



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－

Novel Mechanical Manipulator for Efficient Fuel Debris Retrieval
(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

September 2025

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Review

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)

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 3 月 17 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 3 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、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デスタルの底部に存在する小石状の燃料デブリの回収を目指す。ペデスタル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 5 年度は、マニピュレータのナビゲーションアルゴリズムの開発とマニピュレータの制御性能の評価実験ならびに現場の使用シーンを想定した実証実験に取り組んだ。

令和 4 年度の成果等に基づき、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した。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った。マニピュレータの制御性能の評価を行った。また、シミュレーションモデルとの比較を適宜進めた。また、模擬環境として JAEA 櫛葉遠隔技術開発センター等を活用し、実証実験を行った。

英国チームや外部アドバイザーとの隔週ミーティングなど密な連携のもと、研究を推進した。年度末には、共同ワークショップや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)

— 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 March 17, 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 FY2021, this report summarizes the research results of the “Novel mechanical manipulator for efficient fuel debris retrieval” conducted from FY2021 to FY2023.

The present study aims to the development of a collision-tolerant robotic manipulator with the 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 conducting an investigation in the area deep inside the aperture, which has been difficult with conventional investigations, we aim to recover 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.

This year focused on developing a manipulator navigation algorithm, evaluating control performance, and conducting on-site scenario demonstration experiments. Studies included building a driving model, designing a control algorithm, and assessing manipulator control performance, with comparisons to simulation models. Demonstration experiments were conducted at facilities like the JAEA Naraha Center for Remote Control Technology Development.

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
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 3 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。

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 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 R05I051)

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3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
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5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)【令和3年度～令和4年度】	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)【令和3年度～令和5年度】	3-10
3.2.1 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3年度～令和4年度】	3-10
3.2.2 可変インピーダンスコントローラ的设计【令和5年度】	3-22
3.3 マニピュレータの制御性能の評価実験 (東京大学、連携先：原子力機構) 【令和5年度】	3-25
3.4 現場の使用シーンを想定した実証実験 (東京大学、連携先：原子力機構) 【令和5年度】	3-27
3.5 CVT-VIA 構築 (英国チーム成果)【令和3年度～令和5年度】	3-31
3.6 研究推進	3-40
4. 結言	4-1
参考文献	5-1

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
研究参画者		
国立大学法人東京大学	客員研究員	禹 ハンウル
	特任助教	Angela Faragasso
	助教	小松 廉
	特任助教	中島 慎介
	特任研究員	松日楽 信人
再委託先		
有限会社ライテックス	最高技術顧問 (CT0)	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

表一覧

表 1	グリッパ環境における特徴量ベクトル	.....	3-16
表 2	制御パラメータ	.....	3-26
表 3	今後の展望（ロードマップ）	.....	4-4

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	最適なマニピュレータのパラメータ設計の成果	3-1
図 3.1-2	燃料デブリサンプル	3-2
図 3.1-3	ばね関節のための靱帯拘束	3-3
図 3.1-4	ばね関節の変形による靱帯長さ変化 (Yaw 運動は省略)	3-4
図 3.1-5	グリップ駆動原理	3-5
図 3.1-6	燃料デブリ回収グリップ試作機	3-5
図 3.1-7	デブリ回収グリップの構成部品	3-6
図 3.1-8	提案グリップによる物体把持の様子	3-7
図 3.1-9	提案グリップの水中動作の様子	3-7
図 3.1-10	YALE OpenHand (参考文献[5]を基に作成)	3-8
図 3.1-11	YALE OpenHand 実機	3-9
図 3.1-12	YALE OpenHand 動作評価の様子	3-9
図 3.2-1	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 の成果	3-10
図 3.2-2	PCV 周囲環境の寸法	3-11
図 3.2-3	PCV 環境モデル	3-12
図 3.2-4	ナビゲーションシステム構成図	3-12
図 3.2-5	ロボットアームのグリップ部付近に仮想のカメラが搭載さ れ視界を提供する	3-13
図 3.2-6	オペレータ指示によるロボットの対象物体へのリーチング	3-14
図 3.2-7	カメラ画像からの特徴抽出	3-16
図 3.2-8	対象物体へのリーチングタスク	3-17
図 3.2-9	ソフトウェアシステムと評価対象	3-18
図 3.2-10	ロボット幾何モデル	3-19
図 3.2-11	自由空間におけるロボット可到達域	3-20
図 3.2-12	PCV 詳細モデルにおけるロボット可到達域	3-20
図 3.2-13	実空間におけるロボットナビゲーション実験	3-21
図 3.2-14	マニピュレータ幾何モデル	3-22
図 3.2-15	マニピュレータ電装系と本体	3-22
図 3.2-16	マニピュレータ電装系システム	3-23
図 3.2-17	マニピュレータソフトウェアのシステム構成	3-24
図 3.3-1	マニピュレータ肩関節ヨー軸のポテンショメータ	3-25
図 3.3-2	マニピュレータ駆動軸構成	3-26
図 3.4-1	ナビゲーション実験目標	3-27
図 3.4-2	オペレータ操作端末画面	3-27

図 3.4-3	ナビゲーション実験全景	.....	3-28
図 3.4-4	ナビゲーション実験によるケーブル・コネクタ類の破損と対策	.....	3-29
図 3.4-5	梱包・運搬作業の様子	.....	3-30
図 3.5-1	動力伝達比と出力トルクの角度依存性	.....	3-32
図 3.5-2	CVT の動作様式	.....	3-32
図 3.5-3	運動学解析のための基準座標系	.....	3-33
図 3.5-4	遊星歯車減速機の模式図	.....	3-34
図 3.5-5	2 段階減速の CVT-VIA におけるトルクと角速度出力	.....	3-35
図 3.5-6	英国考案マニピュレータおよび CVT-VIA のコンセプト図	.....	3-36
図 3.5-7	CVT-VIA の駆動原理図	.....	3-37
図 3.5-8	CVT-VIA のシミュレーションモデル	.....	3-37
図 3.5-9	CVT-VIA 実機写真	.....	3-38
図 3.5-10	CVT-VIA への給油の様子	.....	3-39
図 3.5-11	CVT-VIA 本体を転がし、トラクション油を CVT-VIA 本体内で一周させる様子	.....	3-39
図 3.6-1	サセックス大学にて研究設備見学	.....	3-44
図 3.6-2	サセックス大学にて集合写真	.....	3-44
図 3.6-3	年度末共同ワークショップ	.....	3-45
図 3.6-4	柏キャンパス見学	.....	3-46
図 4.1	本研究における実用化イメージと成果	.....	4-4

略語一覧

CLADS	: Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science	(廃炉環境国際共同研究センター)
原子力機構	: 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構	
東京電力	: 東京電力ホールディングス株式会社	
NARREC	: 原子力機構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	
東京大学	: 国立大学法人東京大学	
ライテックス	: 有限会社ライテックス	

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」と略す。）1-3号機の格納容器（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。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（Variable Impedance Actuator：以下、「VIA」と略す。）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。

以下に、3ヵ年計画の3年目である令和5年度の業務実績を述べる。

- (1) マニピュレータのナビゲーションアルゴリズムの開発（国立大学法人東京大学（以下、「東京大学」と略す。）、再委託先：有限会社ライテックス（以下、「ライテックス」と略す。））

① 可変インピーダンスコントローラ的设计

令和4年度の成果等に基づき、無段変速機（Continuously Variable Transmission：以下、「CVT」と略す。）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した。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った。

実施結果の要点として、CVT-VIAによる機械インピーダンスの反映を見据えたマニピュレータ幾何モデルおよびナビゲーションアルゴリズム開発用の実機マニピュレータシステムを構成した。

- (2) 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、「原子力機構」と略す。））

(1)で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った。また、シミュレーションモデルとの比較を適宜進めた。

実施結果の要点として、マニピュレータ実機における関節角度センサや制御パラメータの評価を行った。

(3) 現場の使用シーンを想定した実証実験（東京大学、連携先：原子力機構）

模擬環境として原子力機構櫛葉遠隔技術開発センター（以下、「NARREC」と略す。）等を活用し、実証実験を行った。

実施結果の要点として、提案ナビゲーションシステムを活用し、アーム先端部の障害物回避・ナビゲーションを達成した。

(4) 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ち合わせや会議等を開催した。

実施結果の要点として、英国サセックス大学を訪問すると共に、年度末の共同ワークショップを開催した。

(5) 英国側

CVT を用いた VIA のロボット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 の構造の検討を行い、試験機を構築した。

以上、3 カ年計画の 3 年目である令和 5 年度の業務項目を実施し、所期の目標を達成した。

前年度までの成果報告書：

- ・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 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 2022-040
<https://doi.org/10.11484/jaea-review-2022-040>
- ・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・人材育成事業
JAEA-Review 2024-017
<https://doi.org/10.11484/jaea-review-2024-017>

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、機械的 VIA 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 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。

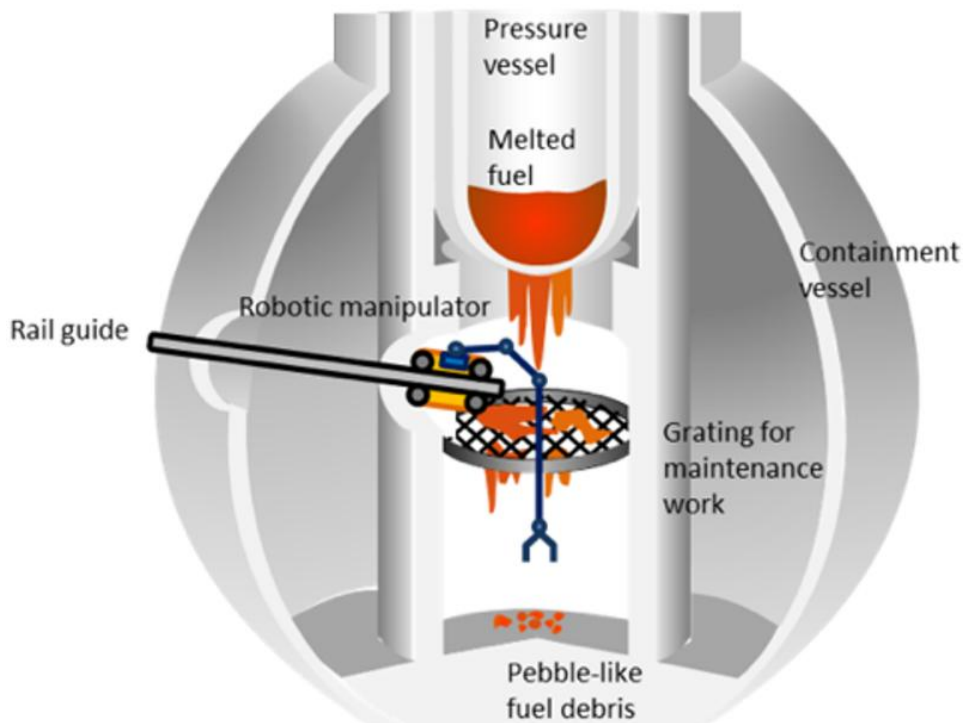


図 1.1-1 提案システムの概要図

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 内のペデスタル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う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いての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：原子力機構）

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：原子力機構）

シミュレーション環境ではない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、実的な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、NARREC 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 VIA 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したがって研究を進める。

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。

項目	年度	令和3年度	令和4年度	令和5年度
(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)		シミュレーション環境の構築 パラメータの最適化		
(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) 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的设计		ナビゲーションアルゴリズム の開発準備	機械式インピーダンスアクチュエータの制作 ナビゲーション手法の開発	制御器の開発 性能評価実験
(3) マニピュレータの制御性能の評価実験 (東京大学、原子力機構)				性能評価実験
(4) 現場の使用シーンを想定した実証実験 (東京大学、原子力機構)				実証実験
(5) 研究推進		研究推進	研究推進	研究推進・取りまとめ
(6) 英国側		Design, manufacture and testing of CVT-VIA	Evaluation of the dynamic performance of the CVT-VIA Development of manipulator/gripper based on CVT-VIA	Demonstration of use-case scenarios

図 2.1-1 年度別全体計画

2.2 令和5年度における成果の目標および業務の実施方法

(1) 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 可変インピーダンスコントローラの設計

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。

(2) マニピュレータの制御性能の評価実験（東京大学、連携先：原子力機構）

(1) で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。

(3) 現場の使用シーンを想定した実証実験（東京大学、連携先：原子力機構）

模擬環境として NARREC 等を活用し、実証実験を行う。

(4) 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。

(5) 英国側（サセックス大学）

CVT を用いた VIA のロボット搭載モデルに向けて、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 の構造の検討を行い、試験機を構築する。

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) 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）	機械式インピーダンスアクチュエータの製作												
可変インピーダンスコントローラの設計	制御器の開発												
(2) マニピュレータの制御性能の評価実験 （東京大学、原子力機構）	性能評価実験												
(3) 現場の使用シーンを想定した実証実験 （東京大学、原子力機構）									実証実験				
(4) 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

実施体制を図 2.3-1 に示す。

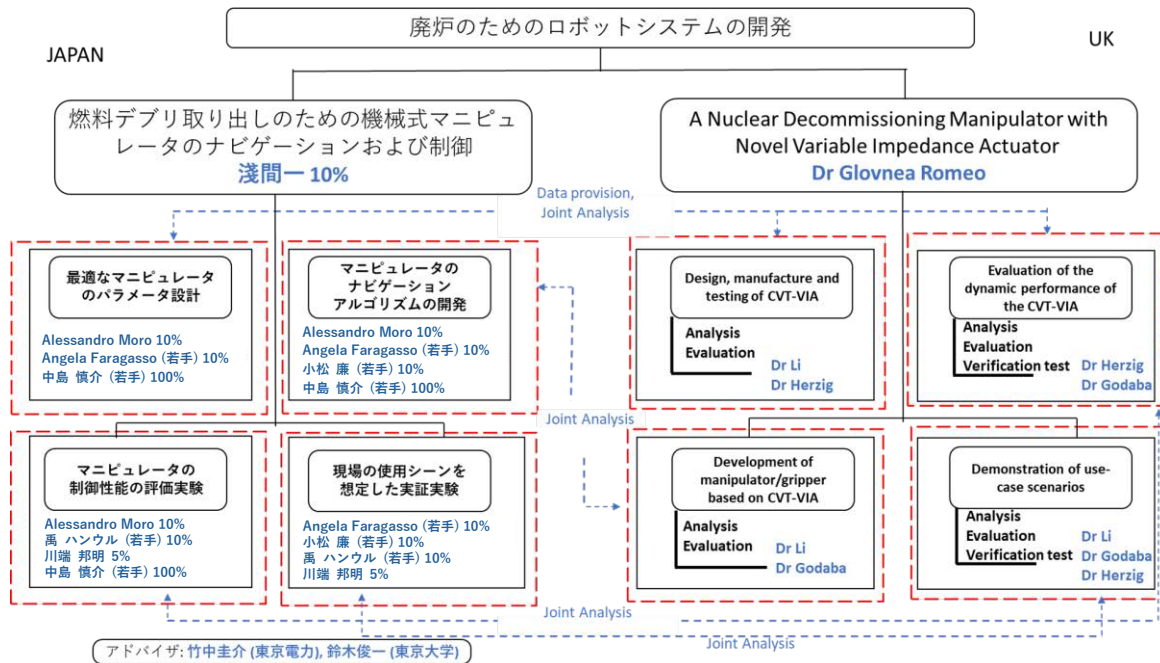


図 2.3-1 実施体制

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)【令和3年度～令和4年度】

【令和4年度までの実施概要】

令和3年度は、シミュレーション環境を構築した。1Fのペダスタル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した。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。

令和4年度では、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。以上の成果を図3.1-1に示す。

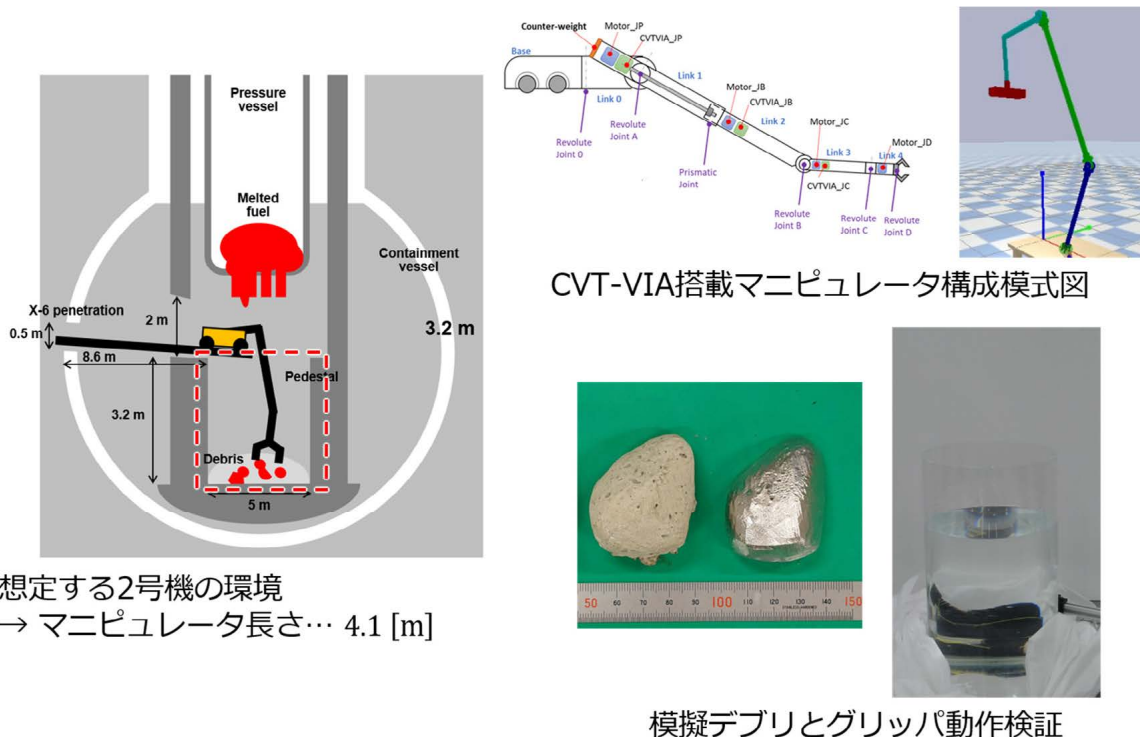
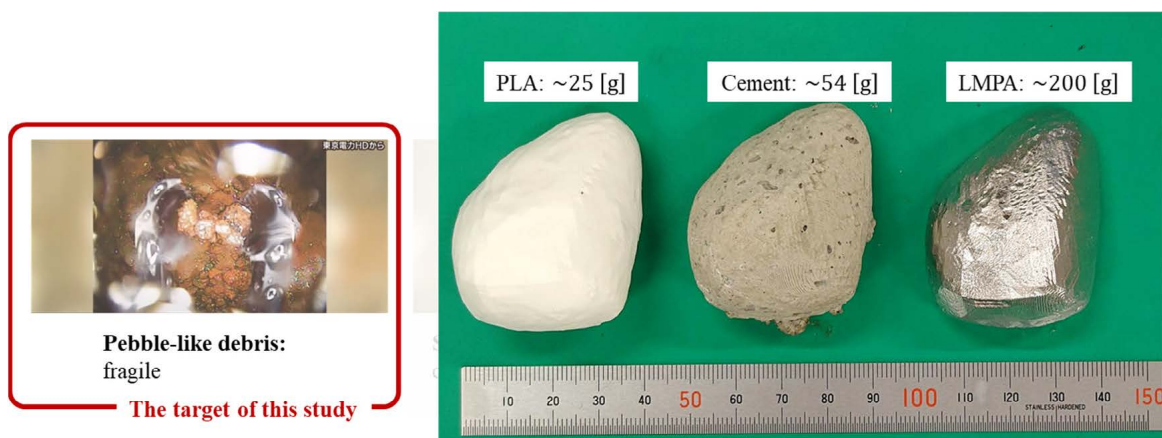


図 3.1-1 最適なマニピュレータのパラメータ設計の成果

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3.1-2に示す。



Divert physical properties depending on the mixture

- **Oxide-based debris** ... light ($3\sim4$ [g cm³]) and **brittle**
- **Metal-based debris** ... heavy ($8\sim10$ [g cm³]) and **ductile**

図 3.1-2 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やセメントと低融点金属 (Low Melting Point Alloy: 以下、「LMPA」と略す。) 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。したがって、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、放射性物質を含むさまざま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、提案グリッパを構成するばね関節の模式図を図 3.1-3 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、ばね関節や靱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。

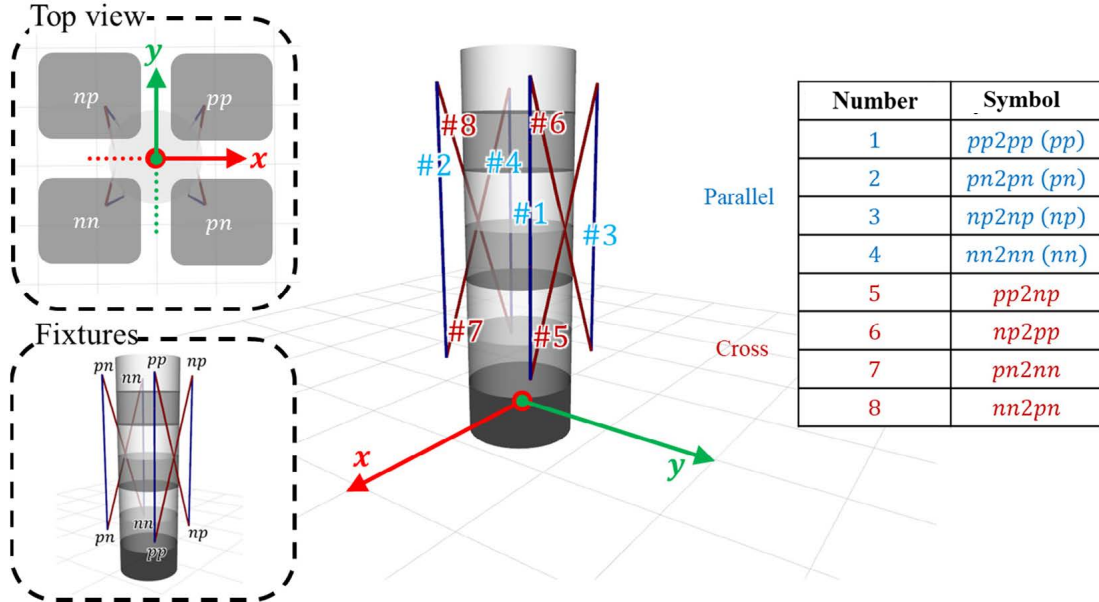


図 3.1-3 ばね関節のための靱帯拘束

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靱帯拘束の手法を活用した。

靱帯拘束とは、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、靱帯拘束は靱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靱帯配置の自動決定に関して、図 3.1-4 にて考察する。ばね関節の曲げ変形によって、靱帯（直線と仮定）の長さ変化をプロットする。初期状態においてばね関節が伸びきった状態であり、靱帯長さ変化が 0 であると想定する。ばね関節がある軸周りに回転したときの靱帯長さ変化が正の場合、当該靱帯はその方向の運動を妨げる要素として働く。反対に、長さ変化が負の場合、当該靱帯は弛むことが可能である。したがって、例えば Pitch+ の運動を許容するばね関節を構成したい場合、当該伸びが正となる靱帯を排除し、残りの靱帯のみ配置すると良い。

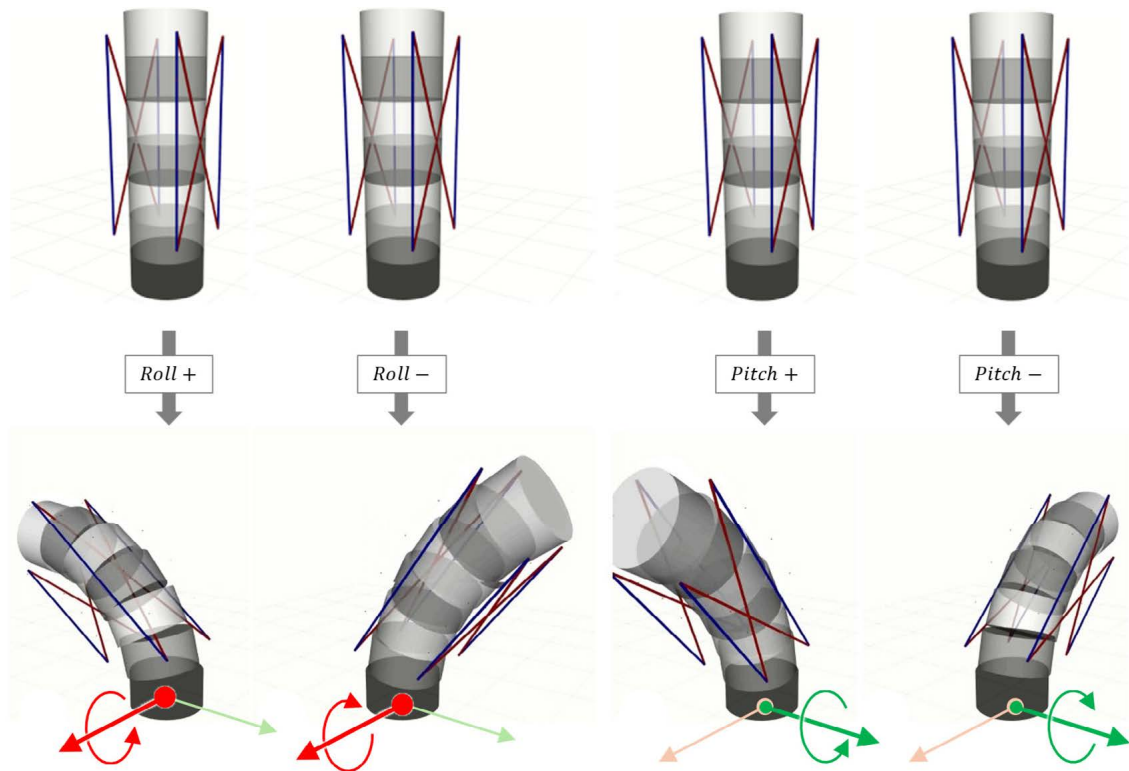


図 3.1-4 ばね関節の変形による靱帯長さ変化（Yaw 運動は省略）

図 3.1-5 にグリップ駆動原理を、図 3.1-6 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。

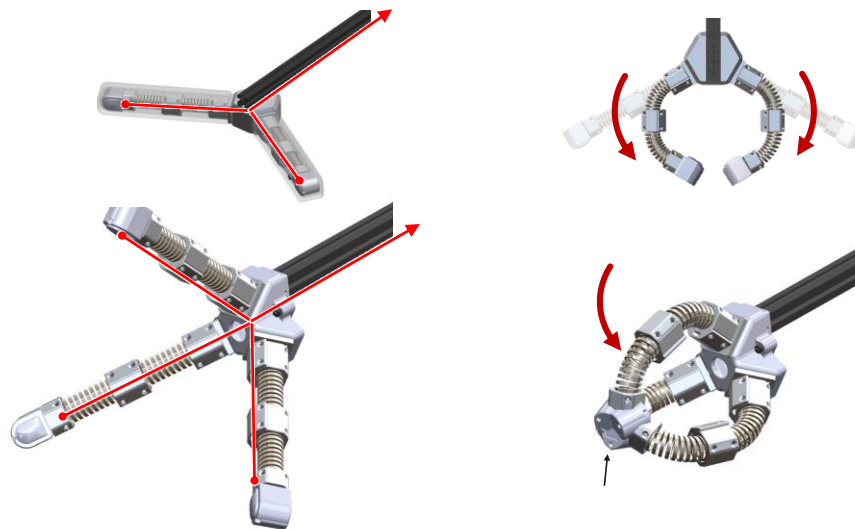


図 3.1-5 グリッパ駆動原理

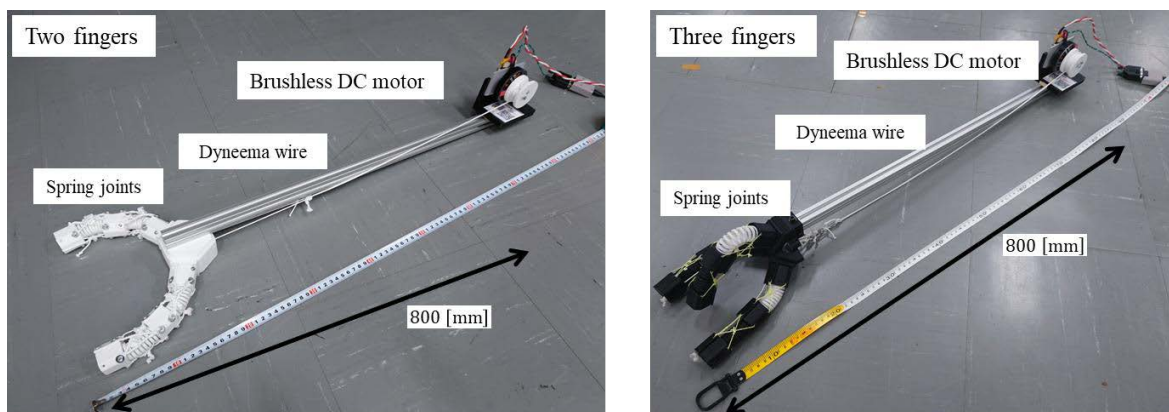


図 3.1-6 燃料デブリ回収グリッパ試作機

腱駆動グリッパの構造は、図 3.1-7 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な、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および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。グリッパ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、実際には靱帯ワイヤの固定点としても作用する。靱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、必要なばねや靱帯・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。

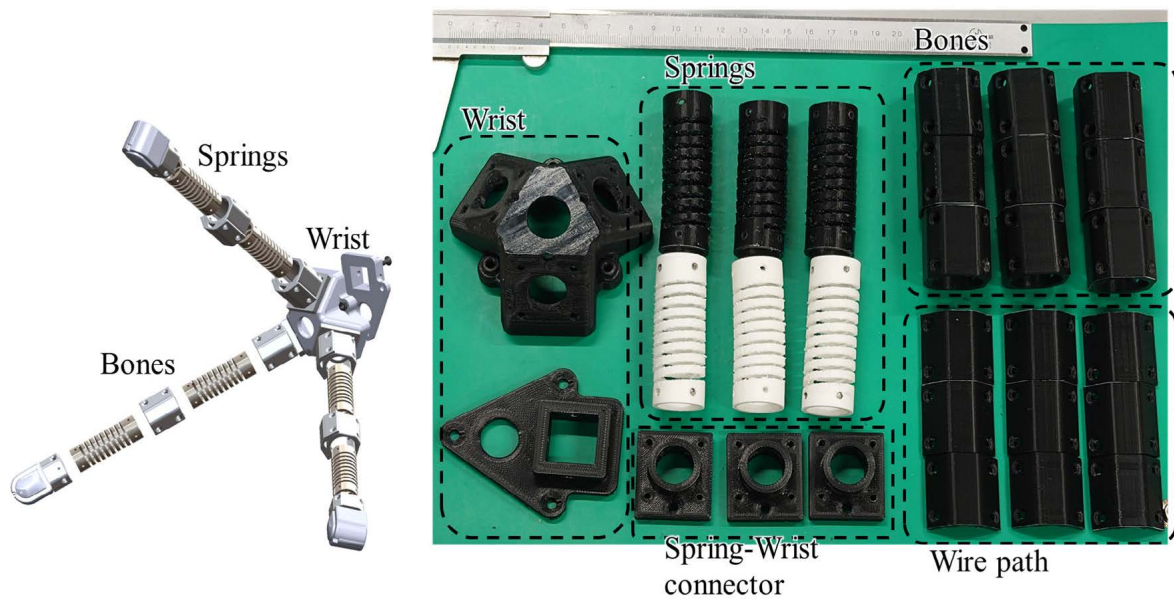


図 3.1-7 デブリ回収グリッパの構成部品

提案グリッパによる物体把持の様子を図 3.1-8 に示す。ある程度の大きさで軽量の物体である場合、把持姿勢の調節とひもの引っ張りにより比較的安定した把持が可能となる。小径の燃料デブリに対しては、より小さな寸法のハンド構成が有効であると考えられる。

また、耐環境評価の一環として、図 3.1-9 に示すように提案グリッパを水中で動作させた。モータ駆動部や電装系がグリッパ本体から離れていることにより、特に防水措置を施すことなく動作を継続できた。また、水槽外壁との接触においても、ばね関節自体の有する柔軟性により環境やグリッパ自体を破損させることなく動作を継続できることが示された。骨格やばね部材を金属加工部品で構築することで、十分な機械強度が期待される。また、スーパー繊維は放射線強度に優れることが報告されているが、PCV 内の狭隘環境における接触・擦り切れの危険性があるので、グリッパ部をゴム手袋のような被覆で保護することが望ましい。

加えて、ペイロードに応じたばね剛性やグリッパのサイズ感に関しては、把持解析システムの導入や、等身大ロボットハンドの知見を有効に活用することが望まれる。ワイヤ駆動を採用することで強力なモータを使用できる一方で、ベース部からの適切なワイヤ経路の設計が課題となる。生体筋配置と類似の問題設定であり、知見の交換が期待される。

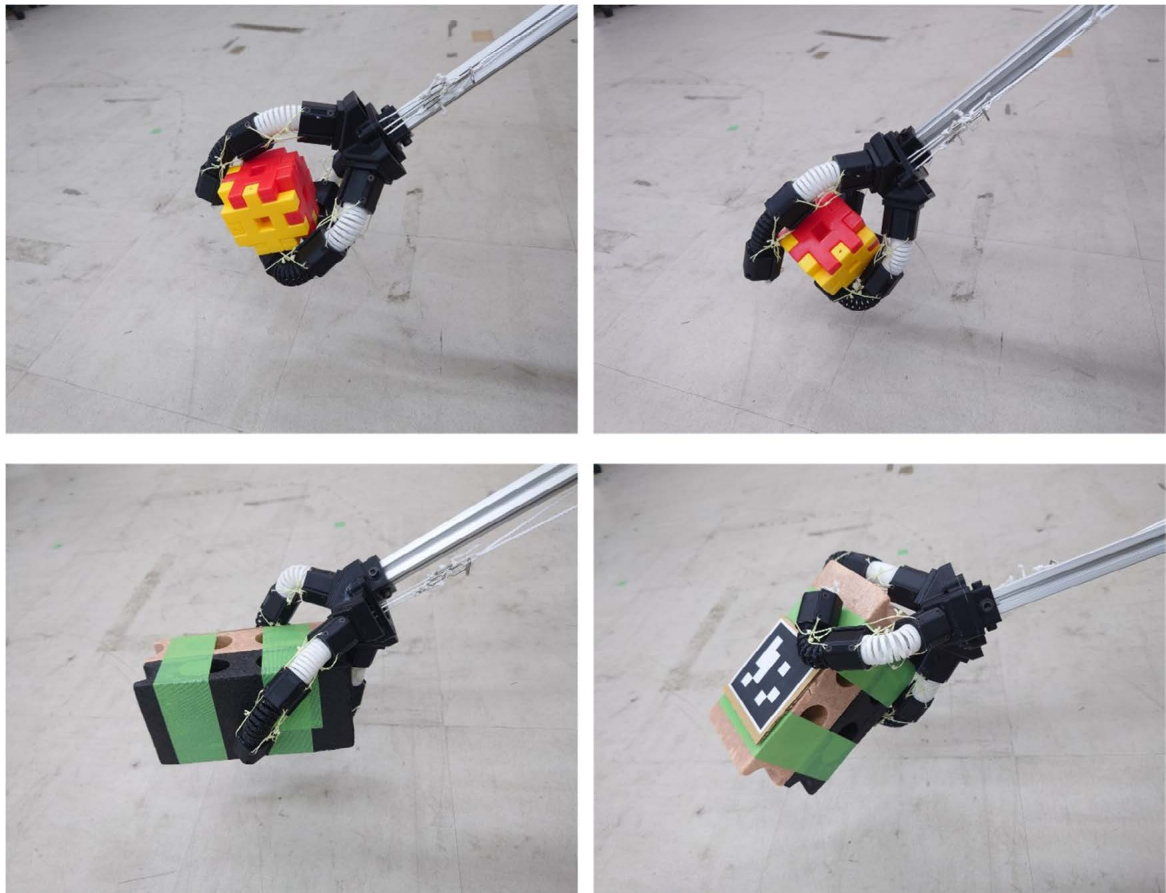


図 3.1-8 提案グリップによる物体把持の様子

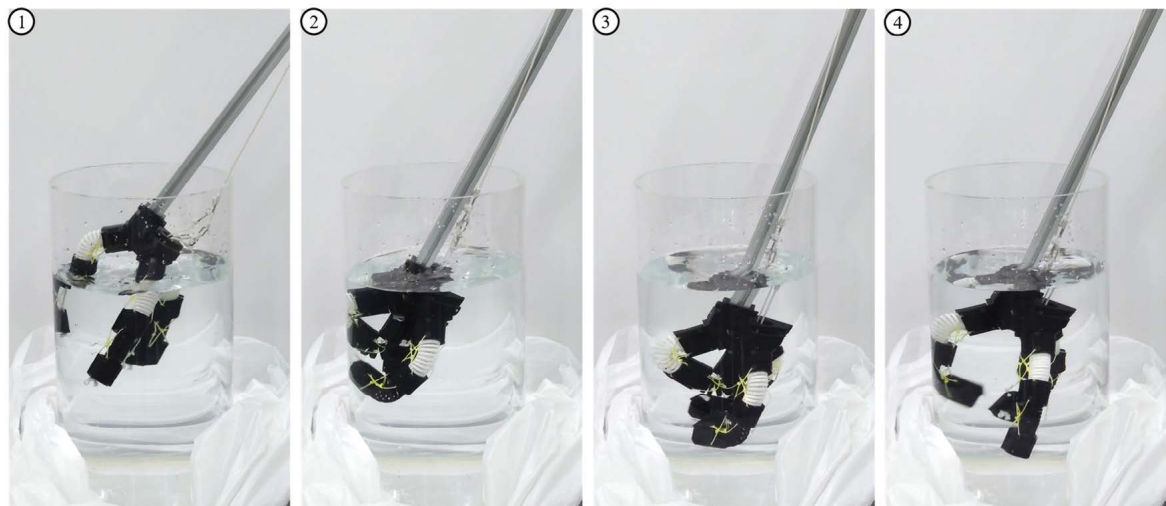


図 3.1-9 提案グリップの水中動作の様子

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た。

図 3.1-10 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 OpenHand[5]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、さまざまな形状のオブジェクトをつかむことが可能。

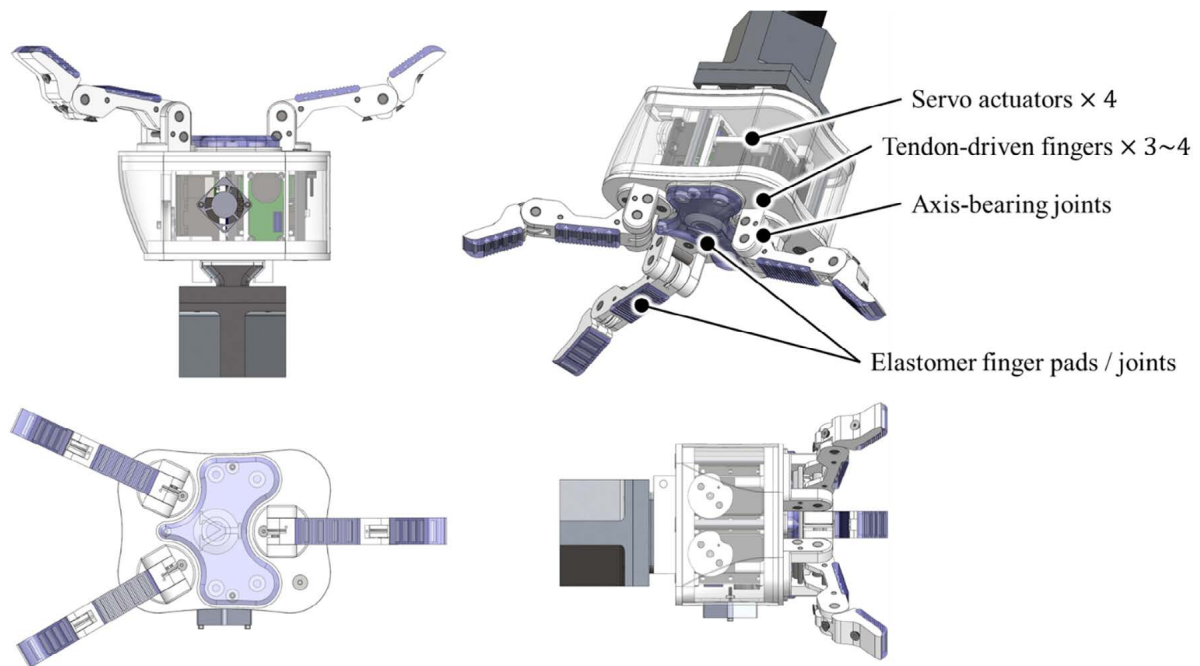


図 3.1-10 YALE OpenHand (参考文献[5]を基に作成)

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 3.1-11 に、動作評価の様子を図 3.1-12 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 3.1-11 YALE OpenHand 実機

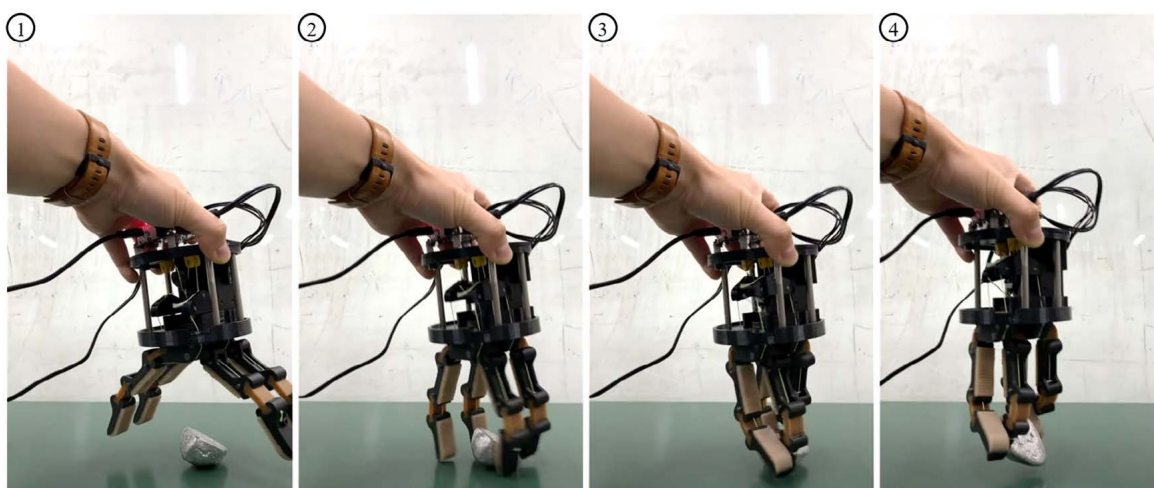


図 3.1-12 YALE OpenHand 動作評価の様子

(NEST Fellow Dr. Zhengyi Jiang <https://youtu.be/kzjBC4T9GyU>)

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

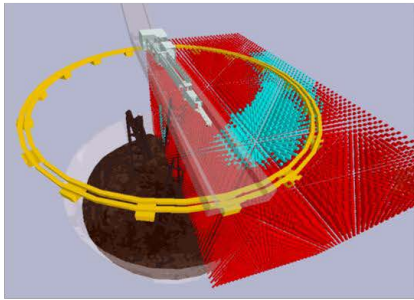
(東京大学、再委託先：ライテックス)【令和3年度～令和5年度】

3.2.1 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3年度～令和4年度】

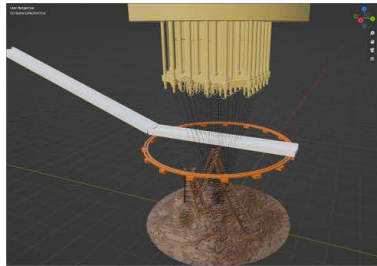
令和3年度には、局所領域におけるマニピュレータの遠隔操作システムの開発に取り組んだ。遠隔操作システムの構築にあたって、シミュレーションと実空間での双方の評価が必要と考え、環境構築とシステム実証検討を行った。PCV 周囲環境の予備的検討モデルを構築・活用したシミュレーションによりナビゲーションシステムを評価した。

令和4年度には、環境モデルの詳細化検討を行った。詳細検討モデルは、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。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のナビゲーションシステムを提案した。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。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。

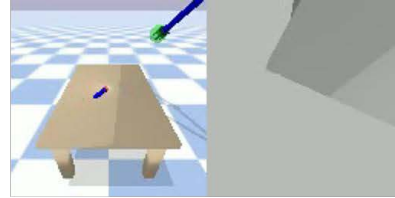
以上の成果を図3.2-1に示す。



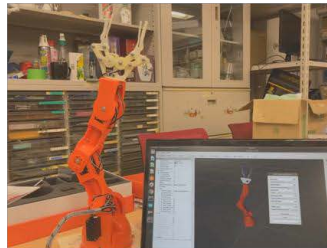
深層強化学習による
可到達域 (Reachability) 検証



再現度を高めた詳細検討環境モデル



手先カメラ映像へのオペレータ提示に基づく
ビジュアルサーボ



卓上ロボット, 等身大協働ロボット実機での
操作検証



図 3.2-1 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の成果

(1) 可到達域評価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 3.2-2 のように、今回は PCV ペDESTAL 周辺の寸法として、直径 5 m、高さ 3.2 m 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 4.1 m 程度と見積もられた。

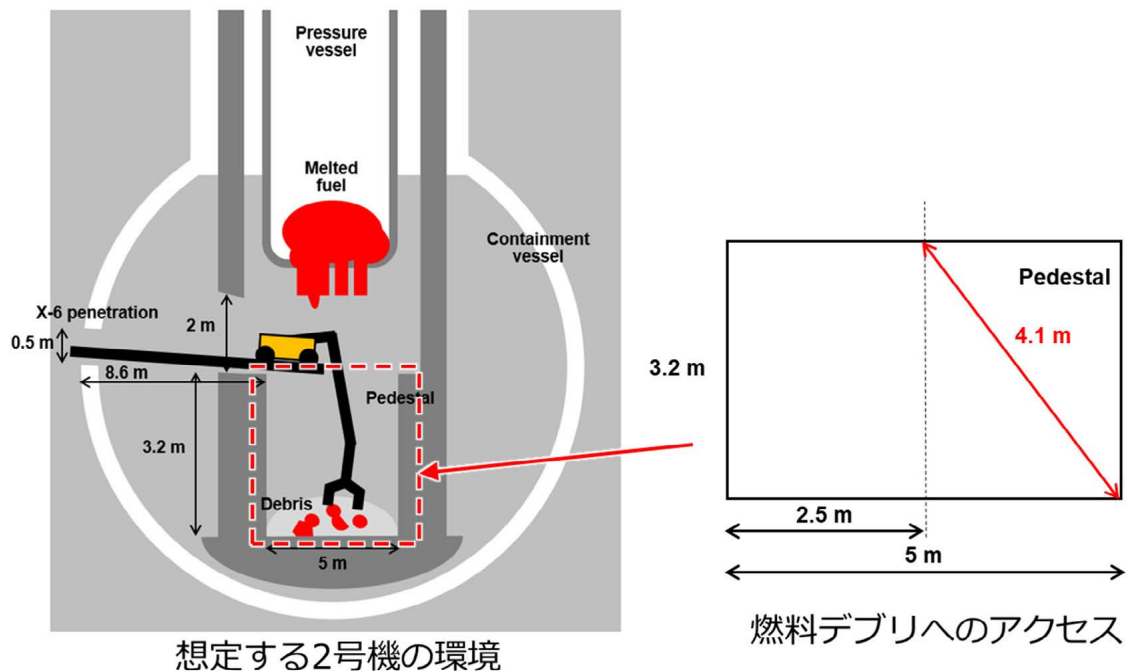


図 3.2-2 PCV 周囲環境の寸法

環境モデルの詳細化検討を行った。令和 3 年度までは、図 3.2-3 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 3.2-3 右の詳細検討モデルを、CG デザイナーの 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。

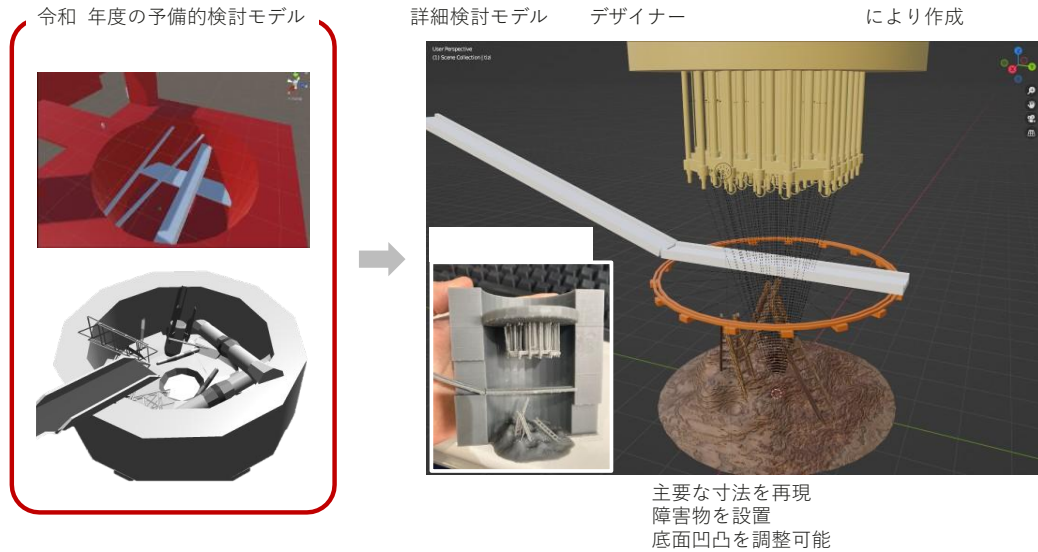


図 3.2-3 PCV 環境モデル

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 3.2-4 に示す。システム入出力は、図 3.2-4 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 $\mathbf{x} = (x, y)$ 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 $\mathbf{z} = (x, y, z, \text{roll}, \text{pitch}, \text{yaw})$ に変換される。続いて、目標手先位置姿勢 $\mathbf{z}$ は、逆運動学計算を介して、ロボット関節位置指令 $\boldsymbol{\theta} = (\theta_1, \dots, \theta_n)$ （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、 $\mathbf{q} = (q_1, \dots, q_m)$ （ここで m はロボットのモータ数）に変換される。

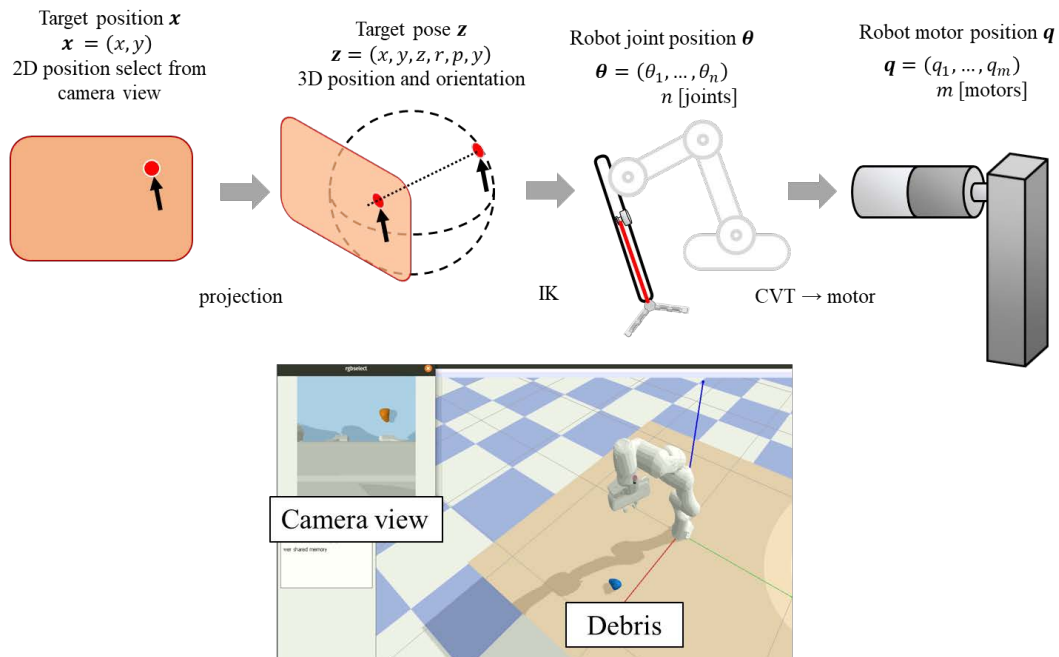


図 3.2-4 ナビゲーションシステム構成図

本項では、購入した計算機とカメラを活用したロボットのナビゲーションシステムのシミュレーションに関して解説する。提案システムは、カメラ映像とオペレータ操作および深層強化学習（DRL：Deep Reinforcement Learning）モデルによるデータを活用する。

① カメラ制御

ロボットは、カメラ映像中から対象点を選択することによって制御される。図 3.2-5 のように仮想的なカメラをロボットシミュレータ上にて実装し、カメラ映像データを出力させる。

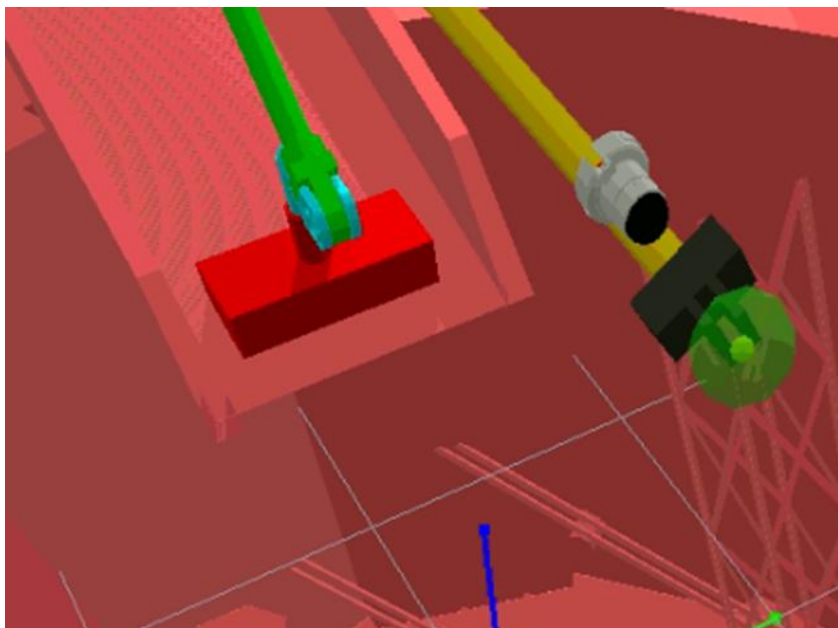


図 3.2-5 ロボットアームのグリップ部付近に仮想のカメラが搭載され視界を提供する
(灰色と黒で描画された円筒形状の物体がカメラに相当する)

オペレータは取得画像中の目標点をクリックすることで選択し、ロボットは選択された点に向かって移動する。提案制御アルゴリズムは、以下に記述される。カメラ視野 (fov: field of view) および対応する射影行列 (Perspective Projection Matrix) について、カメラ行列は、式(1)のようにならわされる。

$$P = \begin{bmatrix} \frac{1}{\tan\left(\frac{fov}{2}\right) \times \frac{w}{h}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\tan\left(\frac{fov}{2}\right) \times \frac{w}{h}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\tan\left(\frac{fov}{2}\right) \times \frac{w}{h}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\tan\left(\frac{fov}{2}\right) \times \frac{w}{h}} \end{bmatrix} \quad \text{式(1)}$$

$$K = \begin{bmatrix} \frac{P[0][0] \times w}{2} & 0 & \frac{w}{2} \\ 0 & \frac{P[0][0] \times h}{2} & \frac{h}{2} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{式(2)}$$

ここで、 w と h は画像サイズであり、 f と h はレンダリングの遠近を表す。エンドエフェクタの移動方向ベクトルは、仮想カメラ取得画像上の選択点の座標から、式(3)のように計算される。

$$\vec{v} = K^{-1} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad \text{式(3)}$$

$$m = \min \left(1 - \frac{|x - \frac{w}{2}|}{\frac{w}{2}}, 1 - \frac{|y - \frac{h}{2}|}{\frac{h}{2}} \right) \quad \text{式(4)}$$

$$\vec{dv} = \frac{\vec{v}}{\|\vec{v}\|_2} \quad \text{式(5)}$$

移動方向ベクトルは、ロボットエンドエフェクタの仮の目標座標を与える。対象物体とグリッパの距離は、カメラ画像における中心座標と選択点間の距離に伴い変化する。カメラ画像の中心から見て、最も近い点が中心から遠いほど、到達する目標点は遠くなる。

$$dv_z = \begin{cases} dv_z \times m, & \text{if forward} \\ -dv_z \times m, & \text{otherwise} \end{cases} \quad \text{式(6)}$$

グリッパ位置および姿勢を表すクォータニオンから、式(7)の手順で回転行列が求められる[6]。新たな目標座標は、式(8)の通りである。

$$R = \begin{bmatrix} 2(q_0^2 + q_1^2) - 1 & 2(q_1q_2 - q_0q_3) & 2(q_1q_3 + q_0q_2) \\ 2(q_1q_2 + q_0q_3) & 2(q_0^2 + q_2^2) - 1 & 2(q_2q_3 + q_0q_1) \\ 2(q_1q_3 - q_0q_2) & 2(q_2q_3 - q_0q_1) & 2(q_0^2 + q_3^2) - 1 \end{bmatrix} \quad \text{式(7)}$$

$$\text{Target} = R\vec{dv} + p_{gripper} \quad \text{式(8)}$$

ここで、 $p_{gripper}$ は、仮想カメラの出力映像中のクリックされた点でのグリッパ座標を表す。ロボット関節角度は、逆運動学を介して計算する[7]。仮想カメラ制御の様子を図 3. 2-6 に示す。

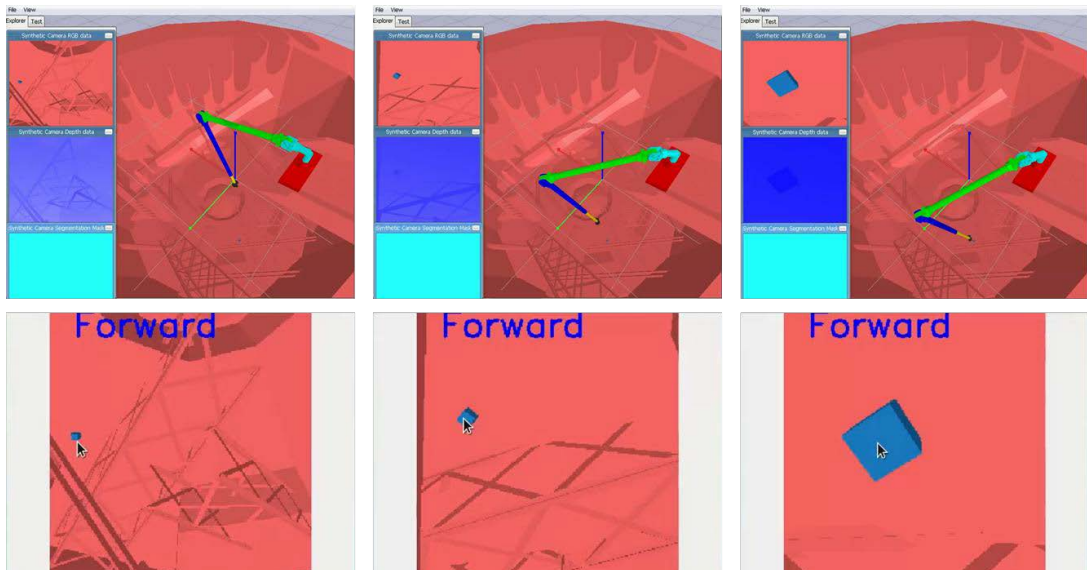


図 3. 2-6 オペレータ指示によるロボットの対象物体へのリーチング
(オペレータがカメラ画像の中の目標点をクリックすると、ロボットは手先を選択座標に向かうように動かす。)

② 深層強化学習

強化学習は、ある環境下におかれたエージェントが試行錯誤を通して望ましい挙動を獲得していく問題である[8]。その中でも、深層強化学習は、強化学習に深層学習を応用した手法と言える[9]。ここでは、ロボットの訓練のために、オープンソフトの学習フレームワークを活用した。Stable Baselines3 (SB3) は、安定性・信頼性が確保された強化学習アルゴリズムの実装を集めたものであり、機械学習フレームワーク PyTorch 上で実装される[10]。ユーザコミュニティの活動が大規模かつ活発であり、安定性確保や迅速なバグ修正に寄与していることから、本研究における活用は、合理的な選択であると考えた。

本タスクの目標は、ロボット手先を所望の目標座標に自動的に到達させることである。手法としては、Deep Deterministic Policy Gradient (DDPG) [11]を選択した。DDPG は、特に連続変化する環境における学習に適した性質を備える。学習シナリオでは、ロボットアームは自動で目標物体（デブリ）に到達しなくてはならない。本シナリオでは、RGB の仮想カメラを用いたビジュアルサーボとロボットおよび環境モデルを考える。双方に対して、以下の行動と観測および報酬関数を定義した。報酬関数は以下の Algorithm 1 によってあらわされる。また、閾値 σ は 0.001 とした。

Algorithm 1 Reward Function

```

Input:
     $d$  = the distance between the end-effector and the target
     $\vec{a}$  = the vector of joint actions
     $t$  = the current time step
Output:
     $T$  = boolean terminal state
     $R$  = the reward signal
 $T = \text{False}$ 
 $R_{\text{distance}} = -d$ 
 $R_{\text{control}} = -\|\vec{a}\|^2$ 
 $R = R_{\text{distance}} + R_{\text{control}}$ 
if  $R(d < \sigma) \vee (t \geq t_{\text{max}})$  then
     $T = \text{True}$ 
end if

```

ロボットは、トルク制御可能な関節および指を備える。本シナリオでは、連続的な行動空間として各関節角度は、 $[-\pi, \pi]$ [rad]の範囲に収まるように設定した。

行動空間 $\mathbf{A}$ は、

$$\mathbf{A} = \{a_0, a_1, \dots, a_i\} \quad \text{式(9)}$$

として定義される。ロボットの各関節に対する入力であり、正規化されている。 i は、関節軸数に相当する。RGB カメラ映像について観測特徴量は、NatureCNN[12]によって抽出される。NatureCNN は、実質的には小規模の畳み込みニューラルネットワーク (CNN) であり、図 3.2-7 によってあらわされる。

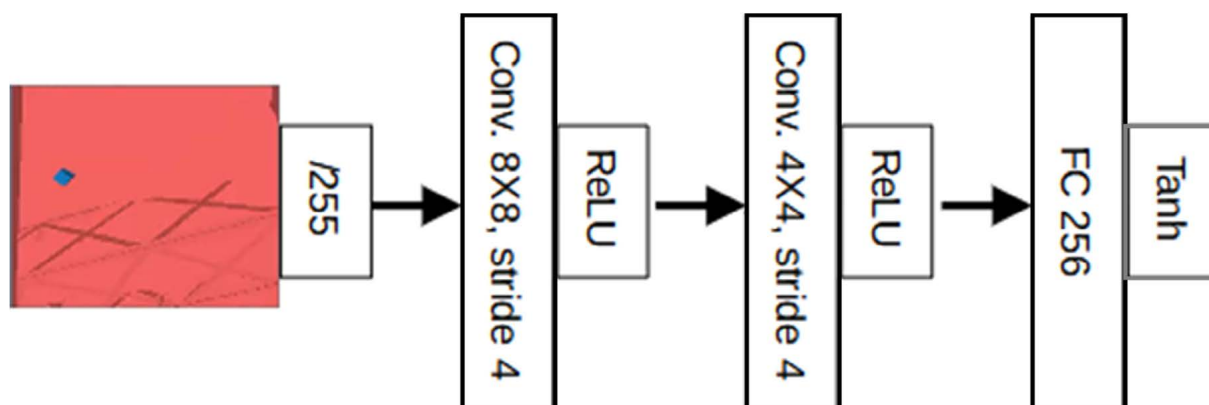


図 3.2-7 カメラ画像からの特徴抽出

表 1 グリッパ環境における特徴量ベクトル

Dimension	Observation
0	世界座標におけるエンドエフェクタ x 位置
1	世界座標におけるエンドエフェクタ y 位置
2	世界座標におけるエンドエフェクタ z 位置
3	エンドエフェクタのクォータニオンの 0 要素
4	エンドエフェクタのクォータニオンの 1 要素
5	エンドエフェクタのクォータニオンの 2 要素
6	エンドエフェクタのクォータニオンの 3 要素
7	グリッパ幅
8	世界座標における対象物体の x 位置
9	世界座標における対象物体の y 位置
10	世界座標における対象物体の z 位置
11	対象物体のクォータニオンの 0 要素
12	対象物体のクォータニオンの 1 要素
13	対象物体のクォータニオンの 2 要素
14	対象物体のクォータニオンの 3 要素

2つの定性的評価の結果を以下に示す。1つは表1に示す観測特徴量を用いたもので、結果は図3.2-8 A)の通りである。もう1つはCNNを活用したもので、結果は図3.2-8 B)に示した。

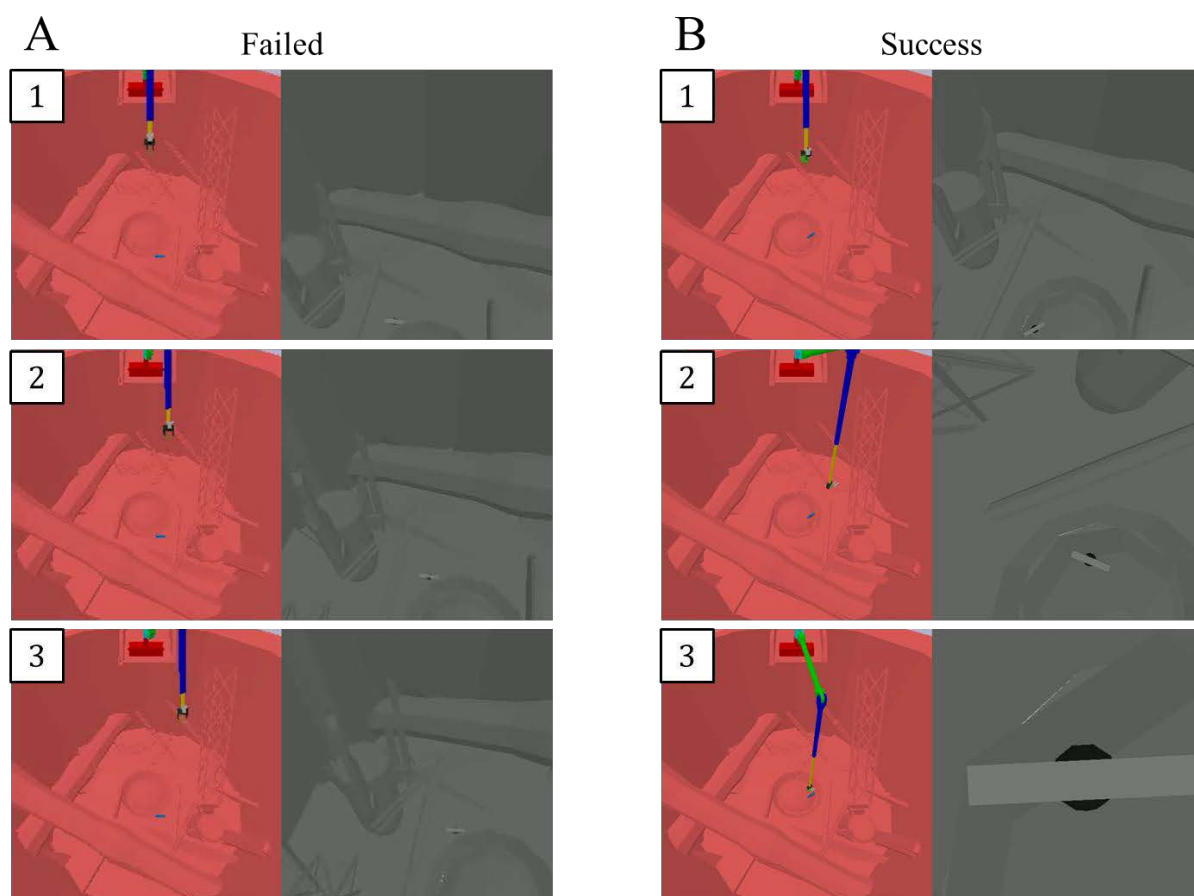


図 3.2-8 対象物体へのリーチングタスク

- A) 表に示した観測量に基づく学習では、失敗してしまった。
 B) 画像から特徴量を抽出する手法を用いた場合、成功した。

ソフトウェアシステム構成を図 3.2-9 に示す。2 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[13]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、令和 4 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。

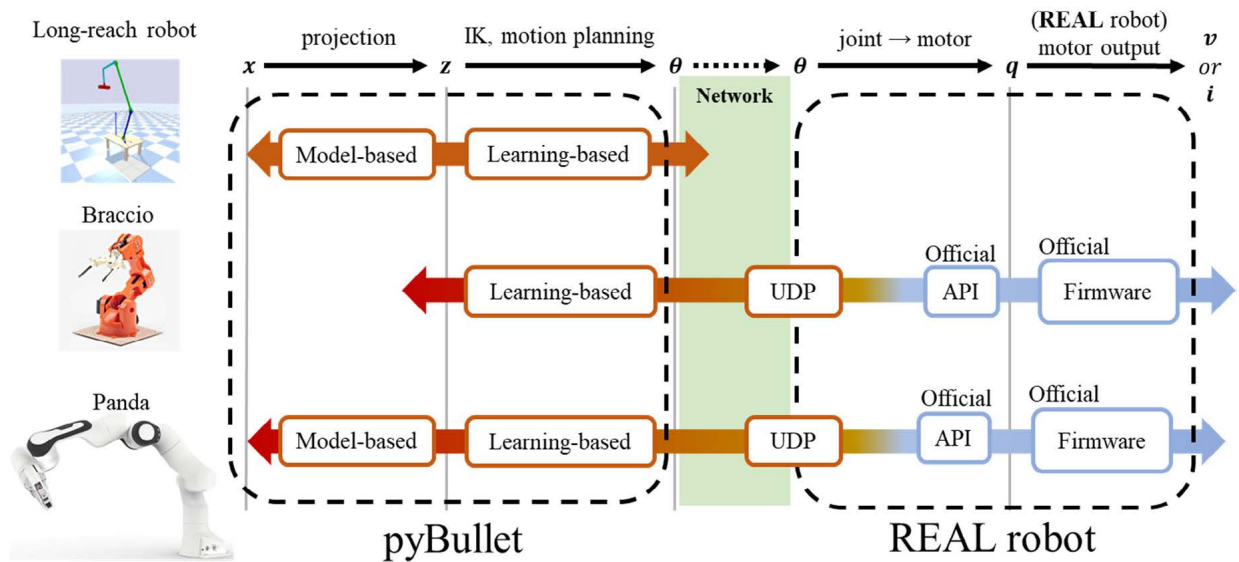


図 3.2-9 ソフトウェアシステムと評価対象

(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、Robot Operating System (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 3.2-10 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。

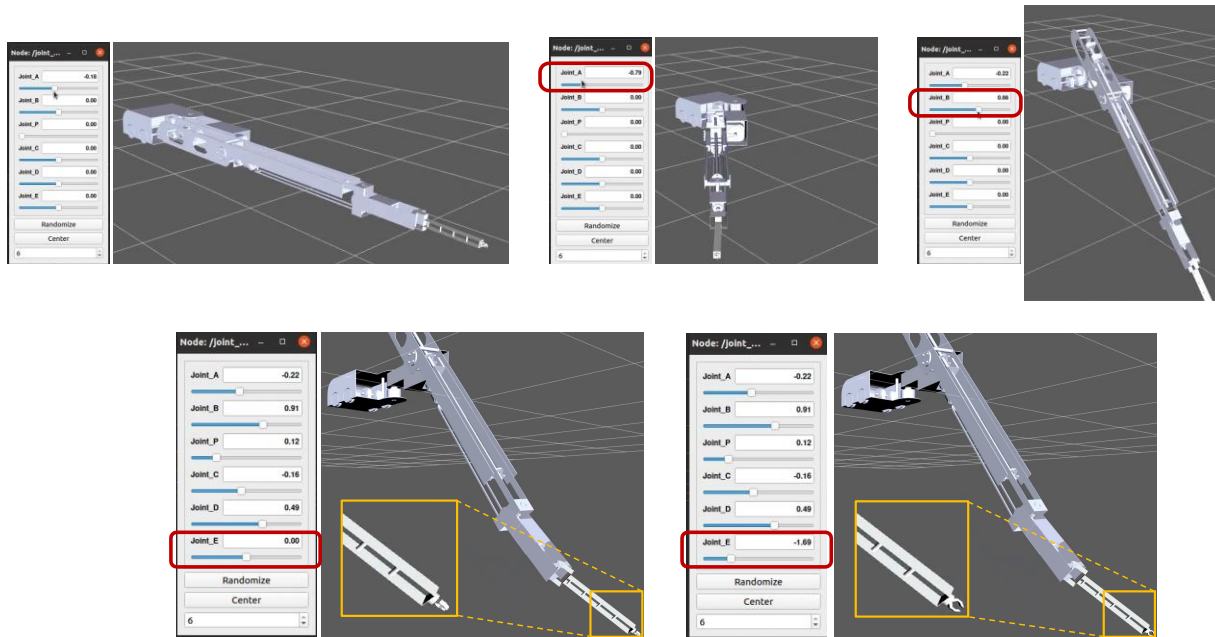


図 3.2-10 ロボット幾何モデル

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。令和 4 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 3.2-11 に、PCV 模擬環境下におけるプロットを図 3.2-12 に示す。

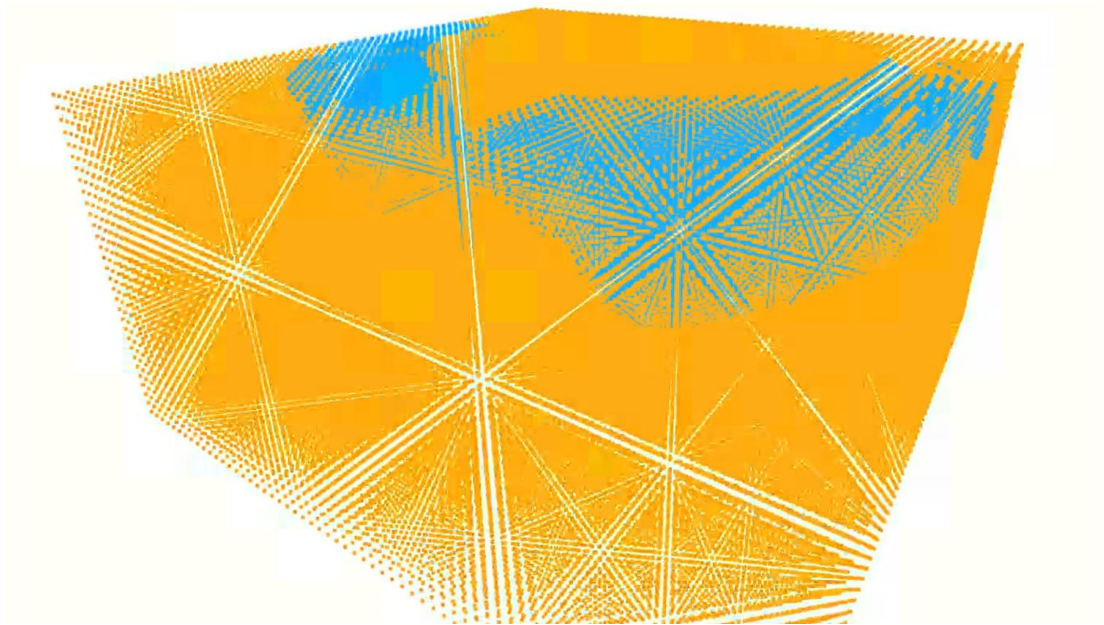


図 3.2-11 自由空間におけるロボット可到達域

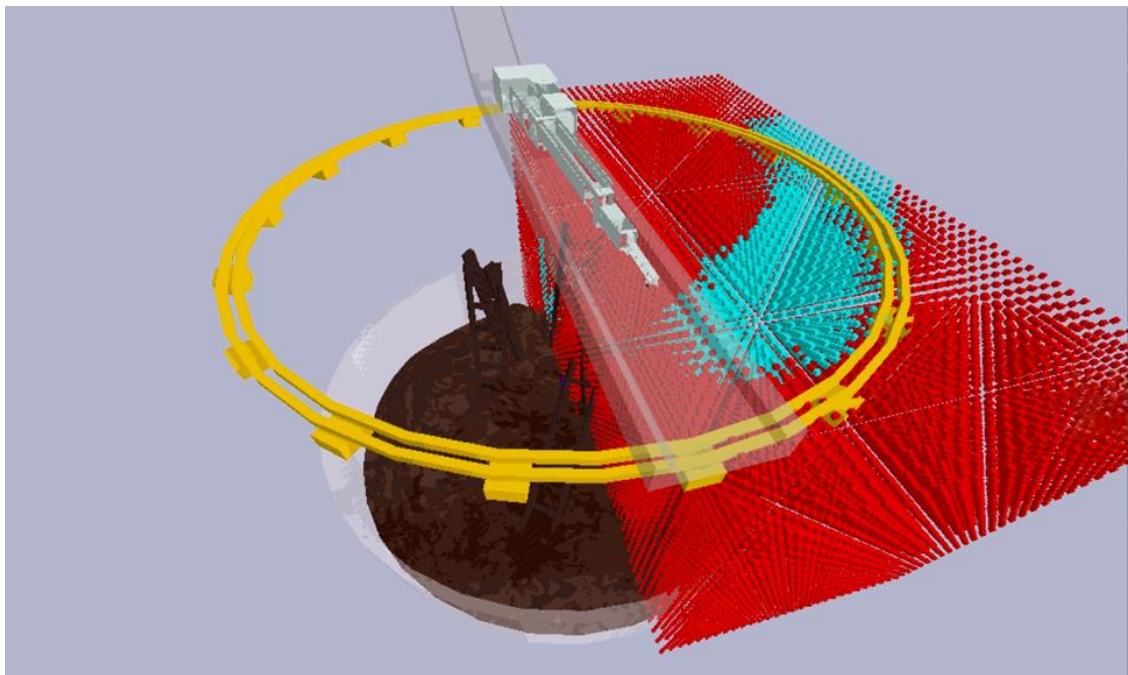


図 3.2-12 PCV 詳細モデルにおけるロボット可到達域

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および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 3.2-13 に示す。

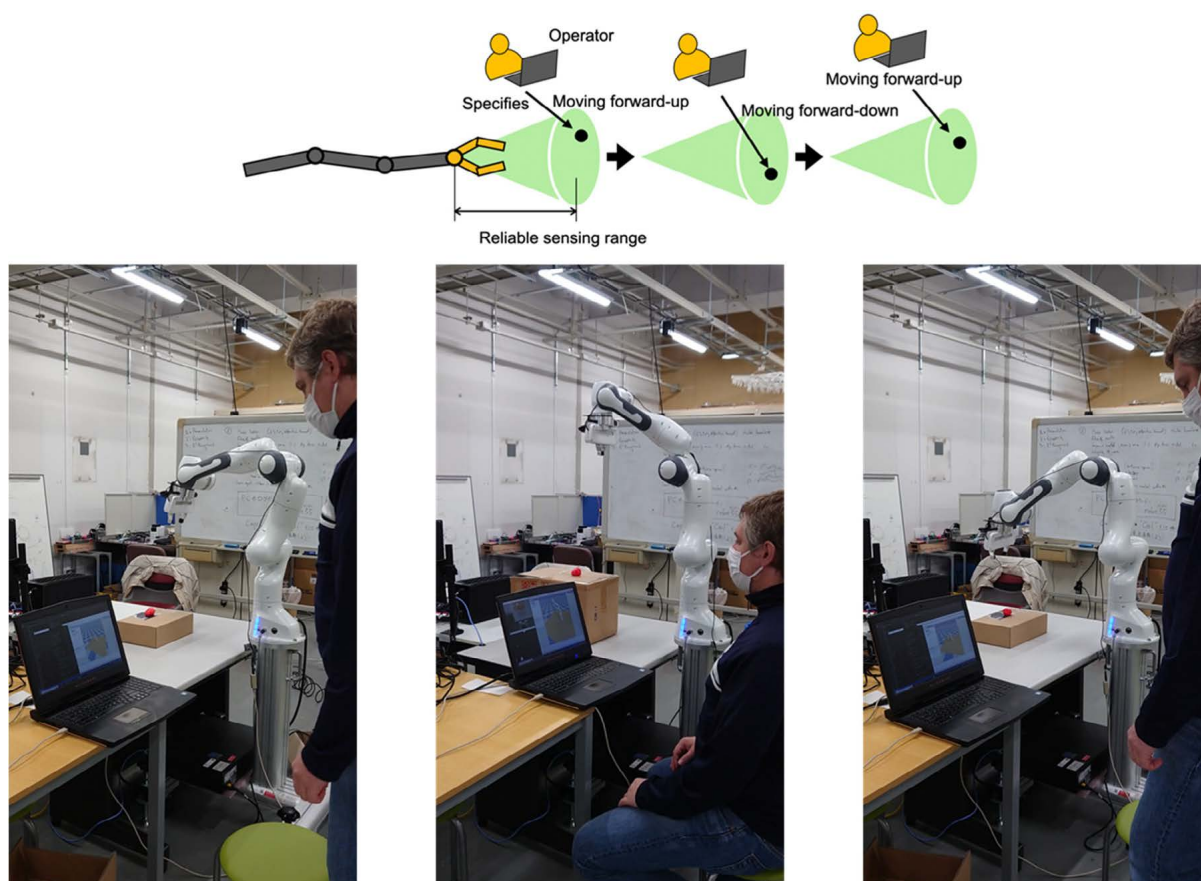


図 3.2-13 実空間におけるロボットナビゲーション実験

3.2.2 可変インピーダンスコントローラの設計【令和5年度】

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した。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った。以上については、主に 3.5 節の英国チーム成果欄に記載する。

CVT-VIA による機械インピーダンスの反映を見据えたマニピュレータ幾何モデルを図 3.2-14 に示す。CAD ソフトウェアで構築したロボット機械モデルを、変換ソフトウェアを活用することでスムーズに Universal Robot Description Format (以下、「URDF」と略す。) ロボットモデルに変換することが可能となった。

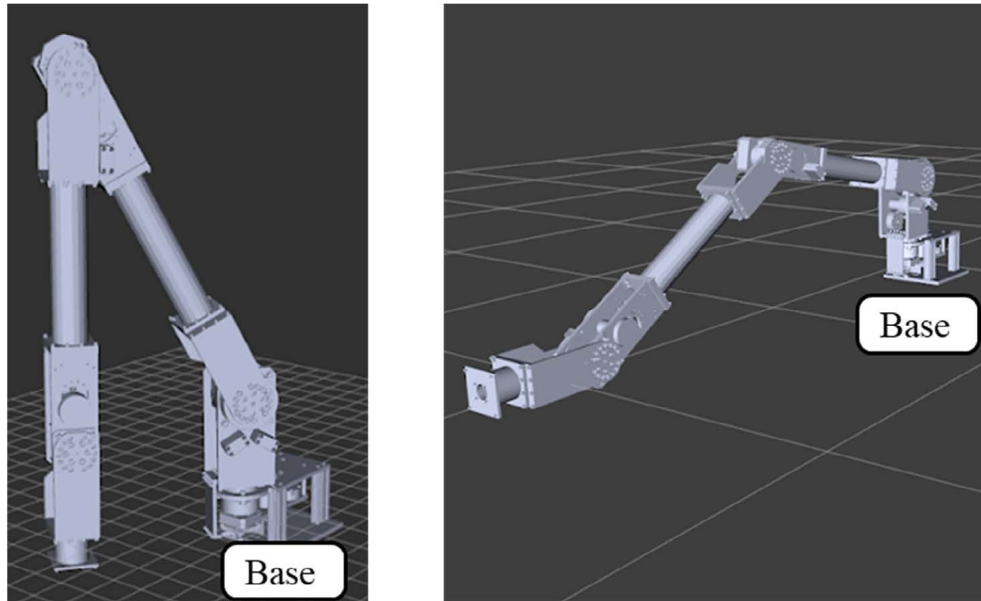


図 3.2-14 マニピュレータ幾何モデル

ナビゲーションアルゴリズム開発用の実機マニピュレータシステムについて説明する。電装系と本体は、図 3.2-15 に示す通りである。直流安定化電源とモータ駆動基板・ADC 信号処理基板をロボット本体から離れた位置に配置し、自己運動による電装系の破壊を防いでいる。

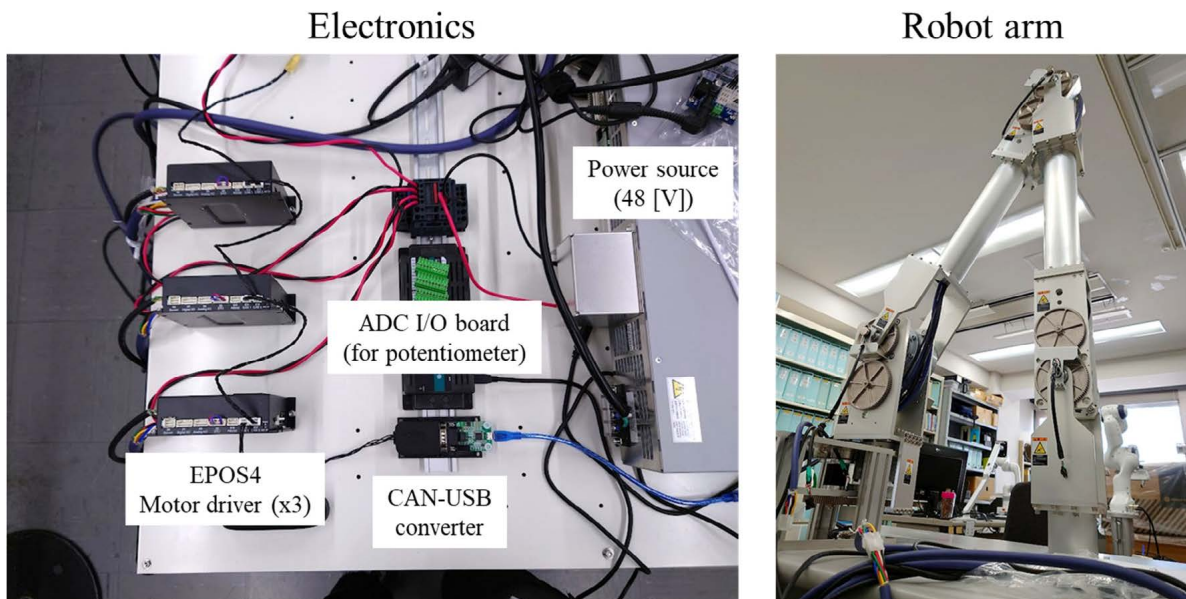


図 3.2-15 マニピュレータ電装系と本体

電装系のシステム構成は、図 3.2-16 に示す通りである。48 [V] 直流安定化電源装置をサーボ電源として、PC からの給電をロジック電源として活用する。サーボ電源は、モータ駆動基板やモータ、ブレーキの駆動に活用される。また、ロジック電源は、ADC 信号処理基板やポテンショメータの駆動に活用される。点線で囲った部分は各関節軸につき 1 セット用意されるが、ブレーキのみ、単一軸にしか搭載されていない。

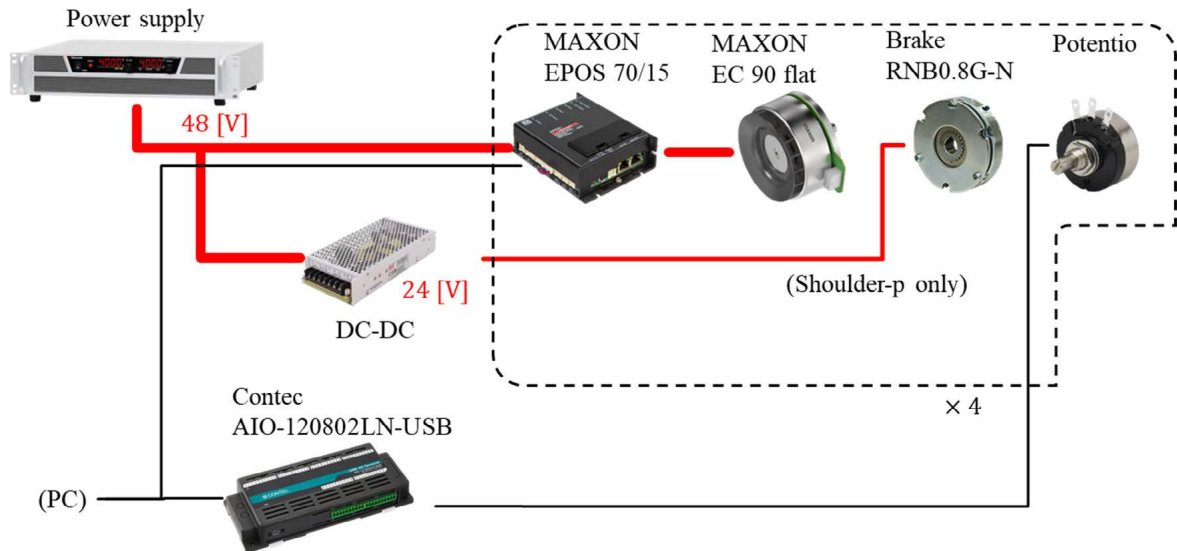


図 3.2-16 マニピュレータ電装系システム

ソフトウェアのシステム構成は、図 3.2-17 に示す通りである。

ソフトウェアは、

- ・シミュレーション層
- ・実機制御層

に分かれている。各々の層に関して説明する。

シミュレーション層では、カメラ映像を基にしたオペレータによる目標点選択をロボットアームへの関節角度指令に変換する役割を担う。まず、画像処理・カメラモデルを活用することで、オペレータによる目標点（2 次元）を 3 次元座標に変換する。続いて、機械学習手法を活用することで、当該 3 次元座標を周囲障害物に干渉しないロボット姿勢・関節角度指令に変換する。当該指令値をロボット実機制御層に送信する。

実機制御層では、シミュレーション層より受けた関節角度指令をロボット実機に送信する。ROS の Joint Trajectory Action を活用することで、ロボット関節角度指令やその軌道を概ねロボットごとに共通の様式で与えることが可能となる。

令和 4 年度までの等身大ロボットアーム（Panda）用ナビゲーションプログラムとほぼ同一のプログラムが、大型ロボットアーム（fukushimarobot）でも同様に機能することが確認された。

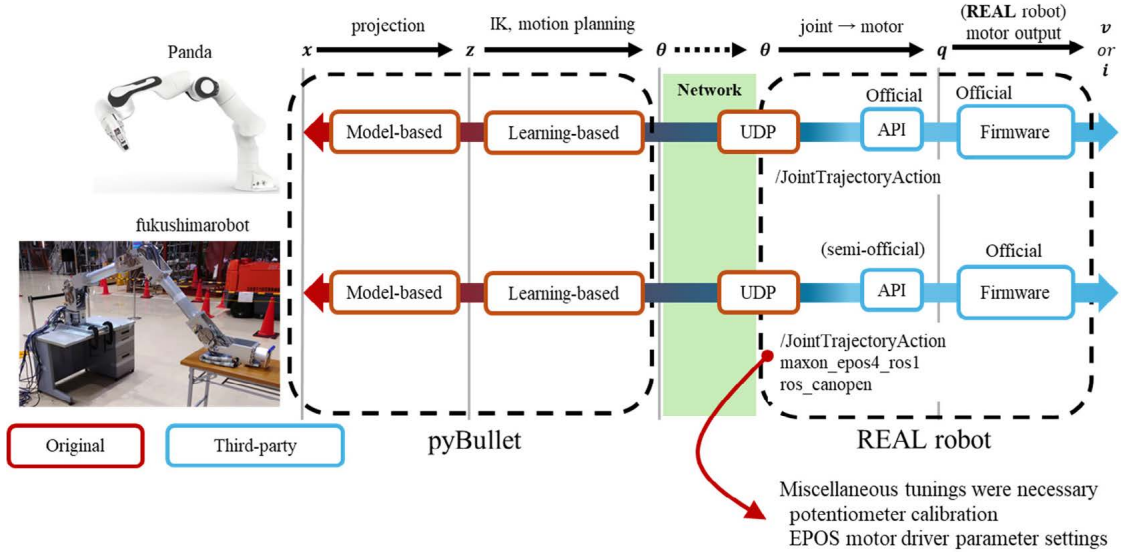


図 3.2-17 マニピュレータソフトウェアのシステム構成

まとめを示す。以上の成果を以て、令和 5 年度の目標である CVT-VIA の構築検討・機械式インピーダンスアクチュエータ・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が達成された。

また、英国開発システムとの統合における要求を示す。図 3.2-17 左側における PyBullet 上のナビゲーションシステムは、同様のソフトウェアが活用可能である。一方で、右側の実機ロボット駆動系ソフトウェアの開発が必要となる。具体的には、Panda、fukushimarobot では所望の関節角速度とモータ駆動指令は概ね 1 対 1 で対応し、駆動のためのサードパーティ製インタフェースが用意されていた。しかし、CVT-VIA においては所望の関節角度に対してエアシリンダの圧力や減速比などのパラメータを陽に設定する必要がある。既存のロボットアクチュエータ用操作プログラムの単純な適用では不十分であり、既存のソフトウェアフレームワークに則りながらも拡張を施した制御ソフトウェアが要求されると考えられる。

3.3 マニピュレータの制御性能の評価実験（東京大学、連携先：原子力機構）【令和5年度】 【令和5年度実施内容および成果】

マニピュレータの制御性能の評価とシミュレーションモデルとの比較を適宜進めた。マニピュレータ実機における関節角度センサや制御パラメータの評価について説明する。

まず、マニピュレータ実機における関節角度センサ評価について示す。ロボット関節軸には、関節角度のセンシング用にアナログポテンショメータが搭載されており、出力電圧値の取得によって関節角度情報を得ることが可能である。

本研究で活用したロボットは、図 3.3-1 に示す肩関節ヨー軸のポテンショメータにドリフトが存在した。オペレータから見て 0 [deg] の関節角度でも、ポテンショメータ出力は 15 [deg] となっていた。これは、シミュレーションモデルでは存在しなかった実機ならではの問題である。しかしながら、提案ナビゲーションシステムは、オペレータがカメラ映像を見ながら移動方向を指定できるため、実機センサのドリフトに左右されることなくナビゲーションを達成することができた。

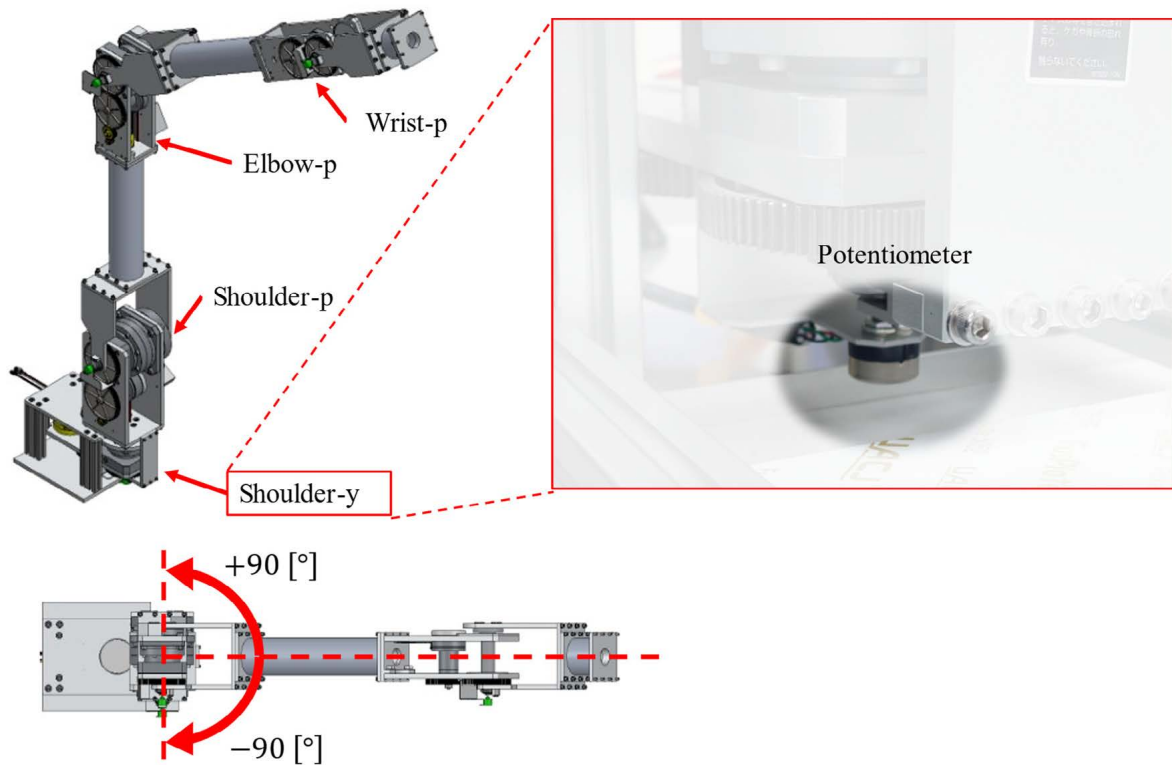


図 3.3-1 マニピュレータ肩関節ヨー軸のポテンショメータ

続いて、マニピュレータ実機における制御パラメータ評価について説明する。マニピュレータ実機の制御パラメータは、図 3.3-2 で示したロボットモデル上およびモータ駆動基板内部に保持させることが可能である。例えば、

- ・関節角度リミット (ロボット CAD モデルにより決定)
- ・関節角速度リミット (ロボット実機動作を目視確認により決定)
- ・関節トルクリミット (モータ電流リミットと減速比により決定)
- ・モータ電流リミット (モータ仕様書より決定)

などが存在する。各リミットの値を表 2 に示す。本研究では、関節角度はロボット製作時点での値にセットした他、すべての関節角速度のリミットを 2 [deg/s]にした。大型ロボットの実験における危険の 1 つに、高速な運動をする重量物の衝突があるが、関節角速度を抑えることで安全な実験の遂行が可能となった。



図 3.3-2 マニピュレータ駆動軸構成

表 2 制御パラメータ

	可動域 [deg]		モータ電流 [A]	関節トルク [Nm]
	min	MAX	MAX	MAX
肩 Yaw 軸	-180	180	3	1067
肩 Pitch 軸	-120	120	3	435
肘 Pitch 軸	60	150	3	120
手首 Pitch 軸	-180	180	3	13

まとめを示す。以上の実験成果を以て、マニピュレータの制御性能の評価とシミュレーションモデルとの比較という令和 5 年度の計画を達成した。

3.4 現場の使用シーンを想定した実証実験（東京大学、連携先：原子力機構）【令和5年度】 【令和5年度実施内容および成果】

提案ナビゲーションシステムの実証実験を NARREC にて実施した。これまで、小型ロボットアーム・等身大ロボットアームで評価してきたナビゲーションシステムの有効性を、比較的大型サイズのロボットアームで検証することが主な目的となる。

実験および移動は、以下の日程にて行われた。

- 8/22 輸送/準備
- 8/23 自由空間での動作実験、ソフトウェア改修
- 8/24 ナビゲーション実験、ソフトウェア改修
- 8/25 ナビゲーション実験、輸送

実験の目標を図 3.4-1 に示す。提案ナビゲーションシステムにより、ロボットアーム先端部が障害物を迂回して対象物体に到達することを目的とする。なお、オペレータはロボットアーム先端部に搭載されたカメラからの入力映像のみを活用し、ロボットアーム自体の俯瞰的視点を持たないこととする。オペレータ操作端末の画面と実験全景を図 3.4-2、図 3.4-3 に各々示す。

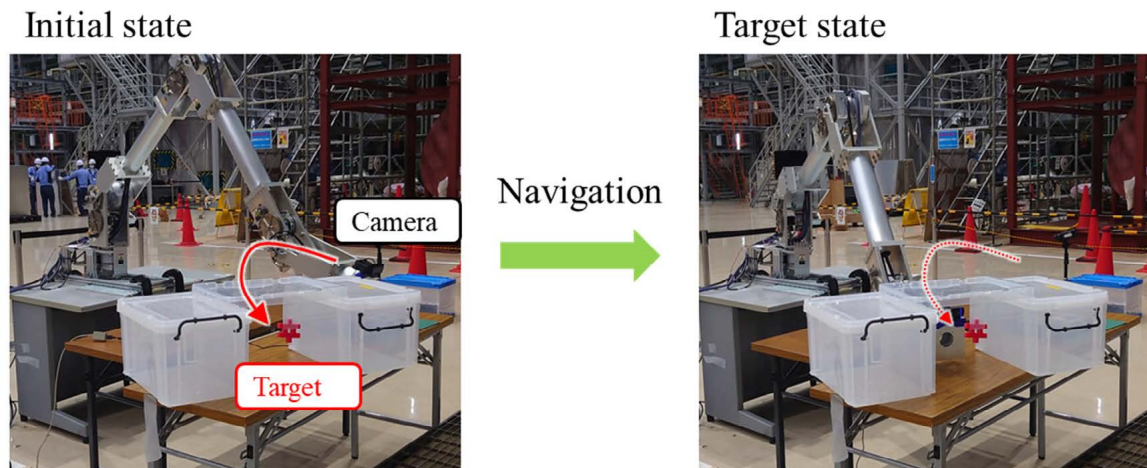


図 3.4-1 ナビゲーション実験目標

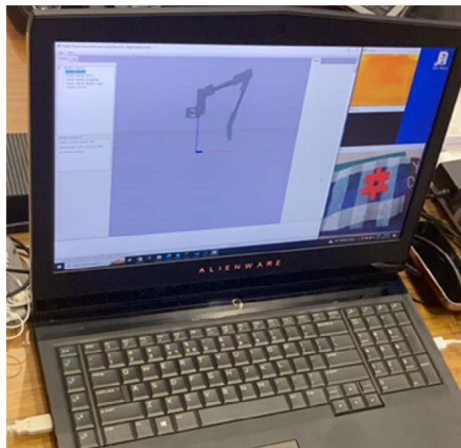


図 3.4-2 オペレータ操作端末画面

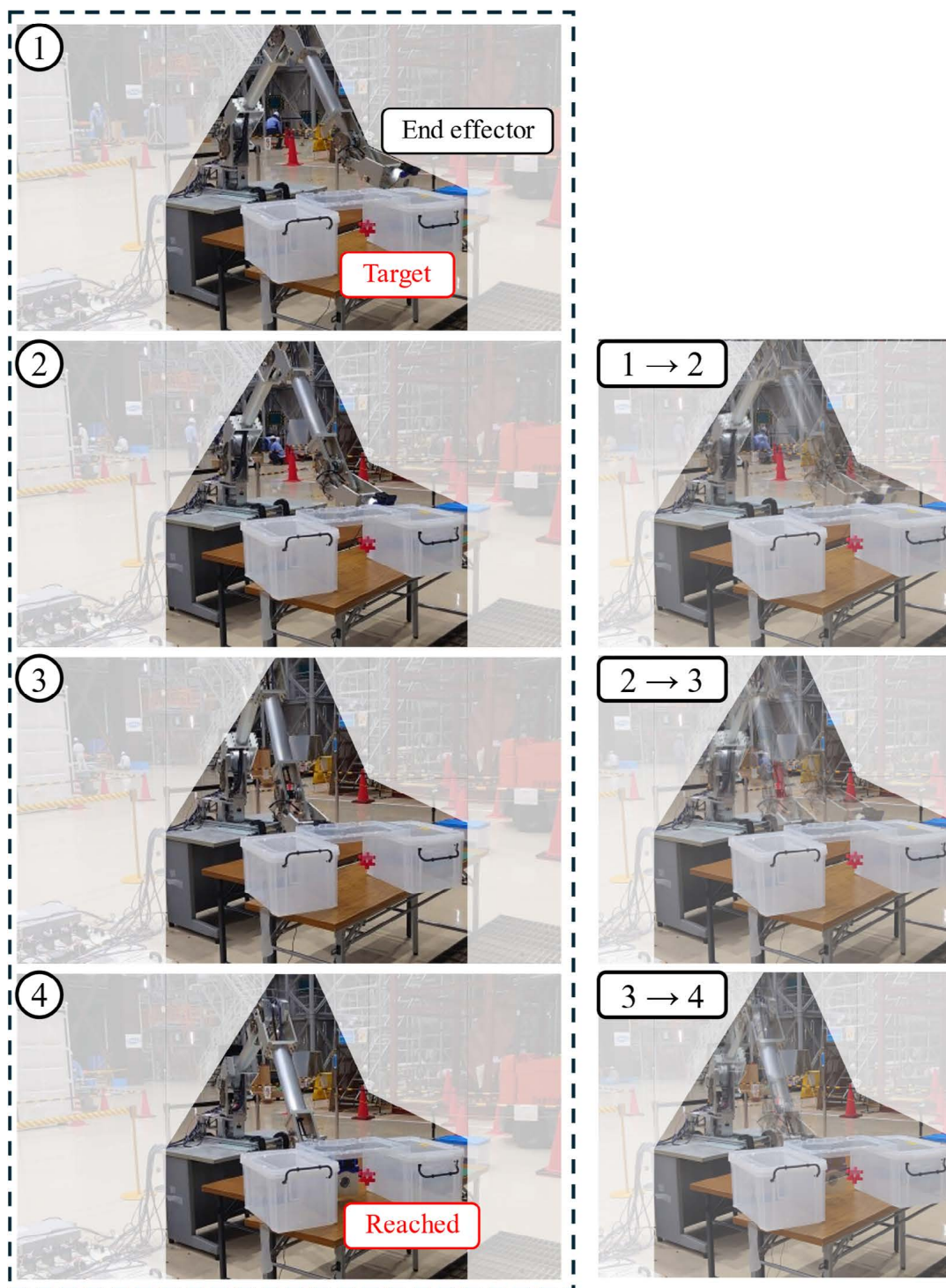


図 3.4-3 ナビゲーション実験全景
(同一領域を切抜き、右側は隣り合うフレームの合成)

実験の結果、ロボットアームはオペレータ指令により、障害物に接触することなく対象物体に到達した。

まとめを示す。以上より、提案ナビゲーションシステムを活用し、アーム先端部の障害物回避・ナビゲーションの達成が実証された。今後の課題として、実証環境の拡大が存在する。具体的には、PCV を模した狭隘部や放射線への対応である。

また、ナビゲーション実験の工程で、実験室における使用ではさほど深刻とならなかったケーブル保護の問題が顕著となった。破損と対策を図 3.4-4 に示す。特に、実験室環境では実行困難であった左右方向の回転を伴う動作の実行時に、関節にケーブルが巻き込まれた。被覆が部分的に剥離し、負荷のかかるコネクタ部における配線の脱離が発生した。大型ロボットアームにおける配線の取り回しは、卓上小型ロボットや等身大ロボットアームよりも注意深い運用が要求される。

ナビゲーション実験の終了とロボットアームの運搬後に、スリットチューブによる配線保護等の対策を実施した。

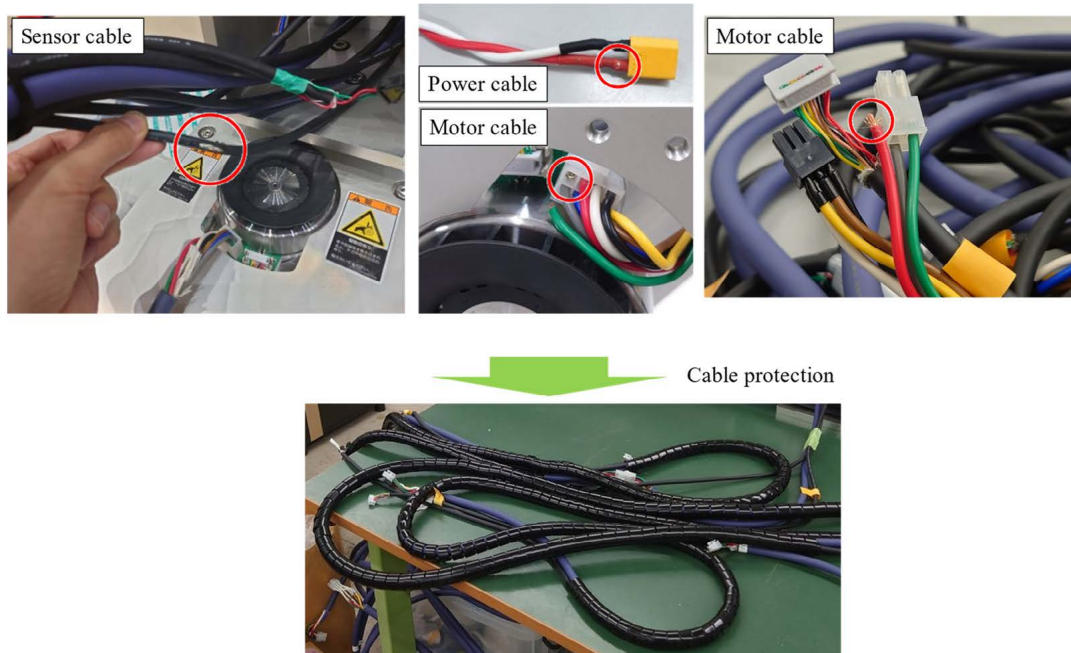


図 3.4-4 ナビゲーション実験によるケーブル・コネクタ類の破損と対策

加えて、2～3 [m]、90 [kg]のロボットアームの運搬は、それ自体が実験評価において無視できないウェイトを占める。運搬を容易にすべく当初リンクごとの分割・現地での再組み立ても案として挙げられた。しかし、再組み立て・再配線による故障・暴走リスクを避けるべく、組み立て後の状態での運搬が実行された。梱包・運搬作業の様子を図 3.4-5 に示す。実応用可能な長尺ロボットアームの構築にあたっては、アルミニウム合金でなく CFRP チューブなどを活用した軽量リンク構造の採用や、モジュラー構成による分解組み立て・運搬可能な構成が求められる。



図 3.4-5 梱包・運搬作業の様子

提案ナビゲーションシステムは環境接触を避ける機能を提供する一方で、CVT-VIA は意図しない環境接触による衝撃を受け流す柔軟性を備える。そこで、環境接触を前提とした狭隘環境における実証評価が期待される。

また、回転関節駆動のみならず直動関節を搭載することで、対象物体へのアプローチが容易となる。提案ナビゲーションシステムは関節駆動方式に依存しないことから、直動関節を搭載したロボットにおいても評価が可能であると考えられる。

加えて、PCV 内部の高放射線環境を想定した評価検討が重要となる。従来の廃炉ロボットシステムと同様の電装系評価および CVT-VIA のトラクション油等の変質をガンマ線照射実験などで評価検討を今後の課題として挙げる。

3.5 CVT-VIA 構築（英国チーム成果）【令和 3 年度～令和 5 年度】

ロボットを使って人間の労働の安全性と生産性を向上させるというアイデアが、1970 年代初頭より産業用ロボットの大規模な開発によって進展してきた[14]。しかし、近年、カスタマイズされた個人向けのロボットに対する需要が急激に高まっている。中小企業にとって、既存の生産ラインを完全自動化することは、コストが高く、さまざまな顧客の要求に応えることは不可能である。この点から、汎用的なロボットシステムには、セットアップが容易かつ異なるタスクに適用でき、人間と協働できることが期待されている。この期待が協働ロボット（Cobot）の概念をもたらした[15]。例えば、医療分野ではロボットマニピュレータを人間の外科医が遠隔操作して、複雑な手術を行うことができる[16]。また、リハビリテーションで腕の機能を回復させるために、外骨格型や endpoint-type ロボットが、柔軟性と接触安全性を確保しつつ着用者の腕部機能回復を補助する[17]。これらを含む多様な用途において、従来ロボットにおける高剛性の駆動系は、（ユーザ自体を含む）環境にダメージを与える可能性があるだけでなく、力制御などの本質的なタスク目標を達成できないことから、異なる駆動系アプローチが要求される。したがって、これらのタスク実行のために、汎用性、適応性、信頼性に優れた駆動系の構築が重要となる。このような背景から、環境接触を実現するロボットの駆動系として、環境になじむための可変インピーダンスの重要性が指摘されている。VIA、別名可変剛性アクチュエータ（VSA）またはコンプライアンス調整可能アクチュエータの研究が精力的に進められている[18]。

VIA の実現には、主に以下の 2 つのアプローチが存在する。

- i) 剛性の高いアクチュエータとソフトウェアベース制御によるアクティブインピーダンス
- ii) 固有コンプライアンスを持つアクチュエータによるパッシブインピーダンス

それぞれ利点と欠点を有する[19]。電気機械式、油圧式、空気圧式などのさまざまな方法で実現可能であるが、動力伝達系に CVT を組み込む試みは限られている。Hirose ら[20]は、スクリー／ナット機構に基づく荷重感応型アクチュエータの設計を示した。この装置は直線運動しかできず、効率も 34%程度と非常に低い。Takagi・Omata[21]と Matsushita ら[22]は、ハンドグリップへの応用が期待できる 2 種類の感応型 CVT の設計（平面リンク機構とドラム・ワイヤ方式）を示した。しかし、最初の設計は性能がリンクの回転角度の範囲に連動するため限界があり、2 番目の設計は減速比の範囲が小さく、比較的複雑な構成である。Kernbaum ら[23]は、変速比無限大変速機（IVT）機能を持つ小型ベルト&プーリ CVT を発表し、人間安全なロボットシステム・触覚フィードバックにおける省エネルギー消費を実現できると主張した。一方で、本要素は回転軸を支える軸受が小型で動的定格荷重が小さく、比較的大きな力が効率と軸受の耐久性に与える影響には注力していない。また、ベルトの構造は複雑であり、ベルトとディスクの間の接触は摩耗しやすいという懸念が存在する。Moore ら[24]は、スクーターのような形状の Cobot の設計に CVT を活用した。提案された CVT 関節部の比較的複雑さに加え、接線力は CVT の要素間の乾性摩擦を介して伝達されるという懸念がある。設計における摩擦係数が 0.8 と設定されるが、これは転導体表面が鏡面仕上げでなければならないという事実を考えると、過度に楽観的であると考えられる。

CP-CVT（定出力 無段変速機）

CVT は、シームレスに、つまり理論上無限に変速比を変化させて動力を伝達する変速機である。内部形状を変化させ、多くの場合、摩擦を利用して要素間の動力を伝達することで実現している。回転体間の力を潤滑油膜の剪断によって伝達する、いわゆるトラクションドライブなど、さまざまな設計がある。この種の装置で最もよく知られているのはトロイダル CVT[25][26]で、変速機の入力と出力要素はトロイダル面を持つ円板である。これらの間には適当数のトロイダルローラがあり、その回転軸の角度位置に応じて可変速度で入力から出力円板に力を伝達している。トロイダル CVT の特殊な設計により、出力エレメントの抵抗トルクの値に応じて変速比を自動的に変化させることができ、原則として特定の寸法での設計に対して減速比によらず常に一定の出力を提供する。動力伝達比と出力トルクの角度依存性を図 3.5-1 に示す。

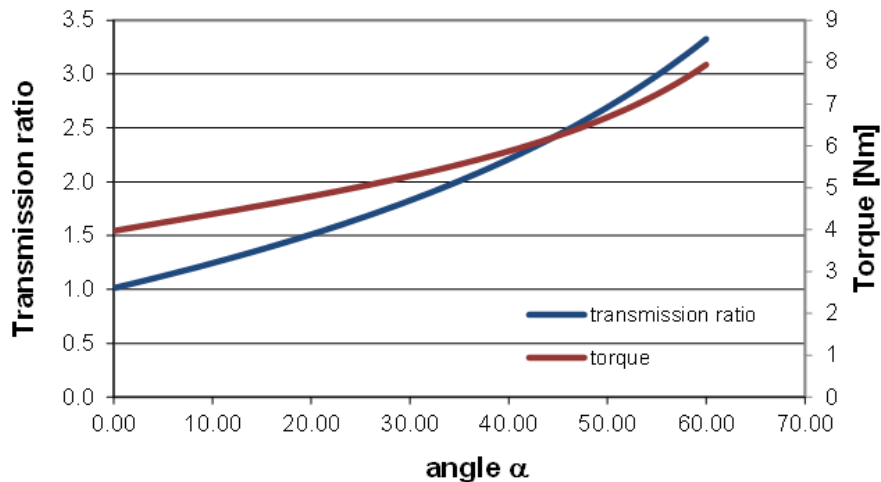


図 3.5-1 動力伝達比と出力トルクの角度依存性

駆動原理

CVT は、入力軸に 2 枚の円盤を搭載する。1 枚はシャフトに固定された円錐形、もう 1 枚はシャフトと一緒に回転し、シャフトに沿って並進可能なトロイダル形である。動力は入力ディスクから適当数の中間球に伝達され、出力ディスクに伝達される。後者は内部円錐形であり、トルク-力変換器の役割を果たすカップリングを介して出力軸に動力を伝達する。低出力トルクでは図 3.5-2 A) に見られるように、球とトロイダルディスク表面の接触点の角度は小さくなる。出力トルクが増加すると、カップリングは出力ディスクを軸方向に移動させ、図 3.5-2 B) のようにボールを径方向に変位させる。これにより、ボールの回転軸の角度が変化し、ボールとディスクの接触点と回転軸の距離が変化する。その結果、出力トルクの増加に合わせて伝達比が変化し、それに伴い出力ディスクの伝達トルクも変化する。

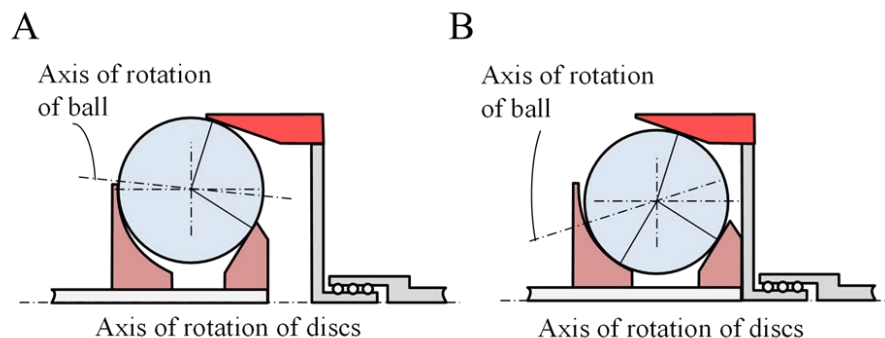


図 3.5-2 CVT の動作様式 A) 低トルク B) 高トルク

図 3.5-3 に示すように、入力ディスクの角速度が正となるようディスクの回転軸に沿った軸 z を持つ、 xyz の 2 つの基準座標系を用いて運動学的解析を実行する。軸 x_1 は、図面の平面に対して垂直であり、平面から外を向いている。座標系 $x_2y_2z_2$ は、図に見られるように、ボールの角速度が正となるように、軸 z_2 をボールの回転軸に沿わせている。軸 x_2 は、軸 x_1 と一致する。

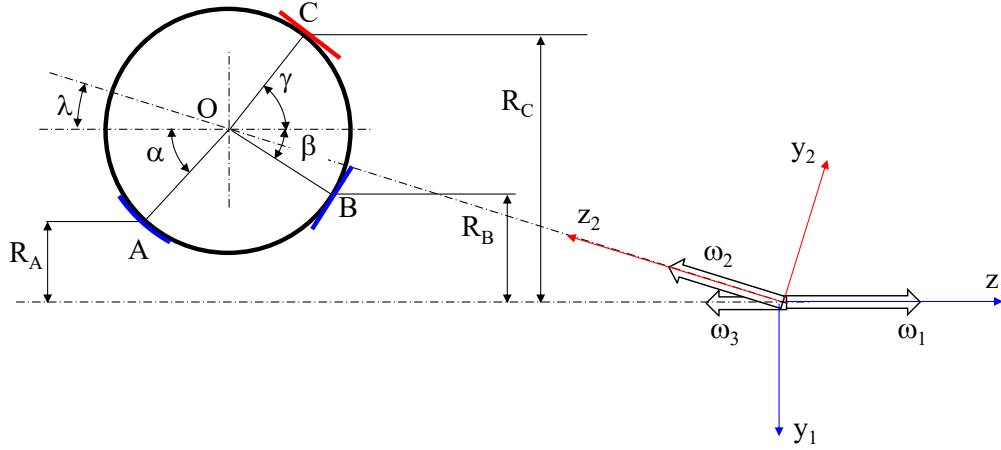


図 3.5-3 運動学解析のための基準座標系

CVT の運動学

表記は以下の通りである。

- α – トロイダルディスクの接点・半径が水平線と成す角度
- β – 入力ディスクの接点・半径が水平線と成す角度
- γ – 出力ディスクの接点・半径が水平線と成す角度
- λ – ボール回転軸が水平線と成す角度
- ω_1 – 入力軸の角速度
- ω_2 – 中間ボールの角速度
- ω_3 – 出力ディスクの角速度
- ω_0 – IVT 出力における角速度
- R_A – 入力トロイダルディスクの接点と回転軸間の距離
- R_B – 入力円錐ディスクの接点と回転軸間の距離
- R_C – 出力ディスクの接点と回転軸間の距離
- r_A – トロイダルディスクの接点とボール回転軸間の距離
- r_B – 入力円錐ディスクの接点とボール回転軸間の距離
- r_C – 出力ディスクの接点とボール回転軸間の距離
- r – 入力ディスクの回転中心とボール中心間の距離
- r_0 – トーラス長径
- R – ボール半径
- R_1 – トーラス短径

ディスクとボールの表面に滑りがないと仮定すると、ディスクとボールの接点の速度が等しいことから、ボールの回転軸の傾き m と伝達比 i_{CVT} が求められる。

$$m = \tan \lambda = \frac{r(\sin \alpha - \sin \beta)}{R \sin(\alpha + \beta) - r(\cos \beta + \cos \alpha)} \quad \text{式(10)}$$

$$i_{CVT} = \frac{\omega_1}{\omega_3} = \frac{\sin(\alpha + \lambda)(r + R \sin \gamma)}{\sin(\gamma + \lambda)(r - R \sin \alpha)} \quad \text{式(11)}$$

NB：減速比は、入力速度を出力速度で割った値として定義される。

IVT の運動学

CVT によって出力速度がゼロになりうるとき、自動車のトランスミッションになぞらえて IVT（無限可変トランスミッション）と呼称される。本設計では、CVT を遊星歯車装置に接続することでこれを実現した。構成は 2 種類存在する。1 つは、CVT の出力角速度、すなわち出力円錐ディスクの速度が、プラントキャリアの入力速度としてプラネタリギヤセットに供給されるケースである。サンギアは入力軸に連結されているため、同一の角速度で回転する。この場合、CVT はアンダードライブ状態で動作する。2 つ目の構成では、CVT の出力ディスクがプラネタリギヤセットのリングギアに直接接続される。出力はプラネットキャリアで回収される。この構成では、CVT はオーバードライブ状態で動作する。アンダードライブとオーバードライブは、CVT の内部の幾何学的なパラメータを変更することによって実現される。第 2 の構成のさらなる解析は今後の課題とする。遊星歯車減速機の構成は、図 3.5-4 の通りである。

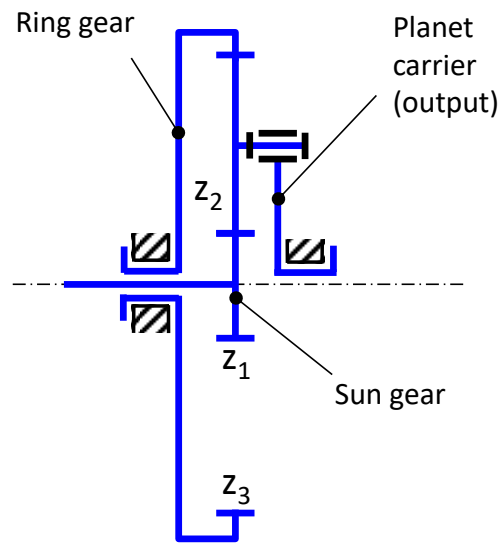


図 3.5-4 遊星歯車減速機の模式図

よく知られる Willis の式から、遊星キャリアの角速度は次の式で与えられる。

$$\omega_p = \frac{\omega_s z_1 - \omega_r z_3}{z_1 + z_3} \quad \text{式(12)}$$

この式において、 ω_s 、 ω_r と ω_p はそれぞれサンギア、リングギア、プラネットキャリアの角速度を表し、 z_1 、 z_3 はそれぞれサンギア、リングギアの歯数である。CVT の比率がプラネタリーセットのリングギアとサンギアの歯数の比率に等しいとき、プラネットキャリアの速度はゼロになることがわかる。

ボールとディスクに関する静力学

ボールとディスクの接点に作用する力は、伝達すべきトルクによって決まり、接点圧によって制限される。出力ディスクのトルクを T_3 とすると、このトルクを伝達するために必要なボールと出力円錐ディスク間の接線力は次の通りである。

$$F_{tc} = \frac{T_3}{nR_c} \quad \text{式(13)}$$

ここで、 n は CVT のボール数を示す。入力軸に働く力とボールに働く力のモーメントの釣り合い式から、出力トルクとトロイダルディスク後面に必要な力の関係が求められる。

$$T_3 = \mu R_c F_A \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\cos \alpha \sin(\gamma + \beta)} = \mu F_A \frac{\sin(\alpha + \beta) (r_0 - \Delta R \sin \alpha + R \sin \gamma)}{\cos \alpha \sin(\gamma + \beta)} \quad \text{式(14)}$$

力 F_A を外部から制御することで CVT の出力トルクおよび CVT-VIA 全体のインピーダンス制御が可能となる。

廃炉マニピュレータのための CVT 設計要件は以下の通りである。

- A) アクチュエータは、可能な限りコンパクトであること。
- B) 軽量であること。
- C) 与えられたサイズに対して、伝達されるトルクはできるだけ大きくなければならない。
- D) 出力トルクが、トロイダルディスクの軸力に対応すること。
- E) 電気モータに要求されるトルクは、できるだけ小さくすること。
- F) ディスクとボールの接触圧力は、**0.12 [GPa]** 以下であること。

図 3.5-4 を基にしたトルク解析から、以下の式が成立する。

$$M_p = M_r \frac{\omega_s + \omega_r}{\omega_s - \omega_p} \quad \text{式(15)}$$

ある出力トルクでプラネットキャリアの角速度はゼロとなる。そして、その値は CVT の出力トルクと遊星歯車の歯数に依存し、以下の関係が成り立つ。

$$M_p = M_r \frac{z_1 + z_3}{z_3} \quad \text{式(16)}$$

特定の CVT 寸法と遊星歯車装置の寸法では、出力速度と出力トルクを取る値の範囲は、図 3.5-5 のようになる。

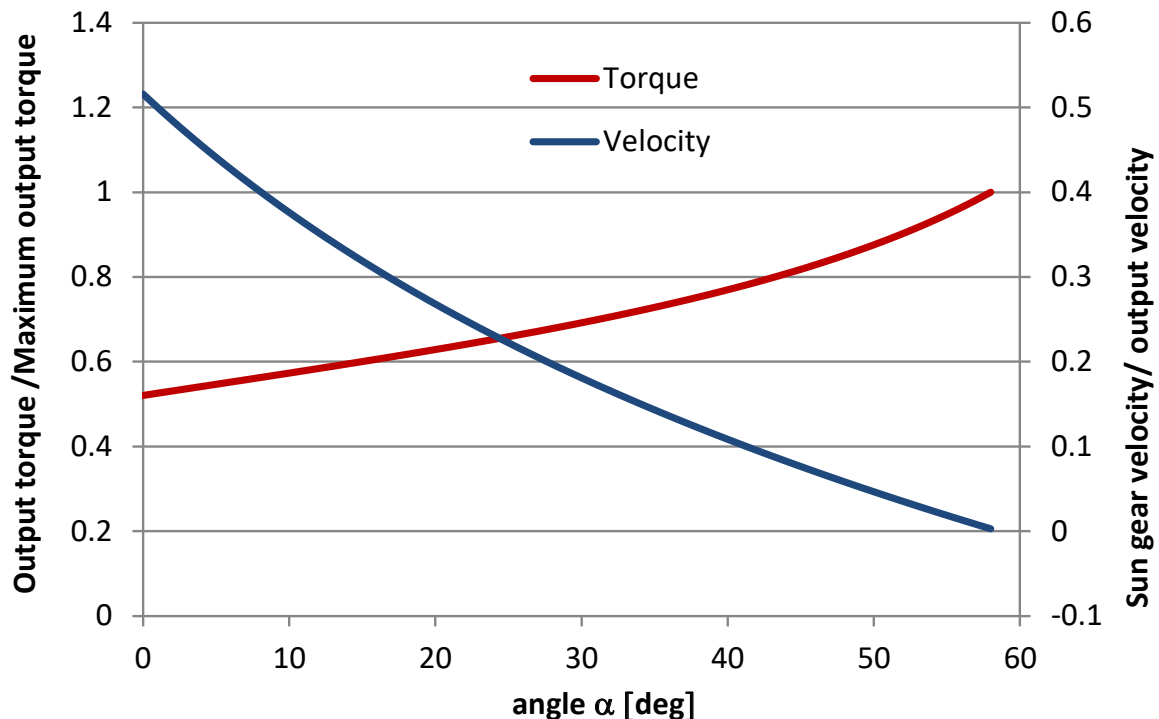


図 3.5-5 2 段階減速の CVT-VIA におけるトルクと角速度出力

出力トルク値を抑えることで、遊星歯車の第 2 段のオーバースペックによる重量過多を避けることが可能となる。要求トルク値の決定には、マニピュレータの構成部品の重量とペイロードの重量の詳細な分析が必要と考えられる。

【令和 4 年度までの概要】

令和 3 年度には、CVT-VIA 設計式の導出を確認した。CVT-VIA は、CP-CVT (CP は Continuous Power の略) と遊星歯車装置から構成される。トロイダル CVT の特殊な設計により、出力エレメントの抵抗トルクの値に応じて変速比を自動的に変化させることができ、原則として特定の寸法での設計に対して減速比によらず常に一定の出力を提供する。

令和 4 年度には、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。マニピュレータ自重を支持可能な構成のための寸法のバリエーションを導出した。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。

コンセプト図を図 3.5-6 に示す。ロボットマニピュレータの図中の赤枠で示す部分が、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。また、転倒危険性に関しては、ベース部への駆動系の集中配置の検討が有効であると考えられる。

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。

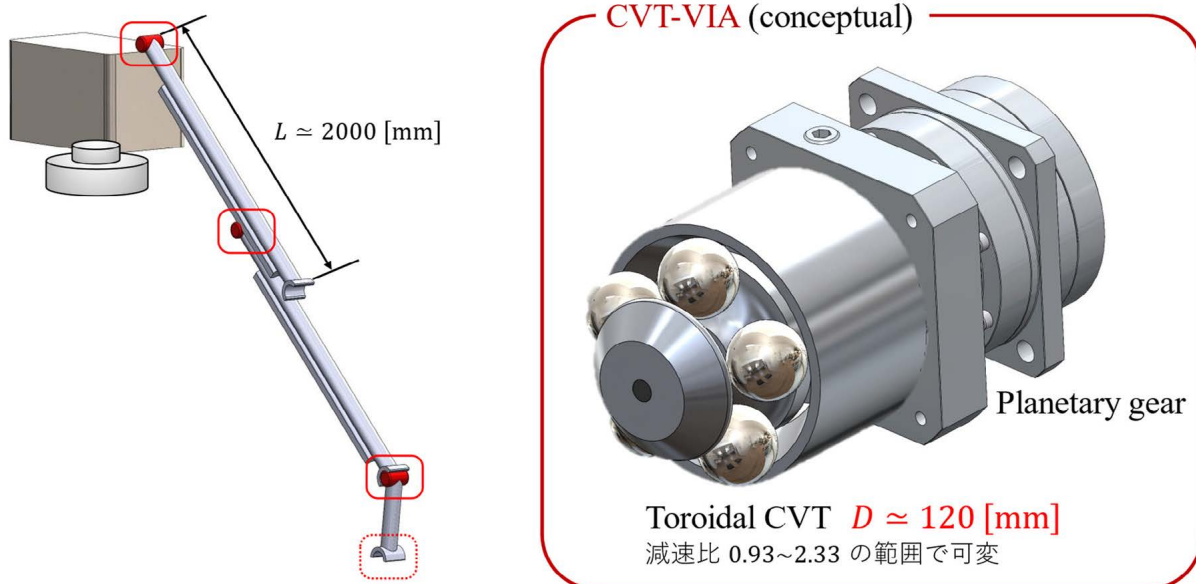


図 3.5-6 英国考案マニピュレータおよび CVT-VIA のコンセプト図

CVT-VIA の変速原理を図 3.5-7 に示す。高速・低トルク状態を図 3.5-7 の左側に、低速・高トルク状態を図 3.5-7 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・トロイダル流体の剪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、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。

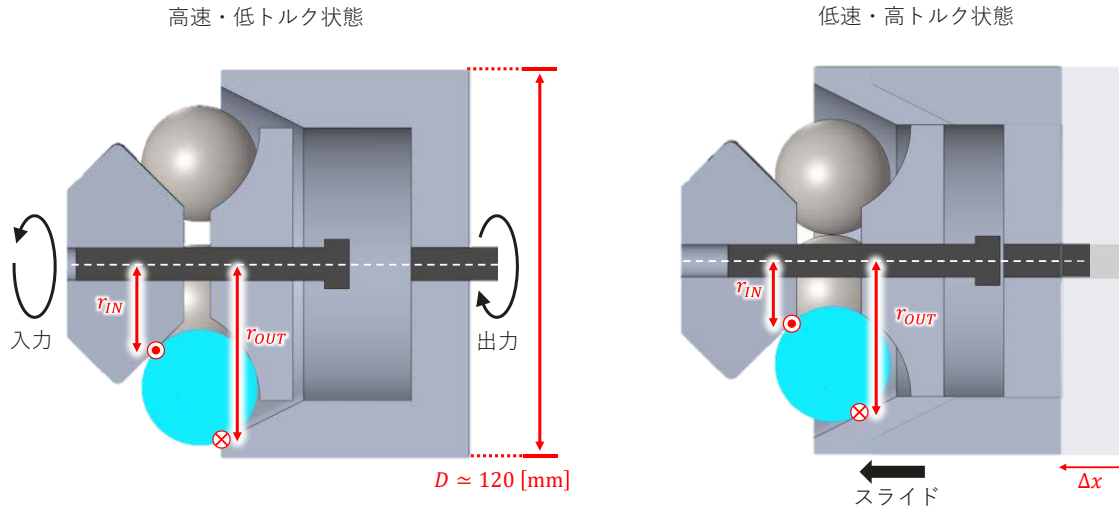


図 3.5-7 CVT-VIA の駆動原理図

【令和 5 年度実施内容および成果】

令和 5 年度には、CVT-VIA のシミュレーションモデルを構築した。MATLAB/simulink 上で構築されたモデルであり、制御アルゴリズムの設計構築および評価手法検討に用いた。内部パラメータの変更やマニピュレータとの統合により、単体動作のみならずマニピュレータ動作における評価にも活用可能なモデルとなっている。図 3.5-8 にモデルを示す。

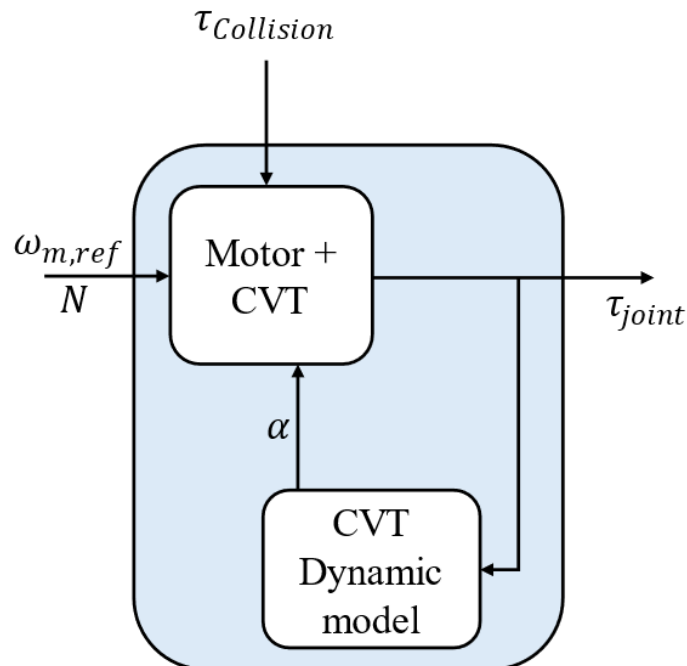


図 3.5-8 CVT-VIA のシミュレーションモデル

マニピュレータに強い衝撃が加わった際の応答を、シミュレーションにて取得した。慣性項を考慮しない状態では、衝撃を受けてから 0.1 [s] 程度で減速比が変化、釣り合いの状態に移行することが示唆された。今後 CVT-VIA の構成部品の慣性等を考慮に入れると、異なる挙動を示すと考えられる。

また、エアシリンダの圧力調整における影響を今後評価することを予定している。

CVT-VIA 実機を製作し、日本チームの実験室にて試験した。令和 4 年度の成果等に基づき、CVT-VIA の構築検討を行い、実機の機械式インピーダンスアクチュエータに反映した。ルーマニア SC ICEST SRL Bucharest 社に製作を依頼し、直径 20 [cm] 程度のモデルとなる。CP-CVT と遊星歯車装置が一体となったアセンブリとなっている。鉄球が 4 つ搭載されており、動力伝達を担う。減速比は 0.67 から 1.91 の範囲で可変である。実機写真を図 3.5-9 に示す。

加えて、トラクション油を CVT-VIA 本体に注入した。CVT-VIA 駆動のためのトラクション油は、動力伝達面における油膜の形成と粘土増加・状態変化を満たす必要があり、他の潤滑油と異なる特殊な仕様、組成が要求される。本研究では、出光興産株式会社のトラクション油 TDF-1 を 500 [ml] 使用した。トラクション油の注入の様子を図 3.5-10 に示す。注入にあたっては、ろうとを活用し周囲でのトラクション油の漏出を可能な限り抑えた。トラクション油の注入の後、シーリングのために樹脂製のピンを注入口に挿入した。また、CVT-VIA の使用に先立ちトラクション油を接触面にまんべんなく行き渡らせる必要があることから、図 3.5-11 に示すように水平に配置した CVT-VIA 本体を合板上で 2~3 周程度回転させた。

以上のセットアップの後、CVT-VIA の入力軸を手動で回転させたところ、出力軸が同期して回転することを確認した。



図 3.5-9 CVT-VIA 実機写真



図 3.5-10 CVT-VIA への給油の様子
(製品は出光トラクション油 TDF-1 を 500 [ml]使用)

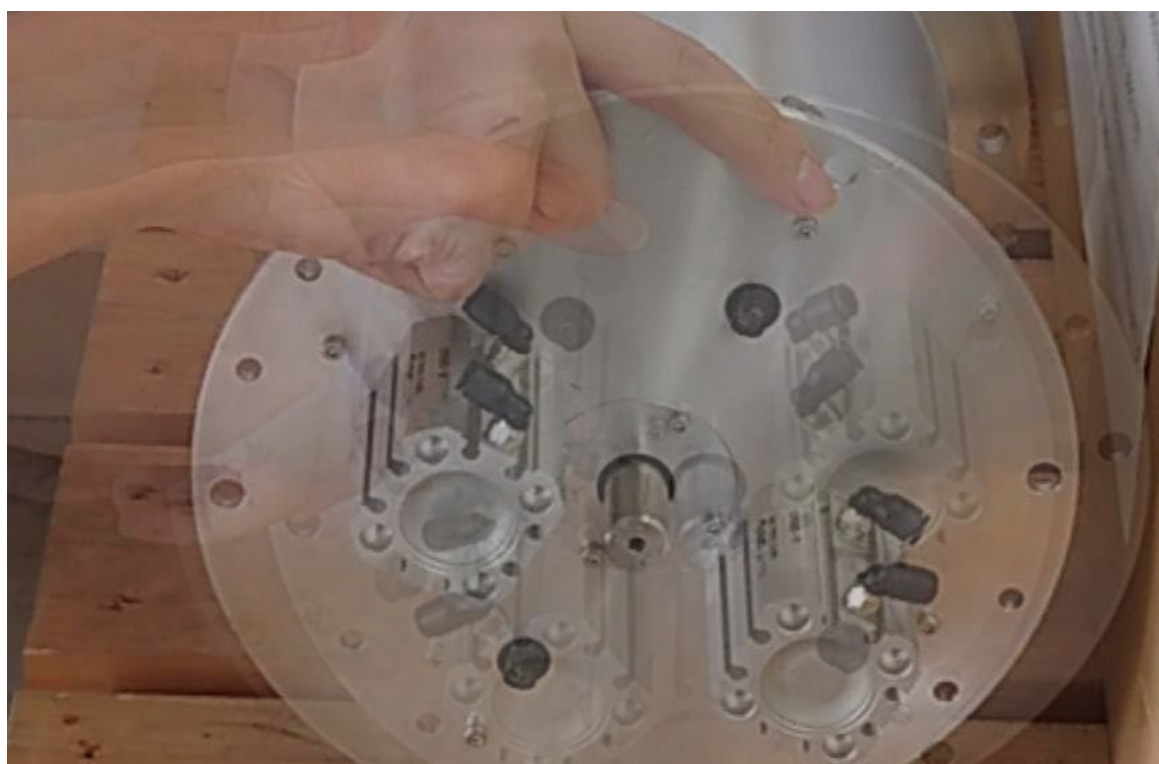


図 3.5-11 CVT-VIA 本体を転がし、トラクション油を CVT-VIA 本体内で一周させる様子

まとめを示す。CVT-VIA のシミュレーションモデルの構築とマニピュレータモデルとの統合および CVT-VIA 実機構築を完了し、これによって令和 5 年度の目標を達成した。

3.6 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の実施しており、東京大学の鈴木俊一先生、東双みらいテクノロジー株式会社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。

最終年度に相当する令和 5 年度では、年度末にプロジェクトを締めくくる共同ワークショップを開催した。加えて、年度末には東京大学とミュンヘン工科大学（TUM）の主催する国際ワークショップにて、本プロジェクトの成果や教訓をまとめた発表を行った。

- 第 31 回日英プロジェクト会議
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 3 名、英国チーム 5 名
主な議題：
 - ◇ JAEA-Review 関連
 - ◇ CVT-VIA 構成検討

- 第 32 回日英プロジェクト会議
開催日：令和 5 年 4 月 19 日
場所：オンライン（Zoom）
出席者：日本チーム 3 名、英国チーム 5 名
主な議題：
 - ◇ ロボットアーム電装検討
 - ◇ CVT-VIA 機構検討

- 第 33 回日英プロジェクト会議
開催日：令和 5 年 5 月 3 日
場所：オンライン（Zoom）
出席者：日本チーム 3 名、英国チーム 6 名
主な議題：
 - ◇ 単軸モータ駆動テスト
 - ◇ CVT-VIA モデリング

- 第 34 回日英プロジェクト会議
開催日：令和 5 年 5 月 17 日
場所：オンライン（Zoom）
出席者：日本チーム 3 名、英国チーム 6 名
主な議題：
 - ◇ 関節角度取得テスト
 - ◇ CVT-VIA 付ロボットアームモデル検討

- 第 35 回日英プロジェクト会議
開催日：令和 5 年 5 月 31 日

場所：オンライン（Zoom）

出席者：日本チーム 3 名、英国チーム 5 名

主な議題：

- ◇ 単軸関節駆動テスト
- ◇ セラフィールドロボットアーム検討

● 第 36 回日英プロジェクト会議

開催日：令和 5 年 6 月 14 日

場所：オンライン（Zoom）

出席者：日本チーム 3 名、英国チーム 5 名

主な議題：

- ◇ 複数軸モータ接続テスト
- ◇ CVT-VIA シミュレーション検討

● 第 37 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 6 月 28 日

場所：オンライン（Zoom）

出席者：日本チーム 3 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 38 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 7 月 26 日

場所：オンライン（Zoom）

出席者：日本チーム 3 名、英国チーム 6 名

主な議題：

- ◇ 複数軸モータ接続テスト
- ◇ CVT-VIA シミュレーション検討

● 第 39 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 8 月 9 日

場所：オンライン（Zoom）

出席者：日本チーム 3 名、英国チーム 5 名

主な議題：

- ◇ 関節角度センサキャリブレーション
- ◇ ロボットアームシミュレーション検討

● 第 40 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 8 月 30 日

場所：オンライン（Zoom）

出席者：日本チーム 3 名、英国チーム 5 名

主な議題：

- ◇ 檜葉実験報告

- 第 41 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 9 月 20 日
場所：オンライン（Zoom）
出席者：日本チーム 3 名、英国チーム 6 名
主な議題：
 - ◇ CVT-VIA 調達打ち合わせ
 - ◇ テストリグ構成案
- 第 42 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 10 月 19 日
場所：オンライン（Zoom）
出席者：日本チーム 3 名、英国チーム 5 名
主な議題：
 - ◇ テストリグ電装検討
 - ◇ ナビゲーション統合検討
- 第 43 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 11 月 6 日
場所：オンライン（Zoom）
出席者：日本チーム 3 名、英国チーム 6 名
主な議題：
 - ◇ ビザ・見学打ち合わせ
 - ◇ CVT-VIA 制御検討
- 第 44 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 11 月 20 日
場所：オンライン（Zoom）
出席者：日本チーム 4 名、英国チーム 5 名
主な議題：
 - ◇ 中間フォロー打ち合わせ
- 第 45 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 12 月 4 日
場所：オンライン（Zoom）
出席者：日本チーム 3 名、英国チーム 6 名
主な議題：
 - ◇ 中間フォロー反省
- 第 46 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 12 月 18 日
場所：オンライン（Zoom）
出席者：日本チーム 3 名、英国チーム 5 名
主な議題：
 - ◇ CVT-VIA シミュレーション

- 第 47 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 6 年 1 月 29 日
場所：オンライン（Zoom）
出席者：日本チーム 3 名、英国チーム 5 名
主な議題：
 - ◇ マニピュレータシミュレーション

- 第 48 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 6 年 2 月 26 日
場所：オンライン（Zoom）
出席者：日本チーム 4 名、英国チーム 6 名
主な議題：
 - ◇ CVT-VIA 調達状況、テストリグ

- 第 49 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 6 年 3 月 11 日
場所：オンライン（Zoom）
出席者：日本チーム 3 名、英国チーム 6 名
主な議題：
 - ◇ 年度末ワークショップ
 - ◇ 廃炉関連設備見学の打ち合わせ

令和5年5月31日に英国サセックス大学を訪問した。CVT-VIA 試作機やロボティクス関連研究設備などの見学を行った。対面ならではの実機・デモンストレーションを交えた議論を実施し、今後の連携強化に向けた方針への足がかりを得た。見学の様子を図3.6-1と図3.6-2に示す。

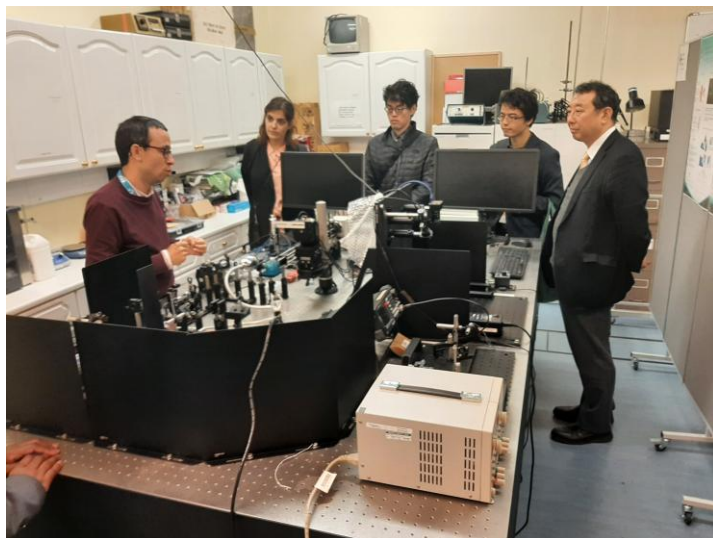


図 3.6-1 サセックス大学にて研究設備見学（写真掲載について承諾済）



図 3.6-2 サセックス大学にて集合写真（写真掲載について承諾済）

令和 6 年 3 月 19 日に東京大学本郷キャンパスにてプロジェクトの締めくくりとなる共同ワークショップを実施した。サセックス大学と東京大学・ライテックス社からの発表者および東芝エネルギーシステムズ株式会社の湯口康弘氏を招聘し、大学と企業の異なる観点からの廃炉ロボット研究開発の方向性に関する活発な議論が交わされた。ワークショッププログラムを以下に示す。ワークショップの様子を図 3.6-3 に、見学の様子を図 3.6-4 に示す。

10:00 – 10:35 ... Hajime Asama (UTokyo)
 10:35 – 10:45 ... Alessandro Moro (RITECS)
 10:45 – 10:55 ... Shinsuke Nakashima (UTokyo)
 10:55 – 11:00 ... Q&A

11:10 – 11:30 ... Romeo Glovnea (USussex)
 11:30 – 11:50 ... Nicolas Herzig (USussex)
 11:50 – 12:10 ... Kithmi Widanage (USussex)

12:20 – 12:55 ... Yasuhiro Yuguchi (Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation)
 12:55 – 13:20 ... Q&A
 13:20 – 13:30 ... Photo

13:30 ... (Lunch) Lab Tour
 14:40 ... Asama Lab
 15:00 ... Morita Lab
 15:30 ... Machine shop



図 3.6-3 年度末共同ワークショップ（写真掲載について承諾済）

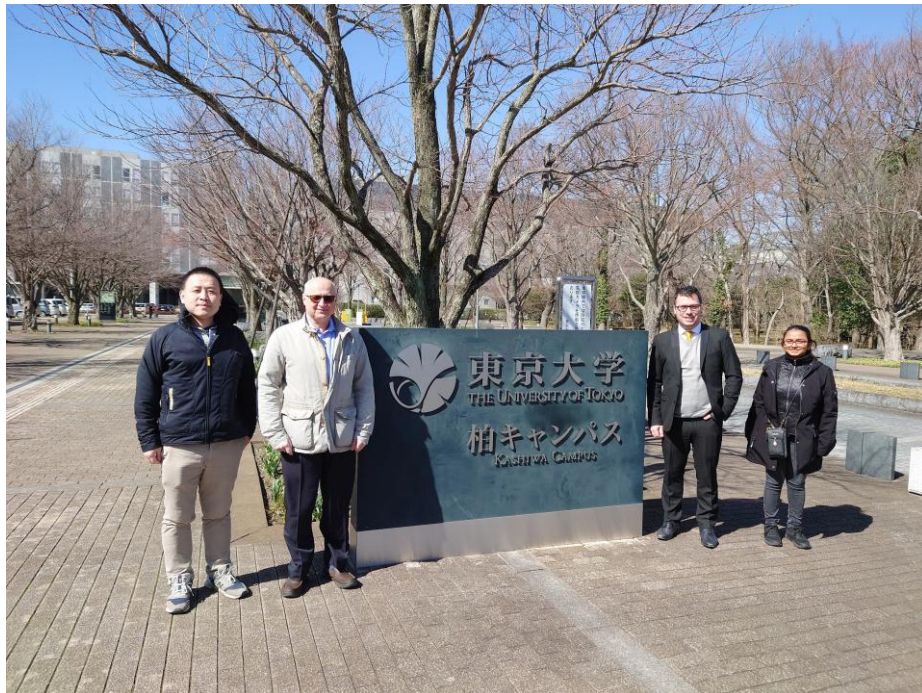


図 3.6-4 柏キャンパス見学（写真掲載について承諾済）

ワークショップでの議論・各種廃炉関連施設の見学を重ねる中で、メンバにとっての大学での基礎研究と企業での実応用との違いの実感も増していった。廃炉への実応用を目指す上で、以下のようなステップがさらに必要となると考えられる。

- ・ CVT-VIA の搭載事例の増加と特性等の発表
- ・ 他の方式と比較した際の CVT-VIA の強みの明示
- ・ トラクション油などの CVT-VIA 特有の部品の放射線耐性評価

また、廃炉作業の促進においては高速に試行錯誤を行える取り回しの良いロボットシステムの要求が大きくなると考えられる。現行の大型ロボットアームに加え、衝撃吸収機構による壊れにくさや、保守・製造のしやすさを指向するロボットシステムの構築にあたり、要素モジュール化や一部人手によるセンシングや駆動の導入および近年発達著しいヒューマノイドや移動マニピュレータによる運用補助の可能性が考えられる。

これらを踏まえの研究活動・議論の継続により、本プロジェクトで芽吹いた基礎技術が将来の廃炉に貢献することが期待される。

令和 6 年 3 月 26 日にミュンヘン工科大学（TUM）と東京大学の合同ワークショップにて、本研究プロジェクトに関する発表を行った。

Agenda for the UTokyo TUM Workshop on 26 March 2024

Angela Faragasso, PhD, Project Assistant Professor @UTokyo
Lessons Learned from International Collaboration: Developing a Novel Mechanical Manipulator for Fuel Debris Retrieval

Shinsuke Nakashima, PhD, Project Research Associate @UTokyo
Active Self-healing Legged Robot with Liquid Metal Tendon: A Bio-inspired Approach for Damage Tolerance

Dingzhi Zhang, M.Sc., PhD Student, MiMed TUM
A Hybrid Human Tracking System using UWB Sensors and Monocular Visual Data Fusion for Human Following Robots
Supervisor: Prof. Dr. Tim C. L  th

Prof. Hajime Asama

Dynamic Collaboration of Construction Robot Swarm for Disaster Response (Moon-shot Project Goal #3)

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。特にペデスタルの内部においては、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 VIA 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、期間全体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 のペデスタル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タ上で実施可能とした。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。

令和 4 年度は、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

令和 3 年度は、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、ROS の接続を確認した。

令和 4 年度は、令和 3 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、2 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。

② 可変インピーダンスコントローラの設計

令和 4 年度の成果等に基づき、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した。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った。

実施結果の要点として、CVT-VIA による機械インピーダンスの反映を見据えたマニピュレータ幾何モデルおよびナビゲーションアルゴリズム開発用の実機マニピュレータシステムを構成した。

(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：原子力機構）

(2)で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った。また、シミュレーションモデルとの比較を適宜進めた。

実施結果の要点として、マニピュレータ実機における関節角度センサや制御パラメータの評価を行った。

(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：原子力機構）

模擬環境として NARREC 等を活用し、実証実験を行った。

実施結果の要点として、提案ナビゲーションシステムを活用し、アーム先端部の障害物回避・ナビゲーションを達成した。

(5) 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。

英国チームとの連携成果として、1F 環境を基にしたマニピュレータ寸法の決定や、CVT-VIA の要求仕様の明確化が挙げられる。当該成果を基にシミュレータおよび実機 CVT-VIA を期間内に構築できた。

実施結果の要点として、英国サセックス大学を訪問すると共に、年度末の共同ワークショップを開催した。

以上、3 カ年計画の 3 年目である令和 5 年度の業務項目を実施し、所期の目標を達成した。今後の課題として、CVT-VIA を搭載した実ロボットによる、狭隘環境や衝撃を含むナビゲーションの動作実証が挙げられる。

図 4.1 に本研究の当初の実用化イメージと、それに対する成果を総括する。“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”という課題に対し、マニピュレータのナビゲーションシステム・遠隔操作システムの開発を実現した。そして、機械式マニピュレータにおける衝撃耐性を実現するための機構系として、CVT-VIA の開発とロボットグリッパの開発という成果を挙げた。以上をもって、少なくとも各要素技術に関しては十分に検討を進めてきたと考えられる。

各要素技術のシステム化に関しては、ソフトウェア構築の工程が残されている。具体的な工程に関して、以下の 2 つに分けて説明する。

1. ロボットグリッパのマニピュレータへの搭載
2. CVT-VIA へのマニピュレータへの搭載

まず 1. は、モータ配置にしたがって難易度が異なる。モータを手首等に搭載する場合、現行のソフトウェアとほぼ同様の構成で動作が可能である。現在市販されている多くの ROS 準拠の産業用ロボット・協働ロボットは、グリッパ部分を平行二指型や真空吸着型に交換しても同様のソフトウェアで動作させることが可能となっている。提案グリッパも、モータの搭載数が 1 点のみであることから、ソフトウェア的な変更点は最小限で抑えることが可能である。一方で、耐放射線性を指向しロボットベース部分にモータを搭載し手先までワイヤを取り廻した場合、あるグリッパ開閉度合に対して要求されるワイヤ変位は、ロボット姿勢に応じて異なる。すなわち、適正ワイヤ長さを逐次計算するアルゴリズムの開発が要求される。

続いて 2. は、CVT-VIA の入出力の増加に伴う課題である。3.2.2 項で説明した通り、CVT-VIA においては、所望の関節角度に対してエアシリンダの圧力や減速比などのパラメータを陽に設定する必要がある。固定の減速比を前提とする既存のロボットアクチュエータ用操作プログラムの単純な適用では不十分であり、既存ソフトウェアフレームワークの改変・拡張が求められる。特に、モータ駆動系ソフトウェアの改変の場合、その難易度は求められる応答速度によって異なる。本研究課題で対象とするロボットシステムは、最大 4.0 [m] の比較的大きなスケールであり、また、大きな速度や加速度の発揮は必ずしも要求されないと仮定すると、PC 上で動作する比較的上位レイヤのソフトウェアの改変で運用上十分なパフォーマンスを得られると期待される。

実環境におけるシステムの適用に関しては、要素技術の統合をハードウェアとソフトウェア双方の観点から一層強化する必要がある。

例えば、

- ・大きな摩擦や剛性を持つロボット指機構の改善
- ・所望の負荷や回転角度に応じて CVT-VIA を追従させる運動制御
- ・ロボットベースから取り廻したワイヤを、把持指令に応じて適切に巻き取らせる駆動制御

などが挙げられる。そして、3.4 節や 3.8 節で示したように、少なくとも現段階における燃料デブリ回収マニピュレータは、数[m]スケールの大型の機械システムであり、その運搬運用や段取りの工程は、決して無視できるものではない。実際の廃炉工程を直接実行するロボットシステムの開発のみならず、現場での下準備等をヒトに代わって持続的に活動・達成する移動マニピュレータやヒューマノイド遠隔操作システムが、廃炉作業を大きく前進させる鍵となろう。

研究ロードマップを表 3 に示す。本研究課題で得られた成果や知見が、1F 廃炉や、引いては極限環境における作業ロボットの進化に貢献することを期待する。

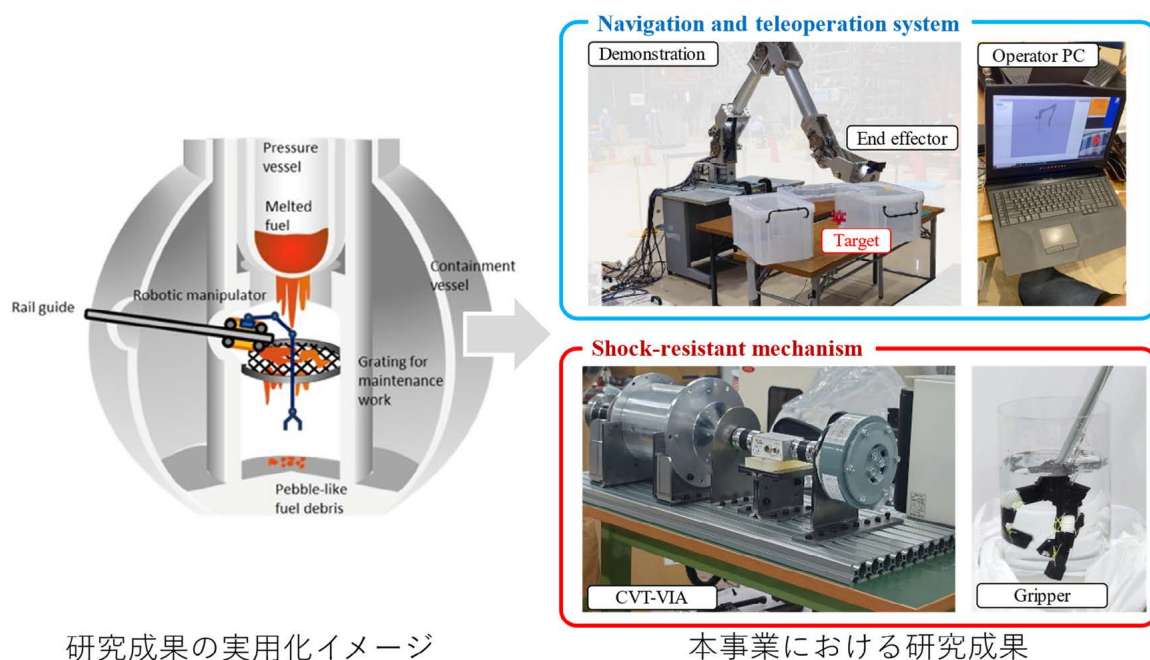


図 4.1 本研究における実用化イメージと成果

表 3 今後の展望（ロードマップ）

第 1 フェーズ	第 2 フェーズ	第 3 フェーズ
本研究課題	衝撃印加などを含む環境接触を伴うモックアップ動作実証および CVT-VIA 構成要素の耐放射線性評価	1F 環境適用

参考文献

- [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, 2019,
<https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/decommissioning/committee/osensuitaisakuteam/2019/02/3-3-3.pdf> (参照: 2023 年 4 月 4 日) .
- [2] Blender Online Community, Blender – a 3D modelling and rendering package, Blender Foundation, Stichting Blender Foundation, Amsterdam, 2018.
- [3] Jay Versluis, Rock generator for blender, 2018,
<https://github.com/versluis/Rock-Generator> (参照: 2023 年 4 月 4 日) .
- [4] S. Makino, K. Kawaharazuka, A. Fujii, M. Kawamura, T. Makabe, M. Onitsuka, Y. Asano, K. Okada, K. Kawasaki and M. Inaba, Five-fingered hand with wide range of thumb using combination of machined springs and variable stiffness joints, In 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp.4562-4567, 2018.
- [5] R. Ma, A. Dollar, Yale OpenHand Project: Optimizing Open-Source Hand Designs for Ease of Fabrication and Adoption, IEEE International Robotics & Automation Magazine, 2017, pp.32-40.
- [6] J.B. Kuipers, Quaternions and rotation sequences: a primer with applications to orbits, aerospace, and virtual reality, Princeton, NJ: Princeton Univ. Press, ISBN: 0691058725 9780691058726, 1999,
<https://www.worldcat.org/title/quaternions-and-rotationsequences-a-primer-with-applications-to-orbits-aerospaceand-virtual-reality/oclc/246446345>
(参照: 2023 年 7 月 18 日) .
- [7] K. Levenberg, A Method for the Solution of Certain Non-Linear Problems in Least Squares, In: Quarterly of Applied Mathematics 2.2, 1944, pp.164-168.
- [8] L.P. Kaelbling, M.L. Littman, and A.W. Moore, Reinforcement Learning: A Survey, 1999. DOI: 10.48550/ARXIV.CS/9605103
- [9] V. Francois-Lavet, et al., An Introduction to Deep Reinforcement Learning, In: Foundations and Trends® in Machine Learning 11.3-4, 2018, pp.219-354. DOI: 10.1561/22000000071
- [10] A. Raffin, et al., Stable-Baselines3: Reliable Reinforcement Learning Implementations, In: Journal of Machine Learning Research, 22.268, 2021, pp.1-8, <https://jmlr.org/papers/v22/20-1364.html> (参照: 2023 年 7 月 18 日) .
- [11] D. Silver, et al., Deterministic Policy Gradient Algorithms, In: Proceedings of the 31st International Conference on Machine Learning.
- [12] P. Dhariwal, et al., OpenAI Baselines, 2017, <https://github.com/openai/baselines> (参照: 2023 年 7 月 18 日) .
- [13] E. Coumans, and Y. Bai, PyBullet, A Python module for physics simulation for games, robotics and machine learning, <https://pybullet.org> (参照: 2023 年 7 月 18 日) .
- [14] S.Y. Nof, Handbook of Industrial Robotics, John Wiley & Sons Inc., USA., 1985.
- [15] J.E. Colgate, W. Wannasuphoprasit, and M.A. Peshkin, Cobots: robots for collaboration with human operators, Proceedings of the ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Atlanta, GA, USA, 1996, pp.433-439.
- [16] Robots as surgical enablers, MarketWatch, retrieved 2013/03/17.
- [17] Y. Li, et al., Differential game theory for versatile physical human-robot interaction, Nature Machine Intelligence, 1(1), 2019, pp.36-43.

- [18] B. Vanderborght, et al., Variable impedance actuators: a review. *Robotics and autonomous systems*, 61(12), 2013, pp.1601–1614.
- [19] D.J. Braun, et al., Variable stiffness spring actuators for low-energy-cost human augmentation, *IEEE Transactions on Robotics*, 35(6), 2019, pp.1435–1449.
- [20] S. Hirose, C. Tibbetts, and T. Hagiwara, Development of X-screw: a load-sensitive actuator incorporating a variable transmission, *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics & Automation*, Detroit, MI, USA, 1999, pp.193–199.
- [21] K. Takaki, and T. Omata, Load-sensitive continuously variable transmission for powerful and inexpensive robot hands, *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics & Automation*, Tokyo, Japan, 2004, pp.3391–3396.
- [22] K. Matsushita, S. Shikanai, and H. Yokoi, Development of drum CVT for a wire-driven robot hand, *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, St. Louis, MO, USA, 2009, pp.2251–2256.
- [23] A.S. Kernbaum, M. Kitchell, and M. Crittenden, An ultra-compact infinitely variable transmission for robotics, *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Singapore, 2017, pp.1800–1807.
- [24] C. Moore, M.A. Peshkin, and J.E. Colgate, Design of a 3R cobot using continuously variable transmissions, *Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation*. Detroit MI, USA, 1999, pp.3249–3254.
- [25] T. Yamamoto, K. Matsuda, and T. Hibi, Analysis of the efficiency of a half-toroidal CVT, *JSAE Review*, 22: 2001, pp.565–570.
- [26] J. Newall, and A. Lee, Measurement and prediction of spin losses in the EHL point contact of the full toroidal variator, *Tribology and Interface Engineering Series*, 43, 2003, pp.769–779.

