



JAEA-Review

2022-029

DOI:10.11484/jaea-review-2022-029

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
(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—

Semi-autonomous Remote-control Technology of an Articulated Mobile Robot
to Recover from Stuck States
(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
電気通信大学

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

November 2022

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

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
(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

電気通信大学

(2022年8月31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、令和元年度に採択された「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」の令和元年度から令和3年度の研究成果について取りまとめたものである。本課題は令和3年度が最終年度となるため3年度分の成果を取りまとめた。

本研究の大目的は、多連結移動ロボット共通の課題である関節部のスタック状態からの復帰方法の確立である。この大目的に対し、本研究ではシステムの冗長性を巧みに利用することにより、多連結移動ロボットがスタック状態から復帰するための制御方法の提案を行う。さらに、提案制御則を利用するためのインタフェースとして、スタック状態を認識できるような描画インタフェース、提案制御の目標指示を行うための操作インタフェースの開発を行い、検証用実機を用いてその有効性を検証する。

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、電気通信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

Semi-autonomous Remote-control Technology of an Articulated Mobile Robot
to Recover from Stuck States
(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 Electro-Communications

(Received August 31, 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 FY2019, this report summarizes the research results of the “Semi-autonomous remote-control technology of an articulated mobile robot to recover from stuck states” conducted from FY2019 to FY2021. Since the final year of this proposal was FY2021, the results for three fiscal years were summarized.

The purpose of this work is to establish a recovery method of an articulated mobile robot from stuck states. In this work, a control method of the robot to recover from stuck states by using redundancy of the system is proposed. In addition, we develop two interfaces. One is a display interface as an operator can understand the situation of the robot and surrounding terrain, and the other is a control interface to provide a target motion using the proposed control method. Finally, the effectiveness of them is demonstrated by experiments using an actual robot.

Keywords: Articulate Mobile Robot, Redundancy, Stuck, Recovery, Interface

This work was performed by the University of Electro-Communications 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
$\alpha / \beta / \gamma$ 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
マイクロ波重量 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
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

課題名	研究代表者	所属機関
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、以下の課題の令和元年度から令和 3 年度の研究成果について取りまとめたものである。本課題は令和 3 年度が最終年度となるため 3 年度分の成果を取りまとめた。

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
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

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

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

(契約番号 R03I019)

成果報告書

令和4年3月

国立大学法人電気通信大学

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、国立大学法人電気通信大学が実施した「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」の令和元年度から令和3年度の研究成果を取りまとめたものです。

目次

概略	v
1. はじめに	1
2. 業務計画	2
2.1 全体計画	2
2.2 実施体制	3
2.3 令和3年度の成果の目標及び業務の実施方法	4
3. 実施内容及び成果	5
3.1 描画インタフェースの開発	5
3.1.1 令和2年度までの実施内容及び成果（概要）	5
3.1.2 令和3年度実施内容及び成果	6
3.1.3 まとめ	7
3.2 動作不能からの復帰を可能とする制御	8
3.2.1 令和2年度までの実施内容及び成果（概要）	8
3.2.2 令和3年度実施内容及び成果	9
3.2.3 まとめ	9
3.3 操作インタフェースの開発	10
3.3.1 令和2年度までの実施内容及び成果（概要）	10
3.3.2 令和3年度実施内容及び成果	11
3.3.3 まとめ	11
3.4 実機検証	12
3.4.1 令和2年度までの実施内容及び成果（概要）	12
3.4.2 令和3年度実施内容及び成果	12
3.4.3 まとめ	13
3.5 研究推進	14
3.5.1 令和2年度までの実施内容及び成果（概要）	14
3.5.2 令和3年度実施内容及び成果	14
3.5.3 まとめ	14
4. 結言	15
参考文献	16

執筆者リスト

事業代表者

国立大学法人電気通信大学

教授

田中 基康

図一覧

図 2.1-1	全体計画図.....	2
図 2.2-1	実施体制図.....	3
図 3.1-1	描画インタフェース 1	5
図 3.1-2	描画インタフェース 2	6
図 3.2-1	T2 Snake-3 によるスタック回避実験の結果	8
図 3.2-2	新しいロボット形状とスタックの分類.....	9
図 3.3-1	改良した手動操作用インタフェース.....	10
図 3.4-1	センサを搭載した多連結移動ロボット.....	12
図 3.4-2	カメラと IMU の搭載.....	13

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
ROS	: Robot Operating System
IMU	: Inertial Measurement Unit (慣性計測装置)

概略

多連結移動ロボットは、推進力を生じる機構（駆動輪やクローラなど）をもつリンクを関節で直列に連結した構造のロボットである。細長い胴体を活かして狭所進入が可能であるほか、豊富な関節自由度を活かして様々な姿勢を取り、複雑環境に適応した動作を行うことができる。このような特徴から、災害対応や狭所点検を目的として世界中で様々な多連結移動ロボットが研究開発されている。多連結移動ロボットはその性能を十分に発揮することができれば過酷な廃炉工程であっても活躍が期待できるが、非常に多くの自由度（関節や車輪）をもつために操縦が難しい。廃炉をはじめとした狭所や災害対応では、多連結移動ロボットは操縦者が目視でロボットと周囲環境を認識できる状況は稀であり、基本的には車載カメラ映像を見ながら遠隔地から操縦することになる。この際、最も問題になるのが、障害物への引っかかり、である。多連結移動ロボットはリンクを連結している関節部分に障害物が引っかかると動作が継続できなくなってしまう。このような状態を「スタック状態」と呼ぶ。スタック状態を100%避けることは非現実的であるため、多連結移動ロボットを実用化の上ではスタック状態からの復帰を行う機能が必要不可欠である。

本研究の大目的は、多連結移動ロボット共通の課題である「関節部のスタック状態」からの復帰方法の確立である。この大目的に対し、本研究では制御方法だけでなくインタフェースに着目する。具体的には、(1)スタック状態を認識できるような描画インタフェースの開発、(2)スタック状態から復帰する制御方法の提案、(3)提案制御を実施するための操作インタフェースの開発、(4)検証用実機の開発と実験、を行った。(1)は「スタック状態からの復帰」に必要な情報の描画を行うインタフェースであり、操縦者がロボットと周囲状況を把握すること、そしてスタック状態とその原因部位を認識可能であるインタフェースを開発した。(2)はスタック原因部分と障害物との接触を解消するような制御方法の提案であり、復帰動作中に体のねじれや転倒、新たなスタックが生じないような動作を操縦者の指示を用いて行う手動制御手法と、半自律的に行う手法を提案した。(3)は、(2)の制御手法を実施する際に必要になる操作が可能なインタフェースであり、最終的には(1)と統合したインタフェースを開発した。(4)ではセンサ類と制御アルゴリズムを実装した多連結移動ロボットの試作機を開発し、各実施項目の進捗に応じて改良を加えた。そして(1)～(3)のインタフェースや制御手法の検証実験を行うことにより、それらの有効性や課題がわかった。

前年度までの成果報告書：

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

（委託研究）；令和2年度英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業

JAEA-Review 2021-025

<https://doi.org/10.11484/jaea-review-2021-025>

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

（委託研究）；令和元年度英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業

JAEA-Review 2020-025

<https://doi.org/10.11484/jaea-review-2020-025>

1. はじめに

多連結移動ロボットは、推進力を生じる機構（駆動輪やクローラなど）をもつリンクを関節で直列に連結した構造のロボットである。このロボットは細長い胴体を活かして狭所進入が可能であるほか、豊富な関節自由度を活かして様々な姿勢をとり、複雑環境に適応した動作を行うことができる。このような特徴から、人間が入れないような狭所の点検、二次災害の危険性のある災害現場での災害対応、といった用途を想定して様々な多連結移動ロボットが研究開発されている[1]。東日本大震災に起因し生じた 1F の事故を受けて廃炉作業が進められているが、放射線量問題で人間が立ち入ることが難しく、多数のロボットが適用されている。中でも、格納容器内に進入するためには狭いパイプ内を通過しなければならず、大型のロボットを用いることができない。これに対し、多連結移動ロボットは細長い胴体で狭いパイプ内を通過し、さらに多数の関節で障害物乗越えをはじめとした多様な動作が可能である。よって、その性能を十分に発揮することができれば過酷な廃炉工程であっても活躍が期待できる。しかしながら、多連結移動ロボットは非常に多くの自由度（関節や車輪）をもつために操縦が難しい。廃炉をはじめとした狭所や災害対応では、多連結移動ロボットは操縦者が目視でロボットと周囲環境を認識できる状況は稀であり、基本的には車載カメラ映像を見ながら遠隔地から操縦することになる。この際、最も問題になるのが、障害物への引っかかり、である。多連結移動ロボットはリンクを連結している関節部分に障害物が引っかかると動作が継続できなくなってしまう。一般的にはロボットの端部に操縦視点用のカメラが搭載されるが、ロボットの胴体中央部付近でこのような引っかかりが生じると、カメラではその状況を確認できないために操縦者は何が起こったのか認識できず、対応することができない。障害物が引っかかり動作が継続できなくなった状態を「スタック状態」と呼ぶ。スタック状態を 100%避けることは非現実的であるため、多連結移動ロボットを実用化する上ではスタック状態からの復帰を行う機能が必要不可欠である。

本研究の大目的は、多連結移動ロボット共通の課題である「関節部のスタック状態」からの復帰方法の確立である。この大目的に対し、本研究では制御方法だけでなくインタフェースに着目する。具体的には、(1)スタック状態を認識できるような描画インタフェースの開発、(2)スタック状態から復帰する制御方法の提案、(3)提案制御を実施するための操作インタフェースの開発、(4)検証用実機の開発と実験、を行う。さらに、研究を円滑に進めるため(5)研究推進、を行う。

2. 業務計画

2.1 全体計画

本業務の全体計画図を図 2.1-1 に示す。

図 2.1-1 に記載されていない項目として、「(5)研究推進」がある。これは廃炉環境国際共同研究センター（CLADS）等との連携を密にして研究を進めることと、研究実施計画を推進するために打ち合わせや会議等を開催する、という内容である。全ての項目について、電気通信大学が担当する。

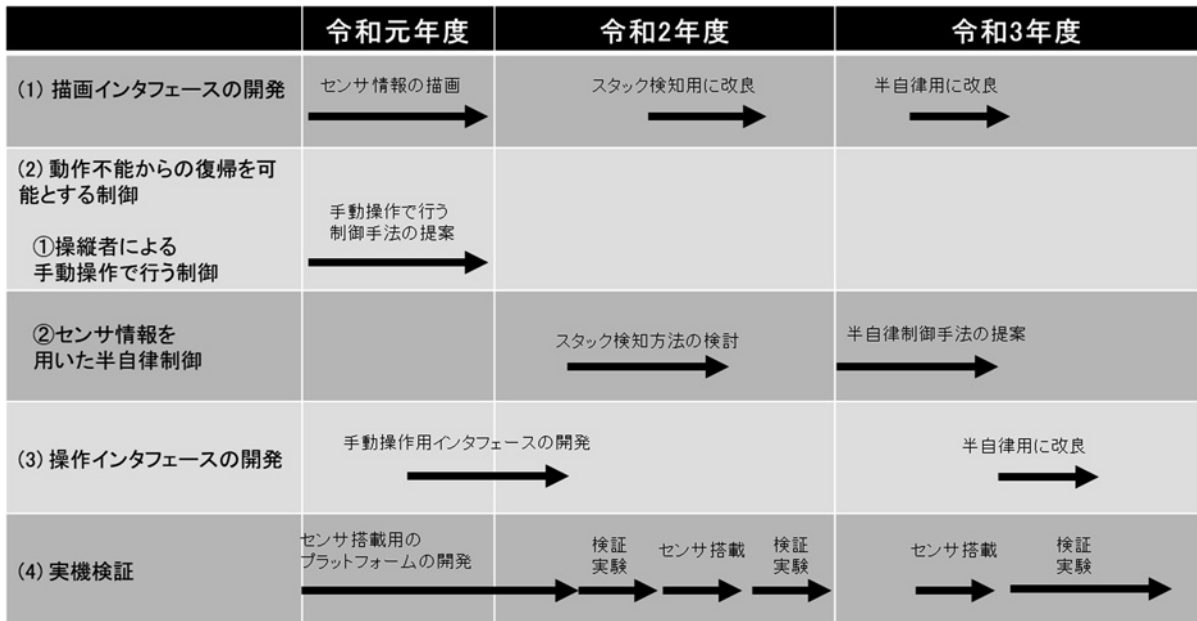


図 2.1-1 全体計画図（[5]より引用）

2.2 実施体制

本業務の実施体制図を図 2.2-1 に示す。

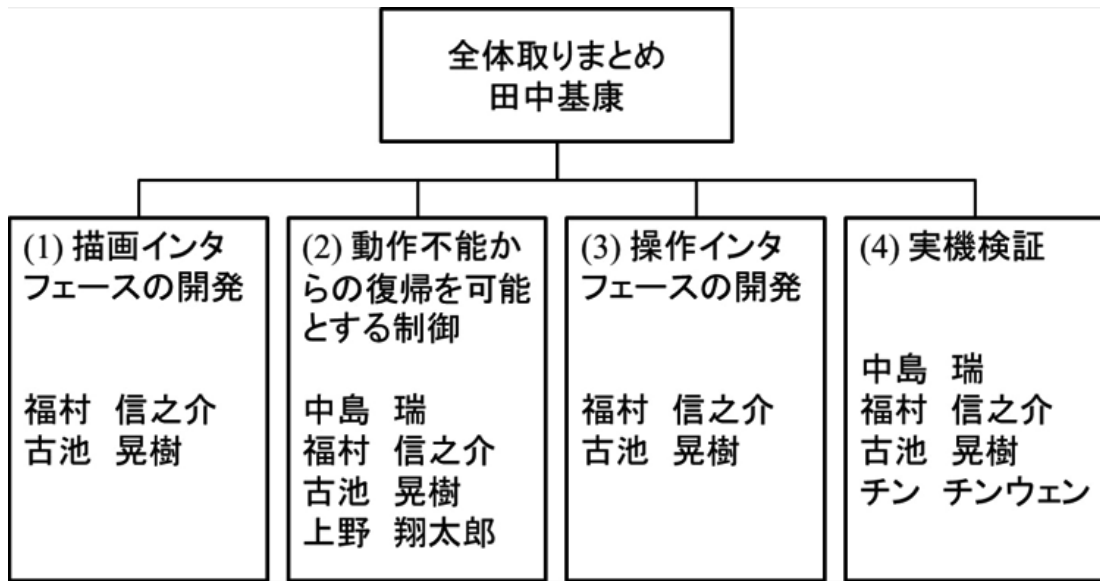


図 2.2-1 実施体制図

2.3 令和3年度の成果の目標及び業務の実施方法

令和3年度は、次の5つの項目を計画した。

- (1) 描画インタフェースの開発
- (2) 動作不能からの復帰を可能とする制御
- (3) 操作インタフェースの開発
- (4) 実機検証
- (5) 研究推進

(1)の項目は、センサ情報の描画に必要なインタフェースの実現を最終目的としている。令和3年度は、令和2年度までに開発した描画インタフェースを対象に、半自律制御を行うための改良を施す。具体的には、後述(2)の制御手法に合わせて、半自律制御手法の実施に必要な情報を表示できるような描画インタフェースに改良する。インタフェースはROS上で開発を行う。

(2)の項目は、センサ情報を用いてロボットが半自律的に復帰動作を行うための制御手法を提案することを目標とした。

(3)の項目は、令和2年度まで開発していた操作インタフェースを対象に、半自律制御手法を実行できるように改良を施すことを目標とした。インタフェースはROS上で開発を行うこととした。

(4)の項目は、上記(1)～(3)の有効性を検証するための実機を開発し、実機検証を行うことを最終目的としている。令和3年度は、令和2年度まで開発していたセンサ等を搭載したプラットフォームロボットを対象に、必要に応じて半自律制御用のセンサの追加実装や改良を行うことを目標とした。そして(2)および(3)に関する検証実験と、檜葉遠隔技術開発センター等での実証実験を行うこととした。

(5)の項目は、研究実施計画を推進することを目的としている。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に打合せや会議等を開催する。

3. 実施内容及び成果

3.1 描画インターフェースの開発

3.1.1 令和2年度までの実施内容及び成果（概要）

センサ情報の描画に必要なインターフェースを実現するため、操縦者が多連結移動ロボットを遠隔操縦する際に状況を把握する情報を整理し、関節角情報を用いて得られるロボットの姿勢、慣性計測装置（IMU）から得られる絶対姿勢、距離センサから得られる周囲環境との相対位置、を描画するインターフェース（図 3.1-1）を開発した。

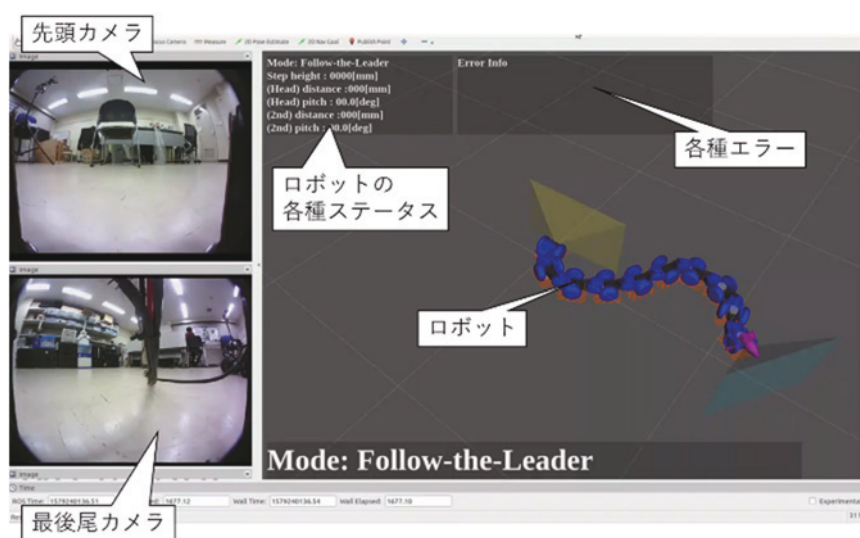


図 3.1-1 描画インターフェース 1
（[6] より引用）

さらに、インターフェースにスタック検知を行うための改良を施した。具体的には、後述 3.2 節の制御手法に合わせて、スタック状態の原因となっている部位を認識できるような描画インターフェース（図 3.1-2）に改良した。インターフェースは ROS 上で開発を行い、制御プログラムとの通信は MATLAB® ROS Toolbox を用いて行った。

開発したインターフェースに対しては既存ロボットを用いて検証を行い、ロボットのカメラ映像、絶対姿勢を考慮したロボット姿勢、距離センサ情報、が描画されていることを確認した。さらに、3.2 節で提案したスタック危険性に基づき描画色を変更することでスタック箇所が認識できるようにした。

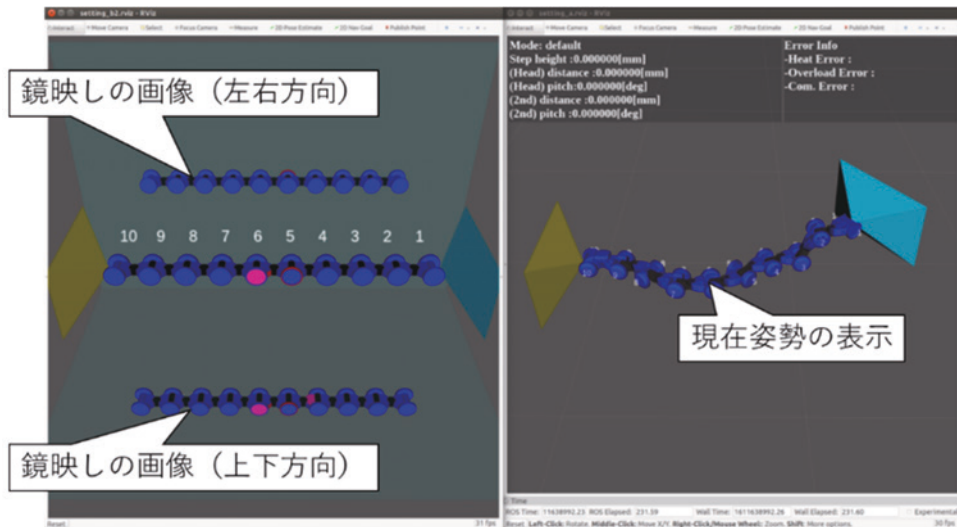


図 3.1-2 描画インターフェース 2
([5] より引用)

3.1.2 令和3年度実施内容及び成果

前述の開発したインターフェースは、手動制御を想定したものであった。そこで、開発した描画インターフェースを対象に、半自律制御を行うための改良を施した。具体的には、3.2 節の制御手法に合わせて、半自律制御手法の実施に必要な情報を表示できるような描画インターフェースに改良した。インターフェースは ROS 上で開発を行った。

操縦者への提示情報の一元化のため、描画・操作インターフェースを統合した。統合された描画インターフェースでは、左側の領域は図 3.1-2 の左側の領域と同様にスタック危険性に基づき色が変わる。色が青ければスタック危険性が低く、赤ければスタック危険性が高い。右側の領域はロボットの現在の体形が描画され、スタックからの復帰制御の際に用いるボタンが表示されている。ロボットの体形を描画するモデルについては、令和2年度までは仮のモデルを用いていたが、3.4 節で開発したロボットを表す正確な外形のモデルに置き換えを行った。

さらに、ロボットの現在姿勢を表すモデルの描画の基準点の切り替えを行った。通常時は最後尾を基準として描画しており、最後尾に取り付けた IMU の情報を反映することで正しい絶対姿勢でのロボットの様子を描画している。これに対し、復帰動作時には制御手法に依存し頭側を固定した動作を行うため、最後尾を基準とした描画では描画と実際の動作との間に齟齬が生じる。そこで、復帰動作時には先頭を固定して描画することにより、描画と実際の動作とが整合するように修正し、通常時と復帰動作時とモデル描画時の基準点が変わるように改良を施した。

以上のように、改良したインターフェースでは、描画・操作インターフェースが統合され、表示モデルは実機に合わせて変更されている。また、半自律制御の確認のためにモデル描画時の基準点変化に対応できるようになった。

3.1.3 まとめ

スタック状態を認識できるような描画インターフェースの開発を行った。具体的には、ロボットの状況やセンサ情報が描画され、スタック危険性に基づき描画色が変わるようになっており、操縦者がスタック状態を容易に認識できる。そして、描画インターフェースは3.3節の操作インターフェースと統合され、描画・操作を行うインターフェースが実現された。

3.2 動作不能からの復帰を可能とする制御

3.2.1 令和2年度までの実施内容及び成果（概要）

操縦者による手動操作で行う制御手法を提案し、ロボット全体の体形の維持等を考慮しながらスタック部を障害物から離脱させた[2]。制御則は数値計算ソフト MATLAB®を用いて実装と確認を行った。シミュレーションおよび既存ロボットを用いた実機実験により制御手法の有効性を検証した。ロボットの側面方向に障害物がある場合と底面方向に障害物がある場合を想定して実験を行った結果、提案制御手法を用いることでロボットはスタックから復帰し動作を再開できることが確認された（図 3.2-1）。

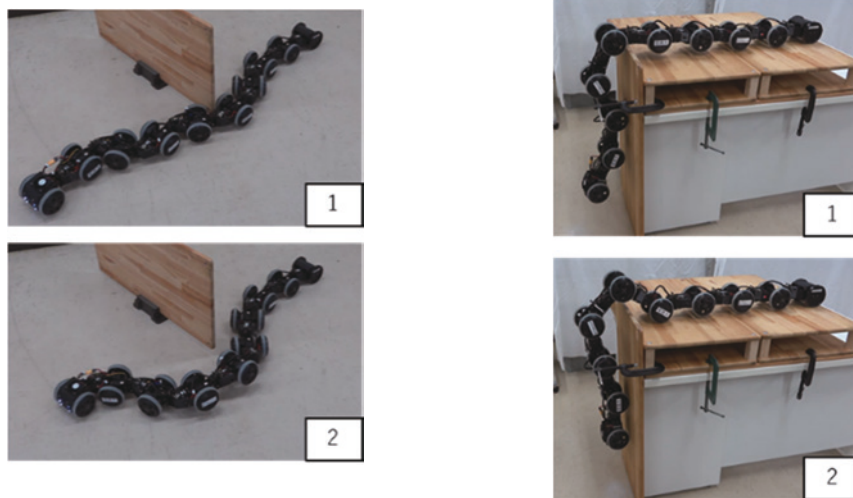


図 3.2-1 T2 Snake-3 によるスタック回避実験の結果
（[6] より引用）

センサ情報を用いてロボットが半自律的に復帰動作を行うための制御手法を提案するための第一歩として、センサ情報からスタック状態を検知する方法について検討を行った。図 3.2-2 のようにスタックを分類し、それぞれのスタック危険性を数値化して表現する方法[3]を提案するとともに、手動制御時に人間が行っていた操作の一部を自動化した[4]。

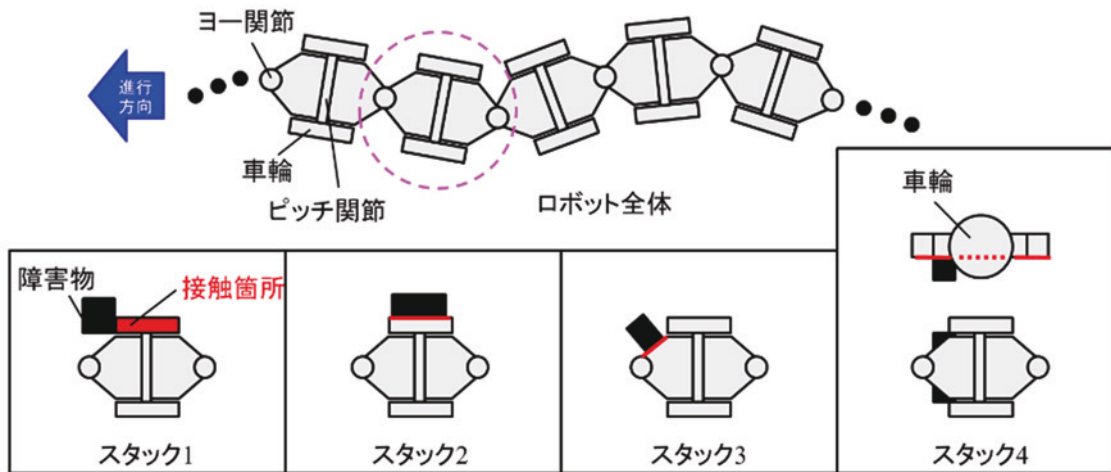


図 3.2-2 新しいロボット形状とスタックの分類
([5] より引用)

3.2.2 令和3年度実施内容及び成果

センサ情報を用いてロボットが半自律的に復帰動作を行うための制御手法を提案した。具体的な方法は、知財の観点から開示せず非公開とする。そして、半自律復帰制御手法の一連の流れを実行可能なシステムを構築した。

3.2.3 まとめ

スタック状態から復帰する制御方法について、2つの方法を提案した。1つは操縦者による手動操作で行う制御手法で、もう1つはセンサ値に基づき半自律的に回避を行う半自律制御手法である。これらの手法を実際に用いるためには特殊なインターフェースが必要であるため、3.1節や3.3節の開発も同時並行で実施した。

3.3 操作インターフェースの開発

3.3.1 令和2年度までの実施内容及び成果（概要）

3.2 節で提案した手動制御の各種指示を行うことが可能なインターフェースを開発し、操縦者用コンピュータの画面にロボットの全身と周囲環境の情報を表示させ、手動制御の各種指示をマウスによって行った。インターフェースは ROS 上で開発を行い、制御プログラムとの通信は MATLAB® ROS Toolbox を用いて行った。開発した操作インターフェースでは、制御手法の指示としてロボットにおける基準点と制御点をマウスでクリックすると中間目標点が出現する。マウスを用いてその中間目標点を任意の位置に移動させ、制御開始ボタンを押すことで制御が開始される。そして、物理シミュレータを用いたシミュレーションを行い、開発インターフェースを用いて提案制御手法の各種指示が可能であることを確認した。開発したインターフェースを図 3.3-1 に示す。また、制御完了時までの体形変化を事前描画できる機能が追加され、操作者の意図しない動作を事前に回避することが可能となった。

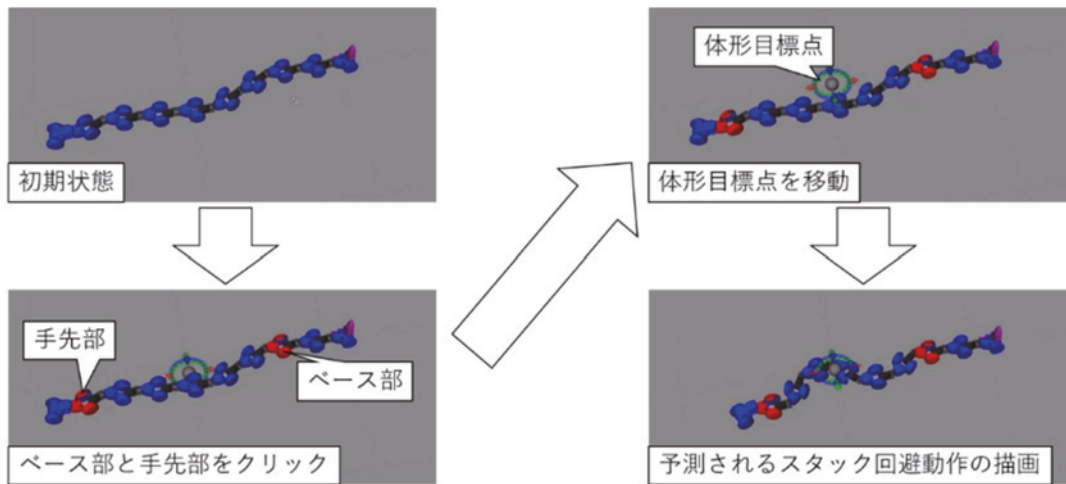


図 3.3-1 改良した手動操作作用インターフェース
（[5]より引用）

3.3.2 令和3年度実施内容及び成果

令和2年度まで開発していた操作インタフェースを対象に、半自律制御手法を実行できるように改良を施した。具体的には、3.1節で説明したように、操作・描画インタフェースを統合したほか、3.2節の半自律制御手法の実行のためのボタンを実装した。インタフェースはROS上で開発を行った。インタフェースの詳細は知財の観点から非公開とする。

3.3.3 まとめ

スタックからの回避を行うための2つの制御手法のための操作インタフェースを開発した。手動操作インタフェースではマウスを使って制御のための情報を入力し、制御を実行する。半自律制御手法用の操作インタフェースでは、半自律制御手法を行うための描画やボタンが用意されている。

3.4 実機検証

3.4.1 令和2年度までの実施内容及び成果（概要）

多連結移動ロボット T2 Snake-3 および T2 Snake-4 をベースとし、センサ等を搭載できる余地を残したプラットフォームロボットの開発を行った。開発したロボットはセンサ等を搭載できるように底面の凹凸が少なくなるよう設計されているほか、リンク長がある程度変化できるようになっている。圧力センサの選定と動作確認を行い、図 3.4-1 に示すようにプラットフォームロボットにセンサを搭載した。次に、開発した実機を用いて 3.2 節、3.3 節の実機検証を行い、手動操作用インタフェースの有効性とスタック検知手法の有効性を確認した。

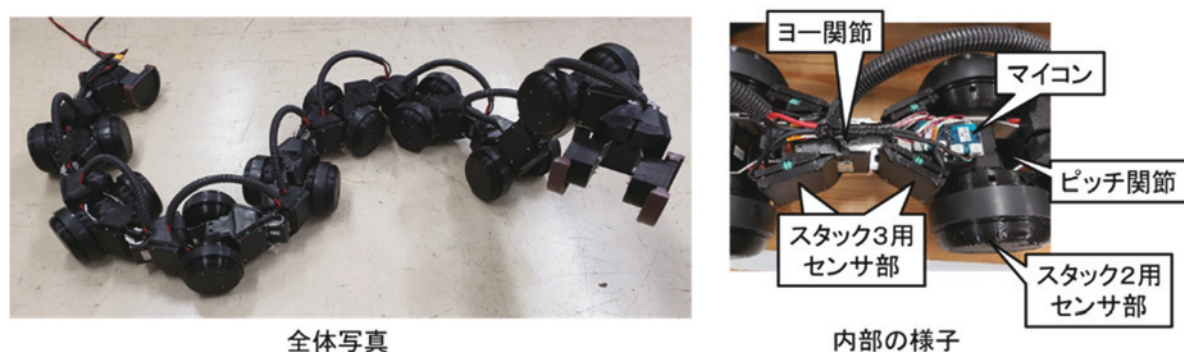


図 3.4-1 センサを搭載した多連結移動ロボット
([5]より引用)

3.4.2 令和3年度実施内容及び成果

令和2年度まで開発していたセンサ等を搭載したプラットフォームロボットを対象に、必要に応じて半自律制御用のセンサの追加実装や改良を行った。次に、開発した実機を用いて半自律制御手法の実機検証を行った。さらに、檜葉遠隔技術開発センター等にて実証実験を行った。

図 3.4-2 に示すように、遠隔操縦と描画インタフェースでの姿勢描画のために先頭と最後尾にカメラ、最後尾に IMU を搭載した。また、複雑地形での動作時の配線保護を目的とし、外装を改良した。

3.1 節の描画インタフェース、3.2 節の半自律制御手法、3.3 節の操作インタフェースで構成された半自律制御システムの検証のため、檜葉遠隔技術開発センターや研究室に再現した実験環境での実証実験を行った。各スタックでの半自律制御手法の有効性を確認するため、胴体のうち 1 カ所のみが障害物と接触しスタックしている状況を再現し、実験を行った。その結果、全ての状況についてスタック状態から復帰することができた。

檜葉遠隔技術開発センターでは ASTM E2828-11 (通称: ランダムステップ) および ASTM E2827-11 の 2 つのフィールドで実験を行った。実験結果については、知財の観点から非公開とする。実験では、関節モータが過負荷状態になりエラーで停止することがあった。また、ロボットの外殻の色が黒であるため、スタック状況を視覚的に確認する際に影と外殻とが一体化し視認性が非常に悪いことがわかった。また、実験により外殻が破損し、その耐久性にも問題があることがわかった。

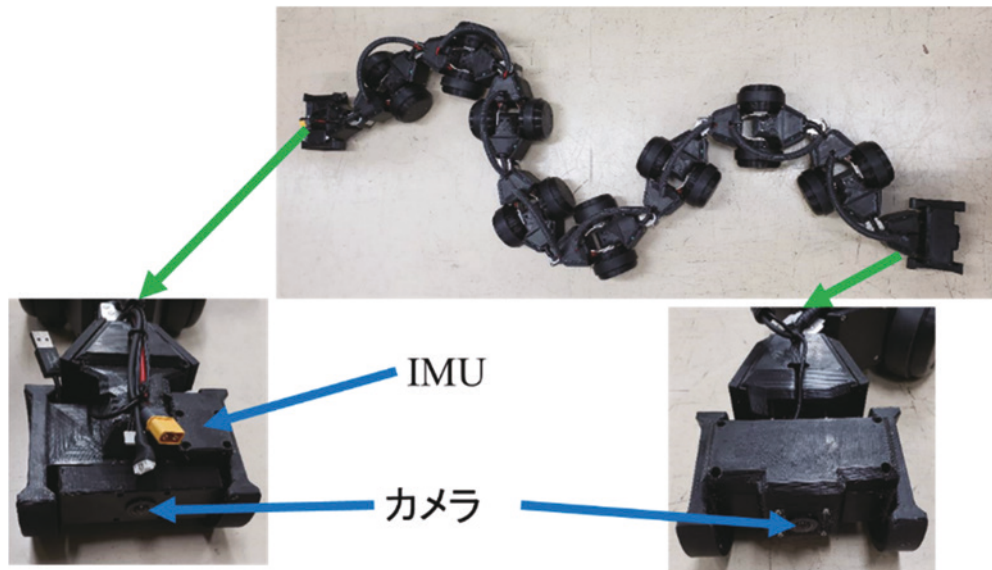


図 3.4-2 カメラと IMU の搭載

スタックの視認性の向上と外殻の耐久性を向上するため、外殻の色の変更と素材の変更を行った。色は青と白を採用し、素材は PLA (Poly-Lactic Acid) 樹脂から ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) 樹脂に変更した。

新型コロナウイルス感染症の流行に伴い、出張での移動を避け実験室で検証実験を行うため、前述の ASTM E2828-11 を模擬したランダムステップフィールドを制作した。フィールドは 90 mm 刻みの 5 種類の高さの木製の角材で構成され、角材の高さはそれぞれ 90、180、270、360、450 mm であり、横幅は 720 mm、奥行きは 1800 mm である。該当のフィールドにてランダムな走行実験を複数回実施した。実験結果の詳細は、知財の観点から非公開とする。実験の結果、関節モータの過負荷エラーが生じなければスタック状態からの復帰できることが確認された。実用化のためには過負荷エラーの回避が必要である。過負荷エラーの回避のためには、大きく分けて 2 つの解決策が考えられる。1 つは、ハードウェアによる解決策、もう 1 つは、ソフトウェアによる解決策である。ハードウェアによる解決策としては、ロボットの軽量化、モータ出力の向上が考えられる。ソフトウェアによる解決策としては、関節にかかるトルクも考慮した制御アルゴリズムの構築が考えられる。

3.4.3 まとめ

センサを搭載したプラットフォームロボットを開発し、提案した制御手法や開発したインタフェースに関する実験を行った。さらに、檜葉遠隔技術開発センターや研究室に再現した実験環境での実証実験により、半自律制御手法は過負荷エラーが生じなければ有効に働きロボットがスタック状態から復帰できること、過負荷エラーの対策が課題であることがわかった。

3.5 研究推進

3.5.1 令和2年度までの実施内容及び成果（概要）

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に打合せや会議等を開催した。具体的には、令和元年度はCLADSの遠隔技術ディビジョンのグループリーダの方と打ち合わせを行い、研究課題の現状と今後についての議論を行い、令和2年度はCLADSの鷺谷 J-P0（JAEAプログラムオフィサー）にメールにて進捗報告を行った。

3.5.2 令和3年度実施内容及び成果

令和2年度に引き続き、CLADSの鷺谷 J-P0 にメールにて進捗報告を行った。

3.5.3 まとめ

以上のように、研究代表者の下で各研究項目間ならびに廃炉国際共同研究センター（CLADS）等との連携を密にして研究を進めた。

4. 結言

本研究では、多連結移動ロボット共通の課題である「関節部のスタック状態」からの復帰方法の確立を目的とし、(1)スタック状態を認識できるような描画インターフェースの開発、(2)スタック状態から復帰する制御方法の提案、(3)提案制御を実施するための操作インターフェースの開発、(4)検証用実機の開発と実験、を行った。また、研究を円滑に進めるため、(5)研究推進、を行った。

(1)では遠隔操縦時に状況把握可能なインターフェースを開発した。ロボットの姿勢や各種情報に加え、スタック危険性に基づき描画色が変化するようになっており、操縦者がスタック箇所を容易に認識できる。そして、描画インターフェースは(3)の操作インターフェースと統合し、描画・操作を行うインターフェースが実現された。

(2)では操縦者による手動操作で行う制御手法、スタック危険性を数値化して表現する方法、半自律的に回避を行う制御手法を提案し、スタック箇所の特定から回避動作までを半自律的に行うことが可能となった。

(3)では(2)にて提案した制御の各種指示を行うことができるインターフェースを開発し、描画インターフェースと統合した。

(4)では全身にセンサを配置した検証用のプラットフォームロボットを開発し、必要に応じて改良を施し、(1)～(3)の検証実験を行った。検証実験の結果より、提案手法の有効性や課題が分かった。

(5)では研究代表者の下で研究室内メンバー間ならびに CLADS 等との連携を密にして研究を進めた。

以上のように、事業目的に対して、当初設定した目標は全て達成することができた。今後の課題は、過負荷状態の回避と耐放射線性能の確保である。過負荷状態の回避については、機体の軽量化やモータの高出力化によるハードウェアの改良や、必要トルクを考慮した回避制御アルゴリズムの構築が挙げられる。耐放射線性能の確保については、本事業で使用した機体の一部の部材は本事業とは別の研究にてある程度の耐放射線性能があることを確認しているものの、本事業で開発した機体に対する耐放射線性試験は実施されていない。本事業で得られた成果を放射線環境下にて利用するためには、本事業にて使用した機体や構成部品に対して耐放射線試験を行い、結果に応じて放射線対策を施す必要がある。

参考文献

- [1] Granosik, G., Hypermobile Robots - the Survey, *J. Intell. Rob. Syst.*, vol. 75, no. 1, 2014, pp. 147-169, DOI: 10.1007/s10846-013-9985-5.
- [2] Nakajima, M. et al., Local Body Shape Control of an Articulated Mobile Robot and an Application for Recovery from a Stuck State, *Adv. Robot.*, vol.36, 2022, pp.488-500, DOI: 10.1080/01691864.2022.2063036.
- [3] 古池晃樹, 中島瑞, 田中基康, スタック検知が可能な多連結移動ロボットの開発, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2021, 2P2-B01, 2021.
- [4] 福村信之介, 田中基康, 田中一男, 多連結移動ロボットのスタックからの復帰制御: 制御領域と制御目標の自動決定, 第 21 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 3G1-12, 2020.
- [5] 廃炉環境国際共同研究センター, 電気通信大学, 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 (委託研究); 令和 2 年度英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業, JAEA-Review 2021-025, 2021, 33p., <https://doi.org/10.11484/jaea-review-2021-025>.
- [6] 廃炉環境国際共同研究センター, 電気通信大学, 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 (委託研究); 令和元年度英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業, JAEA-Review 2020-025, 2020, 34p., <https://doi.org/10.11484/jaea-review-2020-025>.

This is a blank page.

