

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—
Semi-autonomous Remote-control Technology of an Articulated Mobile Robot
to Recover from Stuck States
(Contract Research)
-FY2020 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 2021

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—

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

(2021年9月7日受理)

日本原子力研究開発機構（JAEA）廃炉環境国際共同研究センター（CLADS）では、令和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（以下、「本事業」という）を実施している。

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

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

本研究は、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2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)

— FY2020 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 September 7, 2021)

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 FY2020.

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 in FY2020.

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
付録 成果報告書	11

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
Appendix Result Report	11

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 (令和元年度まで) 大曲 新矢	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	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 (令和2年度 まで) 岡山大学

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
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 (平成30年度まで) 竹下 健二	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	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

本報告書は、以下の課題の令和2年度の研究成果を取りまとめたものである。

共通基盤型原子力研究プログラム

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 2 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 R02I032)

成果報告書

令和 3 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2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. 1-1

2. 業務計画 2. 1-1

 2.1 全体計画 2. 1-1

 2.2 令和2年度の成果の目標及び業務の実施方法 2. 2-1

3. 令和2年度の実施内容及び成果 3. 1-1

 3.1 描画インタフェースの開発 3. 1-1

 3.2 動作不能からの復帰を可能とする制御 3. 2-1

 3.3 操作インタフェースの開発 3. 3-1

 3.4 実機検証 3. 4-1

 3.5 研究推進 3. 5-1

4. 結言 4-1

参考文献 5-1

執筆者リスト

事業代表者 国立大学法人電気通信大学 教授 田中 基康

図一覧

図 2. 1-1	全体計画図.....	2. 1-1
図 3. 1-1	描画インタフェース.....	3. 1-1
図 3. 2-1	新しいロボット形状とスタックの分類.....	3. 2-1
図 3. 2-2	シミュレーション結果.....	3. 2-3
図 3. 3-1	改良した手動操作インタフェース.....	3. 3-1
図 3. 4-1	センサを搭載した多連結移動ロボット.....	3. 4-1
図 3. 4-2	手動操作インタフェースを用いたスタック回避実験の様子.....	3. 4-2
図 3. 4-3	ランダム環境でのスタック検知実験の様子.....	3. 4-3

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)
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

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ることができるため、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。(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の開発であり、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ことを目指す。(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こと、または半自律的に行うこと、を目指す。(3)は、(2)の制御手法を実施する際に必要になる操作インタフェースを開発するものである。先頭や最後尾ではなく、スタック状態となっている部分近傍を制御点として指定し、その動作指示を行うことが可能な操作インタフェースの実現を目指す。(4)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するものであり、各実施項目の進捗に応じて改良を加え、(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を目指す。

令和2年度は、(1)については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)についてはセンサ情報からスタック状態を検知する方法の検討、(3)については手動操作作用インタフェースの開発完了、(4)についてはプラットフォームロボットの開発完了と(2)および(3)の検証実験を行った。

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福島第一原子力発電所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（以下、「CLADS」と略す。）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。

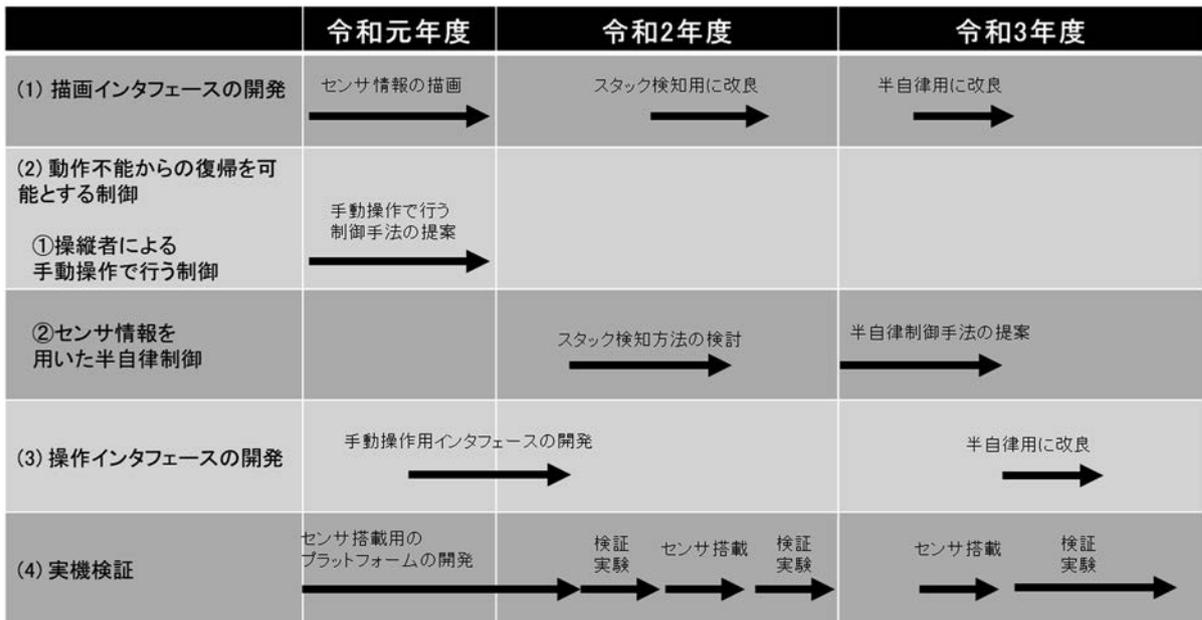


図 2.1-1 全体計画図

2.2 令和2年度の成果の目標及び業務の実施方法

令和2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2年度は、令和元年度までに開発した描画インタフェースを対象に、スタック検知を行うための改良の実施を目指した。具体的には、後述(2)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フェースに改良する。インタフェースは Robot Operating System (以下、ROS と略す。) 上で開発を行い、制御プログラムとの通信は、MathWorks 社の MATLAB® ROS Toolbox を用いて行った。

(2)の項目は、多連結移動ロボットが動作不能からの復帰を可能とするための制御手法を確立することを最終目的としている。令和2年度は、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うことを目的とした。

(3)の項目は、上記(2)で提案する制御の各種指示を行うことが可能なインタフェースの実現を最終目的としている。令和2年度は、手動操作によって動作不能からの復帰を行う制御の指示を行うことが可能な操作インタフェースの開発を完了することを目的とした。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、制御の各種指示はマウスによって行う。インタフェースは 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2年度は、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完了することを目的とした。そして(2)および(3)に関する検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る。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. 令和2年度の実施内容及び成果

3.1 描画インタフェースの開発

本項目では、令和元年度までに開発した描画インタフェースを対象に、ロボット胴体においてスタック状態の原因になっている部位を認識できるように改良を施した。なお、この部位は後述3.2の手法によって導き出される。改良した描画インタフェースを図3.1-1に示す。右半分には令和元年度までに開発した描画インタフェースが表示され、左半分には新たにスタック状態を認識するための表示領域が追加されている。以降では新たに追加した領域について説明していく。

スタック状態を認識するための新たな領域には、紙面上下方向に3つのロボットが描画されている。中央のロボットを基準とし、上側には左右方向に鏡映しになったロボットの映像、下側には上下方向に鏡映しになったロボットの映像が描画されている。これにより、視点を切り替えることなくロボット全身を視認できるようになっている。通常時のロボット胴体は青色で描画されているが、3.2にて説明するスタック危険性が高い部位は赤く表示されるようになっている。危険性が高ければ高いほど純粋な赤色に近づき、スタック危険性が低ければ青色に近づく描画がされる。これにより、ロボット全身においてどの部位がスタックの原因になっているかを操作者が認識することができる。

多連結移動ロボットは多くのユニットが連結された構造になっており、スタック危険性が高い場所が何番目のユニットなのか瞬時に判断しづらい。よって、右半分と左半分のどちらの描画領域でもロボットの先頭から順にユニット番号を表示することにより、何番目のユニットがスタック状態にあるかわかるようにした。

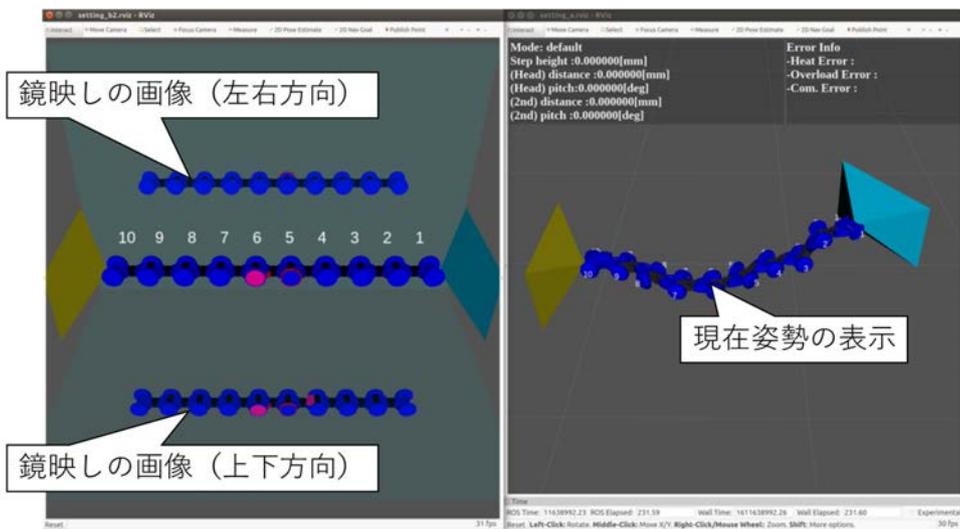


図 3.1-1 描画インタフェース

3.2 動作不能からの復帰を可能とする制御

本項目では、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。以降は、文献[古池 2021]で発表する内容である。[古池 2021] 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, 2021.

まず、ロボットの形状変更に伴いスタックについて再分類を行った。具体的には、後述する実機開発にて、ヨー関節と車輪軸との間の胴体形状が斜面形状に変更されたため、スタックの分類が1つ減り4つになった。発生箇所依存した分類を図 3.2-1 に示す。

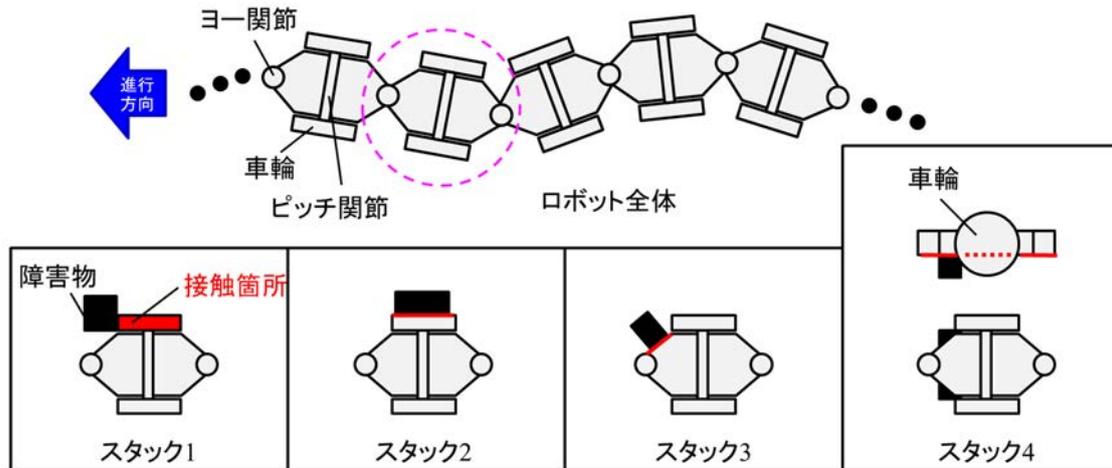


図 3.2-1 新しいロボット形状とスタックの分類

次に、スタック検知手法について検討を行った。スタックが発生しロボットが推進できなくなった際に、どの単位節にてスタックが発生しているかを特定することが目標である。スタック検知のためのセンサとして、圧力センサを全身に配置することとした。スタック 1~4 に対して、それぞれの箇所に圧力センサを配置し、検出した力の大きさをスタックを検知する。ここで、スタック 1 についてはスタックの発生が車輪と障害物との接触位置に大きく依存するため、車輪に加わる力の大きさだけでなく向きも計測できるようにし、その値から接触位置の高さを推定できるようにする。スタック 2~4 については、障害物とロボットとの間の摩擦力によってスタックが生じる。スタック発生箇所のセンサで測定した接触力を用いて摩擦力の大きさを評価する。しかしながら、摩擦係数はロボットと障害物の両方に依存し変化するため、正確な摩擦力を計算することは難しい。これは、スタックの原因となっている箇所を完全に特定することは困難であることを意味する。よって、各センサでスタックが生じている危険性を数値化し、その数値を比較することで操作者がスタック原因箇所を推定できるようにした。ここで、スタックがその場所で発生している可能性を数値化したものをスタック危険性と呼ぶことにする。

スタック 1 のスタック危険性を d_1 とする。この値は障害物の高さに大きく影響される。そこで、障害物を段差とみなして 1 つの車輪に滑りが生じず高さ s の段差を乗り越え可能な条件を求め、整理することで d_1 を次式のように定義した。

$$d_1 = \begin{cases} \frac{W\sqrt{s(2r-s)}}{Q(r-s)+\tau} & (s \leq r) \\ \frac{W\sqrt{s(2r-s)}-Q(r-s)}{\tau} & (s > r) \end{cases}$$

ここで、 W は車輪に加わる荷重、 Q は車輪に働く推進力、 τ は車輪トルク、 r は車輪半径である。なお、接触高さ s はセンサ値から求める。前述の式は分母と分子がそれぞれ段差を昇る方向と降る方向に働くモーメントを表しているため、 d_1 が大きいほど段差を乗り越えられずスタックする危険性が高いほか、 $d_1 \geq 1$ でスタックが発生していると判断できる。

スタック 2~4 については、そのスタック危険性を d_2 とし、次式で定義する。

$$d_2 = af$$

ここで、 f はセンサ値から計算した接触力の進行方向と直交する方向の成分、 a は比例定数である。この値が大きいと進行方向と逆向きの摩擦力が大きくなり、その場所でのスタックが生じる危険性は高くなる。比例定数 a はセンサが検出できる最大値のときに 1 となるように設定した。そして、スタック危険性に対して閾値に基づく自動判定や操作者による判断でスタック原因箇所が特定できると考えられる。

以上が動作不能からの復帰を可能とする制御について、令和 2 年度計画していた内容である。令和 2 年度はこれに加え、令和 3 年度検討予定の準備として、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。以降は、文献[2]にて発表した内容である。

令和元年度の成果である操縦者による手動操作で行う制御手法では、下記の 2 つの操作が行われていた。

Step 1: 制御部の範囲（ベース部と手先部）を入力

Step 2: 体形目標点の座標を入力

これら 2 つの Step について、どのような値を設定するかが曖昧であり、操作者に負担であった。そこで Step 1、Step 2 を自動的に設定する方法を提案した。Step 1 では、下記の 5 つの条件を設定した。

- 条件 1. 制御部の関節数が 7 以上
- 条件 2. 制御部の関節数がロボット全体の関節数を超えない
- 条件 3. スタックしているリンクが制御部に含まれる
- 条件 4. 制御部の両端のリンク番号が偶数
- 条件 5. スタックしているリンクの位置と制御部の手先目標軌道が重ならない

条件 1 は制御部の手先の位置姿勢を制御し、かつ冗長自由度が生じるためのものである。条件 2 は制御部の取りうる関節数の上限の超過を防ぐため、条件 3 はスタックしているリンクについて制御を行えるように設定した。条件 4 は制御部の両端をピッチ関節とすることで制御部をなるべく接地面から離し、地面との接触で復帰動作を阻害しないために設定した。条件 5 は動作軌道上に障害物が存在する状況や動作後に再度スタックが生じることを防ぐ条件である。そして、前述の 5 条件を満足する候補に対し、評価関数が最小かつ動作中にロボットに転倒が生じないものを自動選択する。

Step 2 では、体形目標点の座標を自動生成する。スタック 1 とスタック 3 が生じている場合、進行方向に対して垂直方向かつ障害物と環境から離れる方向に制御目標を設定する。スタック 2 とスタック 4 が生じている場合、接触面に対して法線方向かつ障害物と環境から離れる方向に制御目標を自動設定する。離れる量については事前に定数で設定する。

以上の手法についてシミュレーションによる検証を行った。シミュレーションの様子を図 3.2-2 に示す。胴体側面に板状の障害物が挟まっている状況を初期状態とした。Step 1 の自動選択によってベース部は第 3 車輪対、手先部は最後尾が選択された。Step 2 の目標値は図 3.2-2 のオレンジの点のように設定された。動作の結果、図 3.2-2 左のように車輪と車輪の間に障害物が挟まった状態から、図 3.2-2 右のようになった。スタック状態から復帰できていることがわかる。以上のように、手動操作による制御手法の一部の操作を自動化することができた。なお、成果をまとめた文献[2]の発表は優秀講演賞を受賞した。

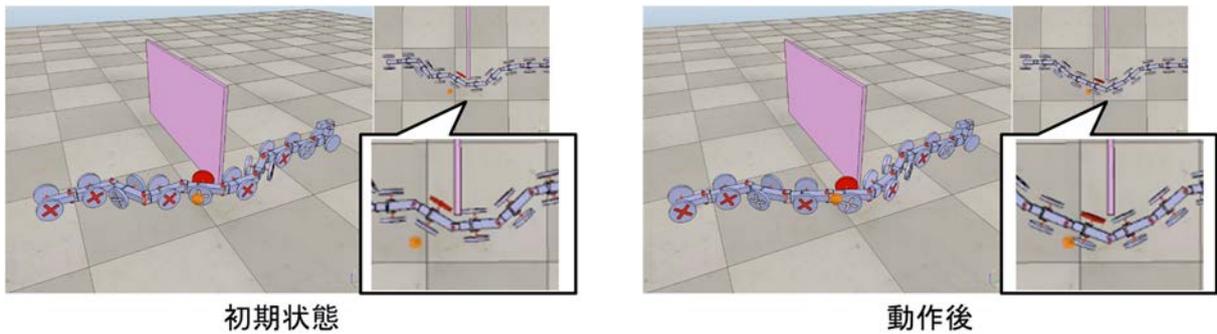


図 3.2-2 シミュレーション結果

3.3 操作インターフェースの開発

本項目では、令和元年度から継続していた手動操作にてスタック回避を行う制御の各種指示を行うことが可能なインターフェースの開発を完了した。具体的には、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、制御の各種指示は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。

開発したインターフェースを図3.3-1に示す。まず、スタックからの回避制御を行うベース部と手先部について、マウスのクリックで指定する。この際、改良点としてクリックした部位の色が変わり操作者がわかりやすくなっている。次に、スタックから復帰できるように体形目標点を操作者がマウスで移動する。令和元年度のインターフェースではこの直後にロボットが回避動作を開始していたが、回避動作が成功するか失敗するかはロボットが動作して初めてわかる状況であった。つまり、回避動作が失敗する可能性がある、ということである。これは実運用上大きな問題であるため、令和2年度は事前に動作が予測できるようにインターフェースを改良した。これにより、回避動作を実行した場合にロボットがどのような動作をし、最終的にどのような姿勢に収束するかを動作前に確認できるようになった。操作者は予測されるスタック回避動作を確認し、問題がなければロボットにその動作を行わせる。問題がある場合はマウスでの各種指示を再度やり直す。これを繰り返すことにより、操作者が意図しない失敗動作を避け、適切な回避動作を生成できるようになった。

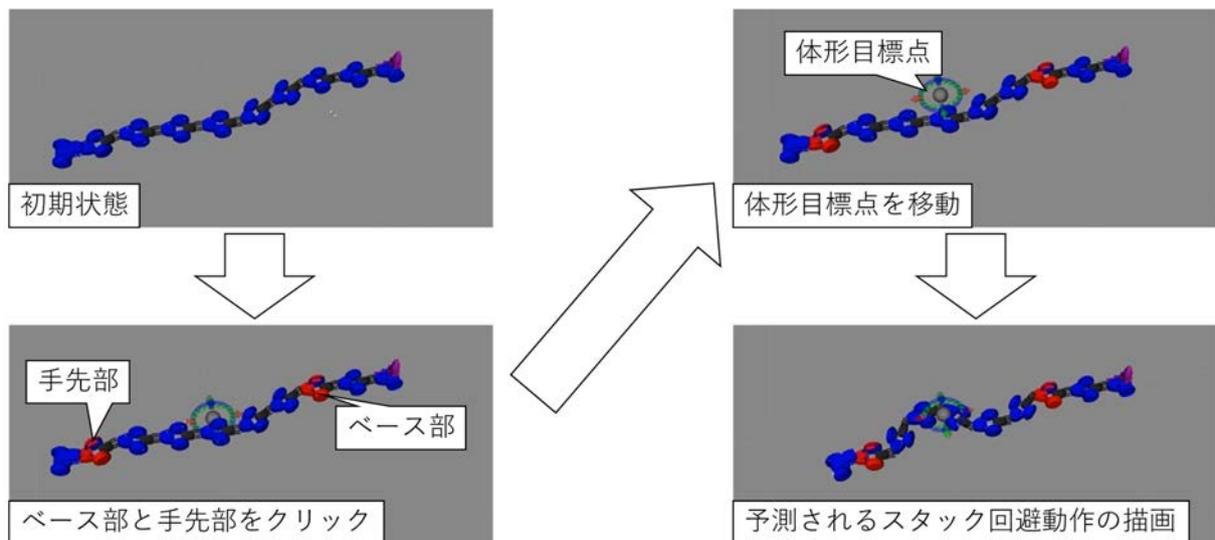


図 3.3-1 改良した手動操作インターフェース

3.4 実機検証

本項目は、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するものであり、各実施項目の進捗に応じて改良を加え、(1)～(3)のインタフェースや制御手法の検証実験を行うものである。

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を開発完了後、3.2のスタック検知に必要なセンサの搭載を行った。搭載後のロボットを図3.4-1に示す。このロボットは全長2.16m、重量は12.1kgであり、全身で104個の圧力センサを搭載している。圧力センサは、3.2にて述べた配置で取り付けられた。スタック1用のセンサとしてはInterlink Electronics社のFSR402を、スタック2～4用のセンサとしては同社のFSR406を用いた。圧力センサの値は胴体各所に搭載したマイコン（THK株式会社のSEED MS1A）のADポートを介して取得し、取得したセンサ値はCAN通信にて制御用PCに送られる。センサ搭載に伴い、令和元年度に開発機体の車輪用モータ固定部の金属部材を改良し、3Dプリンタを用いて成形した樹脂部材を全身に取り付けた。



図 3.4-1 センサを搭載した多連結移動ロボット

開発した実験機を用いて(3)の手動操作インタフェースの検証実験を行った。結果を図3.4-2に示す。初期状態では第5車輪対と第6車輪対の間に板状の障害物が存在している。図3.4-2の1のように、操縦者はベース部として第2車輪対、手先部として第8車輪対を選択し、体形目標点は障害物から少し横方向に離れた位置に指定した。次に、図3.4-2の2のように、インタフェースによってロボットが行うであろう回避動作の予測結果が描画され、操縦者はその内容を見て回避動作として問題ないことを確認した。この際、ロボットは全く動作していないことに注意されたい。そして図3.4-2の3のように動作が開始され、図3.4-2の4のように回避動作を完了できた。なお、動作の予測結果に問題がある場合、図3.4-2の1に戻って再度制御パラメータの指示をやり直すことができる。以上のように、手動操作インタフェースの有効性が確認できた。

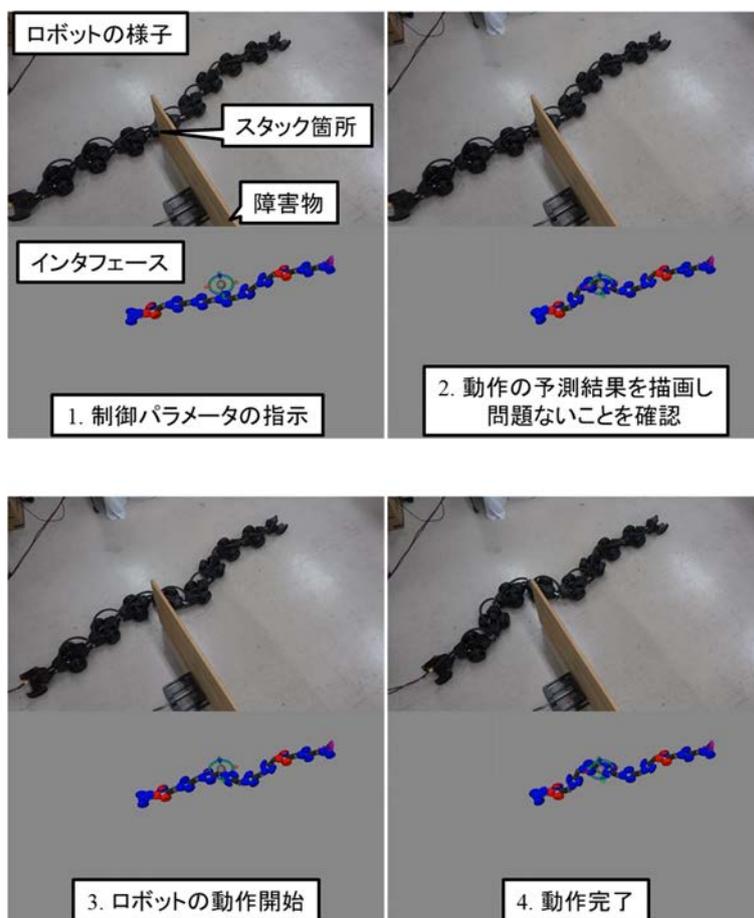


図 3.4-2 手動操作インタフェースを用いたスタック回避実験の様子

また、開発した実験機を用いて(2)のスタック検知の実機検証を行った。機体は直線姿勢で前進しているものとし、障害物に接触させることでスタック 2~4 を発生させた。結果としては、スタック 2~4 については接触個所のスタック危険性が上昇し、スタックが検知できることが確認できた。一方で、スタック 1 についてはスタック危険性の誤差が大きい結果となった。スタック 1 のスタック危険性は障害物の接触高さに大きく影響され、その接触高さは 3 つのセンサ情報を合成して得ている。データを解析したところ、接触位置の高さが実際は 50 mm であるのに対してセンサ値から推定された値が 70 mm と大きな誤差が生じていた。これが原因でスタック危険性も誤差が大きく、正しい結果を得ることができなかった。車輪を回転させない条件では比較的正しい推定結果が得られていたため、車輪の回転による影響であると考えられる。この問題への対応は今後の課題とする。また、ランダム環境でのスタック検知実験の様子を図 3.4-3 に示す。ロボットは複数の部分で周囲の障害物との接触に起因するスタックが生じて動作不能となった。スタック時のインタフェース描画の様子を図 3.4-3 の右に示す。車輪側面の接触によって生じるスタック 2 と胴体下面の接触によって生じるスタック 4 が発生していることがわかる。このように、ランダム環境でもスタック状態が検知できることが確認された。以上のように、提案したスタック検知手法の有効性が確認できた。

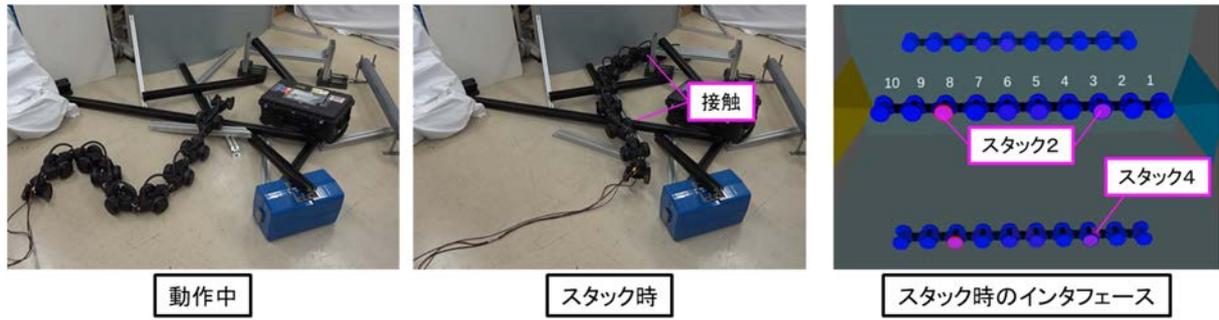


図 3.4-3 ランダム環境でのスタック検知実験の様子

3.5 研究推進

本研究を推進するにあたり、令和 3 年 2 月 25 日に CLADS の鷺谷氏に研究進捗をメール報告した。また、研究実施計画を推進するために電気通信大学研究室内にて適宜打ち合わせを開催した。

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。また、研究を円滑に進めるため、(5)研究推進を行った。

(1)では前年度までに開発した描画インタフェースを対象に、スタック検知を行うための改良を施した。改良したインタフェースでは、(2)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。(2)では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。スタック危険性を数値化して表現する方法を提案するとともに、令和元年度提案した手動制御の実施時に操作者が行っていた操作の一部を自動化した。(3)では令和元年度から継続していた手動操作にてスタック回避を行う制御の各種指示を行うことが可能なインタフェースの開発を完了した。令和元年度までの成果に加えて制御完了時までの体形変化を事前描画できる機能を追加し、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。(4)では令和元年度から継続していた、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完了した。さらに(2)のスタック検知に必要なセンサの搭載を行い、スタック検知の実機検証を行った。そして(3)の手動操作用インタフェースの検証実験を行い、インタフェースの有効性を確認した。(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。

参考文献

- [1] Granosik, G., Hypermobile Robots - the Survey, J. Intell. Rob. Syst., vol.75, no.1, 2014, pp. 147-169.
- [2] 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 予稿集, 3G1-12, 2020.

This is a blank page.

