

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—

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

-FY2019 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

December 2020

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<https://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課
〒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.
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Institutional Repository Section,
Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department,
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

© Japan Atomic Energy Agency, 2020

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—

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

(2020年10月8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（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、「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ーフェースとして、スタック状態を認識できるような描画インターフェース、提案制御の目標指示を行うための操作インター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)

— FY2019 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 October 8, 2020)

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 FY2019.

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”.

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: Articulated 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（継続分）.....	2
3. 令和元年度 採択課題.....	5
付録 成果報告書.....	9

Contents

1. Outline of Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource Development Project ..	1
2. Accepted Proposal in FY2018 ~Continued~.....	2
3. Accepted Proposal in FY2019	5
Appendix Result Report.....	9

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)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（継続分）

平成 30 年度採択課題（継続分）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	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

令和元年度は、4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：平成 31 年 4 月 24 日～令和元年 6 月 7 日
令和元年 5 月 30 日～令和元年 7 月 18 日 ※日露共同研究のみ
- ・ 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

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 康一郎	東京工業大学
動作不能からの復帰を可能とする多連結移動ロボットの半自律遠隔操作技術の確立	田中 基康	電気通信大学

共通基盤型原子力研究プログラム

【一般研究】

課題名	研究代表者	所属機関
一次元光ファイバ放射線センサを用いた原子炉建屋内放射線源分布計測	瓜谷 章	名古屋大学
低線量・低線量率放射線被ばくによる臓器別酸化ストレス状態の検討	鈴木 正敏	東北大学
単一微粒子質量分析法に基づくアルファ微粒子オンラインモニタリングに向けた基礎検討	豊嶋 厚史	大阪大学
幹細胞動態により放射線発がんを特徴付ける新たな評価系の構築	飯塚 大輔	量子科学技術 研究開発機構
耐放射線性ダイヤモンド半導体撮像素子の開発	梅沢 仁	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

国際協力型廃炉研究プログラム（日露共同研究）

課題名	研究代表者	所属機関
燃料デブリ取出し臨界安全技術の高度化	小原 徹	東京工業大学
微生物生態系による原子炉内物体の腐食・変質に関する評価研究	金井 昭夫	慶應義塾大学

研究人材育成型廃炉研究プログラム

課題名	研究代表者	所属機関
燃料デブリ取り出し時における炉内状況把握のための遠隔技術に関する研究人材育成	浅間 一	東京大学
化学計測技術とインフォマティクスを融合したデブリ性状把握手法の開発とタイアップ型人材育成	高貝 慶隆	福島大学
放射線・化学・生物的作用の複合効果による燃料デブリ劣化機構の解明	大貫 敏彦	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

本報告書は、採択課題のうち、共通基盤型原子力研究プログラム(若手研究)「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」の令和元年度の研究成果について記したものである。

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.

令和元年度

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 31I120)

成果報告書

令和2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」の令和元年度の研究成果を取りまとめたものです。

目次

概略	iii
1. はじめに	1
2. 業務計画	2
2.1 全体計画	2
2.2 令和元年度の成果の目標及び業務の実施方法	3
3. 令和元年度の実施内容及び成果	4
3.1 描画インターフェースの開発	4
3.2 動作不能からの復帰を可能とする制御	8
3.2.1 操縦者による手動操作で行う制御手法	8
3.3 操作インターフェース開発	15
3.4 実機検証	16
3.5 研究推進	18
4. 結言	18

表一覧

なし

図一覧

図 2. 1-1	全体計画図	2
図 3. 1-1	描画インターフェース	6
図 3. 1-2	捻転時のロボットと描画インターフェース	7
図 3. 2-1	スタックの分類	11
図 3. 2-2	スタック 1 のシミュレーション結果	12
図 3. 2-3	スタック 5 のシミュレーション結果	13
図 3. 2-4	実験結果	13
図 3. 4-1	開発機 CAD 図	16
図 3. 4-2	試作機	17

略語一覧

CAD	: Computer Aided Design	(コンピュータ支援設計)
IMU	: Inertial Measurement Unit	(慣性計測装置)
ROS	: Robot Operating System	

概略

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。

本年度は、(1)についてはセンサ情報を描画するインタフェースの開発、(2)については操縦者による手動操作で復帰動作を行う制御手法の提案、(3)については手動操作インタフェースの開発、(4)については実機検証のための多連結移動ロボットのプラットフォーム部分の開発を行った。

(1)では、関節角度情報に基づくロボット姿勢の描画、距離センサ情報の描画、そして慣性計測装置から検出される絶対姿勢を考慮したロボット姿勢の更新を行う描画インタフェースを開発し、既存の多連結移動ロボットを用いて検証を行った。従来の描画インタフェースでは絶対姿勢が反映されていなかったため遠隔操縦時に状況を把握しづらかったが、慣性計測装置の導入により正確な姿勢を認識できるようになった。次年度は、後述する(4)にてロボットに追加するセンサ情報を反映させ、スタックの原因となっている部位の認識が可能なインタフェースを開発する。

(2)では、運動学モデルに基づく制御手法を提案した。この手法ではシステムに生じる冗長性

を活用し、スタック部位の移動だけでなく関節可動限界角の超過の抑制、可操作度の導入による特異姿勢の回避、転倒回避、の達成に貢献するような評価関数が導入されている。そして制御点の動作については後続姿勢を維持するための工夫がなされており、ロボット全体の姿勢がなるべく動作前から変化しないようになっている。検証実験に先立ち、多連結移動ロボットのスタック状態について分類を行った。簡易的な形状を仮定し、スタックを幾何学的なものと同様のものに分け、障害物が接触する箇所ごとに分類を行った。そして提案制御手法を既存実機に実装し、分類したうちのいくつかのスタック状態を対象に検証実験を行った。その結果、提案手法によってロボットは関節部のスタック状態から復帰できることが確認された。次年度は、操縦者による操作ではなく半自律的に動作を生成する前段階として、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。

(3)では、(2)で提案したスタック回避手法を用い、操縦者が手動で目標動作の設定を行うための操作インタフェースの開発を開始した。暫定版のインタフェースでは操縦者用コンピュータの画面にロボットの前進と周囲環境の情報が表示されており、操縦者は制御の各種指示をマウスによって行う。現状は最低限の機能は備えているものの、視認性や操作性で課題が残っている。次年度は、操作インタフェースに改良を加えてこれらの課題を解決する。

(4)では、センサ搭載前の基本部分の設計を行い、設計したユニットを多数連結した本体部を開発した。開発した実機はリンク長さがある程度変更可能であるほか、十分なセンサ搭載スペースが確保され、関節部の可動域が広い。センサを取り付けやすいようにロボット底部が滑らかに設計されており、アクチュエータユニットを介してセンサ値を取得可能な構成となっている。また、スタック分類の結果を考慮しセンサの設置位置の検討を行うとともに、センサの選定と簡易検証を行った。センサは感圧導電性抵抗を用いた接触式のセンサを選定した。このセンサは小型かつ薄型であるためロボット搭載が容易であるほか、柔軟素材のため曲面部への取り付けが可能である。次年度はこの実機を用いて操作インタフェースの検証実験を行うほか、センサを搭載し、スタック検知の実機検証を行う。

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[1-1]。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、を行う。さらに、研究を円滑に進めるため(5)研究推進、を行う。

参考文献

[1-1] G. Granosik, “Hypermobile Robots - the Survey,” J. Intell. Rob. Syst., vol.75, no.1, pp.147-169, July, 2014.

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。

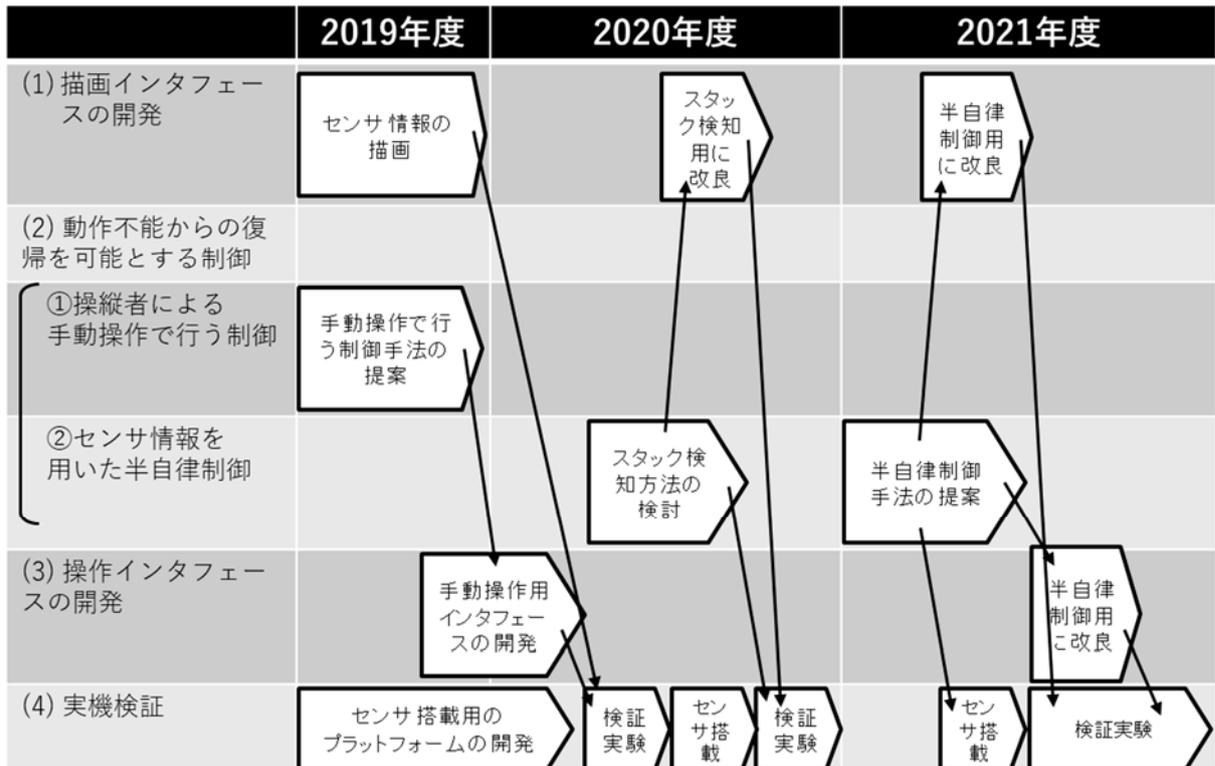


図 2.1-1 全体計画図

2.2 令和元年度の成果の目標及び業務の実施方法

令和元年度は、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。本年度は、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、を描画するインタフェースの開発を行うことを目的とした。インタフェースは Robot Operating System (ROS) 上で開発を行い、制御プログラムとの通信は Matlab® RS Toolbox を用いて行うこととした。

(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。本年度は、操縦者による手動操作によって多連結移動ロボットが動作不能から復帰するための制御手法の提案を目的とした。この手法では、関節数や接地点変化に起因し生じるシステムの冗長性を巧みに利用し、ロボット全体の体形の維持や転倒回避を考慮しながらスタック部を障害物から離脱させる。制御側は数値計算ソフト Matlab を用いて実装と確認を行うこととした。

(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。本年度は、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行うことを目的とした。操縦者用コンピュータの画面にロボットの前進と周囲環境の情報を表示させ、(2)で提案する制御の各種指示を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 RS 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。本年度は、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行うことを目的とした。研究者らが開発してきた多連結移動ロボット T2 Snake-3 および T2 Snake-4 をベースとし、開発を行うこととした。

(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. 令和元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

本項目は、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、を描画するインタフェースの開発を行うことを目的とした。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 RS Toolboxを用いて行った。

多連結移動ロボットは細長い胴体を持つため、人間が進入できないような狭隘空間に進入できる。その際には、外部に設置されたカメラやセンサから情報を得ることが難しいため、ロボット本体に搭載されたセンサ類の情報を用いて遠隔地から操縦することになる。そこで、遠隔地から操縦、すなわち遠隔操縦を行う上で必要な情報について検討を行った。情報としては、ロボットの全身姿勢情報、絶対位置・姿勢情報、視覚情報、距離情報、力覚情報、ロボットのステータス情報の5種類について、実ロボットへの実装を考慮して検討を行った。

ロボットの全身姿勢情報とは、多数の関節で連結されている多連結移動ロボットの全身の姿勢を表す情報である。多連結移動ロボットは関節を巧みに動作させることで多様な動作を行うことができるが、その反面、様々な姿勢を取りうるため、操縦者が現在の姿勢を推定することは至難の業である。そこで、エンコーダやポテンショメータといった角度センサを通じて各関節の角度情報を取得し、描画を行うことで操縦者がロボットの全身姿勢を認識できるようにすることとした。

絶対位置・姿勢情報とは、この地上における絶対的な位置および姿勢の情報である。絶対位置を取得できれば、操縦者はロボットが動作開始位置からどの程度進んだかを完全に把握できる。また、絶対姿勢を取得できれば、操縦者は重力方向を理解し、方角情報を完全に把握することができる。前述するロボットの全身姿勢情報や後述する視覚情報だけでは、操縦者は狭隘空間でロボットがどちらを向いているかを判断することが非常に難しい。よって、絶対姿勢情報を取得することとした。絶対姿勢情報を取得するセンサとしては、アールティ製のUSB出力9軸IMUセンサモジュール RT-USB-9axisIMU2 を用いることにした。絶対位置情報については、屋外であればGPS（Global Positioning System、全地球測位システム）を用いて位置を測定できる。しかしながら、多連結移動ロボットの活躍が見込まれる狭隘空間は屋内または周囲を障害物で囲まれている遮蔽空間であるため、GPSによる位置の正確な測位を行うことができない。絶対位置の推定手法としては、車輪の回転角度に基づくオドメトリ情報や拡張カルマンフィルタを用いて推定する手法が提案されているが、誤差が累積されていくため推定精度は十分とは言えない。特に、車輪の滑りが頻発する不整地環境では精度が著しく落ちることが予見されるほか、落下や転倒といったロボットの不連続な移動が生じた際にその移動量を推定することができない。一方、移動ロボットの絶対位置の推定手法としては近年、SLAM（Simultaneous Localization and Mapping）と呼ばれる自己位置推定と環境地図作成を同時に行う手法がよく用いられる。この手法では、カメラやレーザー測域センサから得られる情報を用いて周囲環境の地図と自己位置の推定が行われる。しかしながら、どちらを用いた場合も計算コストが大きいことから計算能力の高いコンピュータをロボットに搭載しなければならず、細長く積載スペースが小さい多連結移動ロボットへの適用は難しい。さらに、取り組む本研究課題において解決すべき課題である「障害物に引っ掛かって

動作不能となった状態からの復帰」については、動作不能すなわち移動できない状態が想定されており、ロボットはほぼ停止した状態が対象となる。そのため、提案する制御アルゴリズムでは絶対位置を必要としない。以上より、絶対位置の取得は行わないこととした。

視覚情報はカメラ映像に代表される視覚的な情報である。ロボットが移動する空間は狭隘であることを想定すると、ロボットと周囲の障害物までの距離は極めて近いことが予想される。一般的なカメラは視野角が狭く、前述のように障害物までの距離が近いような状況では周囲の情報を十分に得ることが難しい。よって、視野角が広いカメラが適切であると言える。そこで、魚眼レンズを搭載した魚眼カメラを用いることにした。次に、カメラの配置と個数について検討を行った。多連結移動ロボットは多数の関節で直列に連結された細長い胴体を持ち、主に胴体長さ方向に移動を行う。胴体長さ方向に移動を行う際には前進と後退の2つの動作が行われ、先頭だけでなく最後尾を基準とした動作指示や制御が行われることになる。遠隔操縦の際には、動作指示を行うべき先頭、最後尾のそれぞれの周辺情報を取得する必要がある。カメラ数を最小にすることを想定すると、カメラを1つのみ先頭または最後尾に配置する案が考えられる。例えば先頭のみカメラを取り付けた場合、最後尾の情報を取得するためには胴体部の関節を適切に動作させて先頭カメラを最後尾に向ける必要がある。周囲に障害物のない開放空間であればこの方法で十分な情報を得られるが、多連結移動ロボットが進入可能な狭隘空間はロボット胴体の周辺に障害物が存在するため、障害物によってカメラの視界が遮られてしまう。よって、先頭と最後尾、すなわち多連結移動ロボットの両端に視覚情報取得用のカメラを配置することにした。操縦者は遠隔操縦時にはほとんどの場合カメラ映像を見て操縦を行うため、カメラ情報の描画については見やすさを重視し、ロボットの体形情報などとは独立した描画スペースを確保することにした。

距離情報は、周囲の構造物や障害物とロボットとの間の距離の情報である。カメラ映像から対象物までの距離を正確に読み取ることは難しいため、操縦者がより正確に周囲との相対関係を把握するためには距離情報は有効であると言える。距離を測定するセンサは赤外線距離センサや超音波センサなど多岐にわたる。大型のセンサとしてはレーザー測域センサがあり、2次元平面または3次元空間における周囲の障害物までの距離の点群を測定できる。しかしながら、多連結移動ロボットは細長く小型であるため積載スペースが小さく、大型のセンサの搭載には適さない。よって、必要に応じて小型の赤外線距離センサを胴体各所に配置することとした。赤外線距離センサは小型で搭載が簡単な反面、センサから障害物上の1点までの距離情報しか得ることができない。この点をそのままインタフェースに描画すると、空間上の1点のみが描画されることになり、操縦者は障害物の情報を認識しづらい。そこで、障害物を平面と仮定し、センサ値から取得された距離情報に基づきある程度の大きさをもった平面を描画することとした。

力覚情報は、ロボットと障害物との間に生じた接触とその力の大きさに関する情報である。ロボットがスタックし動作不能になった場合、胴体の一部と周囲環境との間に必ず接触が生じているため、力覚情報はスタック個所を特定する際には大変重要な情報となると考えられる。よって、力覚情報を取得するためのセンサを多連結移動ロボットの胴体の様々な場所に配置し、周囲環境との接触の検知を行うこととした。なお、実ロボットにおけるセンサ配置については次年度検討を行うため、本年度は力覚情報に関する描画機能の開発は行わなかった。

ロボットのステータス情報は、ロボットの内部状態を表す情報である。周囲環境の情報だけでなくロボットの内部状態についても適切に表現しなければ、操縦者は誤った認識や操作を行って

しまう。例えば、関節部のアクチュエータが過負荷によるエラーで停止しているにも関わらず動作を続けると、全体の制御がうまくいかず、ロボットは所望の方向へ移動することができない。過負荷によるエラーが生じていることを操縦者が認識できれば、操縦者がロボットに復帰コマンドを送信することで該当のアクチュエータはエラー状態から復帰できる。よって、ロボットの各種ステータス情報を描画インターフェースにて提示することとした。具体的に表示するステータス情報は、ロボットを構成するアクチュエータの各種エラー（過負荷、温度、通信断絶など）や制御モード、制御パラメータとした。

以上の検討内容を考慮し、文献[3.1-1]のインターフェースをベースに描画インターフェースを開発した。開発したインターフェースに対しては既存ロボットである T2 Snake-3[3.1-2]を用いて確認を行った。このロボットはヨー回転関節とピッチ回転関節とが交互に連結され、ピッチ関節と同軸上に車輪が配置されている。胴体底面部には距離センサが取り付けられており、地面までの距離を測定できる。開発した描画インターフェースを図 3.1-1 に示す。描画インターフェースの左上には先頭カメラ映像、左下には最後尾カメラ映像が描画されている。右側にはロボットの姿勢が描画されており、距離センサ情報に基づく環境面がオレンジの斜線領域として表現されている。右上にはロボットの各種ステータスや各種エラー情報が描画されている。また、多連結移動ロボットの現在の制御モードが中央下部に大きく表示されているが、これは操縦者による制御モードの設定ミスを防ぐための工夫である。

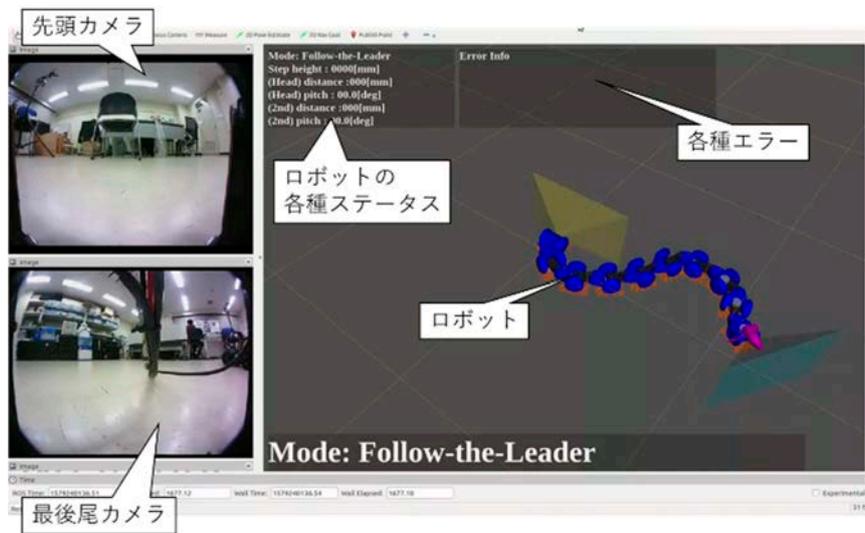


図 3.1-1 描画インターフェース

T2 Snake-3 は、ピッチ回転関節とヨー回転関節をうまく利用することでロボット全体を体軸周りに回転させる捻転動作を行うことができる。ロボットが捻転動作を行っている際の実ロボットと描画インターフェースの様子を図 3.1-2 に示す。IMU から得られる絶対姿勢情報を反映することにより、捻転時のロボット全身の姿勢が正確に描画できていることがわかる。

以上のように、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、ロボットのステータス情報が描画されていることを確認できた。

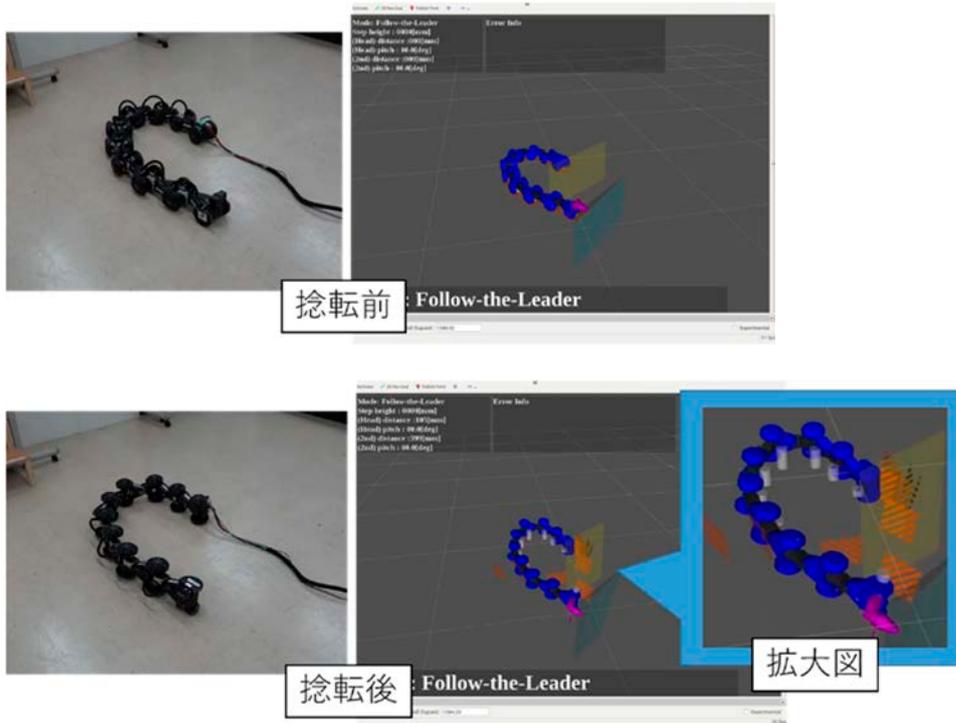


図 3.1-2 捻転時のロボットと描画インターフェース

参考文献

- [3.1-1] 福村信之介, 田中基康, 田中一男, 松野文俊: 多連結移動ロボットのための3次元局所体形変化システム, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2019, 2A2-E04, 2019.
- [3.1-2] Motoyasu Tanaka, Mizuki Nakajima, Yosuke Suzuki, and Kazuo Tanaka: Development and Control of Articulated Mobile Robot for Climbing Steep Stairs, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol.23, issue 2, pp.531-541, 2018.

3.2 動作不能からの復帰を可能とする制御

3.2.1 操縦者による手動操作で行う制御方法

本項目は、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。本年度は、操縦者による手動操作によって多連結移動ロボットが動作不能から復帰するための制御手法の提案を目的とした。この手法では、関節数や接地点変化に起因し生じるシステムの冗長性を巧みに利用し、ロボット全体の体形の維持や転倒回避を考慮しながらスタック部を障害物から離脱させる。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。

まず、制御にて達成すべき動作の検討を行った。スタックからの復帰のために行うべき最大の目標は、スタック原因部分と障害物との接触を解消すること、である。例えば、障害物との接触が原因でスタックが生じている場合、該当部近傍のみの関節を動作させると後続部にねじれが生じてしまう。その結果、転倒や新たなスタックの原因になるような障害物との引っ掛かりが生じる可能性がある。よって、これらは回避すべきであると言える。以上より、制御にて達成すべき動作は、下記のように設定した。

- ・（目標 1）「スタック部を障害物から遠ざける」：スタック部分近傍の姿勢を変化させ、引っ掛かりを解消

- ・（目標 2）「後続部の姿勢の維持」：上記以外の部分は初期状態をできる限り保持することで、胴体のねじれ等の問題を防止

ロボットに上記を解決するような動作を行わせることでスタック状態から賢く復帰させることを目指す。なお、「後続部」とは、スタック回避のために体形変化させる部分よりも最後尾側に位置している胴体部分であるとする。

制御設計を行う上で想定する状況についてまとめる。スタック状態であるため、先頭の位置を含めたロボット全体が動作を停止した状態を初期状態とする。多連結移動ロボットを遠隔操縦する際にはロボット先頭に対して動作指示を行うことがほとんどであるため、スタック状態から復帰した後の操縦性を考慮し、スタック復帰動作時の先頭の位置は固定したままになるようにする。

まずは目標 1 を達成するための制御について述べる。制御設計を行う上で、多連結移動ロボットを多リンクマニピュレータとみなしてモデル化を行った。体形変化させる部分（以後、「体形変化部」と呼ぶ）の先頭側の端部を基準点として設定し、体形変化部の最後尾側の端部を制御点とした。目標 1 を達成するためにはロボットの胴体を障害物から遠ざける必要があるが、例えば体形変化部が直線であった場合、基準点および制御点の位置を固定したままロボットの胴体を障害物から遠ざけることができない。障害物から胴体を遠ざけるためには、制御点をロボット先頭側に移動させる必要が生じる。そこで、制御点を 1 つ先頭側の胴体部の位置まで移動させる。これにより、体形変化部が直線であってもロボットの胴体を障害物から遠ざけることができる。

以上を考慮すると、対象の運動学モデルは次式で表現できる。

$$\dot{\boldsymbol{w}}_e = \boldsymbol{J}_v \dot{\boldsymbol{\theta}}$$

ここで、 \boldsymbol{w}_e は制御点の位置姿勢を並べたベクトル、 $\boldsymbol{\theta}$ は体形変化部の関節の相対角度を並べたベクトルである。この式は一般的な冗長マニピュレータと同じ運動学モデルとなっている。本研究では、この式を制御対象の数式モデルとして用いることとした。

前述の数式モデルに基づき、制御入力を次式のように設計した。

$$\dot{\theta} = J_v^\dagger \{ \dot{w}_{\text{ref}} - K (w_e - w_{\text{ref}}) \} + (I - J_v^\dagger J_v) \alpha \eta$$

ここで、 J_v^\dagger は J_v の疑似逆行列、 w_{ref} は制御点の目標値、 K はフィードバックゲインを表す正定対角行列、 α は冗長性に関するゲインを表す負の定数、 η は任意のベクトルである。制御入力 of the right side first term is the component related to the trajectory tracking of the control point, and the second term is the component caused by redundancy. By substituting the control input into the mathematical model of the object, the closed-loop system equation can be derived. If J_v is full rank, the closed-loop system of the system is a first-order system.

$$\dot{w}_c - \dot{w}_{\text{ref}} + K (w_c - w_{\text{ref}}) = 0$$

よって、制御点の位置姿勢 w_e が目標値 w_{ref} に収束する。 J_v がフルランクでない場合は、制御点が目標値に収束しない。このような場合のロボットの姿勢は特異姿勢と呼ばれる。制御点を目標値に収束させるためには、ロボットが特異姿勢にならないよう注意する必要がある。

制御入力の右辺第二項である冗長性に起因する成分は、制御点の目標値への軌道追従に一切影響を与えないことが知られている。このような性質は冗長性を有するシステム特有のものである。この成分を用いることで制御点の制御以外のサブタスクの達成に貢献できる。本研究では、サブタスクとして下記の3つを設定する。

- ・サブタスク 1：体形目標点への接近
- ・サブタスク 2：特異姿勢回避
- ・サブタスク 3：関節角度減少

サブタスク 1 については、目標 1 の達成を目指すためのものである。スタック部を指定し障害物から離れる方向に移動させるのではなく、体形変化部が目指すべき目標点を設定し、その点に向かって体形変化部の姿勢を変化させることで目標 1 の達成を目指す。仮に、回避対象として障害物位置を指定し体形変化部がそこから離れるように制御した場合、「体形変化部が障害物を避けるために移動していく方向」を操縦者が認識しづらいという問題が生じる。これに対し、体形変化部の目標点である体形目標点を設定してそこに近づくように制御を行う場合、体形変化後の体形変化部の姿勢をある程度予測できるため、操縦者にとって操縦しやすいシステムとなることが期待できる。サブタスク 2 は特異姿勢回避である。前述のようにロボットが特異姿勢となると制御点の目標値への収束が保証されない。よって、サブタスク 2 として特異姿勢を回避することにより、制御点の目標値への収束を保証する。サブタスク 3 は関節角度の減少化である。関節にはハードウェアに起因する限界角度（可動限界角）が存在するため、動作中に関節角度が大きくなりすぎると可動限界角を超過し所望の動作を行えなくなる。そこで、サブタスク 3 として関節角度を減少化することにより、可動限界角の超過を抑制する。

以上のサブタスクを考慮し、評価関数 V を次式のように設定する。

$$V = a_{\text{target}} V_{\text{target}} + a_{\text{singular}} V_{\text{singular}} + a_{\text{joint}} V_{\text{joint}}$$

ここで、 V_{target} 、 V_{singular} 、 V_{joint} はそれぞれサブタスク 1、2、3 に関する評価関数であり、 a_{target} 、 a_{singular} 、 a_{joint} はそれぞれ重みを表す正の定数である。制御入力における冗長性に起因する成分を利用し、 V の減少化を行うことでサブタスクの達成に貢献する。具体的には、任意ベクトル η を

$$\eta = \frac{\partial V}{\partial \theta}$$

のように与えることで、評価関数の減少化に貢献できることが知られている（文献[3.2-1]）。

サブタスク 1 に関する V_{target} は、次式のように設計した。

$$V_{\text{target}} = d^2$$

ここで、 d は体形変化部の中間点と体形目標点との間の距離である。 V_{target} を減少化することによって d が減少化され、体形変化部が体形目標点に近づく。

サブタスク 2 に関する V_{singular} は、次式のように設計した。

$$V_{\text{singular}} = \frac{1}{\det(\mathbf{J}_v \mathbf{J}_v^T)}$$

ここで、 $\det(\mathbf{J}_v \mathbf{J}_v^T)$ はロボットが特異姿勢になると 0 となる。 V_{singular} を減少化すると $\det(\mathbf{J}_v \mathbf{J}_v^T)$ が増大化されるため、特異姿勢の回避に貢献できる。

サブタスク 3 に関する V_{joint} は、次式のように設計した。

$$V_{\text{joint}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f(\theta_{\text{lim}}, |\theta_i|)$$

ここで、 n は体形変化部の関節数、 θ_{lim} は閾値を表す正の定数、 f は下記の関数である。

$$f(x, y) = \begin{cases} (y - x)^3 & (\text{if } x < y) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases}$$

V_{joint} を減少化することにより、各関節角度の減少化が期待できる。

以上のように、前述の制御入力を用いることにより、制御点の目標値への収束とサブタスクの達成が期待され、目標 1 が達成できると考えられる。

次に、目標 2 である「後続部の姿勢の維持」を実現するための目標について検討を行った。前述の制御入力にて設定した制御点は、体形変化部と後続部の間に存在する。これは、後続部の姿勢は後続部の関節角だけでなく、制御点の位置姿勢に大きく影響されることを意味する。以上より、目標 2 を達成するためには制御点と後続部の関節角の両方の動作を適切に設計する必要がある。

後続部の関節角については、シフト制御（文献[3.2-2]）を用いて決定することとした。これは前方の動作を後方にシフトしていく制御方式であり、多連結移動ロボットの 3 次元操舵を行う際に基本となる方法である。この方法では、連続曲線を用いてロボットの目標経路を設計し、ロボットの胴体を目標経路にフィッティングすることで目標関節角や目標車輪速度を得ることができるといえる。あとは、後続部のシフト制御の起点となる制御点を適切に動作することができれば、後続部の体形を維持できる。以上より、後続部のシフト制御に適合するような制御点の目標軌道の設計を行った。体形変化制御の初期状態における制御点と最終目標点の間の経路としては、幾何学関係を考慮し、制御点と最終目標点の間に存在するヨー関節位置（「中間点」と呼ぶ）を経由するように位置目標を設計した。そして、幾何学関係を考慮し中間点での姿勢を適切な値とすることにより、後続部の姿勢に影響を与えないようにした。以上により、目標 2 の達成が見込まれる。

制御手法の有効性の検証に先立ち、ロボットに生じるスタックについて接触部位とスタック条件に着目して分類を行った。分類結果を図 3.2-1 に示す。分類を行う際には簡単化のため、多連

結移動ロボットの構造を簡略化している。障害物はロボットから与える力によって移動しないものとした。スタックには幾何学的条件により動作不能となるスタックと、力学的条件により動作不能となるスタックの2種類が考えられる。幾何学的なスタックとは、障害物が存在することでロボットの移動が阻まれ、ロボットが大きな推進力を生じたとしても障害物が動かない限りは前進が不可能となるスタックである。これに対して力学的なスタックでは、障害物に起因する摩擦力とロボットの推進力との関係に依存してスタックするかどうかが決まる。力学的なスタックの場合、推進力が十分に大きければ動作不能とはならず前進を続けることが可能である。スタック1、3は幾何学的、スタック2、4、5は力学的なスタックである。

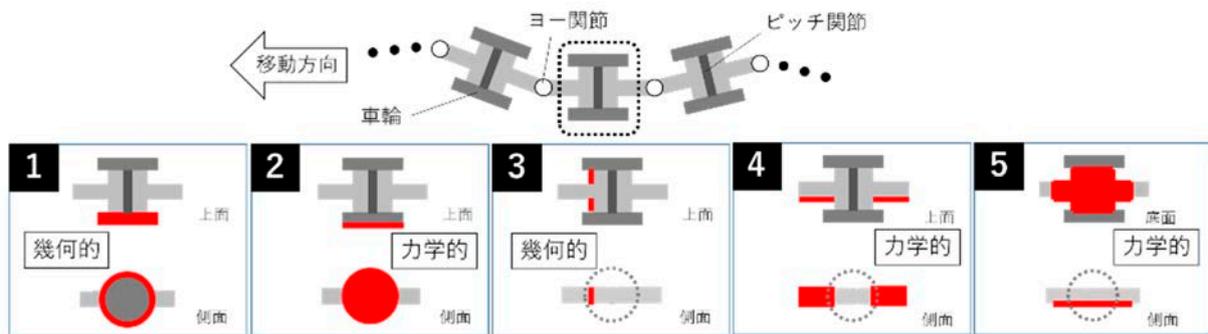


図 3. 2-1 スタックの分類

最後に、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。スタック条件としては、幾何学的なスタックの代表としてスタック 1、力学的なスタックの代表としてスタック 5 を対象とした。対象のロボットは既存ロボットである T2 Snake-3 とし、シミュレーションには物理シミュレータ V-rep を用いた。図 3. 2-2 にスタック 1 のシミュレーション結果を示す。図 3. 2-2(a) に示すように、ロボットの初期状態は平板状の障害物が車輪と車輪の間に挟まったスタック 1 の状態となっており、ロボットが前進しようとしても車輪が障害物に衝突してしまい、移動することができない。このような状況から提案制御手法を用いることにより、スタック部が障害物から遠ざかっていることがわかる。図 3. 2-2(b) に示すように、制御点の位置姿勢はすべて目標値に追従しているほか、図 3. 2-2(c) に示すように体形変化部の中間点と体形目標点との距離 d が小さくなっている。また、ロボットの関節角度は可動範囲内に収まっており、特異姿勢にも収束しなかった。後続部についても、元の体形を維持するように変化していることがわかる。

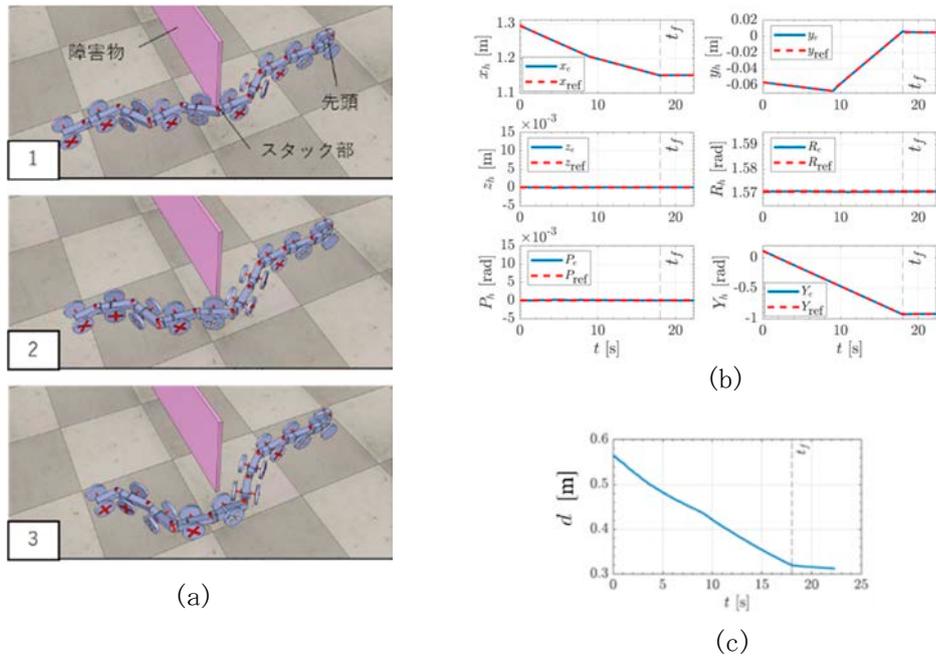


図 3.2-2 スタック 1 のシミュレーション結果

図 3.2-3 にスタック 5 のシミュレーション結果を示す。図 3.2-3(a) に示すように、ロボットは段差を上っている途中で関節部底面が段差の縁に接触し、その部分に大きな摩擦力がかかることで推進力よりも摩擦力が大きくなった状態、すなわち力学的なスタック状態であるスタック 5 となっている。このような状況に対しても提案制御手法を用いることにより、スタック部を段差の縁から遠ざけることができた。図 3.2-3(b) のように、制御点は目標値に収束しているほか、図 3.2-3(c) のように d が小さくなっている。ロボットは特異姿勢にはならず、関節角度も可動範囲に収まった。さらに、後続部は元の体形を維持するように変化した。図 3.2-4 に示すように、実機実験でも同様の結果が得られた。

以上のように、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。

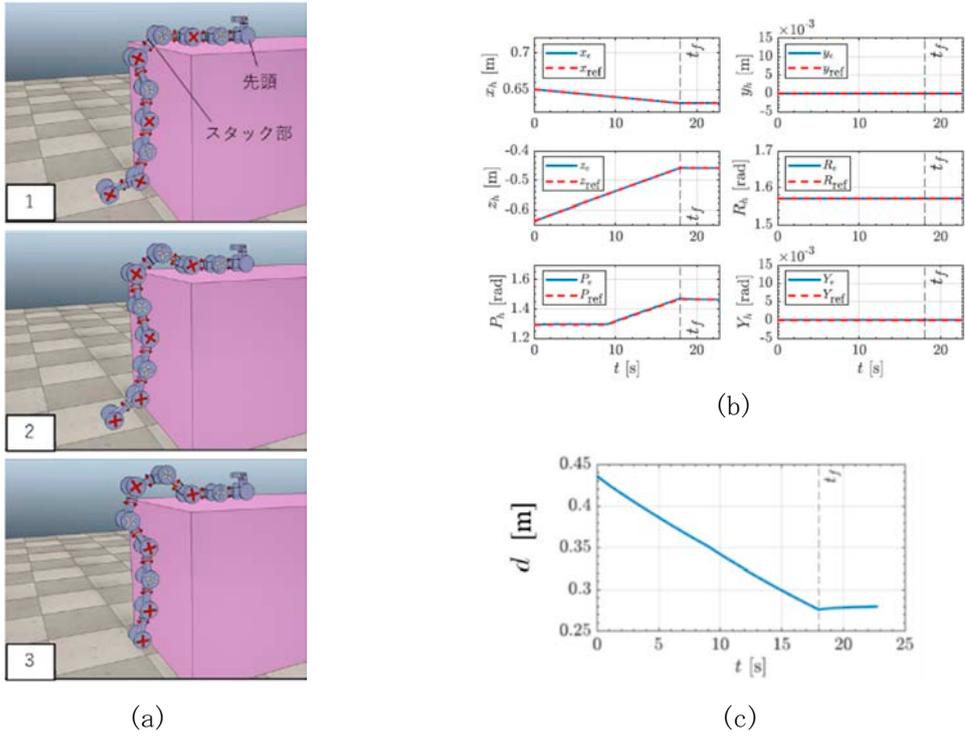


図 3.2-3 スタック 5 のシミュレーション結果

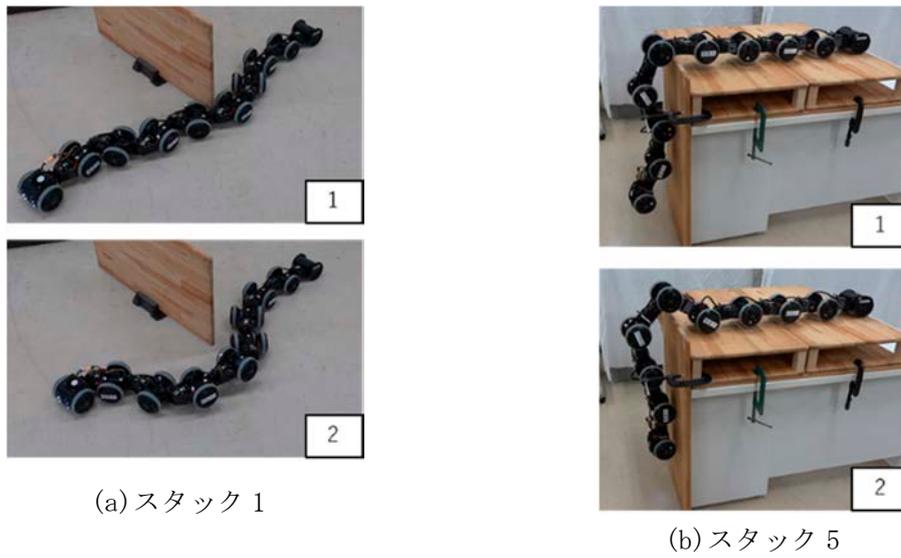


図 3.2-4 実験結果

参考文献

[3.2-1] Yoshihiko Nakamura, Hideo Hanafusa, and Tsuneo Yoshikawa: Task-Priority Based Redundancy Control of Robot Manipulators, The International Journal of Robotics Research, vol.6, no.2, pp.3-15, 1987.

[3.2-2] Motoyasu Tanaka, Mizuki Nakajima, Yosuke Suzuki, and Kazuo Tanaka: Development and Control of Articulated Mobile Robot for Climbing Steep Stairs, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol.23, issue 2, pp.531-541, 2018.

3.3 操作インタフェース開発

本項目は、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。本年度は、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行うことを目的とした。操縦者用コンピュータの画面にロボットの前進と周囲環境の情報を表示させ、提案制御手法の各種指示を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 RS Toolboxを用いて行った。

前述の制御手法では、体形変化部（基準点と制御点）、体形目標点、各種ゲインを設定する必要がある。ゲインは事前に設定できるが、体形変化部と体形目標点はスタック状況に応じて操縦者が指示しなければならない。また、指示の際にはロボットが転倒しないように注意すべきである。通常時には多連結移動ロボットの操舵は操縦者がゲームパッドを用いて行うが、ゲームパッドには限られた数のボタンとアナログスティックしかないため、前述の設定をゲームパッドで行うことは現実的ではない。そこで、PCのディスプレイ上にロボットを描画し、描画されたロボット上の所望の点をマウス等でクリックすることで指示を行うことにした。開発したインタフェースは文献 [3.3-1]をベースとしており、最新版の制御手法に対応するように改良を行った。操作インタフェースでは、制御手法の指示としてロボットにおける体形変化部（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、開発インタフェースを用いて前述の制御の各種指示が可能であることを確認した。シミュレーション結果の一例は図 3.2-2、3.2-3 に示したとおりである。現状の操作インタフェースの見目は従来のものと変わっていないが、制御の算出した内部情報（転倒に関する接地多角形と重心との距離）を受信できるようにカスタマイズが行われている。受信した情報の操作インタフェース上への配置については、次年度に対応予定である。

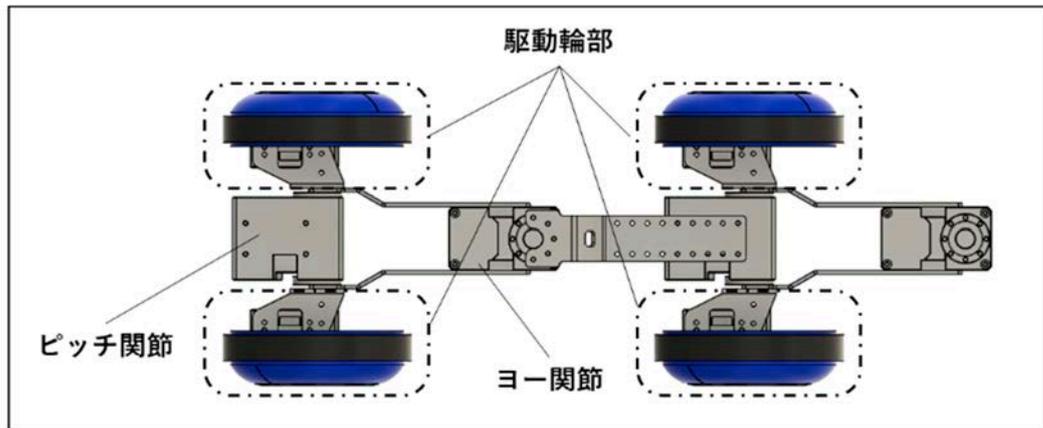
参考文献

[3.3-1] 福村信之介, 田中基康, 田中一男, 松野文俊: 多連結移動ロボットのための3次元局所体形変化システム, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2019, 2A2-E04, 2019.

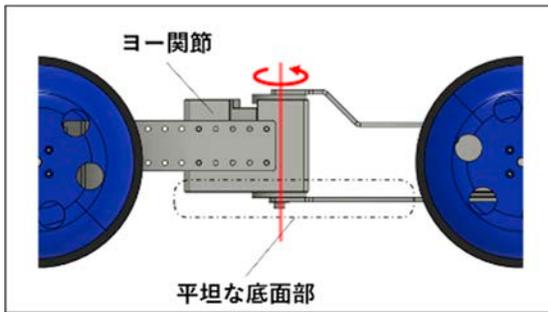
3.4 実機検証

本項目は、本研究で開発するインタフェースと提案する制御手法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。本年度は、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行うことを目的とした。研究者らが開発してきた多連結移動ロボット T2 Snake-3 および T2 Snake-4 をベースとし、開発を行った。

まず、基本部分の設計を行った。図 3.4-1 に設計した機体の CAD 図を示す。なお、締結関連パーツ(ねじ等)は省略してある。



(a) 上面図



(b) 側面図



(c) 駆動輪部

図 3.4-1 開発機 CAD 図

関節構成は T2 Snake-3、 T2 Snake-4 と同じく、ヨー回転関節とピッチ回転関節を交互に連結し、ピッチ回転関節と同軸上に 1 対の駆動輪を配置した。ピッチ、ヨー関節部と駆動輪部は独立的に設計されており、各部の設計変更が他の部分に大きく影響しないよう配慮した。これにより、今後実環境での検証を通じて修正の必要が生じた場合でも、容易に設計変更が可能である。また、各関節を連結するパーツは強度に優れたステンレス素材を採用した。これにより、環境とのスタックや落下等のアクシデントによるロボット損傷の危険性を減じている。

関節部分では、図 3.4-1 (b) のようにヨー関節をロボット上方にオフセットして取り付けられるように設計した。オフセット方向と関節軸が平行であるため、制御モデルに変化がなく制御則で利用するパラメータに直接的な影響を与えない。これにより、ロボット底面部分と環境との距離が大きくなり、不整地などの凹凸のある環境で推進するときスタックが発生しにくくなる。また、ロボット底面部へのセンサ取り付けを考慮し、ロボット底部が平坦になるようにオフセット量を調整した。これにより、ロボット底面部分にセンサを搭載しやすくなる。また、センサの取

り付けが簡便になることで、使用するセンサの変更が発生した場合でも設計変更が容易である。

駆動輪部は図 3.4-1(c)のように、駆動用アクチュエータの一部を駆動輪が覆う構造となっている。車輪半径と車輪の配置幅(トレッド幅)は暫定的に T2 Snake-3 と同等としており、同程度の狭所進入が可能である。前述のとおり、駆動輪部は独立的に設計されているため、必要に応じて車輪半径やトレッド幅を変更することが可能である。また、駆動用アクチュエータを変更することで速度や駆動トルクも変更可能である。

リンク長は T2 Snake-3 よりも増加することでセンサ搭載スペースを確保するとともに、大きな関節可動域を確保した。T2 Snake-3 ではヨー関節の可動域は 60 度程度であったが、開発機では 90 度程度まで屈曲が可能である。これにより、スタックからの復帰動作に大きな関節可動域が必要な場合であっても対応が可能となる。また、各関節を連結するパーツの取り付け位置を変更することでリンク長は設計変更なく 5 段階で変化可能な構成となっている。必要な関節可動域やセンサ搭載スペースに応じて適したリンク長を選択可能である。リンク長が最も長い場合でヨー関節の可動域が 90 度程度、最も短い場合で 60 度程度となる。

関節用アクチュエータは 12 bit の ADC を 3 つずつ搭載しており、多数のセンサ値を取得可能である。また、必要に応じて追加のマイコンを搭載することでより多くのセンサを取得することが可能である。試作ロボットを 2 つ連結したものを図 3.4-2 に示す。図 3.4-2 で使用されている関節用アクチュエータは 4 つであり、計 12 個のセンサが搭載可能である。

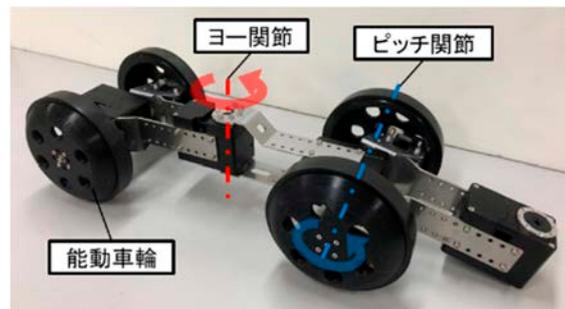


図 3.4-2 試作機

次に、次年度以降に搭載するセンサの検討を行った。ロボットと障害物との間の接触をセンサによって検知できれば、スタック箇所の特定に大いに役立つ情報が得られると言える。そこで、圧力を測定するセンサである接触センサ FSR402 を選定した。このセンサは検出エリアに加わった力に応じて出力が変化するため、センサ出力から環境との衝突が検出可能である。小型かつ薄型(感圧部直径 20 mm、厚さ 1 mm 程度)でロボット搭載が容易であるほか、柔軟素材のため局面部への取り付けが可能である、という特徴をもつ。また単純な構造のため、ひずみゲージのような他の力センサと比べて破損の危険性が低く扱いやすい。また、このセンサはアナログ出力のセンサであり、取得できる接触力の分解能は使用する ADC とセンサと直列で接続する抵抗値によって調整可能である。分解能は次年度以降、ロボットに搭載した状態で環境と接触した際に発生する接触力から試行錯誤的に調整することで決定する。搭載数、搭載箇所は前述したスタックの分類をもとに決定するものとする。

3.5 研究推進

本研究を推進するに当たり、令和2年2月10日にCLADSの遠隔分析技術開発グループの担当者と打ち合わせを行い、進捗状況を報告するとともに今後の展開について議論を行った。

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)では描画インタフェースを開発したほか、開発したインタ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。(2)では操縦者による手動操作で行う制御手法を提案し、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。条件としては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。(3)では操作インタフェースを開発し、開発インタ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。(4)で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行った。(5)では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。

国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質량	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比体積	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 ^(a) , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率 ^(b)	(数字の)	1
比透磁率 ^(b)	(数字の)	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(e)	1 ^(b)	m ² /m ²
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m kg s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m ² kg s ⁻²
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ² kg ⁻¹ s ⁴ A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻²
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m ² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	m ² kg s ⁻² A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² kg s ⁻² A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光照射度	ルーメン	lm	cd sr ^(e)	cd
放射線量	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	m ² s ⁻²
酸素活性化	カタール	kat		s ⁻¹ mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
 (b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。
 (c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
 (f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
 (g) 単位シーベルト (PV, 2002, 70, 205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
表面張力	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
角加速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角加減	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ = s ⁻¹
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² = s ⁻²
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電荷密度	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電表面電荷	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
誘電率	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m ³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
吸収線量率	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
放射線強度	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射輝度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ m ⁻² kg s ⁻³ = m ² kg s ⁻³
酵素活性濃度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² sr)	m ² m ⁻² kg s ⁻³ = kg s ⁻³
	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ³ s ⁻¹ mol

表5. SI 接頭語

乗数	名称	記号	乗数	名称	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI単位による値
分	min	1 min=60 s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10 800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648 000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1 L=1 l=1 dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ kg

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI単位で表される数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852m
バイン	b	1 b=100fm ² =(10 ¹² cm ²) ² =10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的関係は、 対数量の定義に依存。
ベレル	B	
デシベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI単位で表される数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s
ストークス	St	1 St=1cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻²
フオト	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² =10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(a)	Oe	1 Oe≅(10 ³ /4π)A m ⁻¹

(a) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「≅」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1 フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1 メートル系カラット=0.2 g=2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリ	cal	1 cal=4.1858J (「15°C」カロリ), 4.1868J (「IT」カロリ), 4.184J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ=1μm=10 ⁻⁶ m

