



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・人材育成推進事業—

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

-FY2021 Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource
Development Project-

福島研究開発部門 福島研究開発拠点 廃炉環境国際共同研究センター
東京大学

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

January 2023

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 JAEA イノベーションハブ 研究成果利活用課
〒 319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (<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 Institutional Repository and Utilization Section, JAEA Innovation Hub, Japan Atomic Energy Agency.
2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

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

(2022年9月21日受理)

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

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

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

本研究は、研究課題のうち、令和3年度に採択された「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為に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為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3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。シミュレーションソフトウェアの選定や環境構築をした。英国チームとの協議のもと、要求寸法やペイロード、アクチュエータ要求諸元や構造検討を行った。ビジュアルサーボや遠隔操作インターフェースの検討準備を行った。電装系やソフトウェアシステムの構成を決めた。

英国チームや外部アドバイザ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、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)

— FY2021 Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource Development Project —

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

The University of Tokyo

(Received September 21, 2022)

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

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

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

Among the adopted proposals in FY2021, this report summarizes the research results of the “Novel mechanical manipulator for efficient fuel debris retrieval” conducted in FY2021.

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.

In FY2021, we worked on the design of optimal manipulator parameters and the development of navigation algorithms. The simulation software and the environment were configured. We studied the required dimensions, payload, actuator requirements and the structure with the UK team. We conducted the study of visual servo and remote-control interface. The electrical and software system configurations were determined.

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
付録 成果報告書	13

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
Appendix Result Report	13

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タイアップ型人材育成	高貝 慶隆	福島大学
放射線・化学・生物的作用の複合効果による燃料デブリ劣化機構の解明	大貫 敏彦 (～R2. 3. 31) 竹下 健二 (R2. 4. 1～)	東京工業大学
燃料デブリ分析のための超微量分析技術の開発	永井 康介	東北大学

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

本報告書は、以下の課題の令和3年度の研究成果を取りまとめたものである。

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 3 年度

日本原子力研究開発機構

英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業

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 R03I148)

成果報告書

令和 4 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年度の研究成果を取りまとめたものです。

目次

概略	vi
1. はじめに	1
1.1 研究目的	1
1.2 研究概要	2
2. 業務計画	3
2.1 全体計画	3
2.2 令和3年度における成果の目標および業務の方法	4
2.3 実施体制	5
3. 実施内容および成果	6
3.1 最適なマニピュレータのパラメータ設計	6
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	22
3.3 CP-CVTに基づくCVT-VIA構築（英国チーム成果）	35
3.3.1 背景	35
3.3.2 CP-CVT（定出力無段階変速機）	36
3.3.3 IVTの運動学	39
3.3.4 ボールとディスクに関する静力学	40
3.4 研究推進	43
4. 結言	46

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

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

表一覧

表 1	粗密サンプリングによる可到達域の体積.....	20
表 2	複数サンプリング条件における可到達域体積値.....	21
表 3	グリッパー環境における特徴量ベクトル.....	26

図一覧

図 1.1-1	提案システムの概要図.....	1
図 2.1-1	年度別全体計画.....	3
図 2.2-1	月別全体計画.....	4
図 2.3-1	実施体制.....	5
図 3.1.1-1	サンプルとしての3自由度マニピュレータ.....	6
図 3.1.1-2	ターゲットタスク.....	7
図 3.1.1-3	肩関節トルクの計算用のロボットマニピュレータ模式図.....	7
図 3.1.1-4	平面上における挙上動作のシミュレーションおよび動作実行中における関節トルク値	8
図 3.1.1-5	Yale OpenHand は、本ロボットアーム動作環境にて様々な課題を有する.....	9
図 3.1.1-6	CFRP を用いたロボット骨格における FEM の結果.....	10
図 3.1.1-7	アルミニウム合金 A7075 の切削部品を用いて構築されたロボット関節部.....	10
図 3.1.1-8	ロボットアームの CVT.....	11
図 3.1.1-9	CVT 分解図.....	12
図 3.1.1-10	CVT 断面図.....	13
図 3.1.2-1	簡易化したペDESTALモデル.....	14
図 3.1.2-2	シミュレータ上に読み込んだマニピュレータモデル.....	14
図 3.1.2-3	様々なパラメータを用いて作成したマニピュレータモデル.....	15
図 3.1.3-1	ロボット作業空間.....	17
図 3.1.3-2	ロボット作業空間表現.....	18
図 3.1.3-3	仮想空間におけるロボットマニピュレータ.....	18
図 3.1.3-4	可到達領域.....	19
図 3.1.3-5	線形補間を用いた疎な可到達領域解析.....	20
図 3.2.1-1	ロボットアームのグリッパー付近に仮想のカメラが搭載され視界を提供する... ..	22
図 3.2.1-2	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.....	24
図 3.2.1-3	カメラ画像からの特徴抽出.....	25
図 3.2.1-4	対象物体へのリーチングタスク.....	27
図 3.2.2-1	電装系システム構成図.....	29
図 3.2.2-2	CVT と電気モータを用いた単軸駆動試験機の CAD モデル.....	31
図 3.2.2-3	ロボットアーム.....	32
図 3.2.2-4	Braccio ロボットアームの手動操作.....	32
図 3.2.2-5	myCobot ロボットアームの手動操作.....	33
図 3.3.1-1	動力伝達比と出力トルクの角度依存性.....	36
図 3.3.2-1	CVT の動作様式.....	37
図 3.3.2-2	運動学解析のための基準座標系.....	38
図 3.3.2-3	遊星歯車減速機の模式図.....	39
図 3.3.2-4	2 段階減速の CVT-VIA におけるトルクと角速度出力.....	41

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 Advanced Decommissioning Science (廃炉環境国際共同研究センター)
東電	: 東京電力ホールディングス株式会社
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 (無段階変速機)
ROS	: Robot Operating System
VIA	: Variable Impedance Actuator (可変インピーダンスアクチュエータ)

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（PCV：Primary Containment Vessel、以下、「PCV」と略す。）内部には大量の燃料デブリが存在しており、廃炉に向けてこれら燃料デブリを取り出すことが必須となる。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ーを取り付け、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。そこで本研究では可変インピーダンスアクチュエータ（以下、「VIA」と略す。）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1年目である令和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：有限会社ライテックス（以下、「ライテックス」と略す。））

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ー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。グリッパー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、グリッパー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）

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（以下、「ROS」と略す。）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廃炉環境国際共同研究センター（以下、「CLADS」と略す。）等との連携を密にして、研究を進めた。また、研究実施計画を推進するための打合せや会議等を開催した。

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：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

無段階変速機（以下、「CVT」と略す。）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

1Fの1～3号機のPCV内部には大量の燃料デブリが存在しており、廃炉に向けてこれら燃料デブリを取り出すことが必須となる。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ーを取り付け、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。

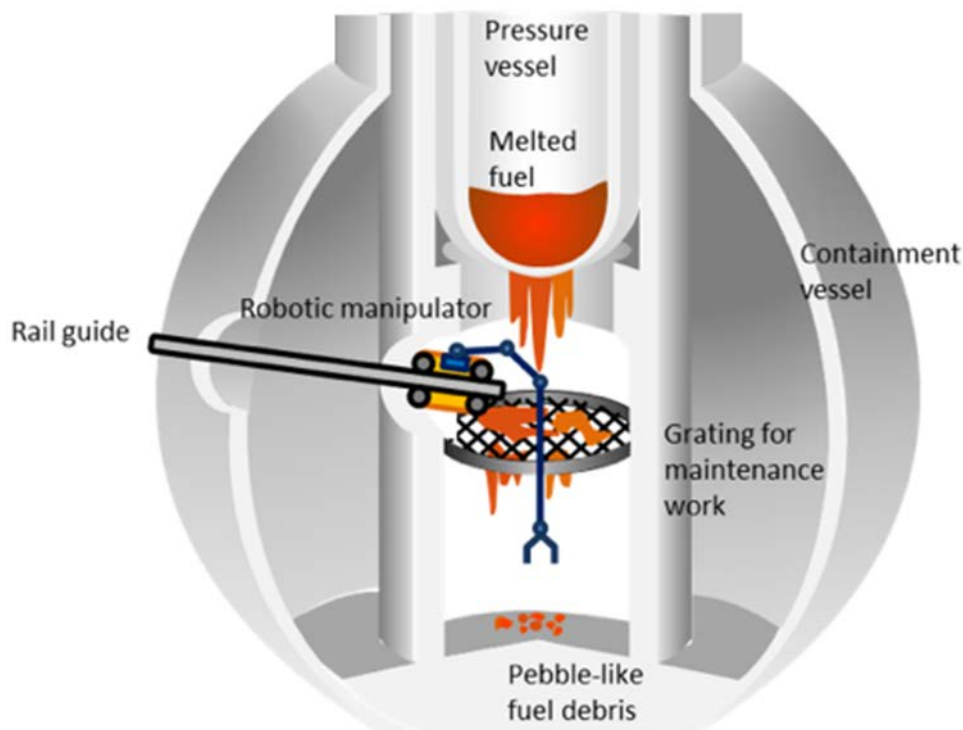


図 1.1-1 提案システムの概要図

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。マニピュレータが原子炉格納容器内のペ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：JAEA）

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、グリッパーにおいては、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、標準的なグリッパー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、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の原子炉格納容器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 檜葉遠隔技術開発センター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-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
(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3年度における成果の目標および業務の方法

(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）

令和3年度はシミュレーション環境を構築する。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う。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う。東京大学はグリッパーのマニピュレータ作成を重点的に、ライテックスはアームのマニピュレータ作成を重点的に行う。

(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）
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う。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う。

(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合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。

項目	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
(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)								模擬する	環境の仕様検討	シミュレーションソフトの検討	シミュレーション環境の構築	
(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									ナビゲーションアルゴリズムの開発準備			
(3) 研究推進										プロジェクト会議の開催		
												まとめ
(4) 英国側									Design, manufacture and testing of CVT-VIA			

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。

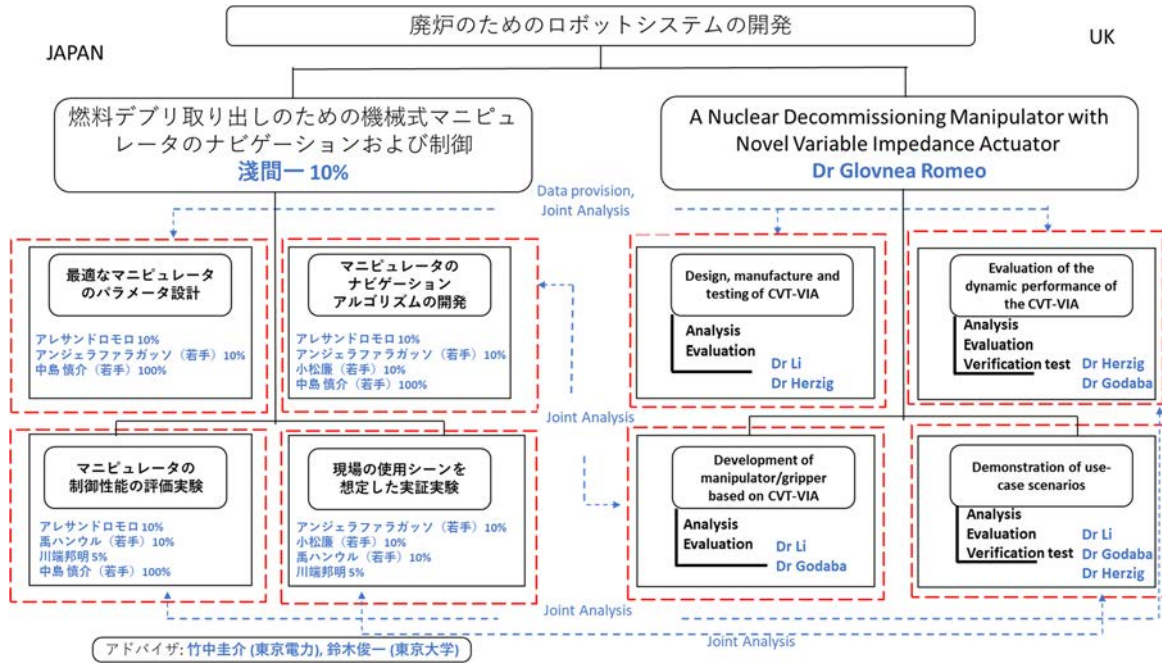


図 2.3-1 実施体制

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）

(1) 暫定自由度に基づく設計および応力解析

マニピュレータの最適パラメータを決定する。

アクチュエータの出力要求の基礎検討のために、図 3.1.1-1 に示すマニピュレータを作図した。3 自由度構成のうち、ピッチ (Pitch) 2 自由度を考慮した。ヨー (Yaw) 自由度の駆動軸について、寸法などの制限が比較的小さいことから、設計は今後の課題とする。

タスクを図 3.1.1-2 に示す。X-6 ペネトレーション先端からペDESTAL部の底部までの距離 3 m およびマニピュレータの屈曲を考慮した結果、マニピュレータの合計リンク長を 4 m 程度と設定した。ペイロードはペDESTAL底部のデブリ 500 g を想定しており、X-6 ペネトレーション先端からアームを下げ、そしてペDESTAL底部のデブリをグリッパーで把持した後、アームを持ち上げデブリを回収する。進入およびタスク実行開始の前提条件として、高さ 0.5 m、奥行 2 m 以上の開口部の存在が前提となる。すなわち、合計 4 m 程度の長尺アームを、CVT-VIA を活用して駆動するというのが本ロボットアームの特徴となる。

ペイロードの重量に比して長尺ロボットアームの自重に伴う負荷が大きくなる。設計の制約として大きく影響したのは CVT-VIA の質量比トルク値である。CVT の重量として 25 kg と発揮トルク 100 Nm を鑑み、各関節にアクチュエータを配置する構成をとることは不可能であると判断した。そこで、根幹部の関節にアクチュエータを集約する構成をとった。現状案ではピッチ 2 自由度、ヨー 1 自由度を備える構成であるが、今後さらなる多自由度化を予定している。

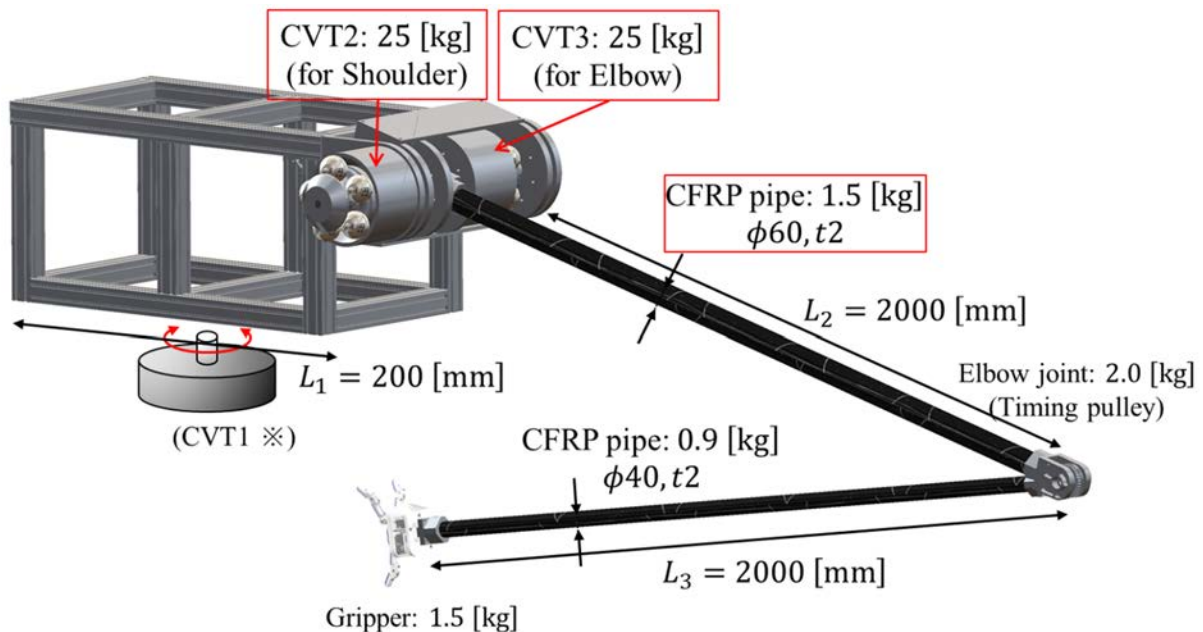


図 3.1.1-1 サンプルとしての 3 自由度マニピュレータ
 ロボットは 3 つの CVT-VIA を搭載する。

ピッチ自由度のアクチュエータ (CVT2、CVT3) はトルク負荷の削減のため同軸配置される。

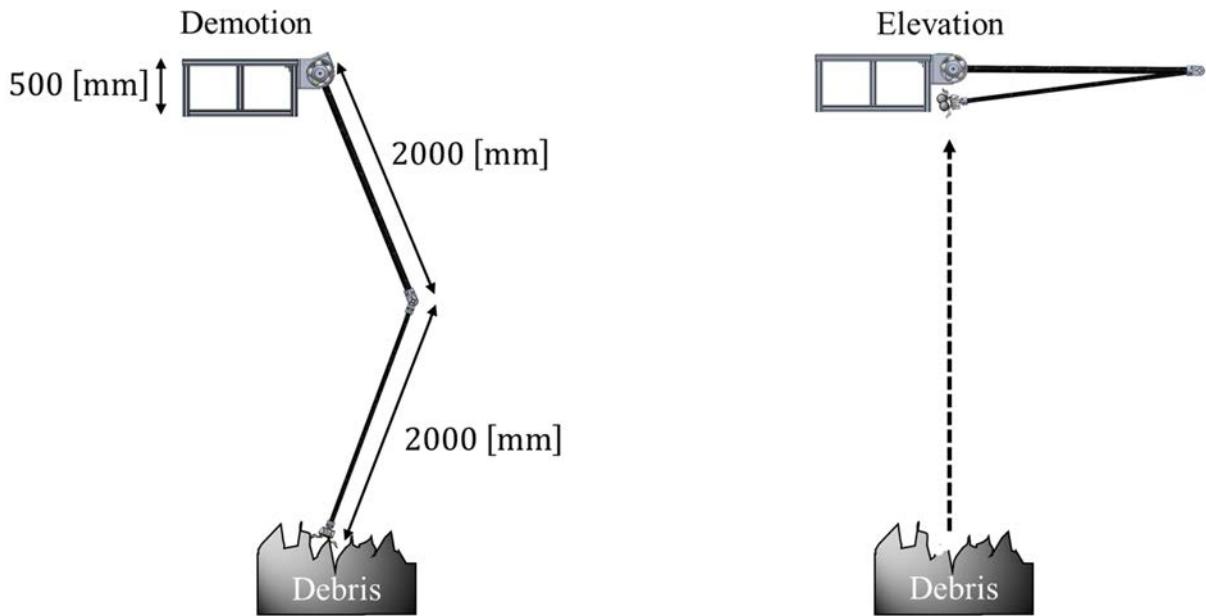


図 3.1.1-2 ターゲットタスク
 マニピュレータはペDESTAL底部のデブリを、4 m の高さだけ持ち上げる。

関節毎に CVT を搭載した場合の要求トルク簡易計算について、図 3.1.1-3 を用いて説明する。

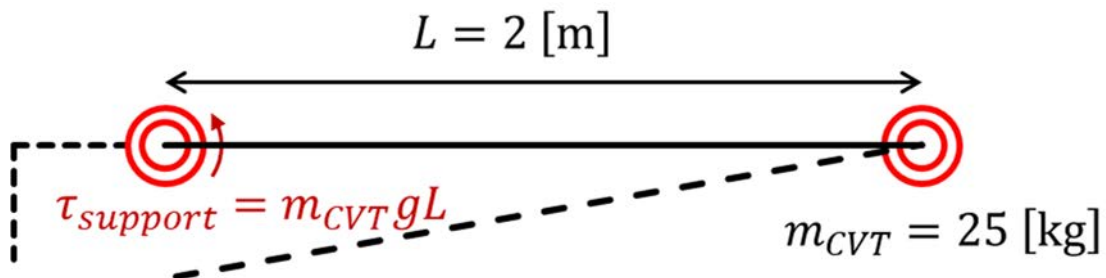


図 3.1.1-3 肩関節トルクの計算用のロボットマニピュレータ模式図

CVT の質量が $m_{CVT} = 25 \text{ kg}$ 、リンク長は $L = 2 \text{ m}$ である。肩関節と肘関節が水平の位置関係にある時に、肩関節のアクチュエータが水平姿勢を保つためのトルクは

$$\begin{aligned}
 \tau_{Support} &= m_{CVT} \times g \times L \\
 &= 25 \times 9.8 \times 2 \\
 &= 490 \text{ [Nm]}
 \end{aligned}$$

となり、これは CVT 発揮トルクの 100 Nm を大きく上回る。今回の簡易計算では、最も重量の割合が大きい CVT にのみ着目したが、実際の運用では、骨格やグripper など他の部品も支持す

る必要があるため、最大負荷はさらに大きくなる。

回避策として、肘関節用の軽量版の CVT-VIA の開発や、肩関節用の大型 CVT-VIA の開発が望まれる。また、最も負荷の大きな水平姿勢をアクチュエータで支持する時間を短くするような工夫の余地があるが、それらの検討は今後の課題とする。例えば、CAD モデルをインポートした動力学シミュレータにより評価が可能であると考えられる。

予備検討としてのシミュレーションを実行した。無視できる質量を持つデブリを図 3. 1. 1-4 の要領で持ち上げるタスクを考える。CAD モデルを基に算出した寸法・質量パラメータを持つモデルであり、挙上動作における関節トルク値をプロットした。関節トルクの過渡的な最大値や定常負荷としての平均値を小さくし、アクチュエータ負荷を抑えるために設計パラメータや動作計画に対して検討の余地が存在する。また、実際の挙上動作においては、上部の CRD 等の障害物の存在により、アームを高く持ち上げることは困難であり、動作設計も今後の課題の 1 つとなる。本シミュレーションは、英国チームのメンバーによりなされたことを付記する。

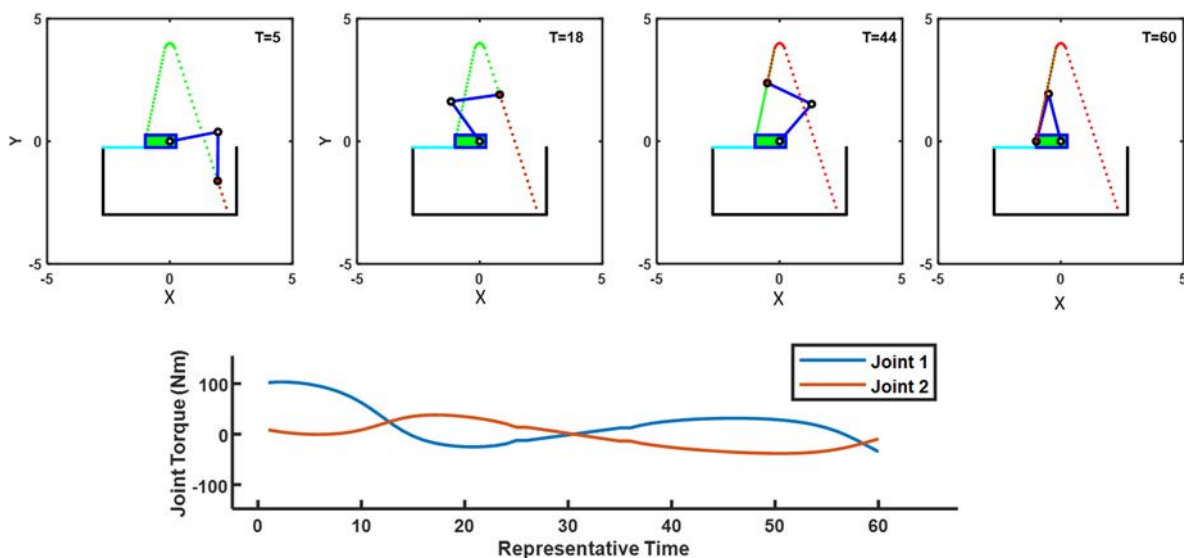


図 3. 1. 1-4 平面上における挙上動作のシミュレーションおよび動作実行中における関節トルク値

グripper周りの構成について

デブリを把持するグripperの構成について、デブリ周辺の放射線の影響を抑えるためには電装系や駆動系をグripper本体から離すことが望ましい。一方で、駆動系の重量によっては、手首部から離すことによって肩関節アクチュエータへの負荷の増大につながることから、アクチュエータ出力とのバランスを考えたグripper設計が肝要となると考えられる。加えて、グripper部は特に放射線の影響を受けることが予想されるので、使用材料全般にわたって、耐放射線性の議論が必要となると考えられる。グripper部の設計ベースラインとして、

図 3. 1. 1-5 に示す Yale OpenHand[1]の活用を予定している。

本ロボットハンドは、数百 g～数 kg のペイロードを把持可能であること、製法が簡易であり試作のループを多く回すことが可能であること、多様な設計・活用事例が存在し、比較検討が容易であることから、設計ベースラインとして適切であると考えられる。

- ・ゴム関節多自由度モデル[1]
- ・高負荷、安価モデル[2]
- ・光学系触覚センサ内蔵、把持・吸引モデル[3]

特に、本研究で構築するロボットアーム/グripperの燃料デブリ回収における設計の懸念事項として、以下が存在する。

- 駆動系統におけるセンサ・電装系の耐放射線性能
- 動力伝達ワイヤの耐放射線性、創傷保護
- 関節部構成
- 環境接触部エラストマーの放射線劣化の有無

これらの要件を満足するグripperの設計案についても検討を進めていく。

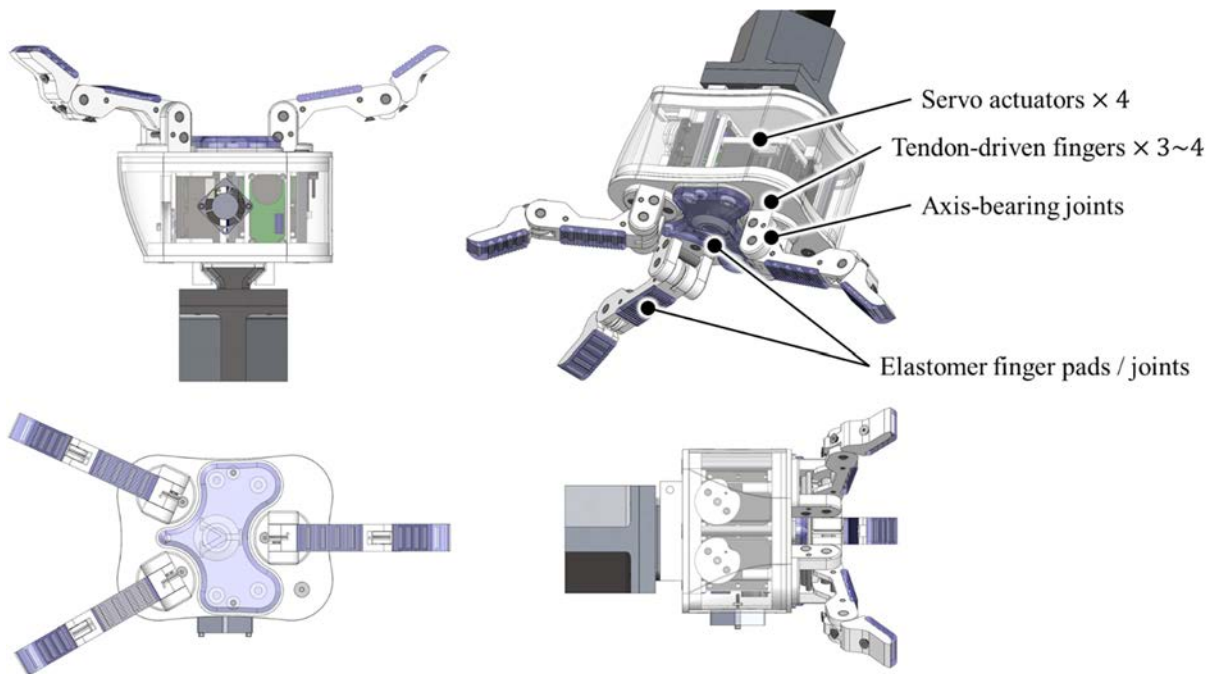


図 3.1.1-5 Yale OpenHand[1]は、本ロボットアーム動作環境にて様々な課題を有する

骨格・関節構造の評価

スーパードラゴン、低イナーシャ脚移動ロボットなどの先行機体を参考とし、またリンク長と質量の観点から、φ60、φ40のCFRPパイプを活用したリンク設計を進めた。

図 3.1.1-6 に示すように、3次元CADを活用した有限要素解析を実施した。自重以上の負荷500Nを想定した曲げモーメントを、上腕部のリンクに加えることによる応力、ひずみを出力させた。厚さが2mmの時に、曲げモーメントによる応力は、CFRP部の限界応力の半分を下回る値となった。垂直変位は累計で数十cm程度となっている。最大応力値から、厚さ2mm程度のCFRPパイプをベースに実機強度を検討することが妥当であると考えられる。

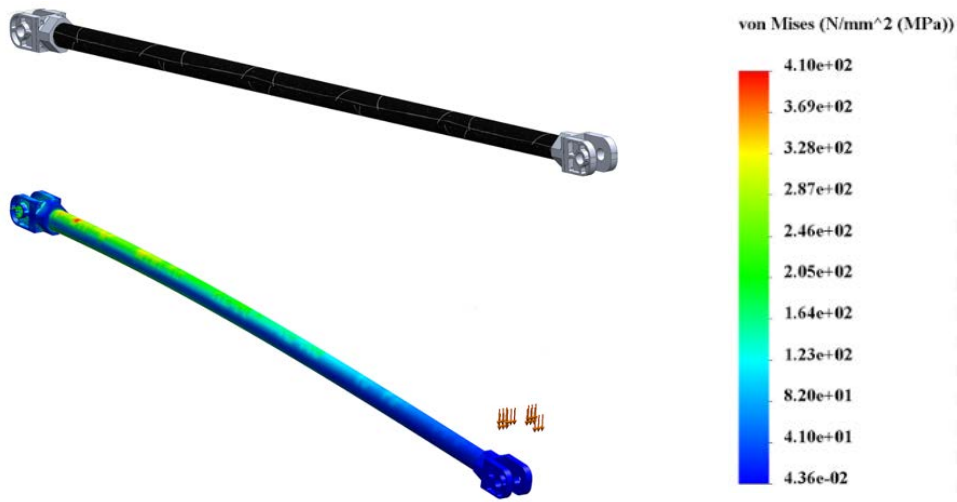


図 3.1.1-6 CFRP を用いたロボット骨格における FEM の結果

関節部には、質量比剛性に優れたアルミニウム合金 (A7075) による切削部品やハイテン鋼による板金部品の活用を予定している。図 3.1.1-7 に、設計案を示す。動力伝達のためのタイミングプーリを備える他、2 次元形状を中心とした部品構成とすることで、加工工程の単純化と設計評価ループの促進を狙う。関節角度計測において、電気的受動部品のポテンショメータを活用することで、耐放射線性の増大を意図する。CFRP パイプとの接合部の検討 (接着/ねじどめ等) を開始する。タイミングベルトのためのテンショナ、軸/ベアリング導入、可動域拡大のためのオフセット導入なども検討事項として存在する。

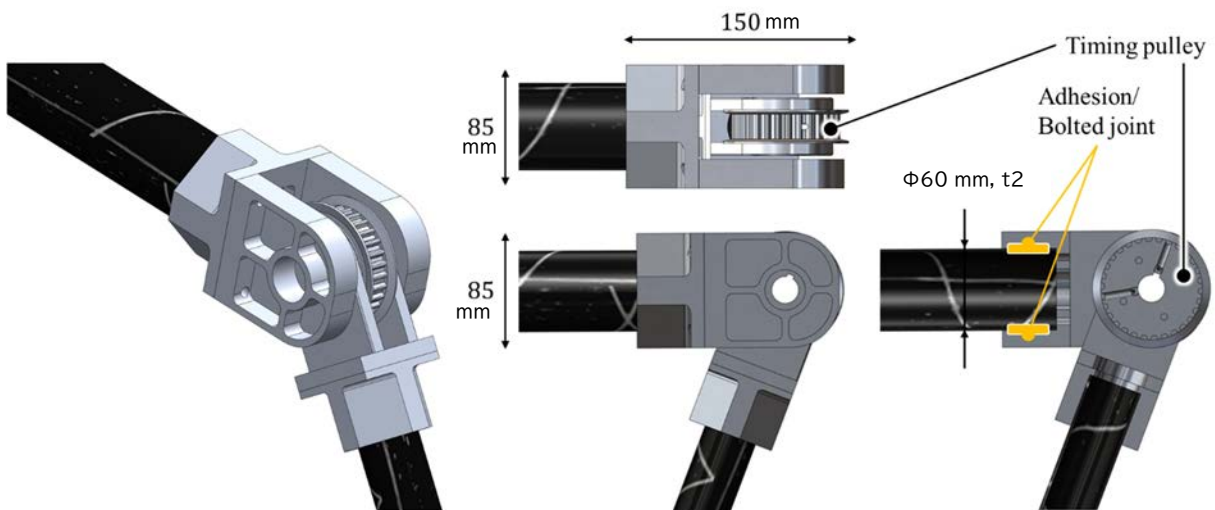


図 3.1.1-7 アルミニウム合金 A7075 の切削部品を用いて構築されたロボット関節部

CVTの動作原理と構成案

図 3.1.1-8A に、CVT の全体図を示す。重量 20 kg、トルク出力は 100 Nm 程度を予定する。駆動伝達に歯車を用いないトラクションドライブが、可変減速比を実現する原理となる。

図 3.1.1-8B に、トラクションドライブの原理を示す。転導体が拘束力 F_C によって近接・弾性変形し、トラクション流体の受ける摩擦力 F_t によって動力が伝達される。

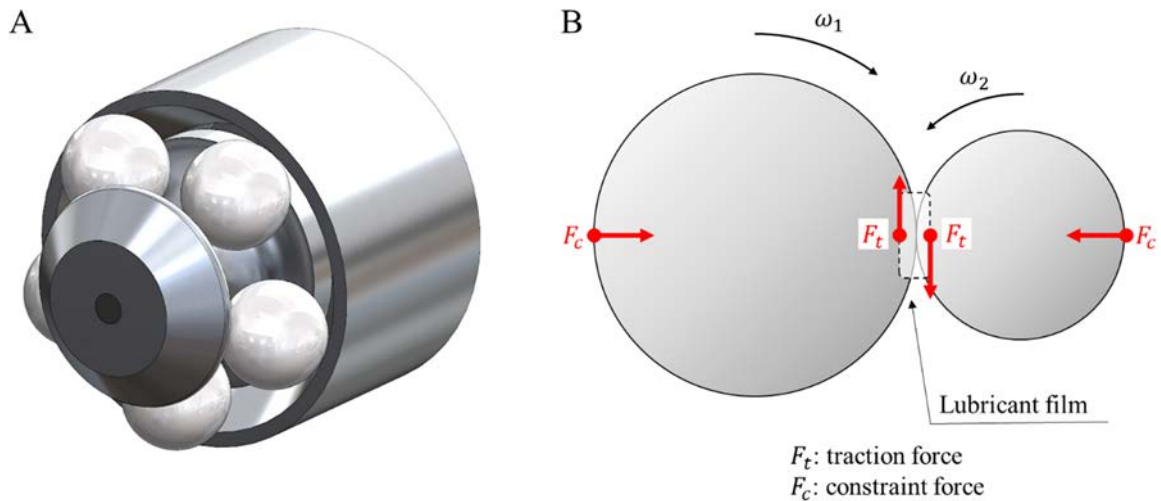


図 3.1.1-8 ロボットアームの CVT
A) 全体図 B) トラクションドライブ原理図

図 3.1.1-9 に、CVT の分解図を示す。英国チームとの議論や先行研究を基に作図したものであり、駆動力を伝達するための最低限の部品を含む。実際のアクチュエータ構成には、これらに加え減速比増大のための遊星歯車と、200 N~300 N の予圧のための小型油圧シリンダを搭載する。

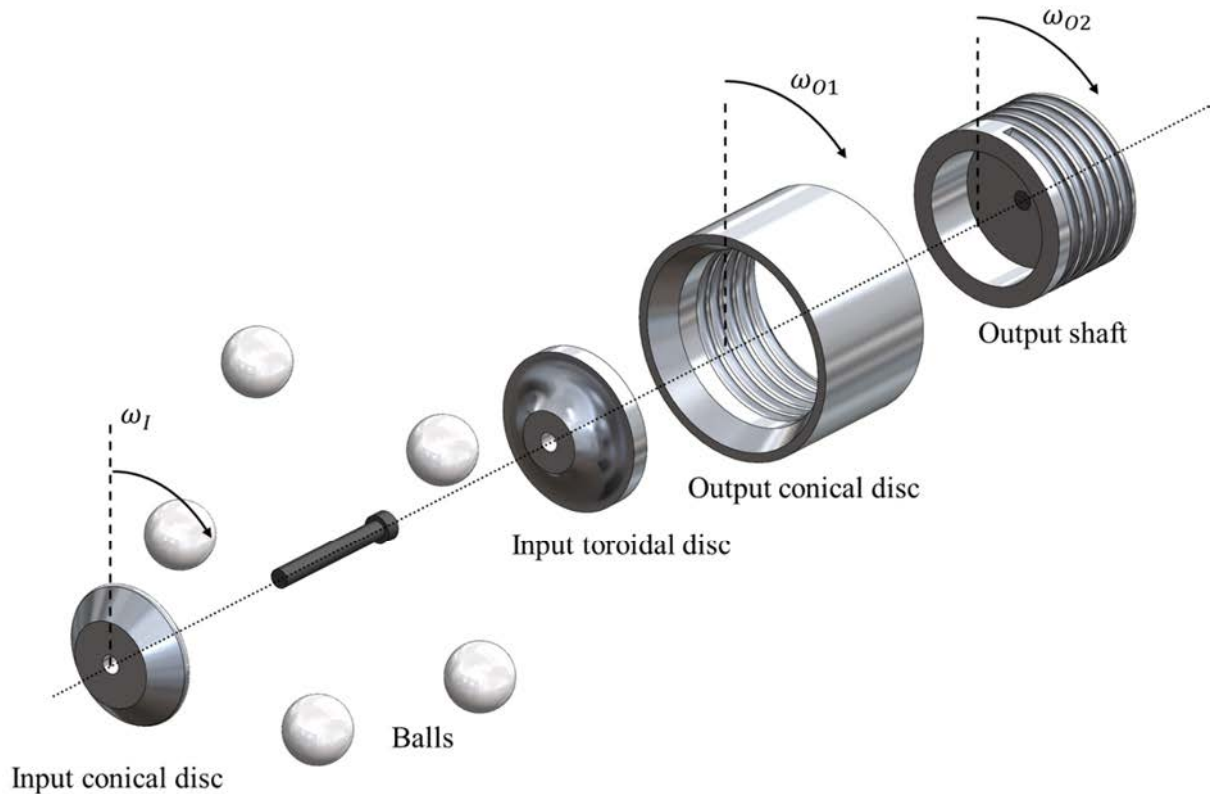


図 3.1.1-9 CVT 分解図

駆動力を伝達するための球体（直径 70 mm）の材質に関しては、質量比剛性に優れる窒化ケイ素などの導入が検討されたが、入手性や要求加工精度などの観点から、鋼球を用いた製造を予定している。重量増分に関してはロボットシステム設計の工夫により解決できると考えている。トラクション油はコンポネント間接触部に常に介在するが、減速機内部を充填する必要は無い。

以下に動作の流れを示す。

1. 入力軸および入力円錐盤が回転し、Balls に対してトラクション力を加える。
2. 球体が回転し、Output conical disc を押す。
3. Output conical disc と出力軸が回転する。

ここで、通常 $\omega_{01} = \omega_{02}$ であるが、 $\Delta\omega_0 = \omega_{01} - \omega_{02}$ が非零のとき、Output conical disc は軸方向に直動運動し、これにより負荷感応変速が達成される。例えば環境接触などによる意図しない負荷を受けた場合に該当する。

CVT の断面図を図 3.1.1-10 に示す。Output conical disc と Output shaft の間にボールねじが介在することで、軸のラジアル方向移動に伴うボール接触点の移動と、それに伴う減速比可変を実現する。

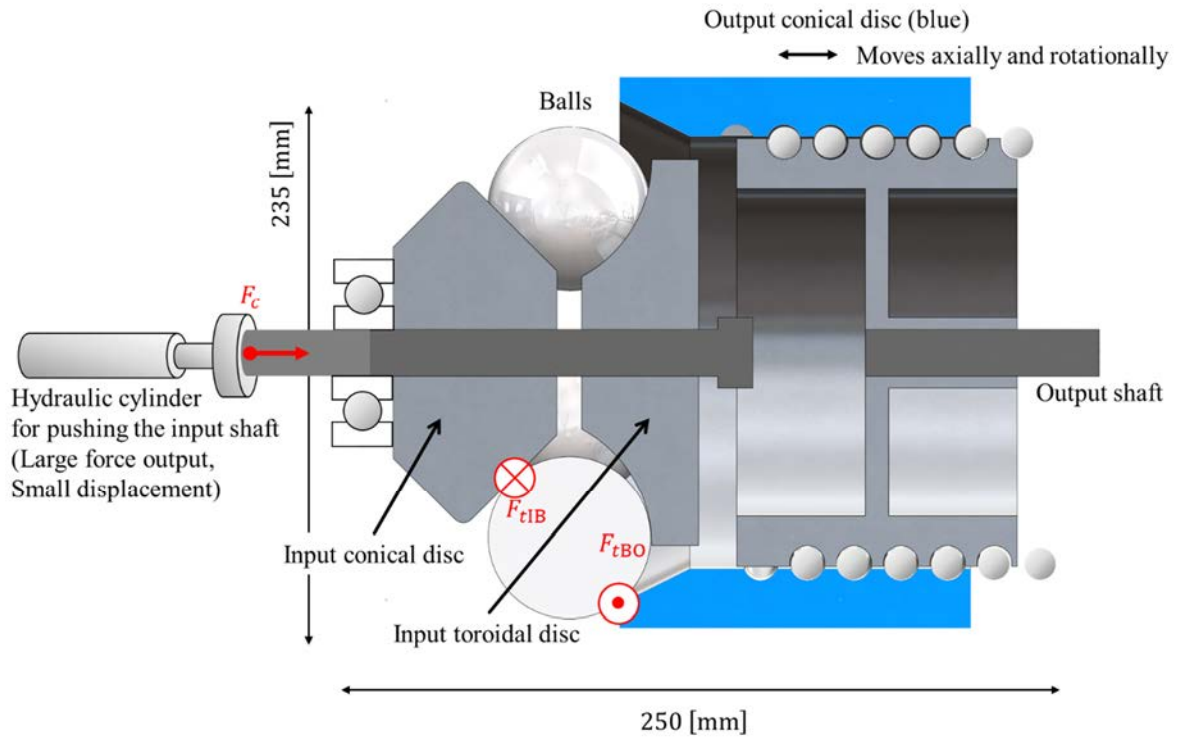


图 3. 1. 1-10 CVT 断面图

(2) シミュレータを用いたパラメータ設計の準備

シミュレータを用いることで 1F に適したマニピュレータの自由度、リンクの長さ等の設計を行う。令和 3 年度においては、令和 4 年度に行うパラメータ設計のために使用するシミュレータを構築した。具体的に説明すると、まずは図 3.1.2-1 に例を挙げたように探査対象となるペDESTAL の 3 次元モデルを作成する。また、マニピュレータの 3 次元モデルを作成する。ここでマニピュレータの 3 次元モデル上においては、関節といった可動部の情報が回転軸とともに含まれているものとする。これによりシミュレータ上で実際のマニピュレータのようにコントロールすることができる。ペDESTAL の底部・天井等の環境モデルおよびマニピュレータを物理シミュレータに読み込むことで、マニピュレータのデブリへのリーチング動作のシミュレーションを行うことができる。

ここでのシミュレータとして PyBullet [4] を採用した。PyBullet は近年、深層学習の研究開発において非常によく使われている。本研究では、令和 4 年度において深層学習を用いたナビゲーションへ取り組むことを考えているため非常に相性がよいということで採用を決めた。PyBullet 上にマニピュレータを読み込んだ様子を図 3.1.2-2 に載せた。また、PyBullet は 3 次元モデルとして、ロボット系で一般的に使われる Unified Robotic Description Format (URDF) 形式の読み込みにも対応しているため、ロボット系のソフトウェアとの相性も非常によい。

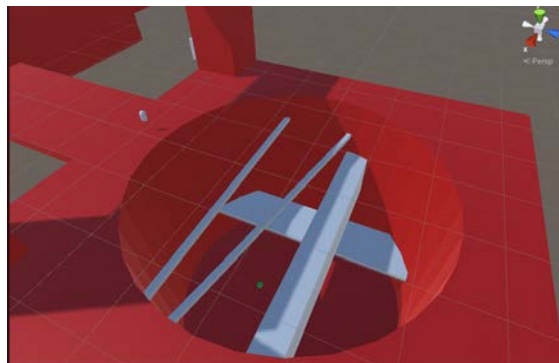


図 3.1.2-1 簡易化したペDESTALモデル

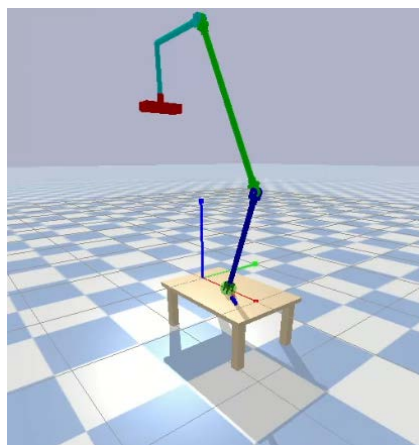


図 3.1.2-2 シミュレータ上に読み込んだマニピュレータモデル

PyBullet に環境モデルと様々なマニピュレータを読み込み、デブリの取り出しといった模擬タスクをシミュレーションすることで、最適なマニピュレータの形状・自由度等を求めることができる。なぜなら、PyBullet は物理シミュレータであるため、適切にマニピュレータの質量・慣性モーメントを指定することで、模擬タスクを行っている最中の関節トルク等も求めることができるからである。つまり、要求されるアクチュエータのトルク計算にも使用可能である。また、適切に 3 次元モデルを設計することで、模擬タスクを実施している最中に環境モデルとマニピュレータの衝突がないかといった点も確認可能である。これにより、ペDESTAL といった複雑な環境において衝突可能性の少ないマニピュレータの構成を得ることが可能である。

ここで、問題となるのは様々なマニピュレータのモデルをどのように生成するかである。人間が 1 台 1 台設計するのは非常に手間がかかるため、マニピュレータのパラメータを指定することで自動的に生成可能なプログラムを生成した。具体的には、3 リンクで構成された図 3.1.2-2 に示すマニピュレータに対して、3 リンクの長さを与えることで自動的に指定されたリンクの長さを持つマニピュレータモデルを作成可能となった。さらに正確な物理シミュレーションのために、与えられたリンクの長さに応じて質量や慣性モーメントも付与可能である。実際に様々なリンクの長さを与えて生成したマニピュレータモデルを図 3.1.2-3 に示す。図 3.1.2-3 ではリンクの長さの合計値を一定に、左図から順番に、緑のリンクの長さを長く、青のリンクの長さを短くしたマニピュレータモデルとなっている。モデル先端にはグリッパーを搭載し、把持対象へのアプローチのみならず、グリッパー一部のシミュレーションも可能としている。今後、様々な自由度を持つマニピュレータの生成にも対応する必要があるが、現在は人間が様々な自由度を持つマニピュレータのベースとなるモデルを作成し、作成プログラム上でリンクの長さといった細かなパラメータを調整する方向で進めようと考えている。

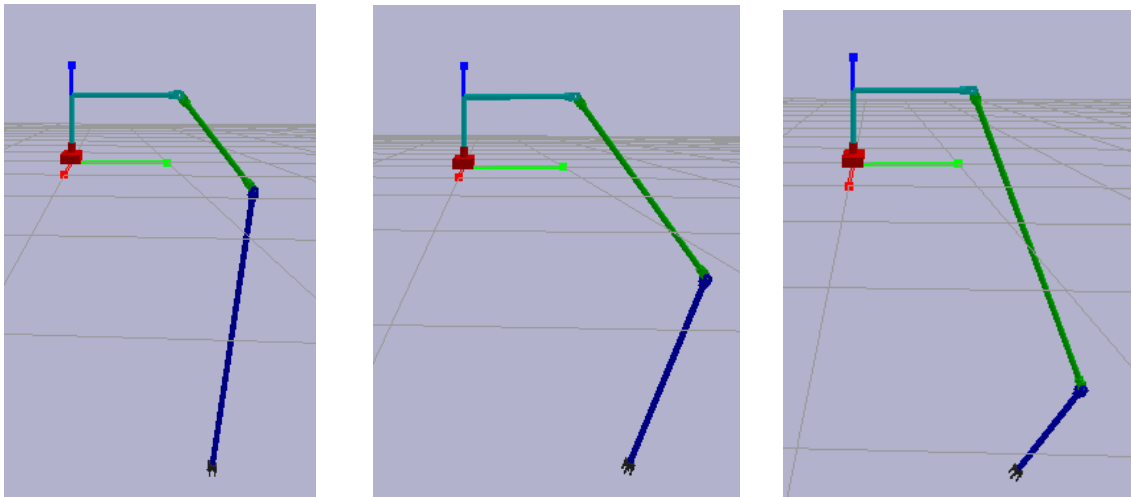


図 3.1.2-3 様々なパラメータを用いて作成したマニピュレータモデル

(3) 可到達域評価

ここでは、シミュレーション環境とアルゴリズムに関して説明すると共に、可到達域の定性的・定量的評価を行う。

① 動力学エンジン

シミュレータとして、(1)で言及した PyBullet を活用している。1F を想定したシミュレーション環境における、マニピュレータの制御と学習および試験の用途で活用される。実装等における柔軟性のため、実装では Python 言語を使用した。

② アルゴリズム

可到達域の計算は、運動計画問題として扱うことが可能である。計算アルゴリズムを以下に示す。

Algorithm 1 Task Motion Planning

```

while  $N_0 < max_0$ 
  while  $N_1 < max_1 \vee \neg(pathfound)$  do
    set random joint position  $P_1$ 
    IK from the target proximity (5 iterations)
    if Collision or self-collision is not detected then
      IK from the target object - gripper (5 iterations)
      if Collision not detected and the object can be grasped then
        FK Interpolate motion from start to goal
        if Collision or self-collision is not detected then
          path found = True
        end if
      end if
    end if
  end while
  IK from the rest position to  $P_1$ 
  IK from the target position to the rest position
  if Robot or object collision or self-collision is not detected then
    Object is reachable
  end if
end while

```

ここで、逆運動学の解法としては、Damped Least-Squares (DLS) 法を採用した[5]。アルゴリズム中における反復回数 max_0 、 max_1 は各々10に設定した。また、 N_0 および N_1 はループカウンタである。対象物体とロボットグリッパー間の距離が1 mm以下になった時、対象物体にロボットが到達したと判定した。グリッパー部の姿勢は、任意の姿勢を許容するものとした。

③ ロボット作業空間

②にて解説したアルゴリズムを用いて、ロボットの可到達域を計算した。ロボットのベース部を原点と設定し、yz 座標系にて 5 mm 間隔で評価を行った。評価結果を図 3.1.3-1 に示す。

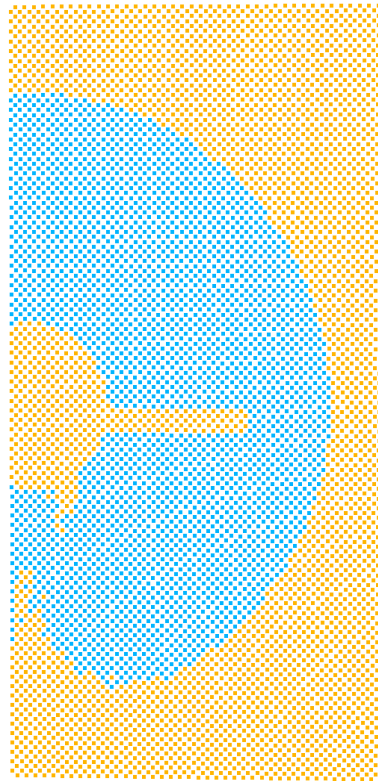


図 3.1.3-1 ロボット作業空間
 青色：アーム先端が到達可能な領域
 黄色：到達不可能な領域

各点の情報を用いて、可到達域の境界を計算し、その体積を求めた。各々の点とその両隣の情報に対して重み行列を計算した。重み行列の値は、可到達な点に対して1、それ以外は0の値とした。各々の点におけるスコアを以下のアダマール積を以て計算した（式(1)）。

$$w = \frac{1}{10} \left[\mathbf{e}^T \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \circ \begin{pmatrix} p_{x-1,y-1} & p_{x,y-1} & p_{x+1,y-1} \\ p_{x-1,y} & p_{x,y} & p_{x+1,y} \\ p_{x-1,y+1} & p_{x,y+1} & p_{x+1,y+1} \end{pmatrix} \mathbf{e} \right] \quad (1)$$

ここで、 e は、すべての成分が 1 の列ベクトルである。重みが 0.4 より小さくなる点のみを選択した。所望の可到達域平面に対して、垂直軸周りに 0.1 rad 毎に回転させ、可到達域を示す立体を計算した。本メッシュは、図 3.1.3-2 のように可到達域を定性的に示すモデルを提供する。

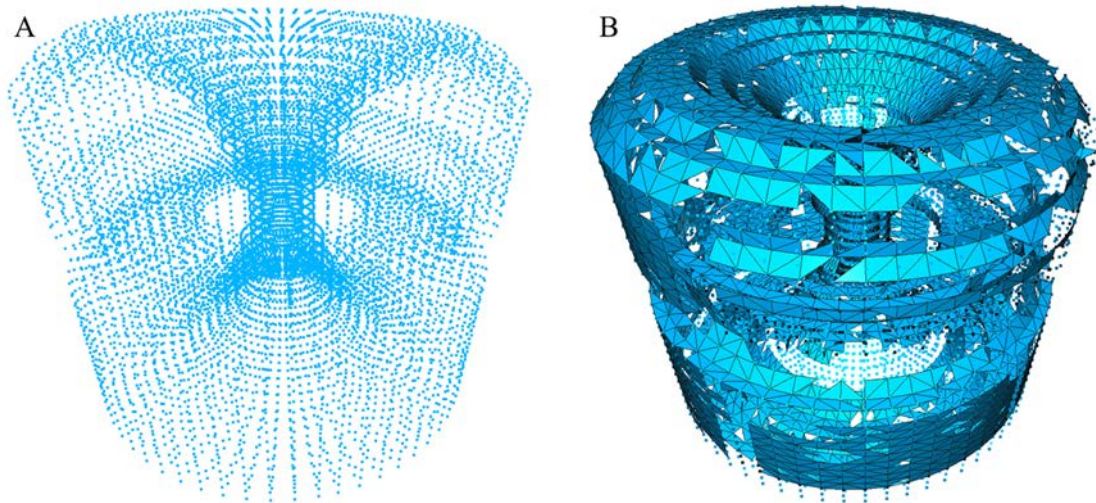


図 3.1.3-2 ロボット作業空間表現
A) 頂点 B) メッシュ

④ 可到達域

可到達域は、障害物が存在しない空間において、ロボット手先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[6]。想定シナリオでは、図 3.1.3-3 のように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。

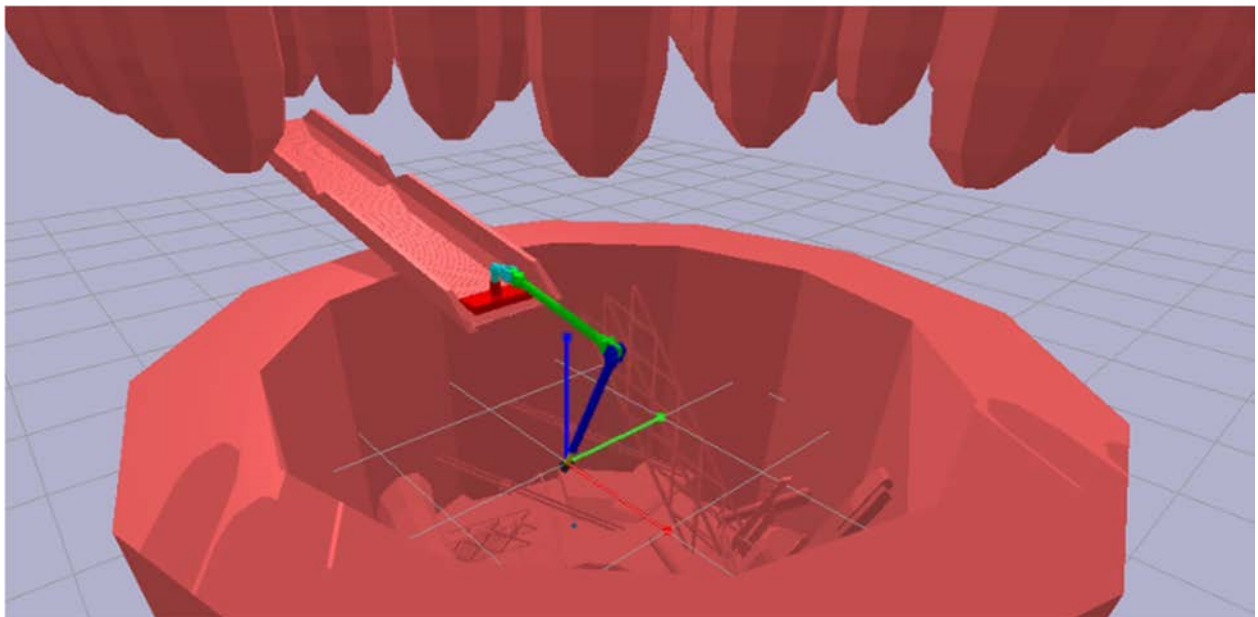


図 3.1.3-3 仮想空間におけるロボットマニピュレータ

可到達域の計算対象領域は、4 m×4 m×3 mに設定した。この領域に対して、2.3節と同様の手法で目標点を取り、可到達域を評価した。目標点同士の間隔は5 cmである。結果を図3.1.3-4に示す。

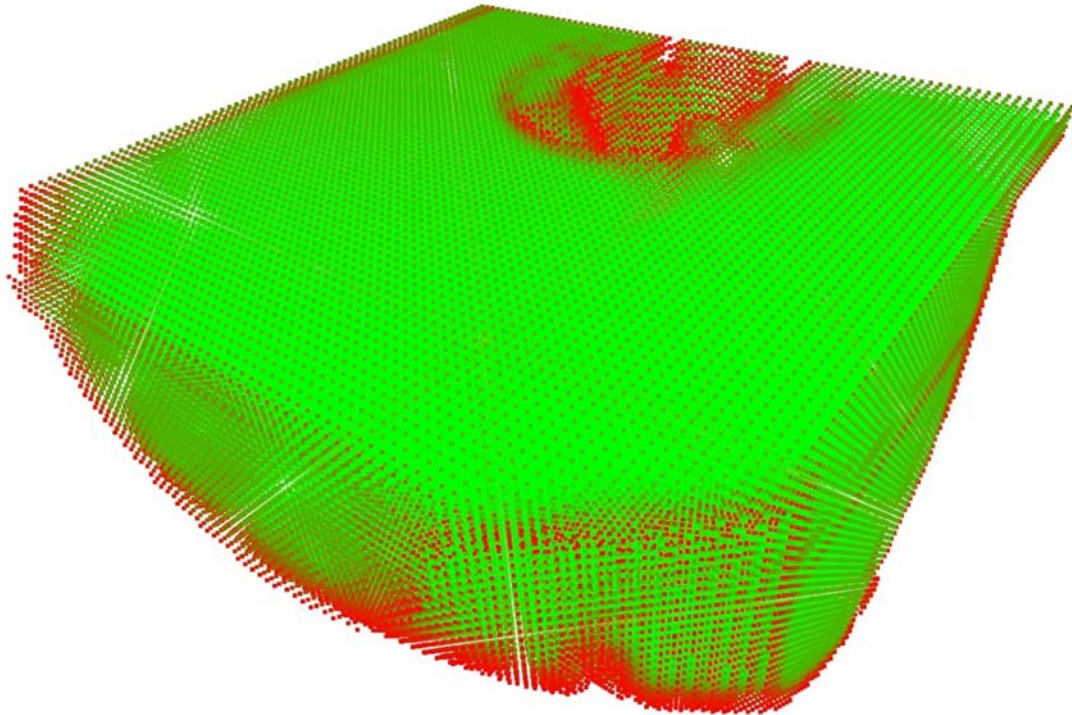


図 3.1.3-4 可到達領域
5 cm 間隔で評価。緑色：到達可能な領域、赤色：到達不可能な領域

緑色の点は、到達可能な領域を示す。赤色は、到達不可能な領域である。本手法では、到達可能領域の高密度な評価ができる一方で、単一口ロボットに対する計算時間が4 daysと極めて大きいことが問題であった。そこで、疎な条件における評価も行った。目標点同士の間隔は20 cmに設定した。本条件では、計算時間は6 hoursであった。可到達域を示す行列 $A \in R^{m \times n \times p}$ を作成した。重み行列を式(1)と同様の原理で評価する。3次元分計算されることが特徴となる(式(2)(3))。

$$B_{x,y,z} = \begin{array}{|c|c|c|} \hline 1 & 1 & 1 \\ \hline 1 & 1 & 1 \\ \hline 1 & 1 & 1 \\ \hline \end{array} \circ \begin{array}{|c|c|c|} \hline p_{x-1,y-1,z+1} & p_{x,y-1,z+1} & p_{x+1,y-1,z+1} \\ \hline p_{x-1,y,z+1} & p_{x,y,z+1} & p_{x+1,y,z+1} \\ \hline p_{x-1,y+1,z+1} & p_{x,y+1,z+1} & p_{x+1,y+1,z+1} \\ \hline \end{array} \begin{array}{|c|c|c|} \hline p_{x-1,y-1,z} & p_{x,y-1,z} & p_{x+1,y-1,z} \\ \hline p_{x-1,y,z} & p_{x,y,z} & p_{x+1,y,z} \\ \hline p_{x-1,y+1,z} & p_{x,y+1,z} & p_{x+1,y+1,z} \\ \hline \end{array} \begin{array}{|c|c|c|} \hline p_{x-1,y-1,z-1} & p_{x,y-1,z-1} & p_{x+1,y-1,z-1} \\ \hline p_{x-1,y,z-1} & p_{x,y,z-1} & p_{x+1,y,z-1} \\ \hline p_{x-1,y+1,z-1} & p_{x,y+1,z-1} & p_{x+1,y+1,z-1} \\ \hline \end{array} \quad (2)$$

$$w_{x,y,z} = \frac{1}{32} \|vec(\mathbf{B})\| \tag{3}$$

ここで、可到達域の合計体積は、サンプリングされたボクセル要素を集めたベクトルの長さで決定される (式(4))。

$$V = \sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n \sum_{z=1}^p w_{x,y,z} * l^3 \tag{4}$$

重み行列の補間のために、線形補間を利用して 20 cm 間隔から 5 cm 間隔のデータを得た[7]。補間結果を、5 cm 間隔の計算データと比較した。双方のサンプリング結果を図 3.1.3-5 に示す。また、定量比較の結果は表 1 の示す通りである。

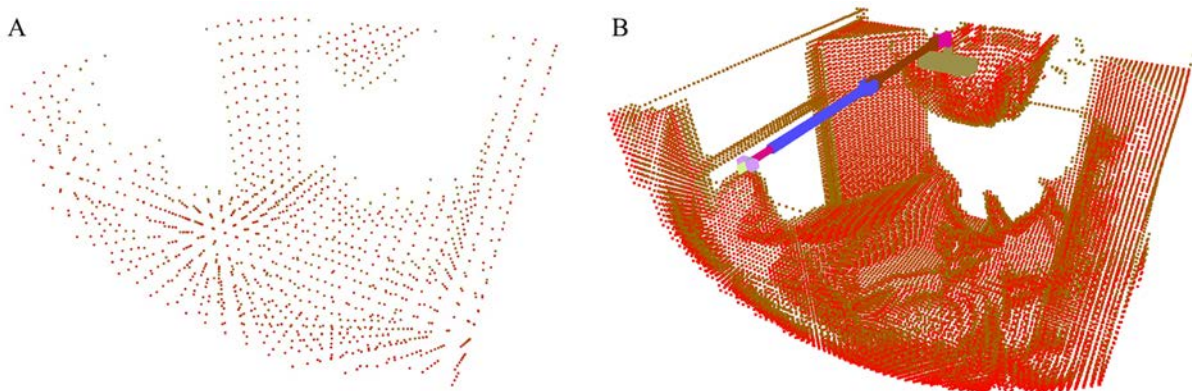


図 3.1.3-5 線形補間を用いた疎な可到達領域解析
A) 20 cm 間隔 B) 5 cm 間隔で補間 (領域端部のみを描画)

表 1 粗密サンプリングによる可到達域の体積

可到達域の体積		
サンプリング間隔	体積 (m ³)	可到達域の占める割合 (%)
5 cm	27.34	56.96
20 cm	23.44	48.83
20 cm (補間 5 cm)	26.38	54.96

ロボット初期位置の最適化を図るべく、異なるロボット初期位置の条件下で可到達域の体積を比較した。20 cm 間隔のサンプリングと、5 cm 間隔補間をさせた状態での結果を表 2 に示す。体積の分散は小さく、ロボット初期位置の可到達域体積への影響は小さいと判断できる。

表 2 複数サンプリング条件における可到達域体積値

可到達域の体積		
サンプリング間隔	体積平均値 (m ³)	分散 σ Vol. m ³
20 cm	23.293	0.611
20 cm (補間 5 cm)	26.22	0.64

参考文献

- [1] Yale OpenHand Project, <https://www.eng.yale.edu/grablab/openhand/> (参照:2022/04/05).
- [2] Franchi, G., et al., The Baxter Easyhand: A Robot Hand that Costs \$150 US in Parts, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2015, pp.2917-2922, DOI: 10.1109/IROS.2015.7353779.
- [3] Hasegawa, S., et al., A Three-fingered Hand with a Suction Gripping System for Picking Various Objects in Cluttered Narrow Space, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2017, pp.1164-1171, DOI: 10.1109/IROS.2017.8202288.
- [4] Coumans, E., and Bai, Y., PyBullet, A Python Module for Physics Simulation for Games, Robotics and Machine Learning, <https://pybullet.org> (参照:2022/04/05).
- [5] Levenberg, K., A Method for the Solution of Certain Non-linear Problems in Least Squares, Quarterly of Applied Mathematics, vol.2, no.2, 1944, pp.164-168.
- [6] Iyengar, S.S, Ying, Z., Robot Reachability Problem: A Nonlinear Optimization Approach, J. Intelligent Robotic Systems, vol.12, 1995, pp.87-100.
- [7] The SciPy Community, LinearNDInterpolator, <https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.interpolate.LinearNDInterpolator.html> (参照:2022/04/03).

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) 局所構成におけるマニピュレータの遠隔操作システムの開発

ここでは、購入したパソコン・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、そして深層強化学習(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3.2.1-1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。

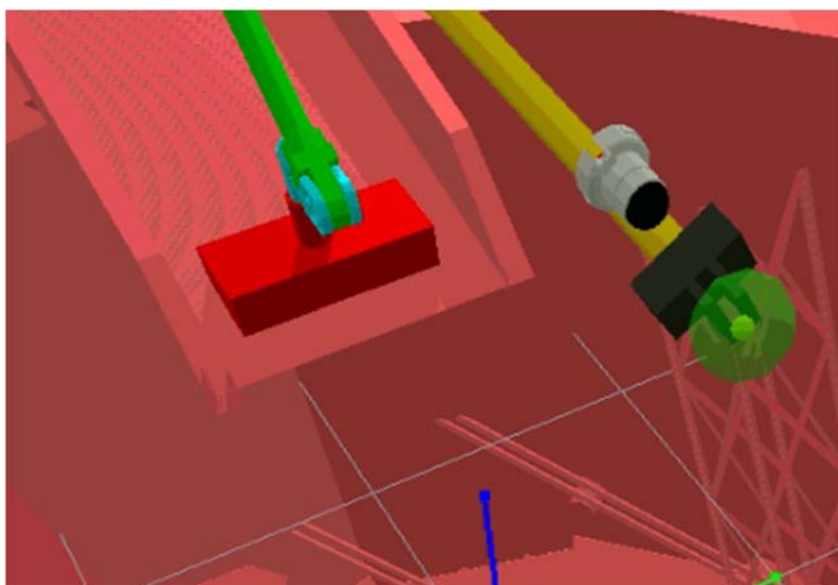


図 3.2.1-1 ロボットアームのグリッパー部分付近に仮想のカメラが搭載され視界を提供する。
(灰色と黒で描画された円筒形状の物体がカメラに相当)

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(5)のようにならわされる。

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ \tan\left(\frac{fov}{2}\right) \times \frac{w}{h} & 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\tan\left(\frac{fov}{2}\right) \times \frac{w}{h}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\tan\left(\frac{fov}{2}\right) \times \frac{w}{h}} & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$K = \begin{bmatrix} \frac{P[0][0] \times w}{2} & 0 & \frac{w}{2} \\ 0 & \frac{P[0][0] \times h}{2} & \frac{h}{2} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

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(7)のように計算される。

$$\vec{v} = K^{-1} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$m = \min \left(1 - \frac{|x - \frac{w}{2}|}{\frac{w}{2}}, 1 - \frac{|x - \frac{h}{2}|}{\frac{h}{2}} \right) \quad (8)$$

$$\overrightarrow{dv} = \frac{\vec{v}}{\|\vec{v}\|_2} \quad (9)$$

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ーの距離は、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（式(10)）。

$$dv_z = \begin{cases} dv_z \times m, & \text{if forward} \\ -dv_z \times m, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

グリッパー位置および姿勢を表すクォータニオンから、式(11)の手順で回転行列が求められる[3.2-1]。新たな目標座標は式(12)の通りである。

$$R = \begin{bmatrix} 2(q_0^2 + q_1^2) - 1 & 2(q_1q_2 - q_0q_3) & 2(q_1q_3 + q_0q_2) \\ 2(q_1q_2 + q_0q_3) & 2(q_0^2 + q_2^2) - 1 & 2(q_2q_3 + q_0q_1) \\ 2(q_1q_3 - q_0q_2) & 2(q_2q_3 - q_0q_1) & 2(q_0^2 + q_3^2) - 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$Target = R\overrightarrow{dv} + p_{gripper} \quad (12)$$

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ー座標を表す。ロボット関節角度は、逆運動学を介して計算する[3.2-2]。

仮想カメラ制御の様子を図 3.2.1-2 に示す。

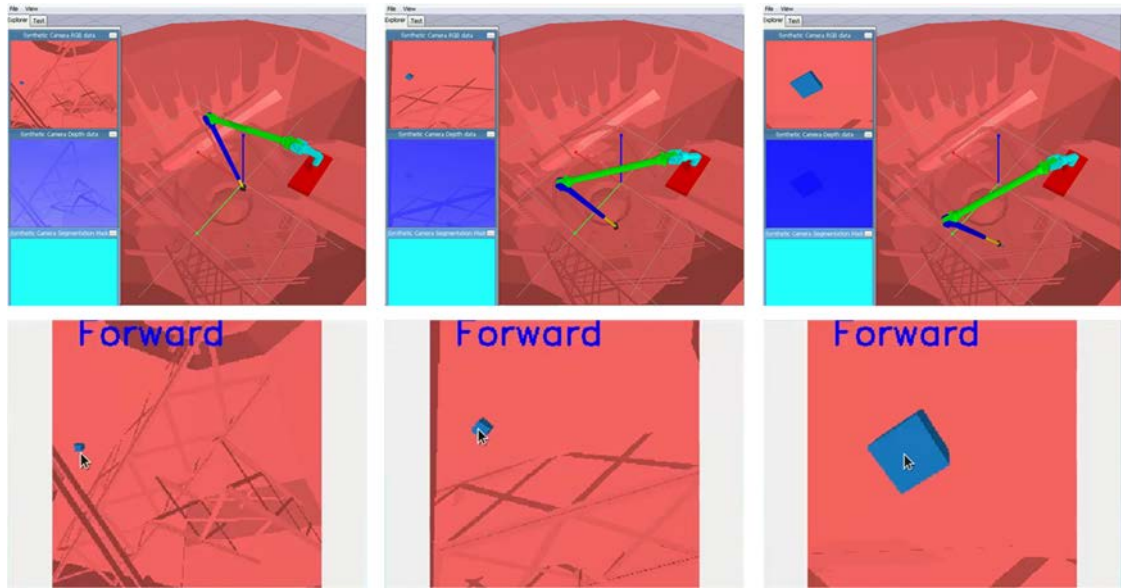


図 3.2.1-2 オペレータ指示によるロボットの対象物体へのリーチング
 (オペレータがカメラ画像の中の目標点をクリックすると、
 ロボットは手先を選択座標に向かうように動かす。)

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[3.2-3]。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[3.2-4]。ここでは、ロボットの訓練のために、オープンソース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[3.2-5]。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) [3.2-6]を選択した。DDPG は、特に連続変化する環境中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、そして報酬関数を定義した。報酬関数は以下の Algorithm 2 によってあらわされる。そして、閾値 σ は 0.001 とした。

Algorithm 2 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

$T = \text{False}$
 $R_{distance} = -d$
 $R_{control} = -\|\vec{a}\|^2$
 $R = R_{distance} + R_{control}$
 if $R(d < \sigma) \vee (t \geq t_{max})$ 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

$$\mathbf{A} = \{a_0, a_1, \dots, a_i\} \tag{13}$$

として定義される（式(13)）。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[3. 2-7]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. 1-3 によってあらわされる。

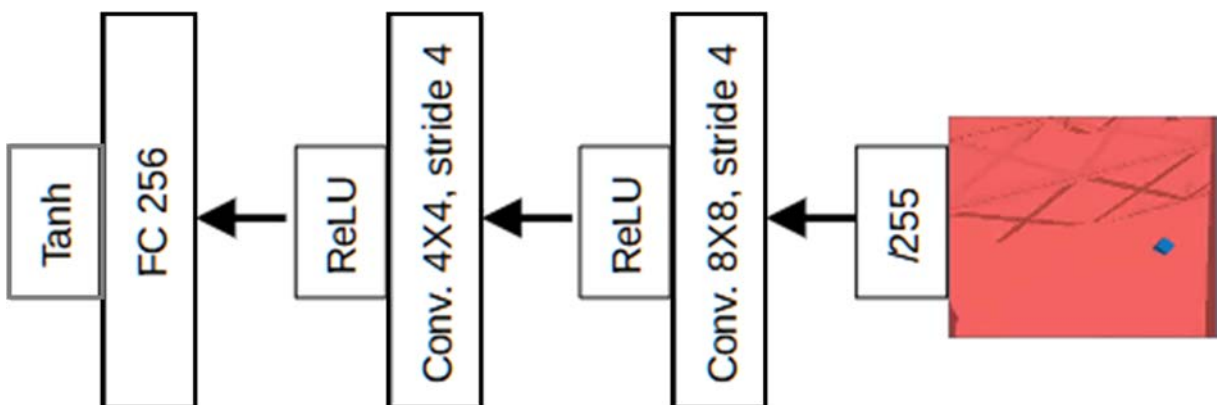


図 3. 2. 1-3 カメラ画像からの特徴抽出

2つの定性的評価の結果を以下に示す。1つは、表3に示す観測特徴量を用いたもので、結果は図3.2.1-4Aの通りである。もう1つは、CNNを活用したもので、結果は図3.2.1-4Bに示した。

表3 グリッパー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	グリッパー幅
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

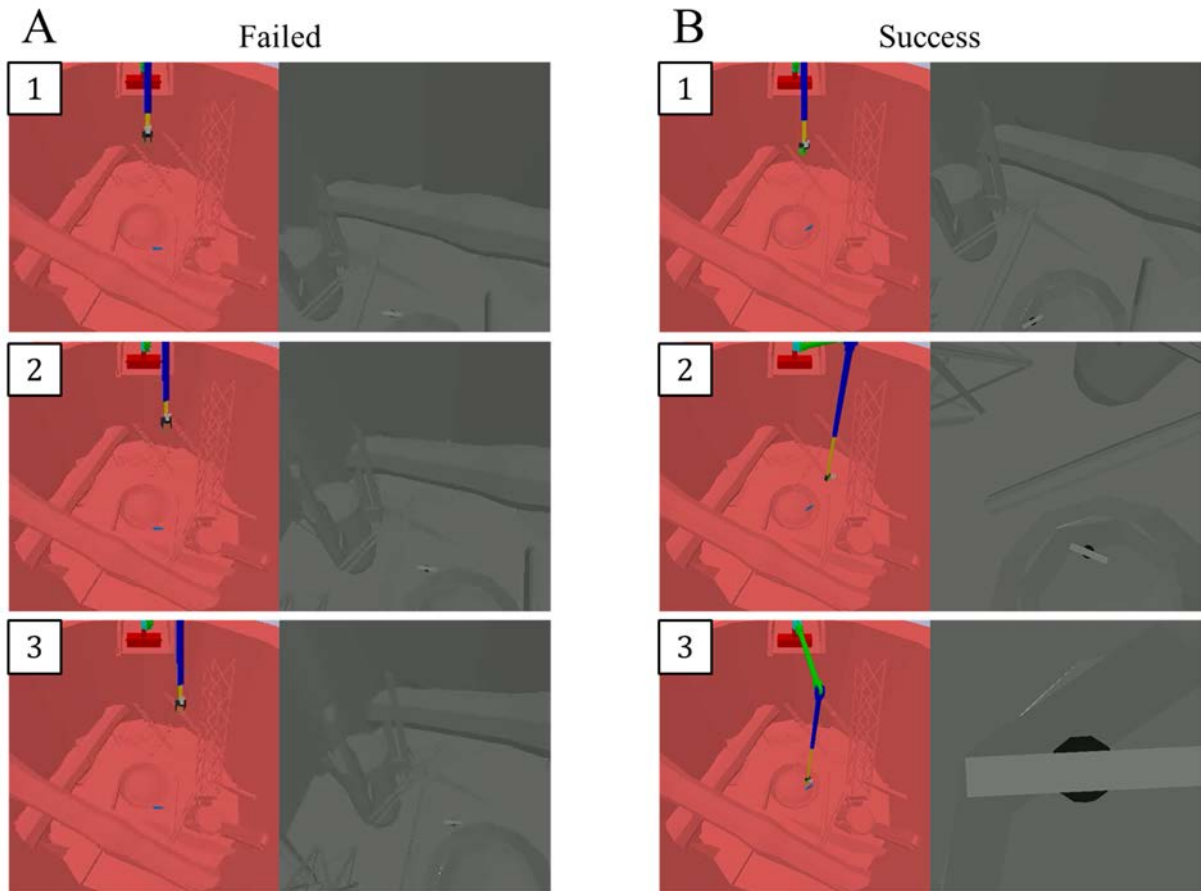


図 3.2.1-4 対象物体へのリーチングタスク

- 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。

参考文献

- [3.2-1] Kuipers, J. B., Quaternions and Rotation Sequences: A Primer with Applications to Orbits, Aerospace, and Virtual Reality, Princeton Univ. Press, ISBN: 0691058725 9780691058726, 1998, 384p.
- [3.2-2] Levenberg, K., A Method for the Solution of Certain Non-linear Problems in Least Squares, Quarterly of Applied Mathematics, vol.2, no.2, 1944, pp.164-168, <https://doi.org/10.1090/qam/10666>.
- [3.2-3] Kaelbling, L. P., Littman, M. L., and Moore, A. W., Reinforcement Learning: A Survey, Journal of Artificial Intelligence Research, vol.4, 1996, pp.237-285, <https://doi.org/10.48550/arXiv.cs/9605103>.
- [3.2-4] François-Lavet, V., et al., An Introduction to Deep Reinforcement Learning, Foundations and Trends® in Machine Learning, vol.11, no.3-4, 2018, pp.219-354, <https://doi.org/10.1561%2F22000000071>.
- [3.2-5] Raffin, A., et al., Stable-Baselines3: Reliable Reinforcement Learning Implementations, In: Journal of Machine Learning Research, vol.22, no.268, 2021, pp.1-8, <http://jmlr.org/papers/v22/20-1364.html> (参照: 2022/04/03) .
- [3.2-6] Silver, D., et al., Deterministic Policy Gradient Algorithms, In: Proceedings of the 31st International Conference on Machine Learning, Ed. by Eric P. Xing and Tony Jebara, vol. 32, Proceedings of Machine Learning Research 1. Beijing, China: PMLR, 22-24 Jun 2014, pp.387-395, <https://proceedings.mlr.press/v32/silver14.html> (参照: 2022/04/03) .
- [3.2-7] Dhariwal, P., et al., OpenAI Baselines, 2017, <https://github.com/openai/baselines> (参照: 2022/04/03) .

(2) 電装系とソフトウェアのシステム検討

電装系システム構成

(ロボット全体システム)

図 3.2.2-1 に、ロボット全体の電装系システム構成案を示す。

制御計算機は、ロボット幾何モデルなどを格納し、ロボットやエンドエフェクタ姿勢を送信する。

モータコントローラは、モータドライバに対して電圧・電流指令を送信する。単一のモータコントローラで複数のモータドライバ基板を制御可能である。

モータドライバ基板は、所望の電圧・電流をモータに対して給電する。ブラシレスモータを対象にした三相交流への変換や、モータ角度に応じた調整の機能を備える。

ブラシレス DC モータは、ロボットの駆動力を発生される装置であり、CVT への軸入力を与える。ホールセンサやエンコーダを活用した位置制御・トルク制御が可能となる。

CVT は減速機であり、モータ出力トルクを、ロボットリンクを駆動可能な大きさに変換する。一般の減速機と異なり、本研究で用いるロボットに搭載される CP-CVT (Continuously Power CVT) は、駆動負荷に応じて減速比を変化させるという特徴を備える。燃料デブリへのアクセスにおいて、障害物などとの意図しない接触・衝撃に対してなじむ挙動を示すことで、モータ軸への負荷伝達や減速機本体の破損を防ぐことが可能となると考えられる。実際には、CVT 単体でロボットリンク駆動のためのトルクを確保することは困難であることから、CVT 出力段に遊星歯車減速機などを搭載することで、十分なトルクを出力させる。

イーサネットカメラは、グリッパー部に装着され、エンドエフェクタ周囲の視界を操作者に提供する。実機カメラ映像を用いたデブリや障害物認識により、把持対象物へのアクセスが可能となる。制御用計算機との通信は、イーサネットハブを介して成される。

電源装置は、計算機や制御系統への供給用の低電力のモデルおよびモータ駆動系への給電のための大電力モデルの 2 系統による給電を予定している。

現状では、要求出力値の検討段階であるため、一般電源としての 100 V 交流から給電できる電源系統案を考慮している。また、モータドライバやブラシレスモータに関しては、等身大ヒューマノイド等用途における実績のある小型・大出力モデルを中心に選定を開始している。アプリケーション特性上、体積・質量当たりの出力に優れ、設計ベースラインとして適切と考えられる。

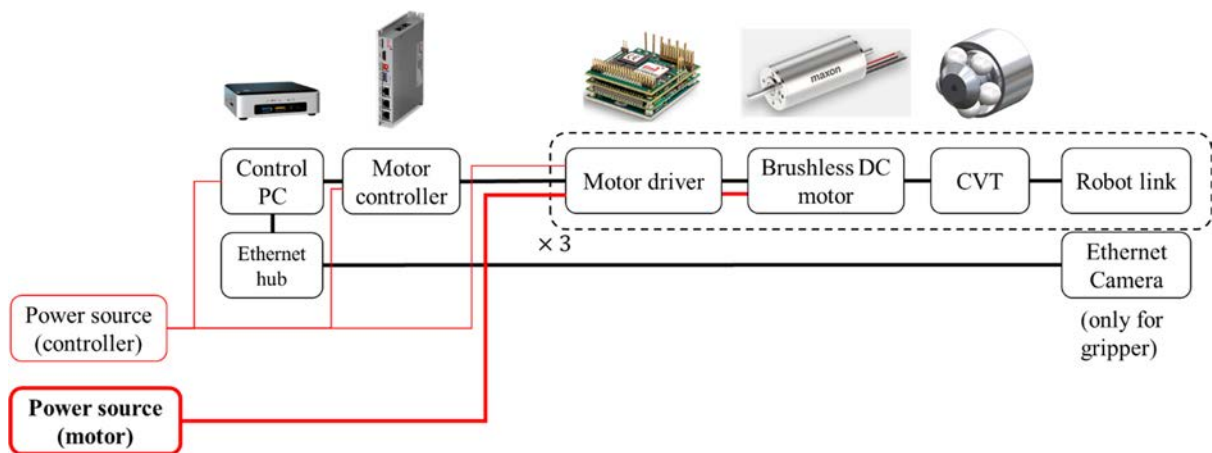


図 3.2.2-1 電装系システム構成図

(ロボット関節駆動系システム構成)

図 3.2.2-2 に市販 CVT をベースとしたアクチュエータ構成の例を示す。以下のコンポーネントから構成される。

- モータ駆動回路
- モータ
- ロータリエンコーダ
- ポテンシオメータ
- IMU センサ
- 温度センサ
- 電流センサ

ロータリエンコーダやポテンシオメータ、若しくは IMU センサを、関節角度計測用に搭載する。放射線に対する耐性評価は今後の課題である。

関節軸駆動に関して、センサによって取得される諸パラメータの関係は以下の式(14)～(17)の通りである。

$$\omega_M = K_V e \quad (14)$$

$$\tau_M = K_\tau i \quad (15)$$

$$\omega_i = r_p \omega_M \quad (16)$$

$$\omega_o = r_{CVT} \omega_i \quad (17)$$

ここで、 ω_M はモータ回転数、 ω_i は CVT 入力軸回転数、 ω_o は CVT 出力軸回転数である。 K_V は電圧一回転数係数、 K_τ は電流一トルク係数である。 r_p はプーリによる減速比（一定）、 r_{CVT} は CVT による減速比（可変）である。

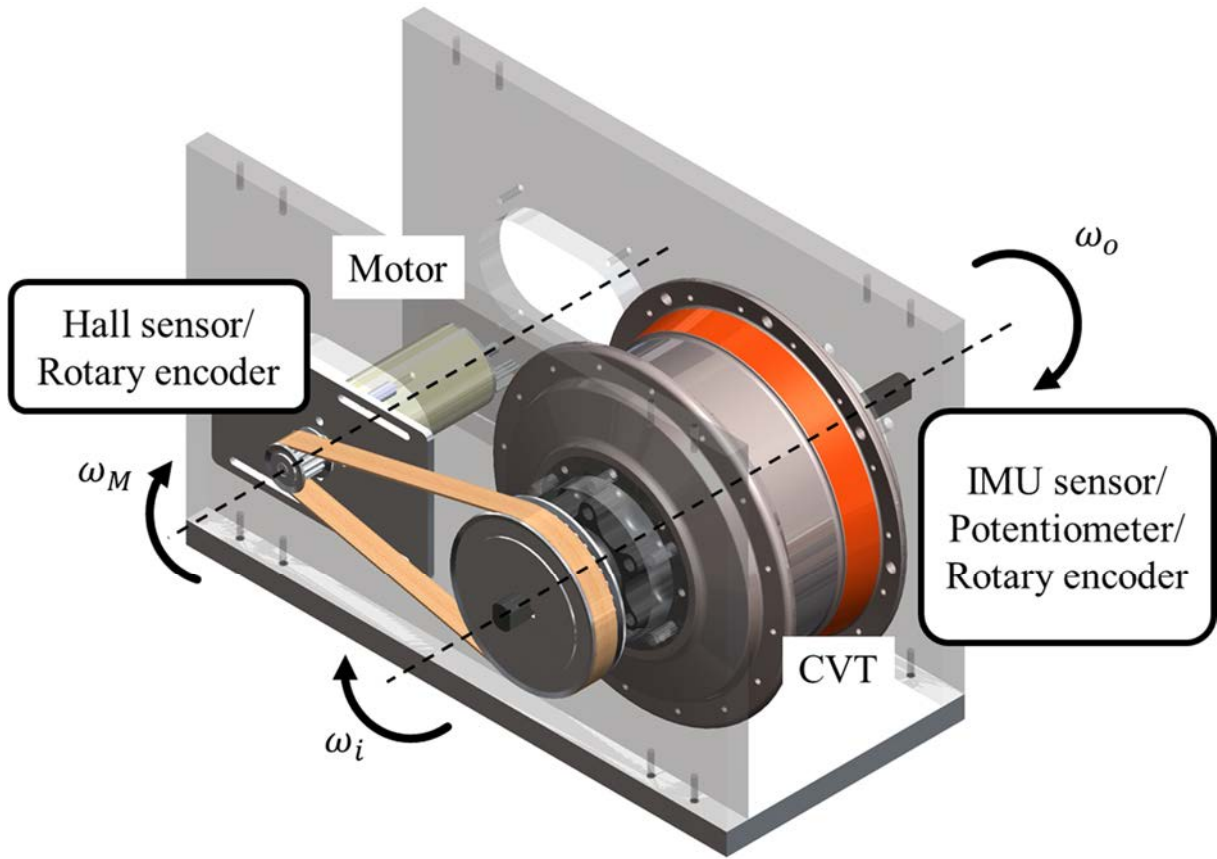


図 3. 2. 2-2 CVT と電気モータを用いた単軸駆動試験機の CAD モデル

ソフトウェアシステム構成

ソフトウェアシステムの構成に関して検討を行った。遠隔操作インターフェースの検討のため、ROS の接続を確認した。

ロボットシステムの構築にあたっては、既に動作が確認できているハードウェア・ソフトウェア構成から、差分を明確にしつつ実装を進めていくことが肝要となる。そこで、要求されるステップとして、以下を実施した。使用したロボットを図 3.2.2-3 に示す。

- ・多自由度卓上ロボット Braccio におけるシステム検証
- ・多自由度協働ロボット myCobot におけるシステム検証

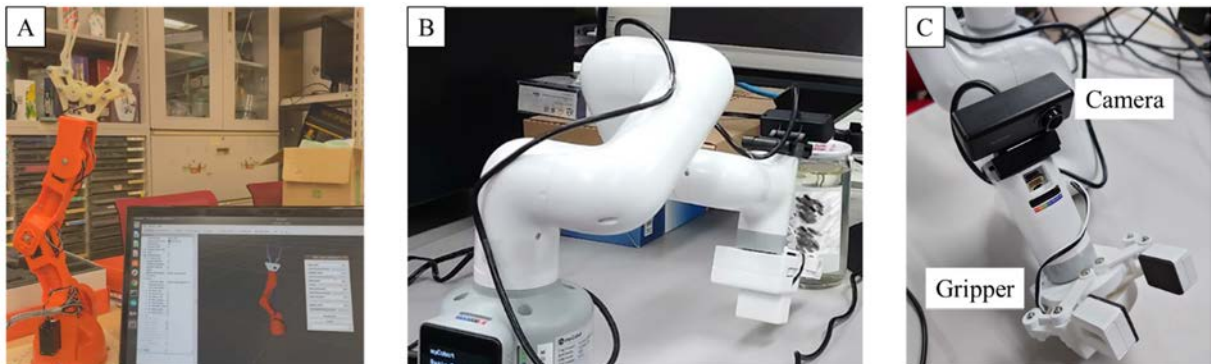


図 3.2.2-3 ロボットアーム

A) Braccio B) myCobot C) myCobot 手先に搭載したカメラ

Braccio ロボットアームにおいて、既存フレームワークを活用した手動操作の実験を行った。そして、myCobot ロボットアームでは、USB カメラを搭載させ、手先付近のカメラ画像を基にしたグリッパー部の手動操作による物体把持タスクの実験を行った。

Braccio ロボットアームにおける手動操作実験の結果を図 3.2.2-4 に示す。ロボットの各関節角度を GUI のスライダアプリケーションで操作した。可視化ソフトウェアの表示するロボットモデルの姿勢と実ロボット姿勢が一致していることが分かる。

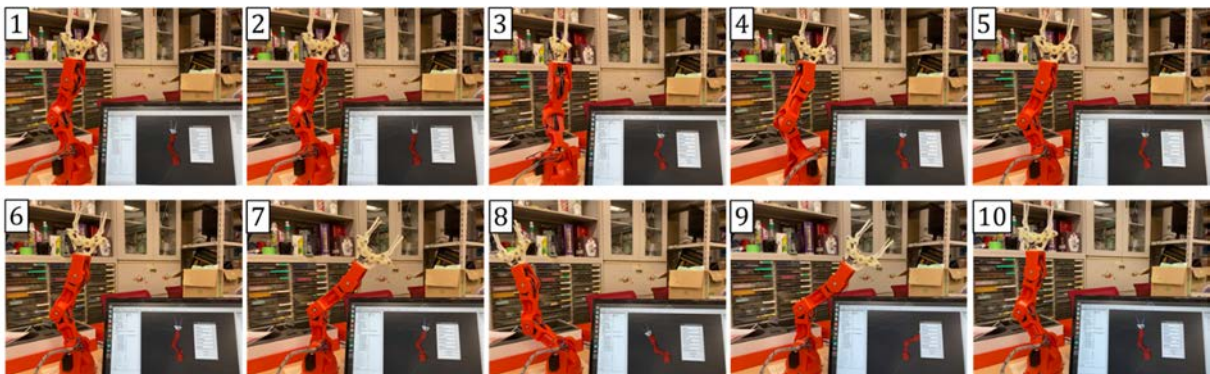


図 3.2.2-4 Braccio ロボットアームの手動操作

myCobot ロボットアームにおける手動操作実験の結果を図 3.2.2-5 に示す。ロボット手先に搭載したカメラ画像をオペレータが観察し、ロボット関節角度を、スライダアプリケーションを活用して操作した。1~2 min 程度の試行錯誤の後、ロボットアームは把持対象物体の把持と挙上を実現した。

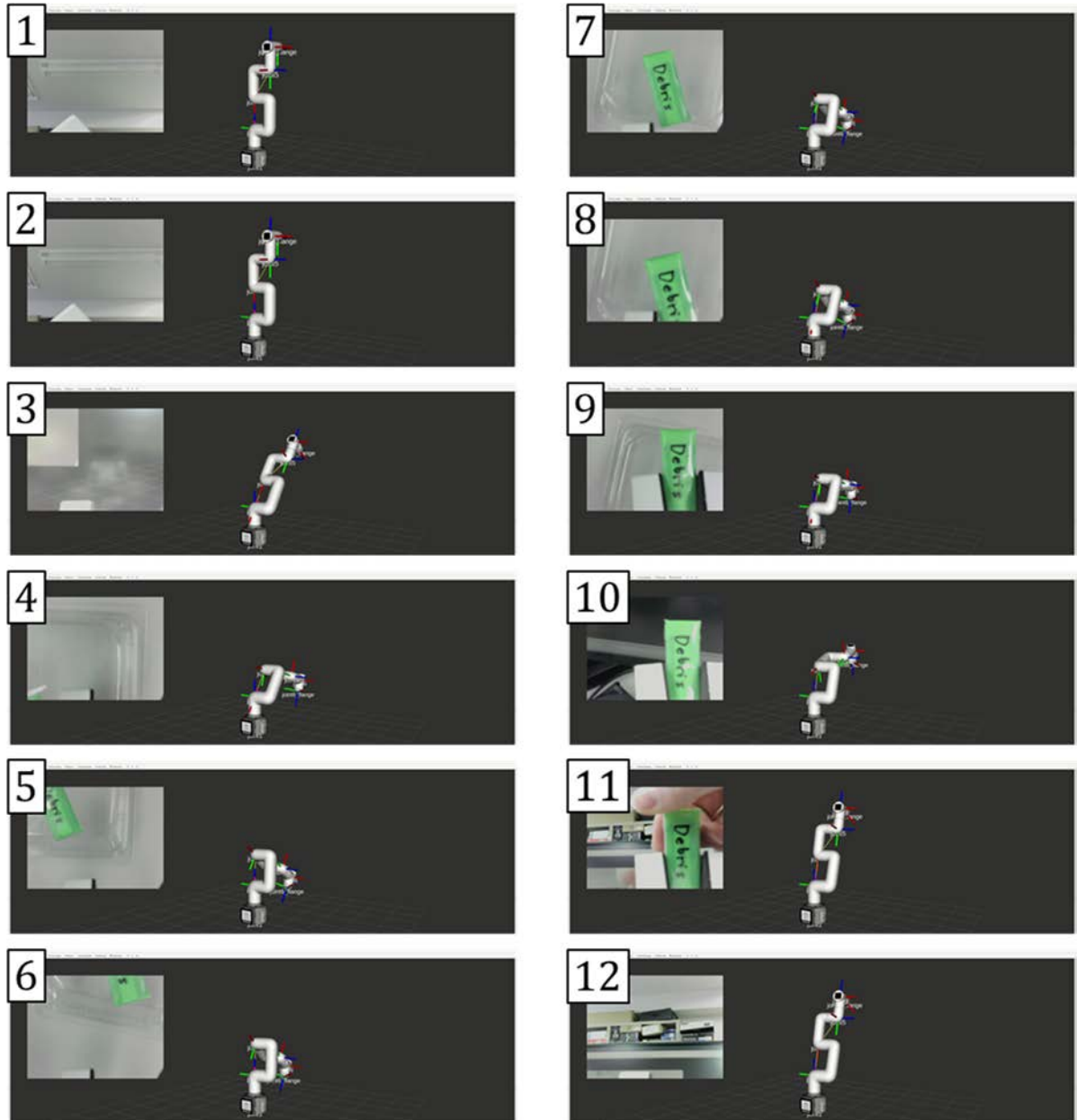


図 3.2.2-5 myCobot ロボットアームの手動操作
オペレータはカメラ画像を基にロボット関節角度とグリッパーを手動操作する。

卓上協働ロボットからの発展の展望は以下の通りである。

- ・異なる寸法・質量コンフィギュレーション
- ・CVT-VIA を用いた可変インピーダンス駆動系とその制御
- ・放射線影響評価を備えるシステム構成

また、今後の課題として、機械学習を実行するシミュレーション環境とロボット実機を透過的に扱うことの可能なロボットプログラミング環境の構築等が肝要となると考えられる。

3.3 CP-CVTに基づくCVT-VIA構築（英国チーム成果）

3.3.1 背景

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[3.3-1]。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、様々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、そして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[3.3-2]。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[3.3-3]。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[3.3-4]。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[3.3-5]。

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[3.3-6]。電気機械式、油圧式、空気圧式などの様々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 et al. [3.3-7]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。Takaki・Omata[3.3-8]とMatsushita et al. [3.3-9]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。Kembraum et al. [3.3-10]は、変速比無限大変速機（以下、「IVT」と略す。）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 et al. [3.3-11]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。

3.3.2 CP-CVT（定出力無段階変速機）

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[3.3-12][3.3-13]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する。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。概略図を図3.3.1-1に示す。

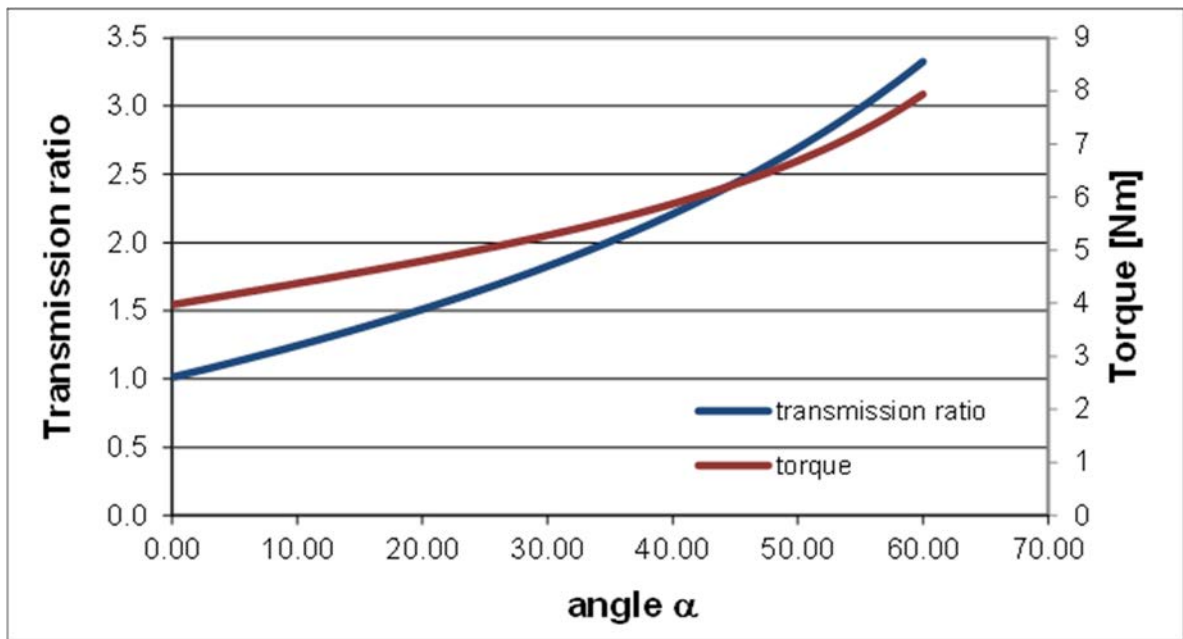


図 3.3.1-1 動力伝達比と出力トルクの角度依存性

3.3.2.1 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、そして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3.3.2-1A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3.3.2-1B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。

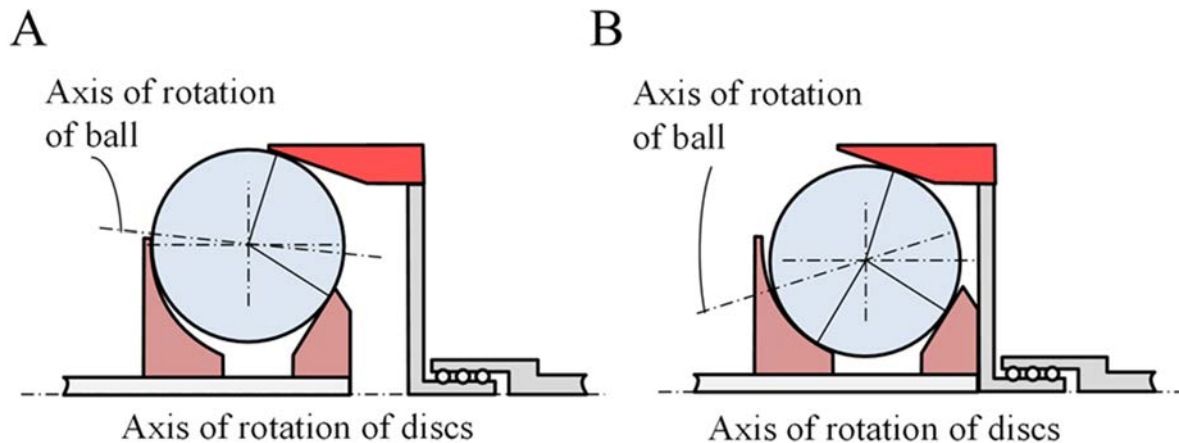


図 3.3.2-1 CVT の動作様式
A) 低トルク B) 高トルク

3.3.2.2 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触点・半径が水平線と成す角度
- β – 入力ディスクの接触点・半径が水平線と成す角度
- γ – 出力ディスクの接触点・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触点と回転軸間の距離
- R_B – 入力円錐ディスクの接触点と回転軸間の距離
- R_C – 出力ディスクの接触点と回転軸間の距離
- r_A – トロイダルディスクの接触点とボール回転軸間の距離
- r_B – 入力円錐ディスクの接触点とボール回転軸間の距離
- r_C – 出力ディスクの接触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 – ボール半径
- r_0 – トーラス長径
- R_1 – トーラス短径

図 3.3.2-2 に示すように、入力ディスクの角速度が正となるように、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。

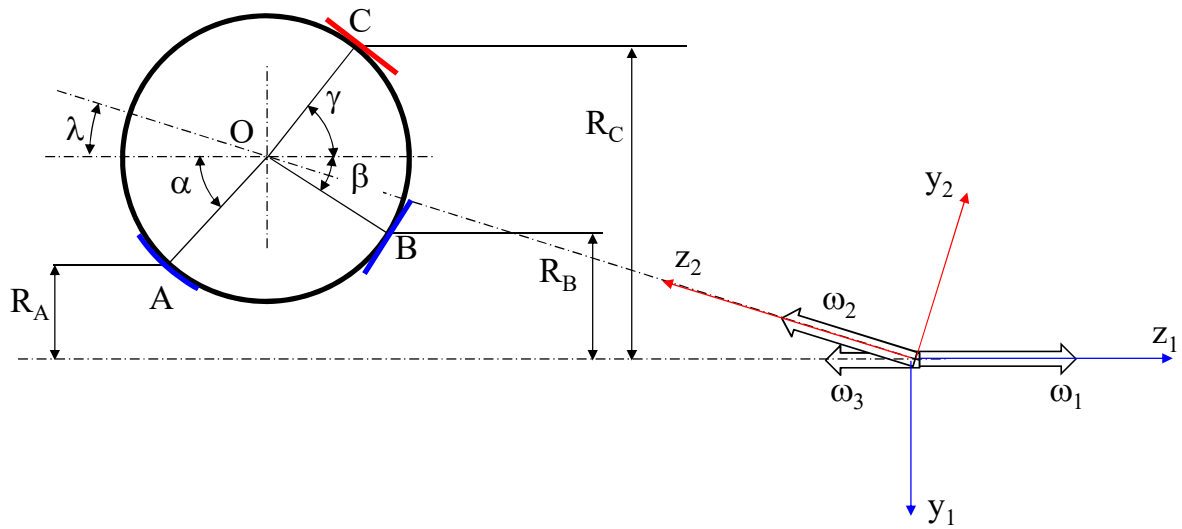


図 3. 3. 2-2 運動学解析のための基準座標系

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触点の速度が等しいことから、ボールの回転軸の傾き m と伝達比が求められる (式(18) (19))。

$$m = \tan \lambda = \frac{r(\sin \alpha - \sin \beta)}{R \sin(\alpha + \beta) - r(\cos \beta + \cos \alpha)} \quad (18)$$

$$i_{CVT} = \frac{\omega_1}{\omega_3} = \frac{\sin(\alpha + \lambda)(r + R \sin \gamma)}{\sin(\gamma + \lambda)(r - R \sin \alpha)} \quad (19)$$

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。

3.3.3 IVT の運動学

CVT によって出力速度が零になりうる時、自動車のトランスミッションになぞらえて IVT 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 3.3.2-3 の通りである。

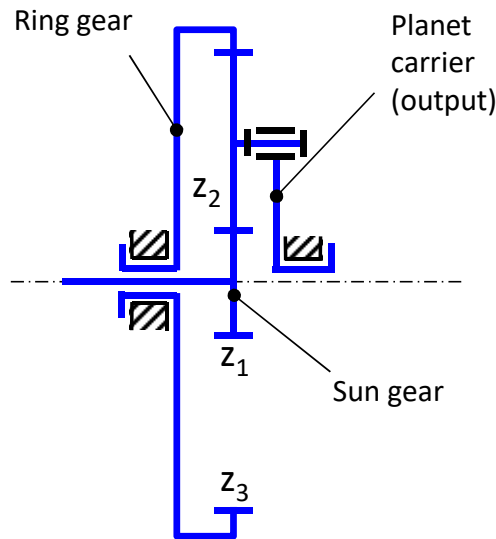


図 3.3.2-3 遊星歯車減速機の模式図

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(20)で与えられる。

$$\omega_p = \frac{\omega_s z_1 - \omega_r z_3}{z_1 + z_3} \quad (20)$$

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 0 になることがわかる。

3.3.4 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式(21)の通りである。

$$F_{tc} = \frac{T_3}{nR_C} \quad (21)$$

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 (式(22))。

$$T_3 = \mu R_C F_A \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\cos \alpha \sin(\gamma + \beta)} = \mu F_A \frac{\sin(\alpha + \beta) (r_0 - \Delta R \sin \alpha + R \sin \gamma)}{\cos \alpha \sin(\gamma + \beta)} \quad (22)$$

力 F_A を外部から制御することで、CVT の出力トルク、そして 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 3.3.2-3 を基にしたトルク解析から、以下の式(23)が成立する。

$$M_p = M_r \frac{\omega_s + \omega_r}{\omega_s - \omega_p} \quad (23)$$

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 (式(24))。

$$M_p = M_r \frac{z_1 + z_3}{z_3} \quad (24)$$

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の取る値の範囲は図 3.3.2-4 のようになる。

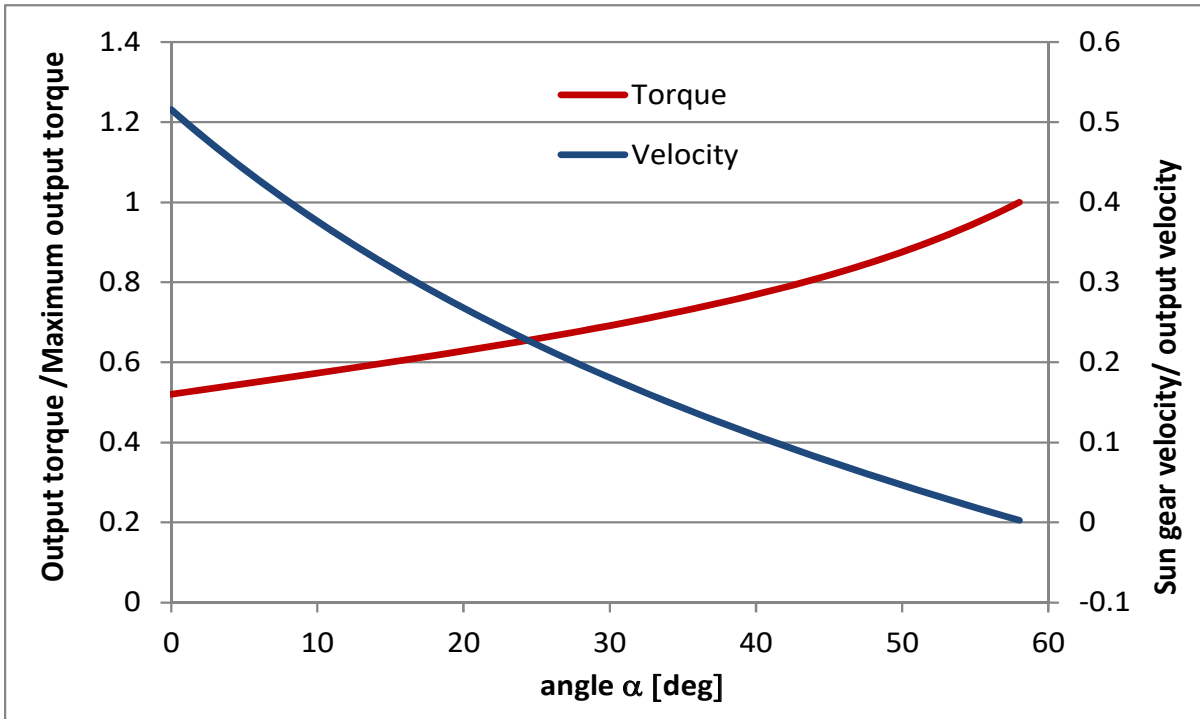


図 3.3.2-4 2 段階減速の CVT-VIA におけるトルクと角速度出力

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。

参考文献

- [3.3-1] Nof, S. Y., Handbook of Industrial Robotics, John Wiley & Sons Inc., USA., 1985, 1358p.
- [3.3-2] Colgate, J. E., Wannasuphprasit, W., and Peshkin, M. A., Cobots: Robots for Collaboration with Human Operators, Proceedings of the ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Atlanta, GA, USA, Dsc-vol. 58, 1996, pp.433-439.
- [3.3-3] K. Gerencher, Robots as Surgical Enablers, MarketWatch, <https://www.marketwatch.com/story/a-fascinating-visit-to-a-high-tech-operating-room> (参照: 2022/04/03) .
- [3.3-4] Li, Y., et al., Differential Game Theory for Versatile Physical Human-robot Interaction, Nature Machine Intelligence, vol.1, no.1, 2019, pp.36-43.
- [3.3-5] Vanderborght, B., et al., Variable Impedance Actuators: A Review, Robotics and Autonomous Systems, vol.61, no.12, 2013, pp.1601-1614.
- [3.3-6] Braun, D. J., et al., Variable Stiffness Spring Actuators for Low-Energy-Cost Human Augmentation, IEEE Transactions on Robotics, vol.35, no.6, 2019, pp.1435-1449.
- [3.3-7] Hirose, S., Tibbetts, C., and Hagiwara, T., Development of X-screw: A Load-Sensitive Actuator Incorporating a Variable Transmission, Proceedings 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Detroit, MI, USA, 1999, vol.1, pp.193-199.
- [3.3-8] Takaki, K., and Omata, T., Load-sensitive Continuously Variable Transmission for Powerful and Inexpensive Robot Hands, Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Tokyo, Japan, 2004, pp.3391-3396.
- [3.3-9] Matsushita, K., Shikanai, S., and Yokoi, H., 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.
- [3.3-10] Kembraum, A. S., Kitchell, M., and Crittenden, M., An Ultra-compact Infinitely Variable Transmission for Robotics, Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Singapore, 2017, pp.1800-1807.
- [3.3-11] Moore, C. A., Peshkin, M. A., and Colgate, J. E., Design of a 3R Cobot Using Continuously Variable Transmissions, Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation, Detroit MI, USA, 1999, vol.4, pp.3249-3254.
- [3.3-12] Yamamoto, T., Matsuda, K., and Hibi, T., Analysis of the Efficiency of a Half-toroidal CVT, JSAE Review, vol.22, no.4, 2001, pp.565-570.
- [3.3-13] Newall, J., and Lee, A., Measurement and Prediction of Spin Losses in the EHL Point Contacts of the Full Toroidal Variator, Tribology and Interface Engineering Series, vol.43, 2003, pp.769-779.
- [3.3-14] Cretu, O. S., and Glovnea, R. P., Constant Power Continuously Variable Transmission (CP-CVT): Operating Principle and Analysis, ASME Transaction, Journal of Mechanical Design, vol.127, no.1, 2005, pp.114-119.

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1回日英プロジェクト会議
開催日：令和3年11月11日
場所：オンライン（Zoom）
出席者：東京大学4名、サセックス大学（University of Sussex、以下、「Sussex 大学」と略す。）4名、ライテックス1名
主な議題：
 - ◇ メンバー挨拶
 - ◇ プロジェクトの進め方について

- 第2回日英プロジェクト会議
開催日：令和3年11月25日
場所：オンライン（Zoom）
出席者：東京大学4名、Sussex 大学4名、ライテックス1名
主な議題：
 - ◇ シミュレーション環境構築の進捗について
 - ◇ CVT-VIA のコンセプトについて

- 第3回日英プロジェクト会議
開催日：令和3年12月9日
場所：オンライン（Zoom）
出席者：東京大学3名、Sussex 大学4名、ライテックス1名
主な議題：
 - ◇ シミュレーション環境構築の進捗について
 - ◇ 深層強化学習を用いたアプローチについて

- 第4回日英プロジェクト会議
開催日：令和4年1月6日
場所：オンライン（Zoom）
出席者：東京大学5名、Sussex 大学4名、ライテックス1名
主な議題：
 - ◇ 新メンバーの紹介
 - ◇ 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5回日英プロジェクト会議
開催日：令和4年1月20日
場所：オンライン（Zoom）

出席者：東京大学 5 名、Sussex 大学 4 名、ライテックス 1 名

主な議題：

- ◇ 研究進捗の共有
- ◇ 令和 4 年度積算について

● 第 6 回日英プロジェクト会議

開催日：令和 4 年 2 月 3 日

場所：オンライン (Zoom)

出席者：東京大学 5 名、Sussex 大学 4 名、ライテックス 1 名

主な議題：

- ◇ 中間フォロー発表について
- ◇ ロボットアームの設計パラメータの検討

● 第 7 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 2 月 17 日

場所：オンライン (Zoom)

出席者：東京大学 6 名、Sussex 大学 4 名、ライテックス 1 名、東京電力 1 名

主な議題：

- ◇ 鈴木先生、竹中様からのコメントを聴取
- ◇ 現場のニーズについて
- ◇ 研究進捗の共有

● 第 8 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 3 月 3 日

場所：オンライン (Zoom)

出席者：東京大学 5 名、Sussex 大学 4 名、ライテックス 1 名、東京電力 1 名

主な議題：

- ◇ 令和 3 年度成果報告書の作成について
- ◇ 1F の 1~3 号機の構造について
- ◇ 研究進捗の共有

● 第 9 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 3 月 17 日

場所：オンライン (Zoom)

出席者：東京大学 5 名、Sussex 大学 4 名、ライテックス 1 名、東京電力 1 名

主な議題：

- ◇ 3 号機のペDESTAL内部のスキャンデータについて
- ◇ 研究進捗の共有

TUM-UTokyo Excellence, Diversity, and Mobility Workshop 2022 Program

13:00 - 13:05 Germany (20:00 - 20:05 JST)

Opening by Prof. Asama and Prof. Lüth

13:05 - 13:20 Germany (20:05 - 20:20 JST)

“Novel Mechanical Manipulator for Efficient Fuel Debris Retrieval”

Angela Faragasso (Prof. Asama laboratory)

13:20 - 13:35 Germany (20:20 - 20:35 JST)

“Collision Avoidance in the Workspace of Robots with Individual Arm Structures”

Christoph Rehekampff (Prof. Lüth laboratory)

13:35 - 13:50 Germany (20:35 - 20:50 JST)

“Humanoid Motion Control based on Centroidal Viscoelasticity”

Zewen He (Prof. Yamamoto laboratory)

13:50 - 14:05 Germany (20:50 - 21:05 JST)

“Nonlinear Normal Modes of Multi-Body Systems: Highly Efficient Periodic Tasks in Robots”

Arne Sachtler (Prof. Albu-Schäffer laboratory)

14:05 - 14:20 Germany (21:05 - 21:20 JST)

“Optimal Order Pick-and-Place of Objects in Cluttered Scene by a Mobile Manipulator”

Fengyi Wang (Prof. Gordon Cheng laboratory)

14:20 - 14:35 Germany (21:20 - 21:35 JST)

“Potential for AI in real-time analysis of internal combustion engines”

Dominik Waligorski (Prof. Jaensch laboratory)

14:35 - 14:50 Germany (21:35 - 21:50 JST)

“Study on Engine Cyclic Variation Mechanism Using Machine Learning”

Charite Sendanyoye (Prof. Yamasaki laboratory)

14:50 - 15:05 Germany (21:50 - 22:05 JST)

“Optimization of catheter ablation strategy by in silico learning for radical treatment of tachyarrhythmia”

Hiroshi Seno (Prof. Sakuma laboratory)

15:05 - Germany (22:05 - JST)

Closing (Photo) by Prof. Sakuma

4. 結言

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。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ーを取り付け、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 カ年計画の 1 年目である令和 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ー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。グリッパー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、グリッパー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）

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、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合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。

以上、3 年計画の 1 年目である令和 3 年度の業務項目を実施し、所期の目標を達成した。今後の課題としては、以下の研究の実施を目標とする。

まず、最適なマニピュレータのパラメータ設計に取り組む。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、東京大学とライテックスとで共同で行う。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。

続いて、マニピュレータのナビゲーションアルゴリズムの開発を実施する。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として、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、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す。

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合せや会議等を開催する。

