE Open Hand である。日用品の取り扱いを意図しており、指先の自由度や把持力などを人間の手に近づけることが意図されており、具体的には、以下のような特徴が挙げられる。

- 指の自由度：人間の手の自由度に近づけることで、ある程度繊細な作業もカバーする。
- 軽量化と生産容易性：主な構造材として軽量の 3D プリント樹脂を活用し、工夫された製法により、容易な構築と長時間の使用にも耐えられる。
- 柔軟性：モデルに依存するが、関節部や指の腹部に柔軟なゴム素材を使用しているため、様々な形状のオブジェクトをつかむことが可能。

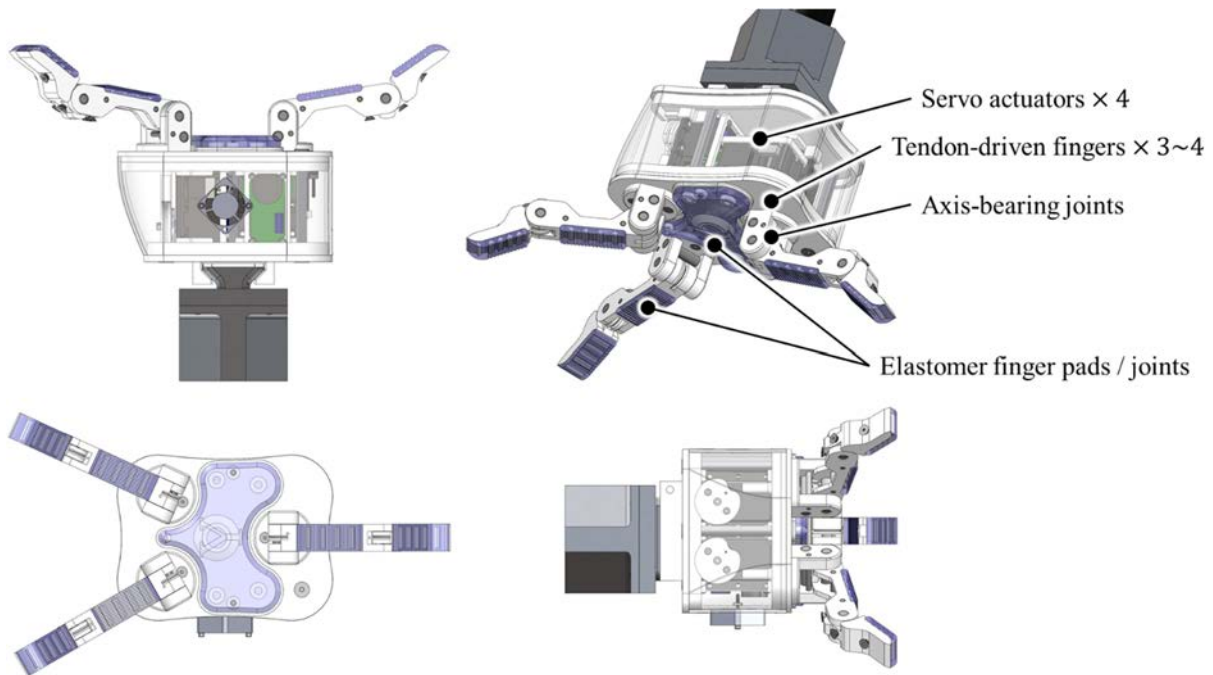


図 3.1-5 YALE Open Hand

本グリップの構築と動作評価によって、デブリ回収の達成に重要な以下の知見が得られた。実機グリップを図 3.1-6 に示す。

- 自重を支える関節剛性
- 十分な把持力を発揮させるための張力およびモータ発揮トルク
- 把持力をデブリに確実に伝達させるための表面摩擦

以上の知見を基に、ばね関節グリップの各構成部品を、例えば金属ばねや骨格などのより強固な構造へと置換し、表面改質やアクチュエータ交換により握力増大を図ることを今後の課題とする。

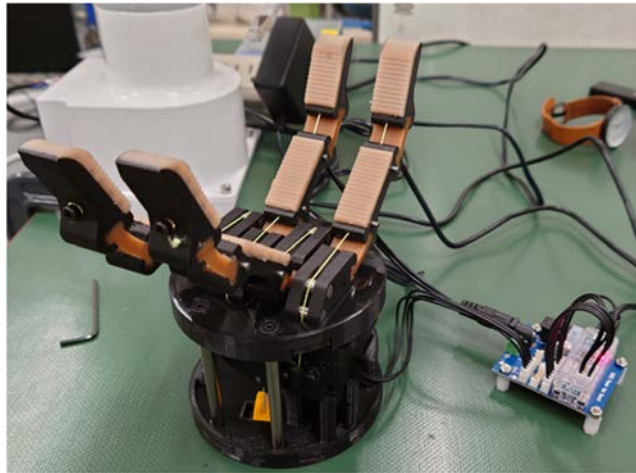


図 3.1-6 YALE Open Hand 実機

3.2 マニピュレータのナビゲーションアルゴリズムの開発(東京大学、再委託先: ライテックス)

(1) 局所領域におけるマニピュレータの遠隔操作システムの開発

遠隔操作システムの構築にあたって、シミュレーションと実空間での双方の評価が必要と考え、環境構築とシステム実証検討を行った。

1FのPCV底部からの燃料デブリ回収のためのマニピュレータの遠隔操作システムを開発した。提案システム検証のためのシミュレーション環境を構築した。環境情報として、ロボットが運動する空間の範囲を決定する必要がある。図3.2-1のように、今回は、PCVペDESTAL周辺の寸法として、直径5m、高さ3.2m程度の円柱を想定した。ペDESTAL上部にロボットマニピュレータのベース部が配置され、当該箇所よりアームを伸ばし、底部のデブリに到達、回収させる。検討結果として、底部にアクセスするために必要なマニピュレータ寸法は、全長4.1m程度と見積もられた。

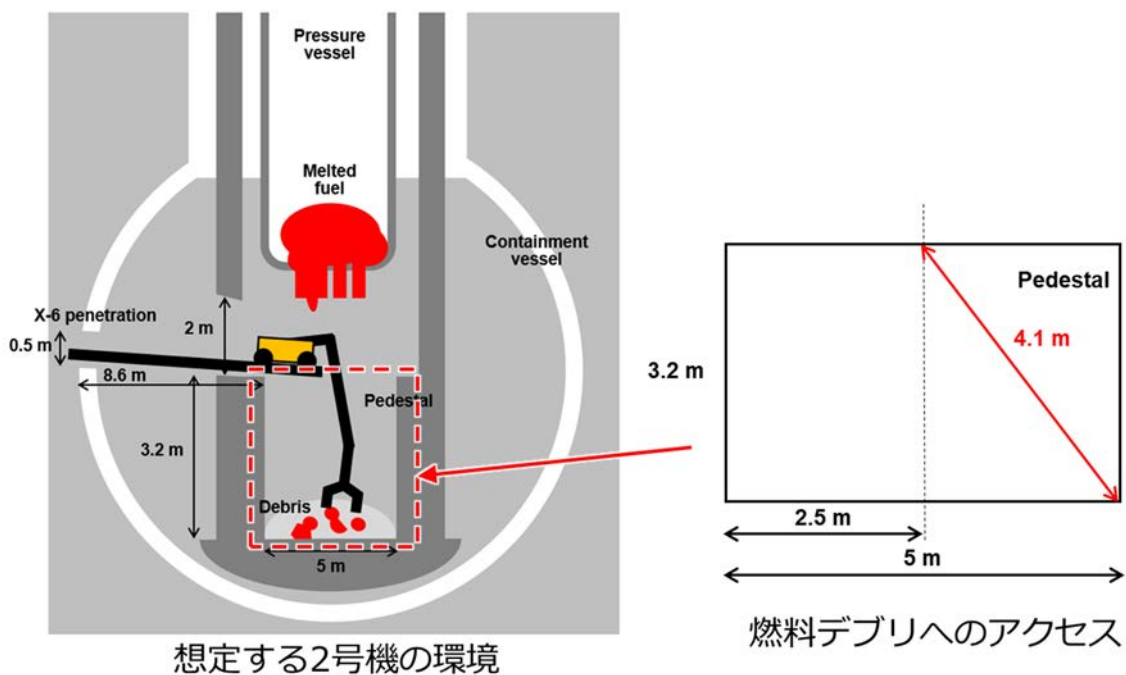


図 3.2-1 PCV 周囲環境の寸法

環境モデルの詳細化検討を行った。令和3年度までは、図3.2-2左に示すような予備的検討モデルを活用していたが、アーム上部に存在する制御棒やペDESTAL底部の凹凸・障害物などを考慮に入れた運動計画の必要性が兼ねてから指摘されていた。そこで、これらを勘案した図3.2-2右の詳細検討モデルを、CGデザイナー Ms. Yingwen Huang に依頼・構築した。ペDESTAL本体や周囲の詳細寸法を再現し、内部障害物や底面凹凸を、柔軟に調整可能なデータとなっている。

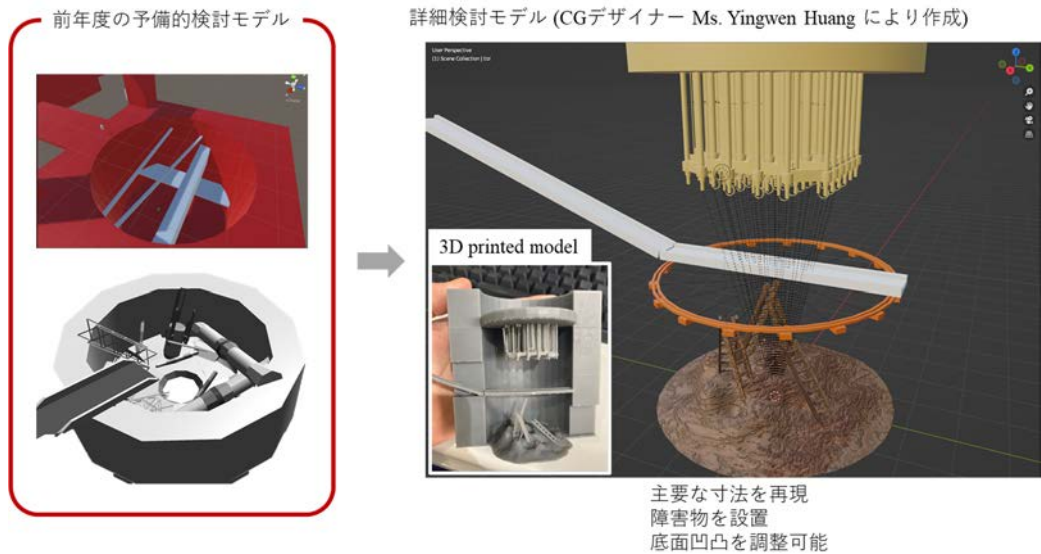


図 3.2-2 PCV 環境モデル

位置センサに頼らないマニピュレータ操作を可能とするための一環として提案するナビゲーションシステムのシステム構成図を図 3.2-3 に示す。システム入出力は図 3.2-3 上部の通りであり、カメラ映像を基にオペレータが対象点をクリックすると、ロボットマニピュレータは、エンドエフェクタ（手先）を当該位置に到達させるように進行する。まず、オペレータの選択した目標点 $x = (x, y)$ は、カメラモデルなどの仮定を基に、エンドエフェクタの目標手先位置姿勢 $z = (x, y, z, roll, pitch, yaw)$ に変換される。続いて、目標手先位置姿勢 z は、逆運動学計算を介して、ロボット関節位置指令 $\theta = (\theta_1, \dots, \theta_n)$ (ここで n はロボットの関節数) に変換される。最後に、関節位置指令は、減速比などの値を基に、 $q = (q_1, \dots, q_m)$ (ここで m はロボットのモータ数) に変換される。

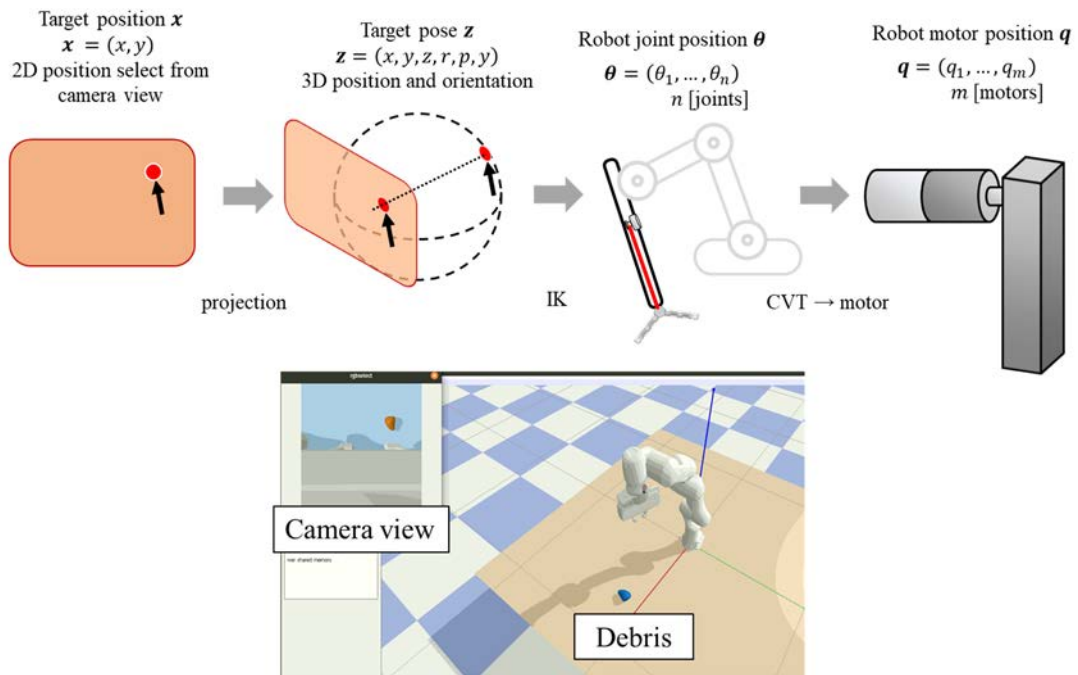


図 3.2-3 ナビゲーションシステム構成図

ソフトウェアシステム構成を図 3.2-4 に示す。二次元目標座標から 3 次元座標への変換と逆運動学の部分は令和 3 年度と同様に、動力学シミュレータの PyBullet [5] 上で実装される。また、関節角度指令からアクチュエータ角度指令への変換およびアクチュエータ角度指令に追従するための電圧・電流指令の出力は、ロボットと共に提供される API やファームウェアを活用する。これらのソフトウェアの検証を、前年度構築された長尺マニピュレータのシミュレーションと、小型ロボットマニピュレータ、等身大ロボットマニピュレータに対して行った。

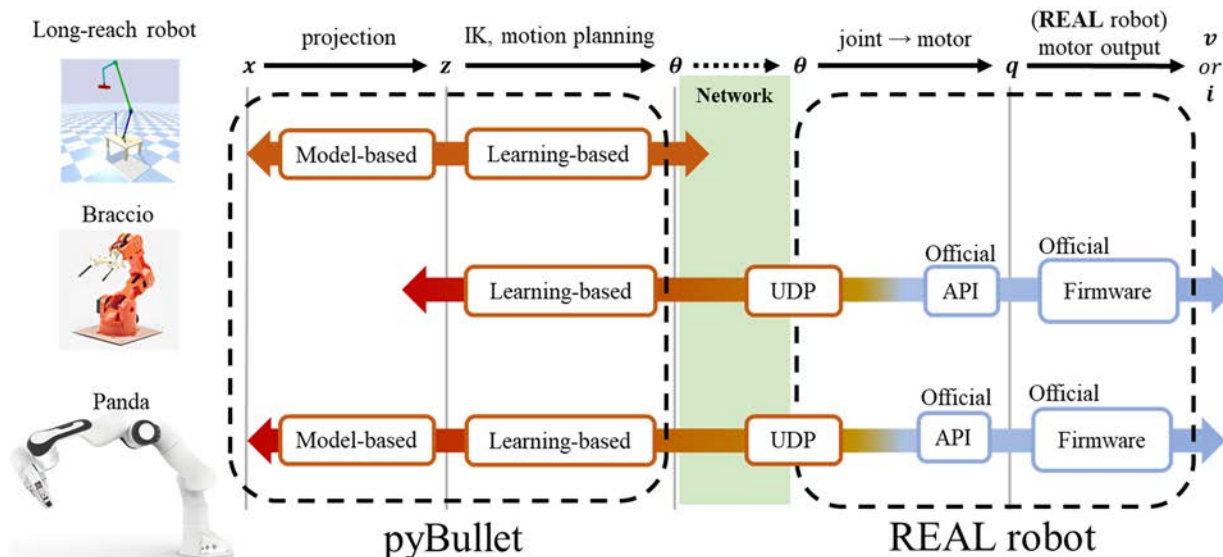


図 3.2-4 ソフトウェアシステムと評価対象

(2) 可到達域評価

英国チームの考案したマニピュレータの CAD データを基に、ロボット幾何モデルを構築した。当該データを URDF で作成することで、ROS 対応の各種ソフトウェアパッケージとのシームレスな結合を可能とする。データ変換には、3次元 CAD の SolidWorks 上で動作するアドオンソフトウェアの SolidWorks URDF Exporter を活用した。図 3.2-5 は、視覚化ソフトウェアに当該ロボットモデルを表示したものであり、GUI ベースでロボットモデルの関節可動域などの簡易的検査を実行可能である。

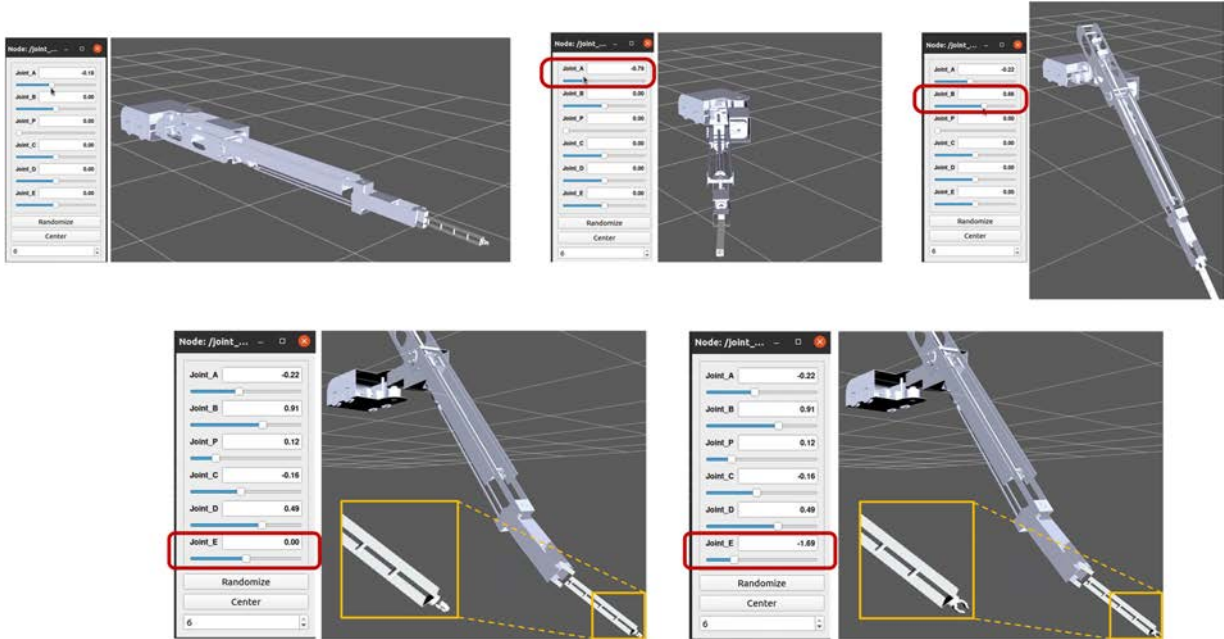


図 3.2-5 ロボット幾何モデル

可到達域の計算アルゴリズムについて説明する。可到達域は、障害物が存在しない空間においてロボットのエンドエフェクタが自身のリンクや関節の運動により到達可能な領域を表す [2]。

想定シナリオでは、ロボットは開口部から腕を伸ばし、障害物の存在する底部にアプローチする。前年度成果と同様のアルゴリズムを、英国チーム設計マニピュレータモデルに対して適用したものである。自由空間上での計算結果のプロットを図 3.2-6 に、PCV 模擬環境下におけるプロットを図 3.2-7 に示す。

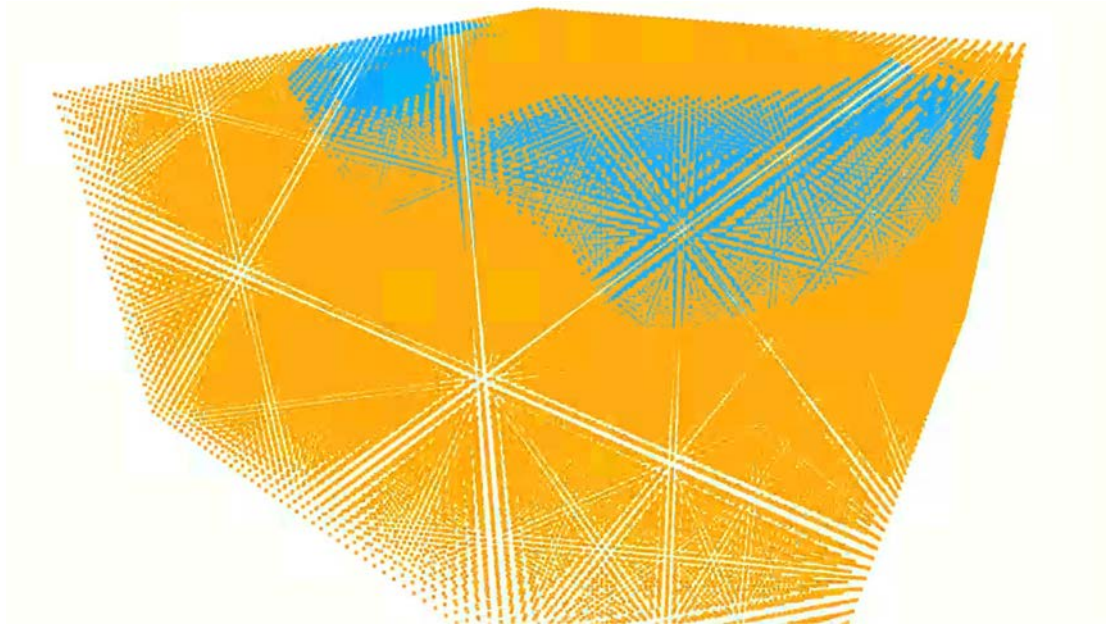


図 3.2-6 自由空間におけるロボット可到達域

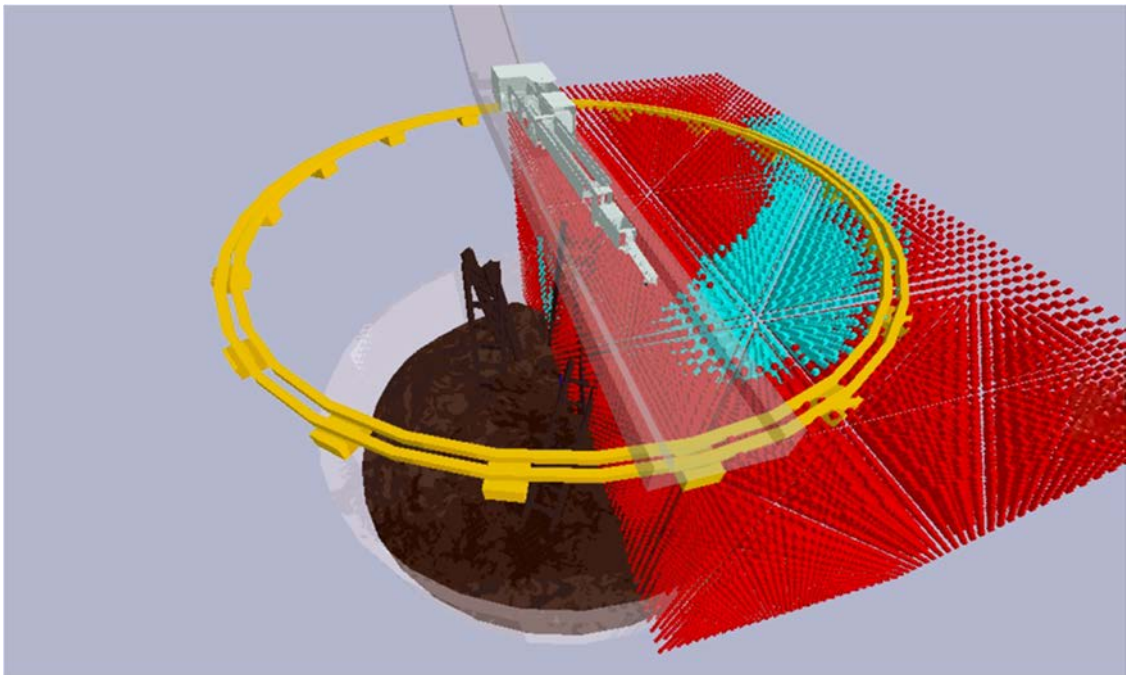


図 3.2-7 PCV 詳細モデルにおけるロボット可到達域

マニピュレータナビゲーションのアルゴリズムを説明する。ナビゲーション機能については、強化学習の手法の一つとして DDPG と並び活用される Soft Actor-Critic (SAC) アルゴリズムに基づいて学習によって獲得する手法を採用した。手法の特徴として、off-policy (価値関数の更新において方策を用いない) であること、連続空間で有効なアルゴリズムであること、そして探索と活用を両立させることが挙げられる。アルゴリズムの実行に必要な各種の値は以下に設定した。

観測値: カメラ視野内でのデブリ位置、デブリサイズ、関節角度

報酬値: カメラ視野内でのグリッパ位置・デブリ位置と視野中心の距離

終端値: グリッパがデブリに接近

ナビゲーションの流れと、実機ロボットによる実行の様子を図 3.2-8 に示す。

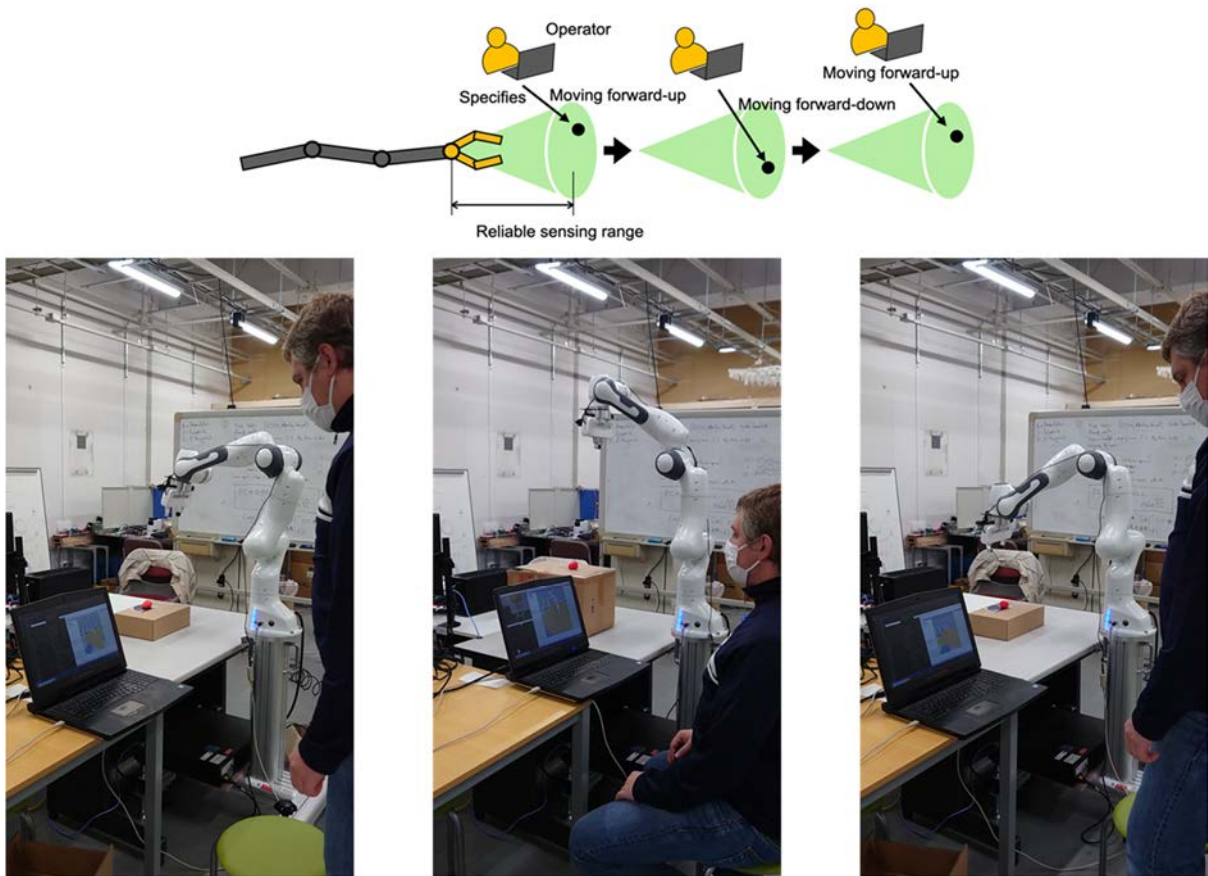


図 3.2-8 実空間におけるロボットナビゲーション実験

3.3 CVT-VIA 構築（英国チーム成果）

英国チーム成果について説明する。PCV 内部環境寸法に基づき、デブリ回収動作を実現するためのマニピュレータおよび当該マニピュレータのための CVT-VIA を設計した。令和 3 年度時点では CVT-VIA の直径は 200 mm 程度となることが予想されたが、設計検討の後 直径 120 mm 程度の CVT-VIA で、マニピュレータ自重を支持可能な構成が得られることが判明した。コンセプト図を図 3.3-1 に示す。ロボットマニピュレータの図中の赤で示す部分が、CVT-VIA が搭載される部分である。なお、手首に相当する先端部の関節に関しては、負荷が比較的小さい部分であることから、搭載是非を比較的柔軟に変更できる。リンク寸法や自由度配置は、実際の設計寸法において修正される可能性があることを付記する。CVT-VIA の駆動力を関節回転運動や直動運動として取り出すにあたり、歯車やタイミングベルト、ラックピニオンなどの導入が予定されている。

当該寸法の CVT-VIA は、1F の PCV 用マニピュレータだけでなく、英国チームの研究目標であるセラフィールド用のマニピュレータでも同一のモデルが活用される見込みであり、駆動における知見はスムーズに共有可能であると期待される。

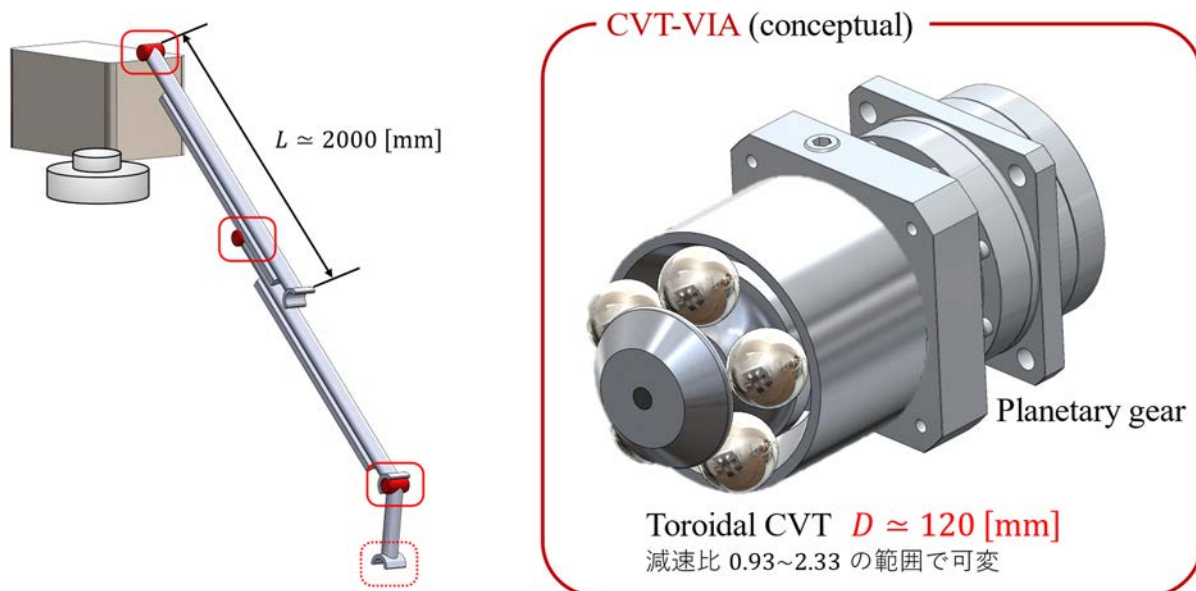


図 3.3-1 英国考案マニピュレータおよび CVT-VIA のコンセプト図

CVT-VIA の駆動原理を図 3.3-2 に示す [6]。高速・低トルク状態を図 3.3-2 の左側に、低速・高トルク状態を図 3.3-2 の右側に示す。トロイダル構造を採用しており、歯車等ではなく、球体とディスク・トロイダル流体のせん断応力により駆動力を伝達する。出力軸の受ける負荷トルクに応じて、ディスクが軸上をスライドする機構を導入することで、球体とディスクの接触位置が移動し、それに伴い入力軸と出力軸の回転半径 r の比率が連続的に変化する。すなわち、入力回転数と出力回転数の比率である減速比が変化することになる。

本研究課題では、出力軸にさらに遊星歯車機構を搭載することで、変速比無限大変速機 (IVT) を構成する。CVT 部と遊星歯車部の減速比を適切に設計することで、マニピュレータ本体への衝撃負荷による出力軸の外乱トルクの入力軸への伝達・破壊を防ぐことが可能となる。

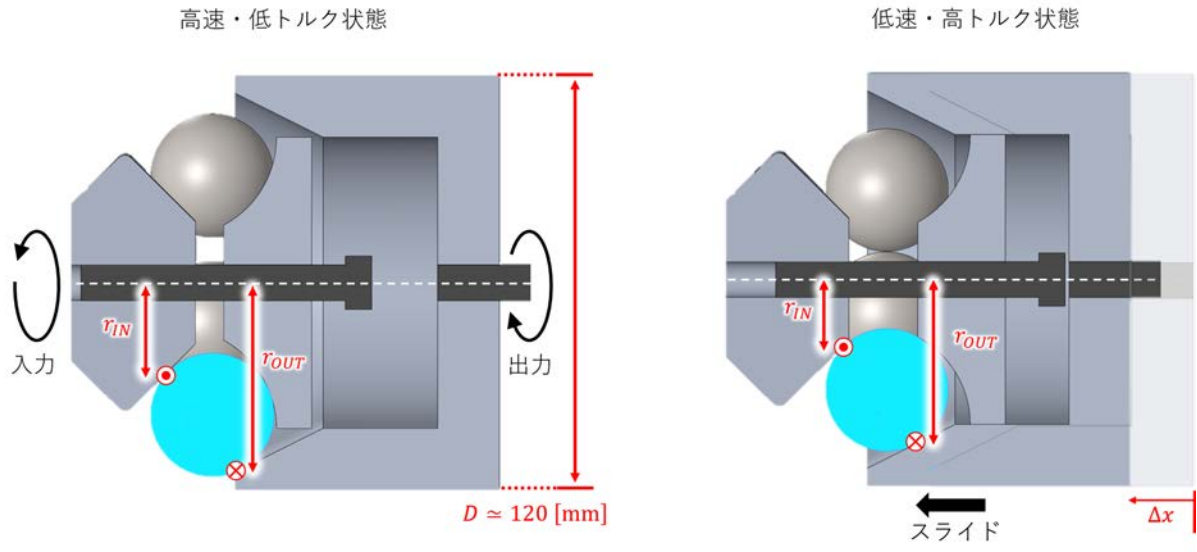


図 3.3-2 CVT-VIA の駆動原理図

3.4 研究推進

毎月2回程度の日英共同のプロジェクト会議を実施し、研究進捗の共有および研究項目間での議論を行った。また、日本側だけの打ち合わせも定期的にも実施しており、東京大学の鈴木俊一先生、東京電力の竹中圭介様から現場の状況やニーズについて助言を得ている。加えて、年度末には、東京大学とTUMの主催する国際ワークショップにて、本プロジェクトの説明発表を行った。

- 第11回日英プロジェクト会議
 開催日：令和4年4月28日
 場所：オンライン（Zoom）
 出席者：日本チーム7名、英国チーム6名
 主な議題：
 - ◇ IEEE IROS 2022 WS（以下、「WS」という。）
採択報告、今後の予定と担当割り振り
 - ◇ 英国 CVT-VIA 卓上試験機案

- 第12回日英プロジェクト会議
 開催日：令和4年5月12日
 場所：オンライン（Zoom）
 出席者：日本チーム7名、英国チーム6名
 主な議題：
 - ◇ アーム設計案
 - ◇ グリッパ関連発表

- 第13回日英プロジェクト会議
 開催日：令和4年5月26日
 場所：オンライン（Zoom）
 出席者：日本チーム7名、英国チーム6名
 主な議題：
 - ◇ 把持タスク、リーチング
 - ◇ WS案内

- 第14回日英プロジェクト会議
 開催日：令和4年6月9日
 場所：オンライン（Zoom）
 出席者：日本チーム7名、英国チーム6名
 主な議題：
 - ◇ 把持タスク、リーチング発表（サブタスク分割）
 - ◇ シミュレーション環境における燃料デブリの生成について

- 第15回日英プロジェクト会議
 開催日：令和4年6月23日
 場所：オンライン（Zoom）
 出席者：日本チーム7名、英国チーム6名

主な議題：

- ◇ 把持タスク
- ◇ RAIN 見学報告、マニピュレータ設計案 (Sellafield, 福島仕様)

● 第 16 回日英プロジェクト会議

開催日：令和 4 年 7 月 7 日

場所：オンライン (Zoom)

出席者：日本チーム 7 名、英国チーム 6 名

主な議題：

- ◇ グリッパ関連について

● 第 17 回日英プロジェクト会議および日本チーム打ち合わせ

開催日：令和 4 年 7 月 21 日

場所：オンライン (Zoom)

出席者：日本チーム 7 名、英国チーム 6 名

主な議題：

- ◇ 今後の購入物品とプロジェクト予定

● 第 18 回日英プロジェクト会議および日本チーム打ち合わせ

開催日：令和 4 年 8 月 17 日

場所：オンライン (Zoom)

出席者：日本チーム 7 名、英国チーム 6 名

主な議題：

- ◇ PCV の 3D モデル
- ◇ WS 関連告知
- ◇ CVT 開発関連

● 第 19 回日英プロジェクト会議および日本チーム打ち合わせ

開催日：令和 4 年 9 月 1 日

場所：オンライン (Zoom)

出席者：日本チーム 7 名、英国チーム 6 名

主な議題：

- ◇ グリッパ関連
- ◇ CVT 開発関連

● 第 20 回日英プロジェクト会議および日本チーム打ち合わせ

開催日：令和 4 年 9 月 20 日

場所：オンライン (Zoom)

出席者：日本チーム 7 名、英国チーム 6 名

主な議題：

- ◇ QST ITER、福島原発見学報告
- ◇ CVT 開発関連

- 第21回日英プロジェクト会議および日本チーム打ち合わせ
開催日：令和4年9月29日
場所：オンライン（Zoom）
出席者：日本チーム7名、英国チーム6名
主な議題：
 - ◇ 把持・リーチングシミュレーション
 - ◇ 繰り返し学習

- 第22回日英プロジェクト会議および日本チーム打ち合わせ
開催日：令和4年10月13日
場所：オンライン（Zoom）
出席者：日本チーム7名、英国チーム6名
主な議題：
 - ◇ 把持・リーチングシミュレーション
 - ◇ CVT CADモデル

- 第23回日英プロジェクト会議および日本チーム打ち合わせ
開催日：令和4年11月15日
場所：オンライン（Zoom）
出席者：日本チーム7名、英国チーム6名
主な議題：
 - ◇ 中間フォロー対策
 - ◇ グリッパ状況

- 第24回日英プロジェクト会議および日本チーム打ち合わせ
開催日：令和4年11月29日
場所：オンライン（Zoom）
出席者：日本チーム7名、英国チーム6名
主な議題：
 - ◇ 繰り返し学習

- 第25回日英プロジェクト会議および日本チーム打ち合わせ
開催日：令和4年12月13日
場所：オンライン（Zoom）
出席者：日本チーム7名、英国チーム6名
主な議題：
 - ◇ 中間フォロースライド・構成案

- 第26回日英プロジェクト会議および日本チーム打ち合わせ
開催日：令和5年1月10日
場所：オンライン（Zoom）
出席者：日本チーム7名、英国チーム6名
主な議題：
 - ◇ 中間フォロースライド・業務計画書・予算状況の確認
 - ◇ CVT・マニピュレータ構築タイムライン案共有

- 第 27 回日英プロジェクト会議および日本チーム打ち合わせ
開催日：令和 5 年 1 月 24 日
場所：オンライン（Zoom）
出席者：日本チーム 7 名、英国チーム 6 名
主な議題：
 - ◇ グリッパ関連

- 第 28 回日英プロジェクト会議および日本チーム打ち合わせ
開催日：令和 5 年 2 月 8 日
場所：オンライン（Zoom）
出席者：日本チーム 7 名、英国チーム 6 名
主な議題：
 - ◇ テストアーム状況、デブリ性状や周囲環境の情報

- 第 29 回日英プロジェクト会議および日本チーム打ち合わせ
開催日：令和 5 年 2 月 22 日
場所：オンライン（Zoom）
出席者：日本チーム 7 名、英国チーム 6 名
主な議題：
 - ◇ テストアーム状況等
 - ◇ 環境表面観測のための繰り返し学習制御の方策について

- 第 30 回日英プロジェクト会議および日本チーム打ち合わせ
開催日：令和 5 年 3 月 22 日
場所：オンライン（Zoom）
出席者：日本チーム 7 名、英国チーム 6 名
主な議題：
 - ◇ JAEA-Review 関連
 - ◇ マニピュレータ末端リンク設計

- 第 31 回日英プロジェクト会議および日本チーム打ち合わせ
開催日：令和 5 年 4 月 5 日
場所：オンライン（Zoom）
出席者：日本チーム 7 名、英国チーム 6 名
主な議題：
 - ◇ JAEA-Review 関連
 - ◇ CVT 調達状況

IROS 2022 WS “Robotics for nuclear environments exploration and decommissioning: challenges and emerging techniques”

ロボティクス分野におけるトップ国際会議の一つである IEEE IROS (International Conference on Intelligent Robots and Systems) における査読付きワークショップを開催した。図 3.4-1 に示すように、当該分野における産学界の専門家や若手研究者による活発な議論がなされた。



図 3.4-1 IROS 2022 Workshop の模様

プログラムは以下の通りである。

09:00 - 09:10

Angela Faragasso, “Workshop overview and introduction”

09:10 - 09:40

Rich Walker, “What can human-like dextrous and tactile telerobotics offer nuclear decommissioning and operations?”

09:40 - 10:10

Romeo Glovnea, “Variable Impedance Actuator based on a Toroidal-type CVT”

10:10 - 10:40

Robert Skilton, “Robotics challenges for fusion energy”

10:40 - 10:47

Fujino et al., “Radiation Source Localization via a Mobile Robot by Integration of Filtered Back-projection”

10:47 - 10:54

Wood et al., “A Systematic Database Search Method for Goal Selection in Redundant Manipulator Path Planning Tasks within Nuclear Gloveboxes”

10:54 - 11:01

Navarro et al., “Complete Coverage Planning in Nuclear Environments Using Off-Center Contact Sensors with 3D Obstacle Geometry”

11:01 - 11:08

Farinha et al., "Optimal Sensor Launching with UAVs for Monitoring of Hazardous Environments"

11:08 - 11:30

"Coffee break with discussions"

11:30 - 12:00

Kostas Alexis, "Autonomous Mapping and Spectroscopic Analysis of Distributed Radiation Fields"

12:00 - 14:00

"Lunch break"

14:00 - 14:30

Fabio Bonsignorio, "Reproducibility and Benchmarking in Nuclear Decommissioning"

14:30 - 14:37

De Schepper et al., "Design and Comparison of a Passive and Active Multiple Radiological Point Source Localisation Algorithm"

14:37 - 14:44

De Mari et al., "Nuclear Plant Containment Building Inspection via Long-Reach Cable-Driven Hyper-Redundant Robot"

14:44 - 14:51

Liu et al., "Viewpoint Presentation for Teleoperation of Robot Manipulation in Fuel Debris Removal Task with 3-Dimensional Obstacles"

14:51 - 14:58

Parween et al., "Design of a Continuous Variable Transmission based Nuclear Decommissioning Robotic Arm"

14:58 - 15:10

"Coffee break with discussions"

15:10 - 15:40

Iain Darby, "Model Behavior of Radioactive Particles"

15:40 - 16:10

Kaspar Althoefer, "Eversion and Growing Robots: Pipe Navigation, Inspection and Characterization"

16:10 - 16:40

Hajime Asama, "Development of a Novel Robotic System for Nuclear Decommissioning"

16:40 - 17:00

"Best paper award - Panel discussion and Closing Remarks"

当日の様子は、以下の Web サイトに掲載されている。

http://www.robot.t.u-tokyo.ac.jp/Robotics_for_nuclear_environments/

TUM-UTokyo Excellence, Diversity, and Mobility Workshop 2023

TUM と東京大学の共催ワークショップ (TUM-UTokyo Workshop) にてプロジェクト成果についての発表を行った。プログラムを以下に示す。

10:30 - 10:40

Prof. Sakuma, Prof. Lüth and Prof. Malte, "Opening"

10:40 - 11:00

Sun Yilun, "Design of soft robotic structures using multi-objective topology optimization method"

11:00 - 11:20

Chen, Tong (M1), "SLS Printed Volute Springs and Application in Quadruped Robots"

11:20 - 11:40

Keitaro Shimada(D1), "Picosecond-resolution single-shot electron density imaging in ultrafast laser ablation plasmas"

11:40 - 12:40

"lunch"

12:40 - 13:10

Prof. Atsushi Yamashita, "Real-world robotics based on intelligent sensing and AI technologies"

13:10 - 13:30

Mikihiro Ikura(D3), "Spiking Neural Networks for Robust and Efficient Object Detection in Intelligent Transportation Systems With Roadside Event-Based Cameras"

13:30 - 13:50

Shinsuke Nakashima (Project Assistant Prof) , "Decommissioning Robot Manipulator for Fuel Debris Retrieval"

13:50 - 14:10

"Break"

14:10 - 14:30

Angela Faragasso (Project Assistant Prof) , "Towards multi-camera system for Minimally Invasive Surgery"

14:30 - 14:50

Kunio Kojima (Assistant Prof), "Design of jumping humanoid robots based on the relationship between frames and drive-trains"

14:50 - 15:10

Prof. Kei Okada, "Socializing Robots: Towards Everyday Life with Robots"

15:10 - 15:30

"Break"

15:30 - 15:50

Felix Fellner, "Load exchange improvement for passive pre-chamber igniters"

15:50 - 16:10

Michael Stark, "Oil film visualisation during transient operation"

16:10 - 16:30

Koyo Horie(MI), "Analysis of Carbon Dioxide Emission Mechanisms of a Hybrid Vehicle in On-Road Driving Using Machine Learning"

16:30 - 16:50

Yoneya, Mitsufuji, Miyamoto and Kumano(Hitachi), "Investigation of Ignition Specification for Lean Limit Expansion of Pre-chamber Combustion"

16:50 - 17:00

Prof. Asama, Prof. Lüth and Prof. Malte, "Closing (Photo)"

18:00 - 19:00

"Dinner: Augustiner, Freisinger Landstraße 4, 85748 Garching bei München"

4. 結言

1Fにおいて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が、確認できていない領域が存在しており、内部環境の完全な把握には至っていない状況である。特にペDESTALの内部においては、開口部付近やその直下付近までにしか調査が行われておらず、それ以外の開口部付近よりも奥の領域に関しては不明なままである。また、英国のセラフィールドのような他の原子力発電所の廃止措置においてもロボット技術の活用が期待されている。そこで本研究では、機械的可変インピーダンスアクチュエータを用いたロボットマニピュレータの開発および効率的な探査・廃炉のための人工知能を使った制御手法の構築を実施している。

以下に、3カ年計画の2年目である令和4年度の研究実績を述べる。

(1) 最適なマニピュレータのパラメータ設計（東京大学、再委託先：ライテックス）

前年度に開発したシミュレーション環境を活用し、廃炉措置に最適なマニピュレータやアクチュエータのパラメータの設計をライテックスと共同で行った。構築したシミュレーション環境において適したマニピュレータの寸法・速度伝達比および効率的な把持力の推定を目指した。

得られた情報・最適なマニピュレータのパラメータは英国側の共同研究先と情報交換をすることで、最終的なマニピュレータ設計へと反映させた。

(2) マニピュレータのナビゲーションアルゴリズムの開発（東京大学、再委託先：ライテックス）

① 局所領域におけるマニピュレータの遠隔操作システムの開発

前年度に準備した計算機等を活用し、ナビゲーションアルゴリズムの開発をライテックスと共同で進めた。特に、機械学習手法等を活用した手法の構築、二次元画像からの目標点のオペレータ提示に基づく高信頼性ビジュアルサーボの実現を目指した。

DDPG アルゴリズムなどをベースとした手法を提案し、位置センサに頼らないマニピュレータ操作を可能とするナビゲーション手法を開発した。

(3) 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ち合わせや会議等を開催した。

隔週で英国側とのミーティングを実施した。また、日本側のミーティングにおいても現場との連携を密にして隔週で議論を行った。

(4) 英国側の成果

CVT を用いた VIA の搭載モデルに向けて、設計を行った。1F およびセラフィールドといった環境に応じて要求されるトルクの計算および CVT-VIA の構造の検討を行った。

以上、3 カ年計画の 2 年目である令和 4 年度の研究項目を実施し、目標を達成した。今後の課題としては、以下の研究の実施を目標とする。

まず、令和 4 年度成果等に基づき、CVT-VIA の構築検討を行い、機械式インピーダンスアクチュエータに反映する。また、駆動のためのモデル構築や制御アルゴリズムの設計構築および評価手法の検討を行う。

続いて、検討した評価手法に基づき、マニピュレータの制御性能の評価を行う。シミュレーションモデルとの比較を適宜進める。模擬環境として NARREC 等を活用し、実証実験を行う。

そして、研究推進として、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、研究を進める。また、研究実施計画を推進するための打ち合わせや会議等を開催する。

参考文献

- [1] 東京電力ホールディングス, “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”, 2019,
<https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/decommissioning/committee/osensuitaisaku/team/2019/02/3-3-3.pdf> (参照 : 2023 年 3 月 5 日) .

- [2] Blender Online Community, “Blender - a 3D modelling and rendering package” ,
Stichting Blender Foundation, Amsterdam, 2018.

- [3] Jay Versluis, “Rock generator for blender” , 2018,
<https://github.com/versluis/Rock-Generator> (accessed : 2023/03/05) .

- [4] Shogo Makino, Kento Kawaharazuka, Ayaka Fujii, Masaya Kawamura, Tasuku Makabe,
Moritaka Onitsuka, Yuki Asano, Kei Okada, Koji Kawasaki, and Masayuki Inaba,
“Five-fingered hand with wide range of thumb using combination of machined springs
and variable stiffness joints” , 2018 IEEE/RSJ International Conference on
Intelligent Robots and Systems (IROS), 2018, pp.4562-4567.

- [5] Coumans, E. and Bai, Y., “PyBullet, a Python module for physics simulation
forgames, robotics and machine learning” , <http://pybullet.org> (accessed : 2022/04/05).

- [6] Cretu, O. S. and Glovnea, R. P, “Constant power continuously variable transmission
(CP-CVT) - Operating principle and analysis” , ASME Transaction, Journal of
Mechanical Design, 127(1), 2005, pp.114-119.

This is a blank page.

