

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
(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—

Development of Semantic Survey Map Building System using Semi-autonomous Mobile
Robots for Surveying of Disaster Area and Gathering of Information
in Nuclear Power Station
(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
東京工芸大学

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

January 2021

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, 2021

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
(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

東京工芸大学

(2020年11月19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、平成30年度に採択された「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」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。

本研究の目的は、災害時においてヒトの立ち入りが困難となった原子力発電所建屋内などの状況調査を対象に、簡単・安全・迅速に複数種類の情報 (空間線量、温度、障害物等) を含んだセマンティックサーベイマップを生成する半自律ロボットシステムの研究・開発 (カメラシステム、セマンティック SLAM、移動経路学習及び安全な経路提示システム) である。

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、東京工芸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

Development of Semantic Survey Map Building System using Semi-autonomous Mobile Robots for Surveying of Disaster Area and Gathering of Information in Nuclear Power Station
(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

Tokyo Polytechnic University

(Received November 19, 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 FY2018, this report summarizes the research results of the “Development of Semantic Survey Map Building System using Semi-autonomous Mobile Robots for Surveying of Disaster Area and Gathering of Information in Nuclear Power Station” conducted in FY2019.

The objective of the present study is to research and develop semi-autonomous mobile robot systems (multi-sensor fusion system, semantic simultaneous localization and mapping (SLAM), system for traversable-route learning and safe traversable-route presentation, etc.) that simply, safely, and rapidly make semantic survey maps including multiple information (air dose rate, temperature, obstacles, etc.). The system will be applied to the investigation of the situation inside the building of the nuclear power station where people cannot access at the time of disaster.

Keywords: Robot Teleoperation, Semi-autonomous Mobile Robot, Sensor Fusion, SLAM, Reinforcement Learning, Semantic Survey Map, Information Gathering, Disaster Area, Nuclear Power Station

This work was performed by Tokyo Polytechnic University 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	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）「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」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

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
(契約番号 31I037)

成果報告書

令和2年3月

学校法人東京工芸大学

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、学校法人東京工芸大学が実施した「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」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	iv
1. はじめに	1-1
2. 業務計画	2.1-1
2.1 全体計画	2.1-1
2.2 令和元年度の成果の目標および業務の実施方法	2.2-1
2.2.1 高精度サーベイマップ生成のためのセンサ統合による環境センシング	2.2-1
2.2.2 サーベイマップ生成のためのセマンティック SLAM	2.2-1
2.2.3 3次元セマンティックマップを用いたクローラロボットの経路強化学習と提示	2.2-1
2.2.4 研究推進	2.2-2
3. 令和元年度の実施内容および成果	3.1-1
3.1 高精度サーベイマップ生成のためのセンサ統合による環境センシング (再委託先：千葉工業大学)	3.1-1
3.1.1 環境特徴量の分布情報を取得可能な3次元測距システムの構築	3.1-1
3.1.2 既知サーベイ情報のオンサイトフィードバックによるセンシングの 高精度化アルゴリズムの構築	3.1-4
3.2 サーベイマップ生成のためのセマンティック SLAM (再委託先：中央大学)	3.2-1
3.2.1 局所セマンティックマップ生成	3.2-1
3.2.2 広域セマンティックマップ生成のための SLAM	3.2-3
3.3 3次元セマンティックマップを用いたクローラロボットの経路強化学習と提示	3.3-1
3.3.1 オペレータへの経路提示と実ロボット制御システムの開発	3.3-1
3.4 研究推進	3.4-1
4. 結言	4-1

表一覧

表 2-1 全体計画における研究開発年次スケジュール 2. 1-1

図一覧

図 1-1 本業務における提案システム全体イメージ 1-3

図 3-1 距離情報+温度情報の同時撮影システム 3. 1-1

図 3-2 近赤外線カメラ 3. 1-1

図 3-3 RGB-D カメラと近赤外線カメラの視野角の違いと近赤外線カメラの掃引の様子 3. 1-2

図 3-4 計測システムの概要 3. 1-3

図 3-5 構築した計測システム 3. 1-3

図 3-6 モックアップ階段 3. 1-4

図 3-7 簡易プール 3. 1-4

図 3-8 RGB-D カメラでの計測結果 3. 1-4

図 3-9 近赤外線情報の重畳結果 3. 1-4

図 3-10 計測した 5 視点 3. 1-5

図 3-11 5 視点の重畳結果 3. 1-5

図 3-12 局所 3 次元セマンティックマップの生成 3. 2-1

図 3-13 世界座標系とロボット座標系 3. 2-2

図 3-14 評価実験 3. 2-4

図 3-15 真のロボット軌跡を用いて生成した広域セマンティックマップ (俯瞰視点) 3. 2-4

図 3-16 実験結果 3. 2-5

図 3-17 H30 年度にて開発した実験用レスキューロボット 3. 3-1

図 3-18 ベルト幅の広いクローラベルトとアタッチメント 3. 3-1

図 3-19 新型ベルトを装着した実験用レスキューロボットの外観 3. 3-2

図 3-20 実ロボット外観 (H30 年度) 3. 3-2

図 3-21 ロボットモデル外観 3. 3-2

図 3-22 実ロボットのセンサ構成 3. 3-3

図 3-23 階段モックアップ 3. 3-3

図 3-24 環境俯瞰図 3. 3-3

図 3-25 計測風景 3. 3-3

図 3-26 局所セマンティックマップ 3. 3-4

図 3-27 初期位置 (図 3-25 と同アングル) 3. 3-4

図 3-28 局所セマンティックマップでの強化学習により得られた学習曲線 3. 3-5

図 3-29 学習した移動経路の提示例 3. 3-5

図 3-30 3 次元局所マップを取得した環境 3. 3-6

図 3-31 シミュレータ上の 3 次元局所マップ 3. 3-6

図 3-32 3 次元局所マップにおける強化学習で得られた学習曲線 3. 3-7

図 3-33	学習した移動経路	3.3-7
図 3-34	LiDAR を搭載した実験用レスキューロボット	3.3-8
図 3-35	実ロボットの移動結果の例	3.3-9
図 3-36	JAEA 櫛葉遠隔技術開発センターでの実験風景	3.4-1

略語一覧

LiDAR	: Light Detection and Ranging	(光検出測距センサ)
RGB-D	: RGB color model with Depth processing	(RGB カラーモデルと深度処理)
SLAM	: Simultaneous localization and mapping	(自己位置推定と環境地図生成を同時に行う手法)

概略

世界的に自然災害が多発し、とりわけ日本では 2011 年に未曾有の大災害に遭遇した。その災害では原子力災害まで影響がおよび、ヒトが立ち入ることが困難な被災した原子力発電所内の状況把握、情報収集が大きな課題となっている。福島第一原子力発電所の一件を契機に、それまで研究・開発されてきた災害対応ロボットシステムは非力であることが明らかとなった。近年では経験的技術的蓄積により廃炉作業に向けた実現可能性の高い機器・ロボットシステムの開発がなされている。一方、被災直後の初動体制においては迅速で確実な環境情報収集・状況把握が必要であり、ロボットによる探査の有用性が認められている。他方、ロボットの遠隔操作には熟練が必要である。それらの両立は難しく、初動体制において迅速で高精度、広範囲な情報収集を行うためのロボットシステムは、関係者の誰もが簡単に操縦可能である必要がある。しかし、とりわけ廃炉に向けた原子力発電所建屋内の移動ロボットによる探査では、遠隔操作の難しさが際立っており、いくつもの未帰還ロボットを生み出した。これは、ロボットに実装されたカメラによる視認性の悪さや、予測不可能な環境状況、非直観的な操作性等が原因であると考えられる。これらの課題を解決するために、以下のアプローチが必要不可欠である。

- ・ 障害物や水没、空間線量の高いエリアの迅速かつ正確な把握
- ・ 全体を俯瞰して見えるような環境上（地図）の取得
- ・ 非熟練者でも操作可能な探査ロボットシステムの開発

そこで、上述の課題に対して本業務では次にあげる 3 つの要素技術を開発・融合することで統合的システムを提案する。

- (a) 高精度サーベイマップ生成のためのセンサ統合による環境センシング
- (b) サーベイマップ生成のためのセマンティック SLAM (Simultaneous localization and mapping)
- (c) 3次元セマンティックマップを用いたクローラロボットの経路強化学習と提示

以上の 3 つのシステムを統合することで本研究の目的が達成される。遠隔操作により移動する災害対応ロボットは、まず搭載センサにより環境情報を取得し、その環境情報を持った仮想地図（セマンティックマップ）を生成し、移動可能な経路を学習する。学習結果である経路をオペレータに提示し、それを選択することで災害対応ロボットが学習結果を用いて実環境を走行する。計画した経路を走行し終わると、セマンティックマップが存在しないエリアとなるので、センサ情報の取得、マップ生成、学習による行動生成を繰り返す。その結果、複数の局所 3次元セマンティックマップが生成され、SLAM 技術により全体的な地図（サーベイマップ）として構成される。生成されたサーベイマップは遠隔操作オペレータが移動ロボットの帰路を計画することにも使用され、減災・廃炉等の意思決定機関へ提供、中長期的な戦略を立案するのに活用されることを想定している。

令和元年度において、上述の 3 つの要素技術は次の通り研究を実施する。「高精度サーベイマップ生成のためのセンサ統合による環境センシング」では、これまでに構築したセンシングシス

テムの改良を行う。実験場にはモックアップや不整地などが用意された模擬環境を選定し、実際の廃炉現場での活用を想定した検証実験を実施する。また、単一の視点から計測したデータから生成した既存のサーベイマップを参照し、オドメトリから得られる自己位置データや 3 次元点群位置合わせ手法を組み合わせることによって、新たな環境センシング結果を統合・補完するとともに高精度化する。これらの手法について、テストデータを用いることにより計算機上でアルゴリズム構築を完了させる。「サーベイマップ生成のためのセマンティック SLAM」では、LiDAR からの 3 次元点群データを用い、静止状態におけるロボット周囲の環境の形状情報に対する局所 3 次元マップを生成する手法を構築する。環境特徴量の分布情報を含む点群データを処理し、セマンティックマップを生成する技術の開発を完了させる。またロボットのオドメトリと IMU (inertia measurement unit) から測定される姿勢 (ロール、ピッチ、ヨー角) データを用い、3 次元空間内を移動するロボットの 6 自由度自己位置・姿勢推定を行う手法を確立する。探査環境における広域セマンティックマップを生成するため、推定されたロボットの 6 自由度位置・姿勢情報に基づき、ロボットの移動中に生成された複数の局所セマンティックマップを統合する手法を構築する。「3 次元セマンティックマップを用いたクローラロボットの経路強化学習と提示」では、これまでに開発した実験用クローラロボットを用いて、セマンティックマップで仮想的に学習した仮想ロボットの最適移動経路を実ロボットに組み込み、実環境内の自律移動を実現する。また、実環境での移動を想定した、制御システムの開発とクローラロボットの移動機能の改良も行う。セマンティックマップにより学習したロボットの移動経路は複数存在し、最終的な移動経路の判断はオペレータが行う。そのため、セマンティックマップにより学習した経路をオペレータに 3 次元地図を活用して提示する手法と、経路の選択インターフェースを構築する。選択された経路情報を実ロボットに転送するシステムも構築する。

令和元年度における研究の成果は次のとおりである。「高精度サーベイマップ生成のためのセンサ統合による環境センシング」では、平成 30 年度で構築したセンシングシステムの改良を行った。実験場にはモックアップや不整地などが用意された模擬環境を選定し、実際の廃炉現場での活用を想定した検証実験を実施した。具体的には、近赤外線カメラと RGB-D センサ、および 3 次元 LiDAR を備えた、ロボットに搭載可能な計測システムを構築した。実験では、各種センサの情報を統合することで近赤外情報を 3 次元的に提示可能であることを検証し、そのデータを用いて水源が視認可能であることを確認した。過去に作成した既存のサーベイマップを参照し、自己位置データなどを用いて既存情報からの差分を検出することにより、新たな環境センシング結果を補完し、高精度化した。テストデータを用いることにより、計算機上でアルゴリズム構築を完了した。オドメトリなどから得られる自己位置情報のみでは精度が不十分な場合に対し、3 次元点群位置合わせ手法である ICP (Iterative Closest Point) を用いることで、複数視点から計測した複数の計測データを精緻に統合し、視野を拡張する手法を構築した。得られた広範囲の 3 次元データに対して、距離ベースのフィルタや水平面に対し IMU を用いた傾斜フィルタを施すことで、距離センサの信頼度を考慮して高精度化を行った。「サーベイマップ生成のためのセマンティック SLAM」では、LiDAR からの 3 次元点群データを用い、静止状態におけるロボット周囲の環境の形状情報に対する局所 3 次元マップを生成する手法を構築した。環境特徴量の分布情報を含む点群データを処理し、セマンティックマップを生成する技術の開発を完了した。実際のロボットに搭載した LiDAR から得られた環境の形状情報を持つ 3 次元点群データを、平成 30 年度に構

築した八分木データ構造のマップに変換する処理を実現した。また、仮想的に模擬した熱源・水たまりの属性クラスを付与した 3 次元点群データから、局所 3 次元セマンティックマップの生成を可能にした。ロボットのオドメトリと IMU (inertia measurement unit) から測定される姿勢 (ロール、ピッチ、ヨー角) データを用い、3 次元空間内を移動するロボットの 6 自由度自己位置・姿勢推定を行う手法を確立した。探査環境における広域セマンティックマップを生成するため、推定されたロボットの 6 自由度位置・姿勢情報に基づき、ロボットの移動中に生成された複数の局所セマンティックマップを統合する手法を構築した。ロボットの 6 自由度の位置・姿勢推定に関しては、基礎的な 6 自由度の運動学を解いて実装した。この際、オドメトリによる誤差が発生するため、提案した環境の特徴量の分布情報を応用した ICP (iterative closest point) アルゴリズムを通じてロボットの位置・姿勢誤差を修正する手法を採用し、統合されたセマンティックマップの精度を向上させた。「3 次元セマンティックマップを用いたクローラロボットの経路強化学習と提示」では、平成 30 年度で開発した実験用クローラロボットを用いて、セマンティックマップで仮想的に学習した仮想ロボットの最適移動経路を実ロボットに組み込み、実環境内の自律移動を実現した。また、実環境での移動を想定した、制御システムの開発とクローラロボットの移動機能の改良も行った。セマンティックマップにより学習したロボットの移動経路は複数存在し、最終的な移動経路の判断はオペレータが行う。そのため、セマンティックマップにより学習した経路をオペレータに 3 次元地図を活用して提示する手法と、経路の選択インターフェースを構築した。選択された経路情報を実ロボットに転送するシステムも構築した。シミュレーション内の仮想ロボットと実クローラロボットが同機能となるように制御プログラムを調整して、学習結果を実ロボットに転送するシステムを開発し、学習結果に基づく実ロボットの自律移動を実現した。また、クローラロボットのクローラベルト幅の変更などによる移動性能向上を行った。シミュレーションによる仮想環境内の複数経路取得も実施し、シミュレータ上の 3 次元地図上での経路表示と移動経路の出力機能も開発した。オペレータがシミュレータから出力された移動経路を選択し、CSV 形式で保存された強化学習の方策を実ロボットへ転送するシステムを実現した。

令和 2 年度としては、これまでに得た成果を用いて全システムをシームレスに統合する。本研究の最終年度であるため、統合されたシステムをモックアップ施設や各大学の施設などを利用し評価実験を複数回行う。また、実験結果によるシステムの改善、最終実験などを実施する。

1. はじめに

本研究では、自然災害をはじめ原子力災害等の災害現場において、初動時の被害情報収集活動や原子炉建屋内の環境モニタリングを実施するための、広域サーベイマップ生成を行う半自律ロボットシステムを開発する。具体的には以下の3つの要素技術を開発し、それらはお互い結合されることを前提に問題設定され有機的に接続する。

(a) 色情報や形状だけでなく、環境中に存在する熱源や放射線源、水源、その他の物質の存在による特徴的なセンサ情報（以下、環境特徴量）を統合するカメラシステム

(b) 状況把握用建屋内サーベイマップ生成とロボットの移動経路学習のためのセマンティックSLAM

(c) SLAMにより生成された仮想環境地図を用いたロボットの移動経路学習と安全な経路提示システム

生成された広域サーベイマップは遠隔操作ロボットのオペレータが使用するだけでなく、減災・廃炉などをミッションとする意思決定機関へ提供されることを前提とし、復旧復興計画に役立てられることを想定している。

現在、我々は常に自然災害の危機にさらされ、とりわけ日本では2011年に未曾有の大災害に遭遇した。その災害では原子力災害まで影響がおよび、ヒトが立ち入ることが困難な被災した原子力発電所内の状況把握、情報収集が大きな課題となっている。福島第一原子力発電所の一件を契機に、それまで研究・開発されてきた災害対応ロボットシステムは非力であることが明らかとなった。近年では経験的技術的蓄積により廃炉作業に向けた実現可能性の高い機器・ロボットシステムの開発がなされている。一方、被災直後の初動体制においては迅速で確実な環境情報収集・状況把握が必要であり、ロボットによる探査の有用性が認められている。他方、ロボットの遠隔操作には熟練が必要である。それらの両立は難しく、いつ何時発生するか分からない災害に対して、ロボット遠隔操作の熟練者を各所に配置、被災時の生存の保証は難しい。そのため、初動体制において迅速で高精度、広範囲な情報収集を行うためのロボットシステムは、関係者の誰もが簡単に操縦可能である必要がある。これまで頑健な災害対応ロボット、遠隔操作性の向上等、様々な研究が行われてきた。しかしそれらのシステムは個別の仮説、前提条件、問題設定があり融合が難しく、いまだに実用化に至っていないのが現状である。とりわけ、廃炉に向けた原子力発電所建屋内の移動ロボットによる探査では、遠隔操作の難しさが際立っており、いくつもの未帰還ロボットを生み出した。これは、ロボットに実装されたカメラによる視認性の悪さや、予測不可能な環境状況、非直観的な操作性等が原因であると考えられる。これらの課題を解決するために、以下のアプローチが必要不可欠である。

- ・ 障害物や水没、空間線量の高いエリアの迅速かつ正確な把握
- ・ 全体を俯瞰して見えるような環境上（地図）の取得
- ・ 非熟練者でも操作可能な探査ロボットシステムの開発

これらの課題を解決できる探査ロボットシステムを開発し、全体的な被災・被害状況を把握することが減災や廃炉を迅速に進める鍵であると考えられる。そこで、上述の課題に対して本研究

では次にあげる技術を開発・融合することで統合的システムを提案する。

(a) 高精度サーベイマップ生成のためのセンサ統合による環境センシング

移動ロボットが原子炉建屋内の被害状況調査を行う場合、搭載されたサーモカメラやビデオスペクトルカメラ、LiDAR (light detection and ranging) などの複数種類のセンサ情報を取得・融合し、環境特徴量を抽出する。(図 1-1①)

(b) サーベイマップ生成のためのセマンティック SLAM

得られた環境特徴量が付与されたロボット周囲の局所 3 次元マップ (セマンティックマップ) を生成する。(図 1-1②)

(c) 3次元セマンティックマップを用いたクローラロボットの経路強化学習と提示 (図 1-1③)

セマンティックマップを 3 次元物理演算シミュレータの環境として設定し、仮想ロボットモデルが、どの経路で進むと安全かバックグラウンドで強化学習する。さらに、学習結果を進める経路として遠隔操作オペレータに提示され、オペレータは経路を指示するだけで、ロボットは自律的に進む (図 1-1④)。

以上の 3 つのシステムを統合することで本業務の目的が達成されると考えられる。また、本業務の提案システムにおいて緊急時はオペレータが直接遠隔操作可能なモードに切り替えられるようなシステム構成とする。本提案システムにおける災害対応ロボットは、計画した経路を走行し終わるとセマンティックマップが存在しないエリアとなるので、センサ情報の取得、マップ生成、学習による行動生成を繰り返す。その結果、複数の局所 3 次元セマンティックマップが生成されるため、SLAM 技術により全体的な地図 (サーベイマップ) として構成される。生成されたサーベイマップは遠隔操作オペレータが移動ロボットの帰路を計画することにも使用され、減災・廃炉等の意思決定機関へ提供、中長期的な戦略を立案するのに活用されることを想定している (図 1-1⑤)。

本研究はこれまで個別に研究されてきた環境特徴量抽出や SLAM による地図生成、強化学習による経路計画等の要素技術を、シームレスに接続し開発するところに先端的要素がある。本研究の要素技術であるサーモカメラやビデオスペクトルカメラによる環境特徴量のセンシング手法は SLAM による 3 次元地図生成に要求される情報を前提として開発され、SLAM により生成されるセマンティックマップは強化学習による経路計画のための仮想環境を前提として開発される。さらに移動ロボットにとって安全な経路を学習するシステムにおいては、SLAM による自己位置推定、複数カメラによる危険環境 (高温箇所や滑りやすい環境) を事前に把握し、実世界情報を用いた強化学習を行う。従来では想定環境やベンチマーク・トイプロブレムで検証されてきた要素技術を実問題に適応する革新的なシステム開発が本研究の特徴であり、本研究のような各要素技術がシームレスで有機的に接続された技術は革新性、独創性を有しており、さらには即座に災害現場への投入が可能となると考えられる。また、震災や原子力災害だけではなく、CBRNE (chemical, biological, radiological, nuclear, explosive) 災害やトンネル災害探査等にも使用することが可能である他にも、本研究の実用化に向けた狙いとしてシステムの低コスト化がある。これまで、被災地や原子炉内の探査用ロボット (レスキューロボットとも呼ばれる) は非常に高価であり、研究機関や一部の大学でしか所有ができない。本研究では製造単価を下げ、耐放射線性を除けばシステム全体の低コスト化を図ることも狙いである。

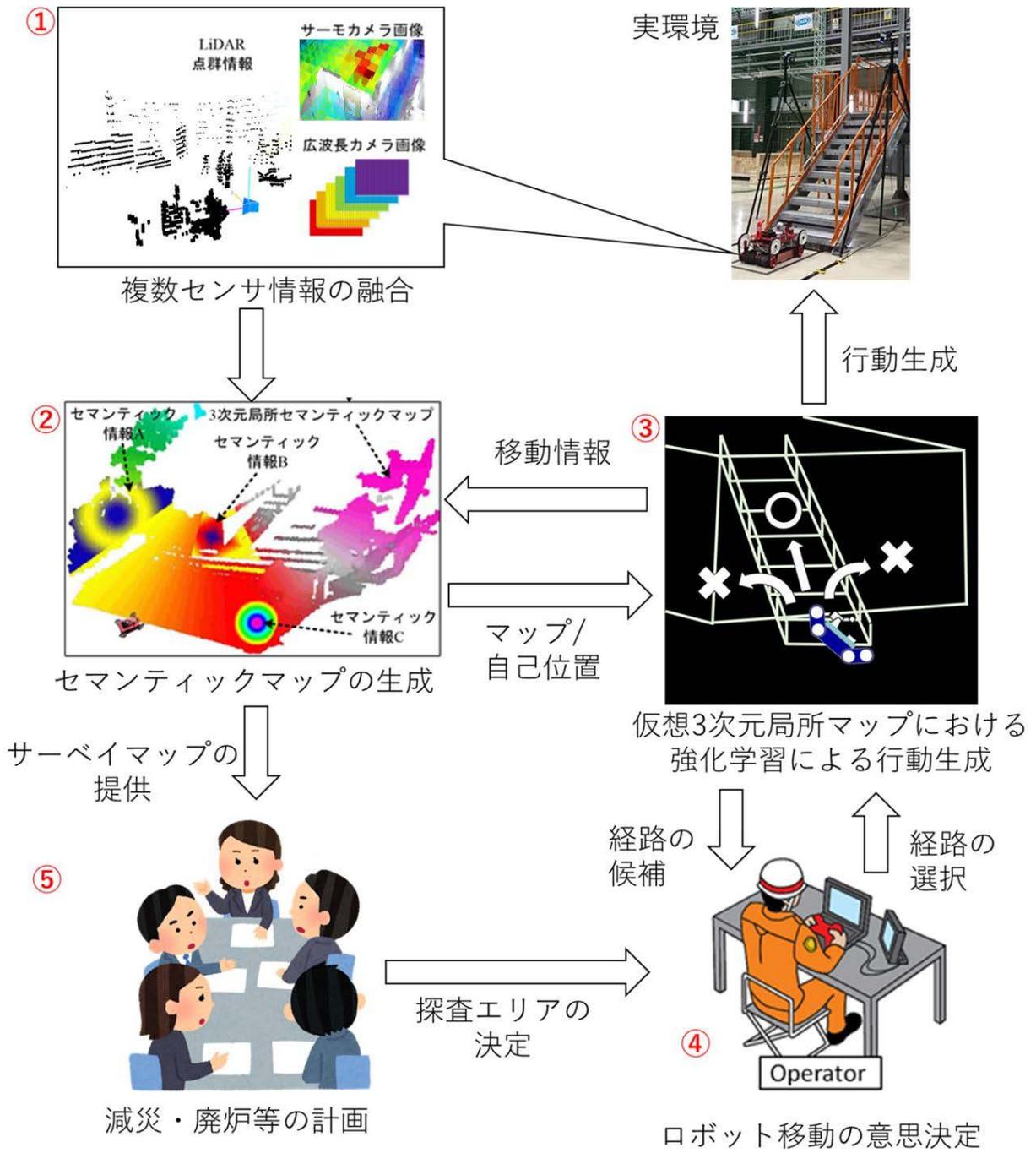


図 1-1 本業務における提案システム全体イメージ

2. 業務計画

2.1 全体計画

本研究にて提案しているシステムを実現するために、大きく分けて3つの要素技術研究開発に分割して研究を進める。「高精度サーベイマップ生成のためのセンサ統合による環境センシング」は千葉工業大学が担当して研究開発を行い、「サーベイマップ生成のためのセマンティック SLAM」は中央大学が担当する。最後に「3次元セマンティックマップを用いたクローラロボットの経路強化学習と提示」を東京工芸大学が担当する。平成 30 年度では各要素技術を開発し、一部接続試験を実施後、令和元年度から各要素技術の統合と評価を開始し、最終年度である令和2年度は1つのシステムとして統合、最終評価を行う。本研究の全体計画表を表 2-1 に示す。

研究推進の計画としては、半年に1回以上の頻度で全体会議を開催し、本研究に参画する全研究者による進捗報告や成果のとりまとめ等を行う。全体会議以外にも、各要素技術の接続仕様の調整や接続試験などで適宜ミーティングや議論を行う。全体会議以外では、web システムを用いた情報共有やメールなどのシステムを活用して研究を遂行する。

表 2-1 全体計画における研究開発年次スケジュール

項番	作業項目		H30年度	H31年度	H32年度
	大項目	小項目			
(1)-①	センサ統合による環境センシング	環境特徴量の分布可能な情報を取得可能な3次元測距システムの構築	センシング技術構築	評価	
(1)-②		既知サーベイ情報のオンサイトフィードバックによるセンシングの高精度化		センシングの高精度化 実験	結合テスト・評価 実験 とりまとめ
(2)-①	サーベイマップ生成のためのセマンティックSLAM	シミュレーション環境構築	センサ情報取り込み シミュレーション構築		
(2)-②		局所セマンティックマップ生成		局所マップ生成	
(2)-③		広域セマンティックマップ生成のためのSLAM		マッチング	SLAMシステム構築・統合 実験 とりまとめ
(3)-①	3次元セマンティックマップを用いたクローラロボットの経路強化学習と提示	セマンティックマップを用いた経路強化学習	学習システム開発		
(3)-②		オペレータへの経路提示と実ロボット制御	クローラロボット設計開発	実ロボット制御システム開発 経路提示 学習シミュレーション	実験
(3)-③		経路再利用による学習の高速化			統合JAEAでの実験 経路再利用手法 とりまとめ

2.2 令和元年度の成果の目標および業務の実施方法

令和元年度では各要素技術の性能向上や接続試験、接続のための詳細な仕様調整、モックアップ施設等を用いた統合システムの試験的実験を行う。各要素技術別の目標や実施方法を次項から述べる。

2.2.1 高精度サーベイマップ生成のためのセンサ統合による環境センシング

(1) 環境特徴量の分布情報を取得可能な3次元測距システムの構築

平成30年度で構築したセンシングシステムの改良を行う。実験場にはモックアップや不整地などが用意された模擬環境を選定し、実際の廃炉現場での活用を想定した検証実験を実施する。

(2) 既知サーベイ情報のオンサイトフィードバックによるセンシングの高精度化アルゴリズムの構築

過去に作成した既存のサーベイマップを参照し、自己位置データなどを用いて既存情報からの差分を検出することにより、新たな環境センシング結果を補完し、高精度化する。テストデータを用いることにより、計算機上でアルゴリズム構築を完了する。

2.2.2 サーベイマップ生成のためのセマンティック SLAM

(1) 局所セマンティックマップ生成

ロボットのオドメトリと IMU (inertia measurement unit) から測定される姿勢（ロール、ピッチ、ヨー角）データを用い、3次元空間内を移動するロボットの6自由度自己位置・姿勢推定を行う手法を確立させる。探査環境における広域セマンティックマップを生成するため、推定されたロボットの6自由度位置・姿勢情報に基づき、ロボットの移動中に生成された複数の局所セマンティックマップを統合する手法を構築する。

(2) 広域セマンティックマップ生成のための SLAM

ロボットのオドメトリと IMU (inertia measurement unit) から測定される姿勢（ロール、ピッチ、ヨー角）データを用い、3次元空間内を移動するロボットの6自由度自己位置・姿勢推定を行う手法を確立させる。探査環境における広域セマンティックマップを生成するため、推定されたロボットの6自由度位置・姿勢情報に基づき、ロボットの移動中に生成された複数の局所セマンティックマップを統合する手法を構築する。

2.2.3 3次元セマンティックマップを用いたクローラロボットの経路強化学習と提示

平成30年度で開発した実験用クローラロボットを用いて、セマンティックマップで仮想的に学習した仮想ロボットの最適移動経路を実ロボットに組み込み、実環境内の自律移動を実現する。また、実環境での移動を想定した、制御システムの開発とクローラロボットの移動機能の改良も行う。

セマンティックマップにより学習したロボットの移動経路は複数存在し、最終的な移動経路の判断はオペレータが行う。そのため、セマンティックマップにより学習した経路をオペ

レータに 3 次元地図を活用して提示する手法と、経路の選択インターフェースを構築する。選択された経路情報を実ロボットに転送するシステムも構築する。

2.2.4 研究推進

研究代表者の下で各研究項目間ならびに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）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。檜葉遠隔技術開発センターのモックアップ施設でロボットとセンサを活用した実環境のデータを取得し、手法の開発に活用する。関連分野の国内外学会に参加し、最先端技術の情報収集および成果発表を行う。

3. 令和元年度の実施内容および成果

3.1 高精度サーベイマップ生成のためのセンサ統合による環境センシング

(再委託先：千葉工業大学)

3.1.1 環境特徴量の分布情報を取得可能な 3 次元測距システムの構築

セマンティック情報を有したサーベイマップを取得するためには、距離センサで計測したロボットの周囲環境の 3 次元形状情報に、他のセンサで取得した物理量を統合して可視化する必要がある。本研究課題では、平成 30 年度に構築した異種複数のセンサ間の位置姿勢関係のキャリブレーション手法を適用したセンシングシステムを構築した。さらに、3 次元形状データに環境中の属性を重畳しセマンティック情報を有する 3 次元点群を生成するための統合手法を構築した。以下、具体的に説明する。

(1) センサの選定

ここでは、距離センサと組み合わせるセンサとしては、以下の 2 種類を対象とした。

(a) 温度カメラ (FLIR 社製 C3 : 図 3-1)

(b) 近赤外線カメラ (BITRAN 社製 BK-51IGA : 図 3-2)



図 3-1 距離情報+温度情報の同時撮影システム



図 3-2 近赤外線カメラ

(a) の温度カメラと組み合わせることで、原子力発電プラント内に発生した異常熱源などの分布を 3 次元的に提示することが可能であり、(b) の近赤外線カメラと組み合わせることで、可視光では検出が困難な物質の検出が可能な映像情報を 3 次元的に提示することが可能である。一般的な RGB カメラは可視光線領域 (0.4 μm ~0.8 μm) に感度を持ち、

人間の目と同じ色情報を取得できる。一方、近赤外線カメラは、人間の目では見ることができない近赤外線光領域（ $0.7 \mu\text{m} \sim 2.5 \mu\text{m}$ ）の情報を取得可能である。近赤外線光は中赤外線光や遠赤外線光とも異なり、可視光線と同様に、光子が対象物によって反射や吸収されるため、高解像度イメージングに必要な高コントラストを取得できる。ここで、近赤外線領域では、特定の分子構造を持つ物質が吸収波長帯を持つことがわかっている。具体的にはOH結合、NH結合、CH結合などのXH結合を持つ水系の物質が近赤外線領域で吸収波長帯を持ち、特に水は1450 nm付近や1550 nm付近で光の吸収効果が大きくなる（参考文献1）。そのため、可視光では水は透明に見えるが、近赤外線領域では光が吸収されるためその部分のセンサの受光強度が低くなり、結果として黒色の画像が得られる。この原理を利用することで、配管からの汚染水の漏洩問題などにおいて漏洩箇所を3次元的に特定することが可能である。以上のように、適切なセンサの選定・調達を完了させ、その他のフィルタおよび適正なレンズなどの光学部品を選定し、組み上げることで環境中の特徴的な物理量をセンシングする計測系を構築した。

(2) センシングシステムの構築とセンサ情報重畳の理論

これらのセンサと距離情報を統合するためには、異種複数のセンサ間での位置姿勢を推定し、センサ情報の座標系を正確に変換する必要がある。ここで、本研究における技術的な課題として統合するセンサ間での解像度および画角の違いがある。例えば、本研究で用いる近赤外線カメラは、近赤外線光に高い感度を持つInGaAs（インジウム、ガリウム、ヒ素）近赤外線カメラであり、このような特殊用途のカメラは、標準的なRGBカメラと比較すると、解像度が低く視野角が狭くなる傾向にある（参考文献2）。そこで、近赤外線カメラを角度制御可能なパンチルト雲台で回転させながら近赤外線情報を計測し、逐次3次元点群に重畳することで視野角の違いを解決する。図3-3は、標準的なカメラと同等の視野角を持つ距離情報が取得可能な距離画像センサ（以下、RGB-Dセンサ）の視野角内を、近赤外線カメラを回転させることで掃引した様子である。以下、近赤外線カメラを例に、構築したシステムの概要および、その計測原理を説明する。

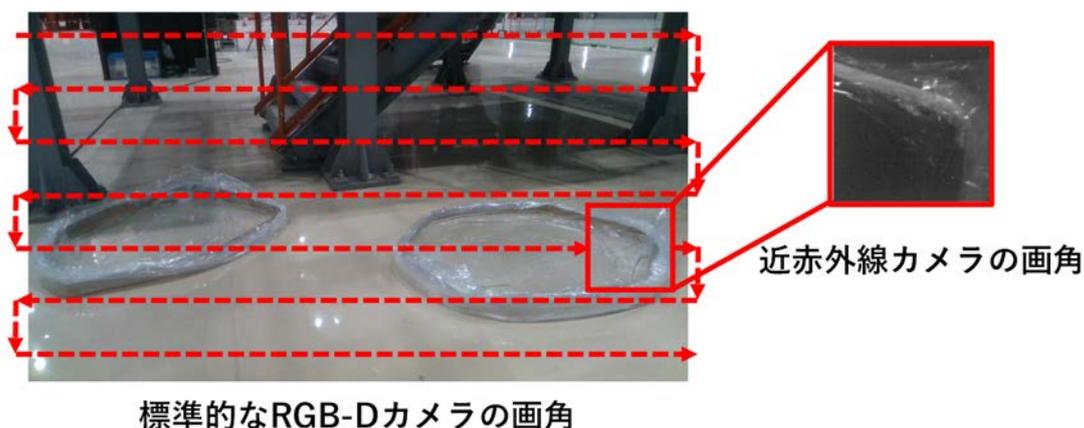


図 3-3 RGB-D カメラと近赤外線カメラの視野角の違いと近赤外線カメラの掃引の様子

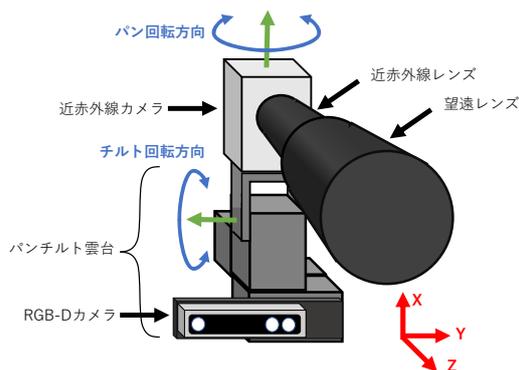


図 3-4 計測システムの概要



図 3-5 構築した計測システム

本研究の目的を達成するための、近赤外線カメラ、RGB-D カメラ、およびパンチルト雲台を用いた撮影システムの概要図を図 3-4 に示し、実際に構築した計測システムの外観を図 3-5 に示す。RGB-D カメラで取得した 3 次元距離情報に近赤外線カメラで取得した近赤外線情報を重畳する。

近赤外線カメラで取得した輝度値の RGB-D カメラで取得した 3 次元距離情報への重畳には、平成 30 年度に構築済みのキャリブレーション手法で求めた両センサ間の位置姿勢関係および、角度制御雲台への制御入力を用いる。具体的には、ある任意の 3 次元距離情報から 2 台のカメラ間の位置関係を表す並進ベクトルと回転行列および近赤外線カメラの内部パラメータを用いる事で、対応する近赤外線カメラの画像座標点を求める事を考える。ここで、近赤外線カメラの画像座標点を ${}^{\text{IR}}\tilde{\mathbf{m}}$ 、RGB-D カメラから取得した 3 次元距離情報を ${}^{\text{D}}\tilde{\mathbf{p}}$ 、近赤外線カメラの内部パラメータを A、2 台のカメラ間の並進ベクトルを ${}^{\text{IR}}\mathbf{t}_{\text{IR} \rightarrow \text{D}}$ 、回転行列を ${}^{\text{IR}}\mathbf{R}_{\text{D}}$ とすると以下の式が成り立つ。

$${}^{\text{IR}}\tilde{\mathbf{m}} \cong [A \ 0] \begin{bmatrix} {}^{\text{IR}}\mathbf{R}_{\text{D}} & {}^{\text{IR}}\mathbf{t}_{\text{IR} \rightarrow \text{D}} \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix} {}^{\text{D}}\tilde{\mathbf{p}} \tag{1}$$

ここで、 ${}^{\text{IR}}\mathbf{t}_{\text{IR} \rightarrow \text{D}}$ が事前のキャリブレーションで求まる既知の量であり、 ${}^{\text{IR}}\mathbf{R}_{\text{D}}$ は事前のキャリブレーション結果の姿勢関係を初期値として、角度制御雲台への制御入力により逐次求まる量である。この式により、RGB-D カメラの 3 次元座標と近赤外線情報を対応付けることが可能である。

(3) 単一の視点からの 3 次元測距実験

実験は、JAEA の檜葉遠隔技術開発センターにて行った。檜葉遠隔技術開発センターは、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推進のために遠隔操作機器（ロボット等）の開発実証施設として整備された施設であり、本実験は移動ロボットによ

る昇降を想定したモックアップ階段下で行った（図 3-6）。計測対象物は水溜りを想定し、直径約 800 mm、深さ約 50 mm の簡易プールに、水道水を溜めたもの（図 3-7）を用いて、近赤外線照明を用いて対象物を照らしながら計測を行った。



図 3-6 モックアップ階段



図 3-7 簡易プール

RGB-D カメラの画角は（水平×垂直）=（ $69.4^{\circ} \times 42.5^{\circ}$ ）であるのに対し、本研究で用いた近赤外線カメラの画角は（水平×垂直）=（約 $8^{\circ} \times$ 約 8° ）である。近赤外線情報が不足する領域が出ないようにオーバーラップさせる事を考慮し、パンおよびチルト方向に 7° ずつ近赤外線カメラを回転させることにより掃引し、近赤外線情報の統合を行った。RGB-D カメラ単体での計測の結果を図 3-8 に示し、3次元距離情報に近赤外線情報を重畳した結果（提案手法）を図 3-9 に示す。簡易プールの内側に溜めた水の部分が、図 3-8 の可視光を提示した RGB カメラの画像では透明で視認が困難であるのに対して、図 3-9 の近赤外線情報を可視化した画像では黒色に提示されていることが確認できる。



図 3-8 RGB-D カメラでの計測結果

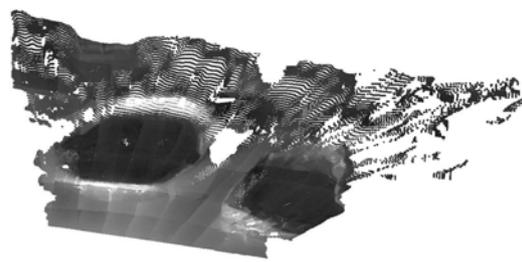


図 3-9 近赤外線情報の重畳結果

3.1.2 既知サーベイ情報のオンサイトフィードバックによるセンシングの高精度化アルゴリズムの構築

3.1.1 で構築した手法により、一地点からの視野を広げて効率的に計測することが可能である。しかし、より広域の調査を目的とする場合や、既に取得したサーベイ情報を更新

する場合、新規に取得した複数の視点からの計測データとの統合が必要になる。本研究では既存のサーベイマップを参照し、自己位置データなどを用いて既存情報からの差分を検出することにより、新たな環境センシング結果を補完する手法を提案した。

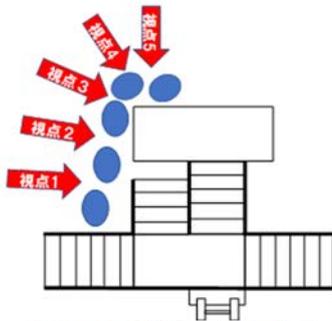


図 3-10 計測した 5 視点

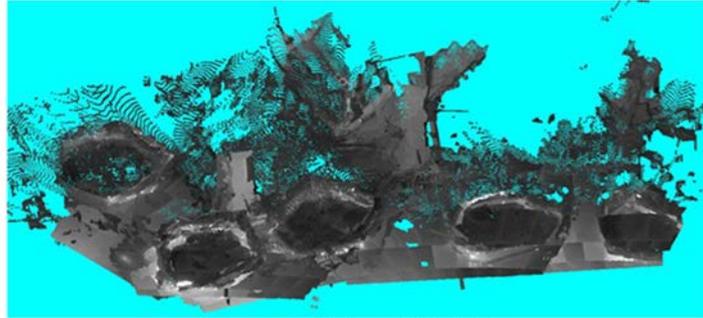


図 3-11 5 視点の重畳結果

(1) 提案手法の概要

提案手法における複数視点からの計測データの統合は以下の手順で行う。まず、上記の 3.1.1 で構築したセンシングシステムを用いた計測により単一の視点からの計測データを獲得する。それを用いて生成した既存のサーベイマップを参照し、オドメトリから得られる自己位置データや 3 次元点群位置合わせ手法を組み合わせることによって、新たな環境センシング結果を統合・補完する。特に、令和元年度オドメトリなどから得られる自己位置情報のみでは精度が不十分な場合に対し、3 次元点群位置合わせ手法である ICP (Iterative Closest Point) を用いることで、複数視点から計測した複数の計測データを高精度に統合し、視野を拡張する。さらに、近赤外線情報の輝度値に対して事前実験に基づき設計した閾値を用いることで、水源領域を検出する手法の検討を行った。得られた水源情報付き 3 次元点群に対して、検出距離ベースのフィルタや IMU を用いた傾斜フィルタを施すことで、地表面に存在する水溜りのみを対象としたノイズに頑健な精度の良い計測を行う手法を提案した。

(2) 実験による検証

実験では、図 3-6 のモックアップ階段周囲に図 3-10 の様に簡易プールを五か所に設置し、上記の提案手法を用いて複数視点の統合を行った。本実験では特に、移動ロボットのオドメトリによる自己位置情報が得られない場合を想定し、ICP を用いた統合における初期値は簡易プールの特徴的な点を手動で与えた。得られた計測結果を図 3-11 に示す。一か所のみからでは計測が困難な広範囲の計測が、提案手法により達成されていることが確認できる。

令和 2 年度は、上記提案手法の精度評価およびその他の属性情報を取得可能なセンサとの統合手法の検討を進めるとともに、統合実験に向けての準備を開始する。

参考文献

- (1) 鈴野純, “近赤外分光法による原料の品質管理に関する研究”, 塗料の研究, No. 157, pp. 2-13 (2015).
- (2) アイアールスペック(株), 小倉睦郎, 西田克彦, 村井博信, “高解像度, 広ダイナミックレンジ USB3 Vision 対応 InGaAs 近赤外線カメラ”, 映像情報インダストリアル2, Vol. 49, No. 2, pp. 21-24 (2017).

3.2 サーベイマップ生成のためのセマンティック SLAM（再委託先：中央大学）

3.2.1 局所セマンティックマップ生成

本節では、環境特徴量の分布情報を含む点群データを処理し、セマンティックマップを生成した結果を説明する。図 3-12 に、ロボットに装着した Velodyne Lidar 社の VLP-16 から取得した 3 次元点群データと、それらを用いて生成した静止状態におけるロボット周囲の環境に対する局所 3 次元セマンティックマップを示す。本研究では、水や熱源などの環境の属性情報を特徴として活用する。点群は、環境計測に用いる LiDAR と融合するセンサの種類によって、周囲環境の 3 次元形状情報やレーザの反射強度以外にも様々な情報を含むことが可能である。例えば、光学カメラを融合する場合は色付き点群情報を得ることが可能である。また、近赤外線カメラ、サーモカメラやガンマカメラを融合して計測する場合、水源、熱源や放射線源など環境の属性情報の取得が可能である。点の持つそれらの物理量が特徴的である場合、それと似た物理量を持つ点を同じクラスであるとみなすことが可能である。以上を踏まえ本研究では、LiDAR から取得する 3 次元点群に対して熱源のクラス、水たまりのクラス、またそれらに属さない点群のクラスのいずれかを付与し、3 次元セマンティックマップを生成する。

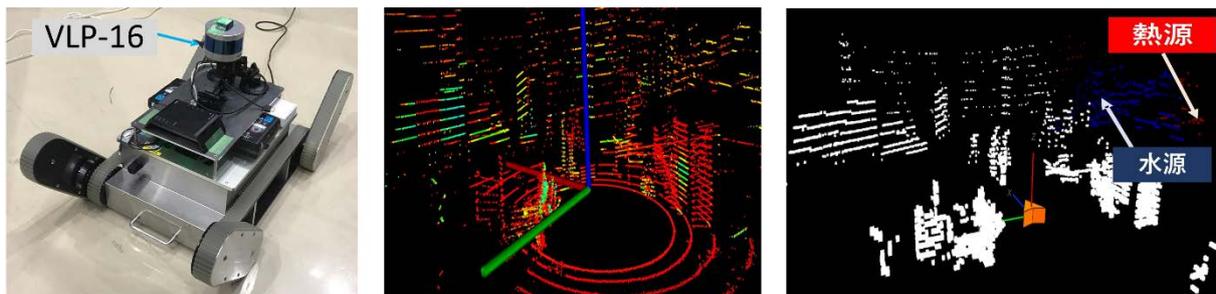


図 3-12 局所 3 次元セマンティックマップの生成

(左：ロボットに装着した LiDAR、中：LiDAR から取得する 3 次元点群、
右：局所 3 次元セマンティックマップ)

ロボットが複数の場所から生成したそれぞれの局所セマンティックマップを広域局所セマンティックマップ統合するためには、ロボット自身の各計測場所における位置・姿勢情報を推定する必要がある。本節では、ロボットの車輪のエンコーダデータと IMU (inertia measurement unit) から測定される姿勢（ロール、ピッチ、ヨー角）データを用い、オドメトリの計算による 3 次元空間内を移動するロボットの 6 自由度自己位置・姿勢推定を行う手法を説明する。

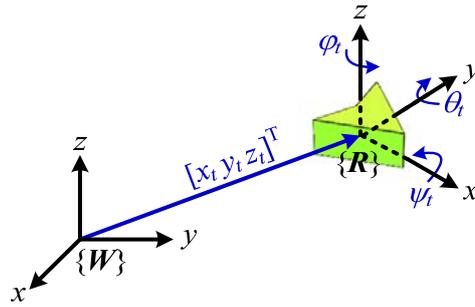


図 3-13 世界座標系とロボット座標系

図 3-13 は世界座標系とロボット座標系を示している。床が平らな屋内環境でロボットが走行する場合には、状態の定義は 3 自由度 $\mathbf{x}_t = [x \ y \ \varphi]^T$ で十分である。しかし、平らでない屋外環境でロボットが走行する場合には、状態を 6 自由度 $\mathbf{x}_t = [x \ y \ z \ \psi \ \theta \ \varphi]^T$ で定義する必要がある。時刻 $t-1$ で推定したロボットの状態 \mathbf{x}_{t-1} に、エンコーダと IMU から得られる制御入力 $\mathbf{u} = [\Delta x \ \Delta y \ \Delta z \ \Delta \psi \ \Delta \theta \ \Delta \varphi]^T$ を適用して、時刻 t でのロボットの状態 \mathbf{x}_t を予測する運動モデル $g(\mathbf{x}_{t-1}, \mathbf{u}_t)$ は次のように表現され、オドメトリの計算に用いられる。

$$\mathbf{x}_t = g(\mathbf{x}_{t-1}, \mathbf{u}_t) \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} x_t \\ y_t \\ z_t \\ \psi_t \\ \theta_t \\ \varphi_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{t-1} + c_\varphi c_\theta \Delta x_t + (c_\varphi s_\theta s_\psi - s_\varphi c_\psi) \Delta y_t + (c_\varphi s_\theta c_\psi + s_\varphi s_\psi) \Delta z_t \\ y_{t-1} + s_\varphi c_\theta \Delta x_t + (c_\varphi s_\theta s_\psi - s_\varphi c_\psi) \Delta y_t + (s_\varphi s_\theta c_\psi - s_\varphi s_\psi) \Delta z_t \\ z_{t-1} - s_\theta \Delta x_t + c_\theta s_\psi \Delta y_t + c_\theta c_\psi \Delta z_t \\ \psi_{t-1} + \Delta \psi_t \\ \theta_{t-1} + \Delta \theta_t \\ \varphi_{t-1} + \Delta \varphi_t \end{bmatrix} \quad (3)$$

ただし、 $s_\psi = \sin(\psi_{t-1} + \Delta \psi_t / 2)$ 、 $s_\theta = \sin(\theta_{t-1} + \Delta \theta_t / 2)$ 、 $s_\varphi = \sin(\varphi_{t-1} + \Delta \varphi_t / 2)$ 、 $c_\psi = \cos(\psi_{t-1} + \Delta \psi_t / 2)$ 、 $c_\theta = \cos(\theta_{t-1} + \Delta \theta_t / 2)$ 、 $c_\varphi = \cos(\varphi_{t-1} + \Delta \varphi_t / 2)$ である。 \mathbf{u}_t は時刻 $t-1$ から t の間の制御入力を意味し、 $[\Delta x_t \ \Delta y_t \ \Delta \varphi_t]^T$ はエンコーダから、 $[\Delta \psi_t \ \Delta \theta_t \ \Delta \varphi_t]^T$ は IMU から得られる。 Δz_t は測定が困難であり、一般に 0 と仮定する。式(2)、(3)は次式のように制御入力 $[\Delta x_t \ \Delta y_t \ \Delta z_t]^T$ を $[\psi_{t-1} + \Delta \psi_t / 2 \ \theta_{t-1} + \Delta \theta_t / 2 \ \varphi_{t-1} + \Delta \varphi_t / 2]^T$ に関して回転変換することにより誘導される。

$$\mathbf{x}_t = \mathbf{x}_{t-1} + \mathbf{T}_t \mathbf{u}_t \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} x_t \\ y_t \\ z_t \\ \psi_t \\ \theta_t \\ \varphi_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{t-1} \\ y_{t-1} \\ z_{t-1} \\ \psi_{t-1} \\ \theta_{t-1} \\ \varphi_{t-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{R}(\psi, \theta, \varphi) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_t \\ \Delta y_t \\ \Delta z_t \\ \Delta \psi_t \\ \Delta \theta_t \\ \Delta \varphi_t \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\mathbf{R}(\psi, \theta, \phi) = \begin{bmatrix} c_\phi c_\theta & c_\phi s_\theta s_\psi - s_\phi c_\psi & c_\phi s_\theta c_\psi + s_\phi s_\psi \\ s_\phi c_\theta & s_\phi s_\theta s_\psi + c_\phi c_\psi & s_\phi s_\theta c_\psi - c_\phi s_\psi \\ -s_\theta & c_\theta s_\psi & c_\theta c_\psi \end{bmatrix} \quad (6)$$

ここで、回転変換は式(6)に示すオイラー角を用いる。すなわち式(4)、(5)を展開することにより、ロボットの6自由度の運動モデルである式(2)、(3)を誘導可能である。次節では、上記で説明したオドメトリにより推定されたロボット位置・姿勢に基づいて統合された広域セマンティックマップと、統合精度を向上させるために適用したICP (iterative closest point) スキャンマッチング手法⁽¹⁾による広域セマンティックマップの生成結果を考察する。

3.2.2 広域セマンティックマップ生成のためのSLAM

3.2.1で説明したオドメトリによるロボットの自己位置推定では、時間経過によりロボットの位置・姿勢誤差が累積してしまい、統合される広域セマンティックマップにズレが生じてしまう。そこで、本研究ではスキャンマッチングSLAM (simultaneous localization and mapping) において主に使用されるICPアルゴリズムに基づく手法を採用し、広域セマンティックマップの精度向上を図る。以下、ICPアルゴリズムについて簡単に述べる。まず、オドメトリにより推定された位置・姿勢情報に基づき、連続した2つのフレームの局所セマンティックマップの初期位置を設定する。その後、位置合わせ状態を、マップを構成する点間距離の総和で評価する最小化問題を解く。この時、現在フレームで生成した局所セマンティックマップを構成する点群 (以下、ソース点群) と前のフレームで生成した局所セマンティックマップを構成する点群 (以下、ターゲット点群) をマッチングする。すなわち、次式のような距離の二乗和 E を評価値とし、最近傍点探索と変換行列計算を繰り返し行うことで、変換行列の回転成分行列 \mathbf{R} 、変換行列の並進成分ベクトル \mathbf{T} を求める。

$$E = \sum_{i=1}^N |p_{k_i} - (q_i \mathbf{R} + \mathbf{T})|^2 \quad (7)$$

E : 距離の二乗和 (評価値)

p : ソース点群の点

q : ターゲット点群の点

N : ソース点群の点の数 (繰り返し計算の試行回数)

k_i : ソース点群中の i 番目の点に対応する参照スキャンデータ点

\mathbf{R} : 変換行列の回転成分行列

\mathbf{T} : 変換行列の並進成分ベクトル

以下、オドメトリに基づいて統合された広域セマンティックマップと、ICP スキャンマ

ッチング手法に基づいて統合された広域セマンティックマップの生成実験結果を述べる。実験は図 3-14 に示す檜葉遠隔技術開発センターの要素試験エリアで行った。本実験では、LiDAR から環境の形状情報を持つ点群を取得し、それに対して仮想的な属性クラスを付与することで、特徴的な物理量を持つ環境を表現した。図 3-15 に、真のロボット軌跡を用いて生成した広域セマンティックマップを示す。ここで、赤色、青色で描画される箇所はそれぞれ仮想的に模擬した熱源、水たまりである。また、紫色の線は真のロボット軌跡を表している。

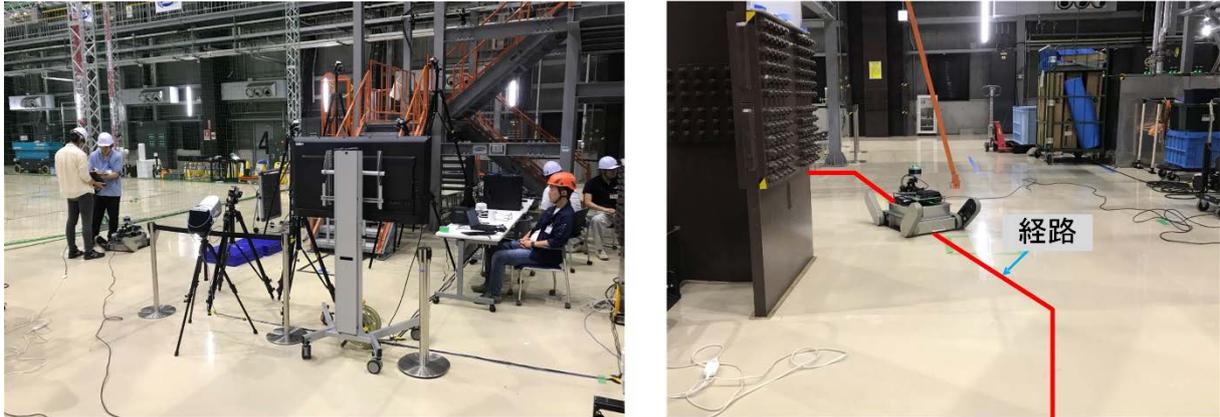


図 3-14 評価実験

(左：実験環境、右：ロボットの移動軌跡)

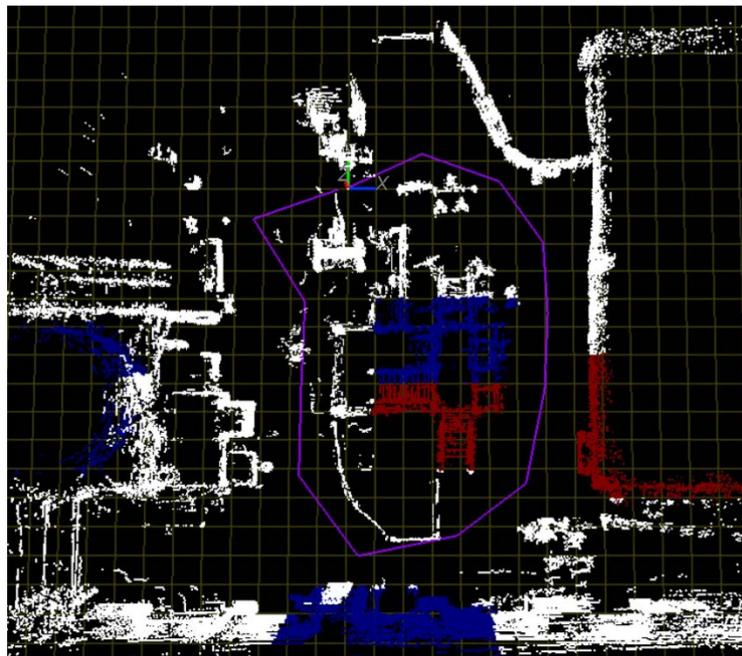


図 3-15 真のロボット軌跡を用いて生成した広域セマンティックマップ（俯瞰視点）

図 3-16 にそれぞれの手法を適用したマップ統合の実験結果を示す。また、真のロボット軌跡を用いて統合した広域セマンティックマップを基準として算出したオドメトリと ICP

スキャンマッチングによる広域セマンティックマップの距離誤差はそれぞれ、0.918 m と 0.320 m であった。オドメトリのみを用いた場合よりも、ICP スキャンマッチングを適用した場合のほうが、統合された広域セマンティックマップの精度誤差が少し減少したものの、図 3-15 に示す真のロボット軌跡を用いて統合した広域セマンティックマップと比べるとまだ乖離が存在する。誤差の原因として、クローラタイプの車輪はオドメトリの誤差が非常に大きい点が挙げられる。ICP スキャンマッチングの位置合わせ結果は、ソース点群とターゲット点群の初期位置に依存しており、オドメトリの誤差が大きい場合は初期位置のズレが大きく誤差をうまく修正できない要因にもなり得る。実際に、本実験において探査ロボットは数メートル地点ごとに局所セマンティックマップを生成していたため、オドメトリに起因する誤差の累積は充分起こり得ると考えられる。

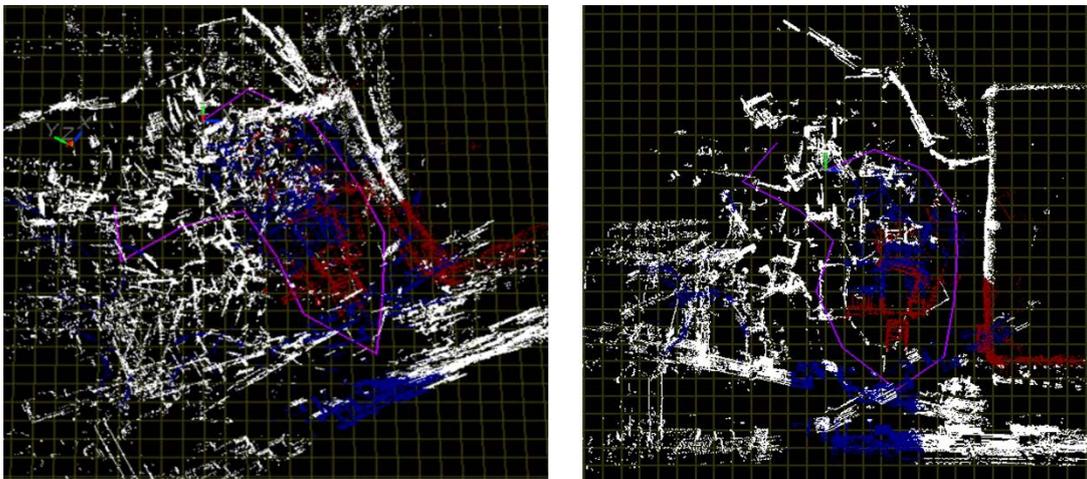


図 3-16 実験結果

(左：オドメトリによる広域セマンティックマップ、
右：ICP スキャンマッチングによる広域セマンティックマップ)

今後の展望としては、局所セマンティックマップ同士を統合し、広域セマンティックマップを生成するために適用した ICP スキャンマッチング手法を点群のクラス情報に対応できるようにさらに改良する一方、累積誤差をさらに減らすため、全フレームにおける局所セマンティックマップを同時に位置合わせ可能な最適化 SLAM 手法⁽²⁾を適用する計画である。

参考文献

- (1) P. J. Besl, N. D. McKay, “A Method for Registration of 3-D Shapes”, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 14, No. 2, pp. 239-256 (1992).
- (2) G. Grisetti, R. Kummerle, C. Stachniss, W. Burgard, “A Tutorial on Graph-based SLAM”, IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, Vol. 2, No. 4, pp. 31-43 (2010).

3.3 3次元セマンティックマップを用いたクローラロボットの経路強化学習と提示

3.3.1 オペレータへの経路提示と実ロボット制御システムの開発

平成 30 年度にて開発した実験用ロボットは胴体クローラベルトが図 3-17 のように幅がせまく、不整地上でのスタックや階段登坂中の接地面積が小さいことによる滑りが懸念されていた。そこで、図 3-18 に示すベルト幅が広い胴体用クローラベルトを開発した。実験用レスキューロボットに装着した外観を図 3-19 に示す。実験用レスキューロボットにおける従来のクローラベルトはベルト幅が 40 mm であったのに対し、令和元年度で開発したベルト幅は 80 mm である。そのため、胴体クローラにおける地面への接地面積は 2 倍近くまで向上し、整地以外でも移動性能向上すると考えられる。令和元年度は、JAEA 檜葉遠隔技術開発センターのモックアップ階段や東京工芸大学厚木キャンパスの研究室にて動作実験を行った。これにより、整地での移動性能向上を確認した。さらには、ベルト直径が大きく設計したことでロボット用のバッテリーや他の機器がより柔軟に配置できるようになり、低重心化にも貢献することが明らかとなった。

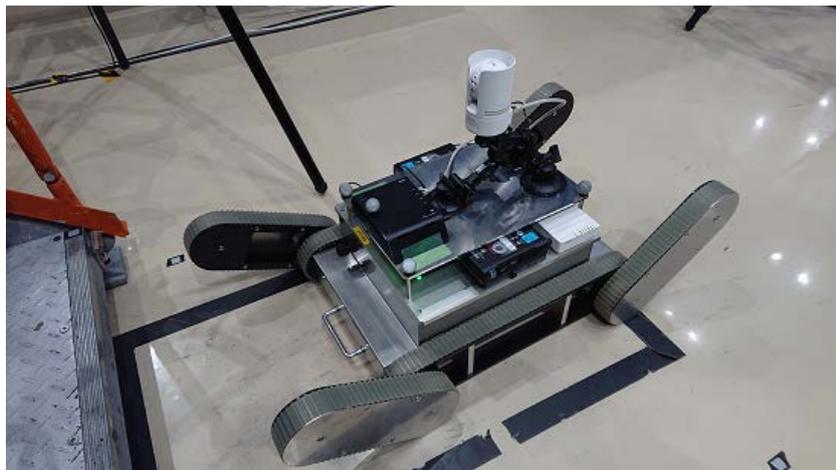


図 3-17 H30 年度にて開発した実験用レスキューロボット



図 3-18 ベルト幅の広いクローラベルトとアタッチメント



図 3-19 新型ベルトを装着した実験用レスキューロボットの外観

局所セマンティックマップにおける強化学習シミュレーションにおいては、ロボットモデルの高精度化を実施した。平成30年度に開発した実験用レスキューロボット（図3-20）に対し、図3-21に示す寸法やベルト幅、フリッパなどの稼働を再現したロボットモデルを製作した。このロボットモデルは本研究で採用している産業技術総合研究所にて開発されたソフトウェア Choreonoid⁽²⁾ と Algorix 社の物理演算ライブラリ AGX DYNAMICS⁽³⁾ での動作を前提としている。ロボットモデルにおけるクローラベルト上の凹凸（ラグ）は、シミュレーション時の計算量低減のため完全な再現はなされていないが、不整地移動や階段昇降が可能であることを事前シミュレーションにより確認済みである。実験用レスキューロボットとロボットモデル共に、移動やフリッパ動作におけるプログラム上のコマンドは同等の動作をするようにプログラムされており、C++言語にて記述されている。そのため、シミュレーション上にてロボットモデルが強化学習で獲得した方策（知識）は、実験用レスキューロボットでも利用が可能である。これにより実験用レスキューロボットはシミュ



図 3-20 実ロボット外観（H30 年度）

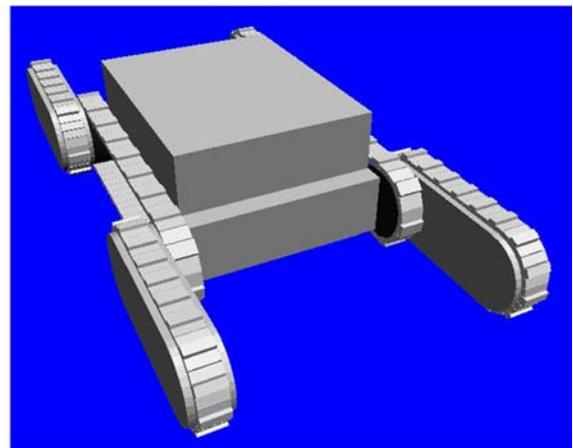


図 3-21 ロボットモデル外観

レーションで獲得した方策を基に自律移動が可能である。

実験用レスキューロボットに搭載された LiDAR と深度センサ（RGB-D カメラ）、近赤外カメラにより取得した局所セマンティックマップを用いて経路強化学習実験を行った。使用したロボットと搭載されているセンサは図 3-22 のとおりである。実験環境は図 3-23 に示す日本原子力研究開発機構櫛葉遠隔技術開発センターの階段モックアップ施設にて行った。センサにより局所セマンティックマップの計測した位置を図 3-24 に示し、計測風景を図 3-25 に示す。



図 3-22 実ロボットのセンサ構成



図 3-23 階段モックアップ



図 3-24 環境俯瞰図

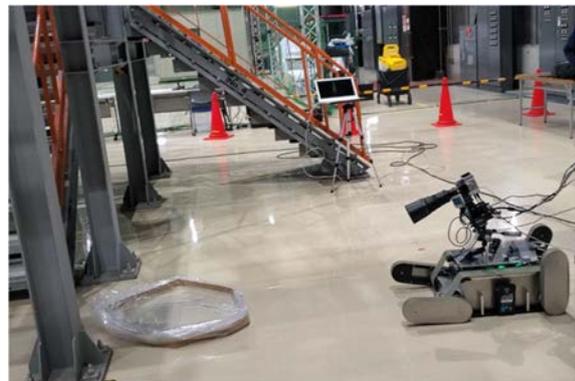


図 3-25 計測風景

計測したセマンティックマップ情報をシミュレータに読み込んだ画面を図 3-26 に示す。図 3-25 における測定位置がシミュレーションにおけるロボットの初期位置となる。図 3-25 に対応するシミュレーションにおけるロボットの位置を図 3-27 に示す。センサ群で取得したデータは点群情報として保存されており、点のままではシミュレーション内のオブジェクトとして成立しないため、点の座標を中心としたボクセルをオブジェクトとしてシミュレーション内に生成している。今回の実験では平面な地面で実施したため、シミュレーション内ではボクセルによる地面を生成せず、別途地面用の 3 次元モデル平面を用意している。また、シミュレーションの動作高速化のために LiDAR から取得したデータの点群（26622 個）は、環境形状が失われな程度の 3943 個のボクセルにデータ削減している。ボクセルのみによる 3 次元環境を構築する場合、点群が粗になる場所において本来壁や障害物があるにもかかわらずロボットモデルが通過し、進入できない場所における探索行動

3.3-3

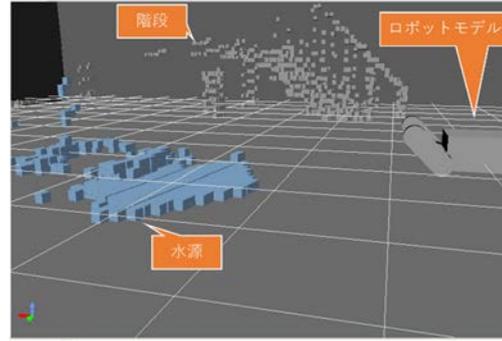
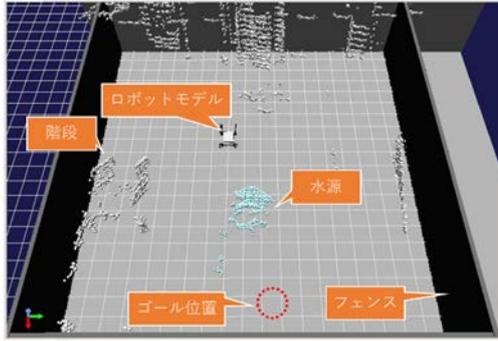


図 3-26 局所セマンティックマップ 図 3-27 初期位置 (図 3-25 と同アングル)

を防止するためにフェンスを設定している。学習は、ロボットモデルの移動に伴う行動の選択を 1 回行うことを 1 ステップと呼び、ロボットモデルがスタート位置からゴール地点に到達するまでを 1 エピソードと呼ぶ。本実験では、強化学習に Q 学習⁽⁴⁾ を用い次式で定義される。

$$Q(s_t, a_t) := Q(s_t, a_t) + \alpha \{ r_t + \gamma \max_{a' \in A} Q(s_{t+1}, a') - Q(s_t, a_t) \} \quad (8)$$

ここで、 s_t 、 s_{t+1} はある時刻における環境状態であり、 a_t は選択可能な行動、 $Q(s_t, a_t)$ は Q テーブルと呼ばれる方策に相当するデータである。学習のためのパラメータである α は学習率であり、 r_t は報酬、 γ は割引率である。本実験では $\alpha = 0.5$ 、 $r_t = 0.1$ と設定している。報酬値としては、フェンスへの衝突は -5、水源への侵入は -5、ゴール地点への到達は 1 で設定している。また、行動選択器としては ϵ -greedy 選択を用いている。 ϵ -greedy 選択は $1 - \epsilon$ の確率で $\max_{a \in A} Q(s, a)$ となる行動を選択するが、必ず ϵ の確率でランダム行動すなわち探索行動を行う行動選択方法である。本実験では $\epsilon = 0.1$ と設定している。ロボットモデルに定義されている実行可能な行動は、前進、後退、右旋回 45 deg、左旋回 45 deg の計 4 種類である。ロボットモデルが観測可能な状態は、自己位置 x 、 y と姿勢角 θ である。したがって、方策として獲得される情報は、ある地点の (x, y) における姿勢角 θ の時の実行可能な行動の価値である。

シミュレーションにて学習した結果を図 3-28 に示す。図 3-28 は学習曲線と呼ばれ、学習の進捗に対するパフォーマンスを読み取ることができる。図中の Number of steps では学習のエピソードを繰り返すごとにゴールまでに必要である行動選択回数が少なくなっていることが読み取れる。また、Cumulative rewards ではスタート地点からゴール地点までロボットモデルが移動する際に得た報酬値の累積を現している。例えばゴールまで移動する際にフェンスに多く衝突することがあれば Cumulative rewards の値が小さく、フェンスに衝突せずゴールに到着している場合は 1 になり、曲線としては 1 に収束する形となる。グラフから、エピソード (Number of episode) を繰り返すごとにステップ数が小さく、累積報酬値は大きくなり局所セマンティックマップ上での強化学習が行えていることが読み取れる。累積報酬値は 1 への収束傾向が読み取れるがステップ数はまだ収束は得られていない。これは学習回数を増加させれば解決可能であると考えられるが長時間のシミュレー

3.3-4

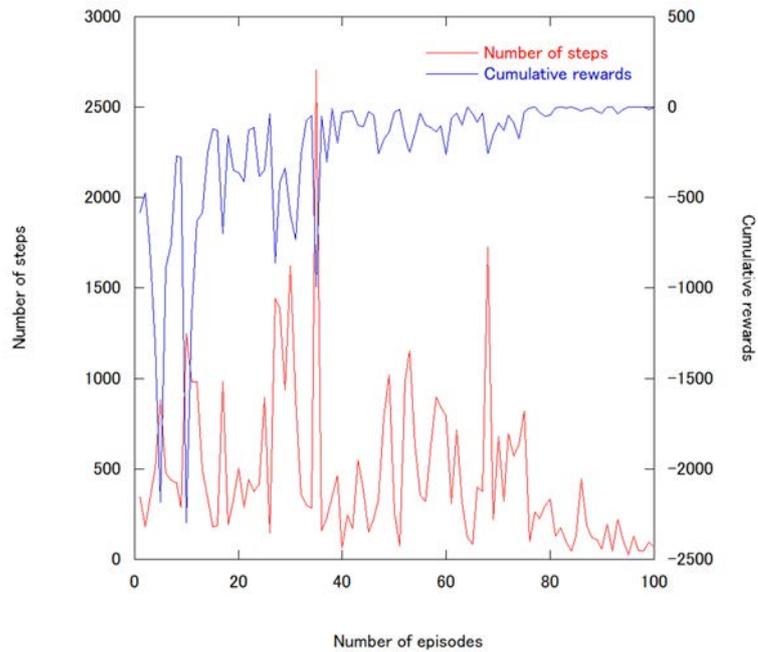


図 3-28 局所セマンティックマップでの強化学習により得られた学習曲線

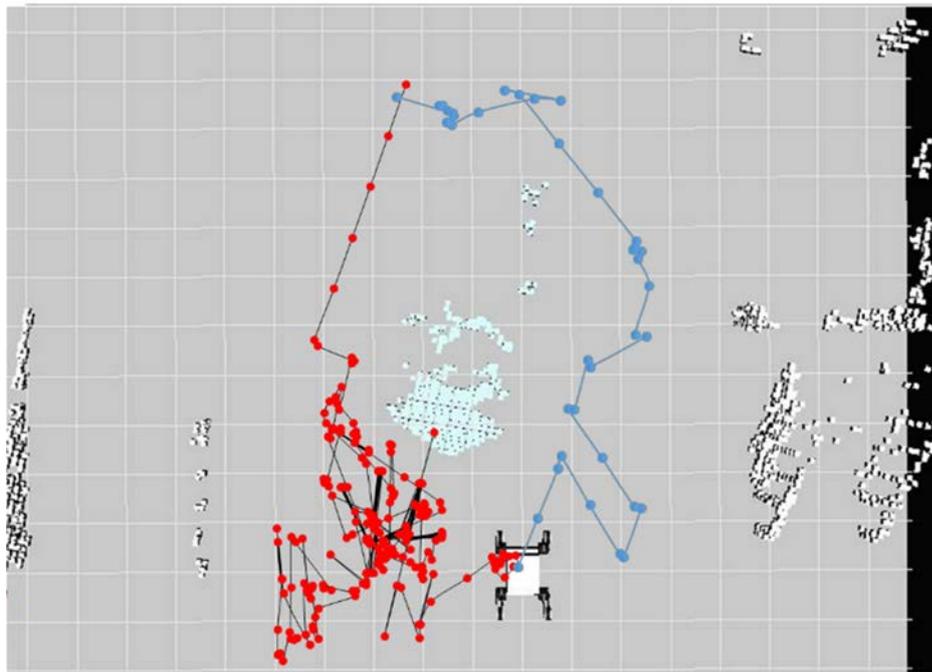


図 3-29 学習した移動経路の提示例

シミュレーションが必要となり、1回のシミュレーション時間短縮が今後の課題となる。

本シミュレーションにて学習した移動軌跡を図 3-29 に示す。シミュレータの Choreonoid 上のマップ画面に移動経路データを重畳するシステムを開発し、図 3-29 に示している。実験におけるある試行では、ロボットからゴール方向に向かって水源の右側を移動する経路（図中の青点）を学習しているが、他の試行では左側を移動する経路（図中の赤点）も学習された。左側の移動経路では、ロボットモデルのスタート地点付近での探索行動が見ら

3.3-5

れ、十分に学習が進んでいないと考えられるが、ゴール付近では直進動作をしていることから、右側移動経路（青点）とは異なる経路を学習していると考えられる。これは、局所セマンティックマップの構成上、準最短経路や報酬値が高い経路で複数が存在するのが原因であると考えられる。強化学習はトイプロBLEMであれば、理論的な最適解を学習するが、複雑な環境や状態においては解が複数存在する可能性もあり、さらには実際の物理環境を忠実に模擬できていない局所セマンティックマップにおいては、セマンティックマップでの環境情報での最適解が現実世界での最適解であるとは限らない。最終的には、学習結果をロボットのオペレータが画面表示上で確認し、どの学習結果を用いてロボットを動作させるか選択する。オペレータは画面上に表示された経路をコマンドラインで選択、ロボットへの転送が可能である。方策や移動軌跡データは、CSV ファイルとしてサーバ内に保存されており、方策の再利用や移動軌跡の表示をはじめ、データ解析等にも利用可能である。

次に、学習した方策を実験用レスキューロボットで再利用し、実環境でもシミュレーション環境と同様に目的地まで到達できるか実験を行った。図 3-30 に示す実際の環境にて、実験用レスキューロボットに搭載された LiDAR により 3 次元点群情報を取得し、Choreonoid に読み込み可能な 3 次元局所マップに変換後、令和元年度に制作したロボットモデルを用いて強化学習シミュレーションを行った。取得された 3 次元局所マップは図 3-31 のとおりである。LiDAR で取得した点群情報を一辺 0.1 m のボクセルとしてシミュレータ内に描画し、実環境を模擬できるように構成されている。実環境とシミュレーションにおける、実ロボットとロボットモデルの移動スタート位置と移動到達目標地点（ゴール位置）は同じに設定している。



図 3-30 3次元局所マップを取得した環境

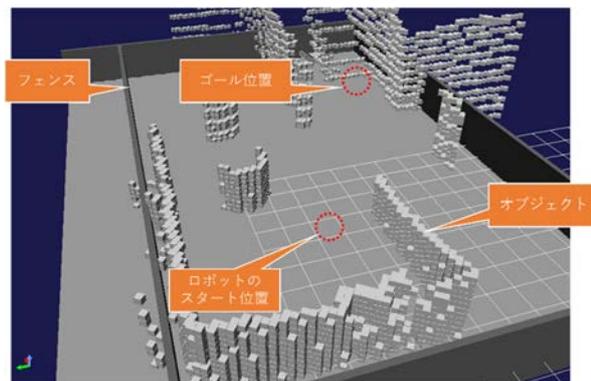


図 3-31 シミュレータ上の 3次元局所マップ

シミュレーションを実行する計算機には、富士通製 PRIMERGY RX300 S8 (CPU: Xeon E5-2670v2 2.5 GHz×2 (40 スレッド)、メモリ: 96 GB、GPU: nVIDIA GeForce GT1030) を用いた。シミュレーション内でのロボットモデルが学習するための強化学習器として、様々な研究で用いられている Q 学習⁽⁴⁾を採用し実験を行った。ゴール地点には正の報酬として 1 を設定している。3 次元点群で表示されているオブジェクト以外の人工的な壁（以降、フェンスと呼ぶ）に接触する座標にロボットモデルが到達すると負の報酬が与えられる。フェンスの負の報酬として -5 を設定した。報酬の値は事前実験により検証して設定を行って

3.3-6

いる。ロボットモデルは学習初期では試行錯誤的すなわちランダムで動作するが、ゴールへの到達による正の報酬の獲得により徐々に移動可能な経路を学習する。ロボットモデルに定義されている実行可能な行動は、前進、後退、右旋回 45 deg、左旋回 45 deg の計 4 種類である。ロボットモデルが観測可能な状態は、自己位置 x 、 y と姿勢角 θ である。本実験も同様に Choreonoid にて取得可能な自己位置情報は分解能が高く、状態空間爆発を起こすため自己位置や姿勢角は粗視化している。強化学習のアルゴリズムにおいては、最適な解を取得総報酬値やスタートからゴールまでの行動回数で学習進度や獲得した方策のパフォーマンスを見ることができる。本シミュレーションにおける学習曲線を図 3-32 に示す。また、最後のエピソードで実行した移動経路を図 3-33 に示す。

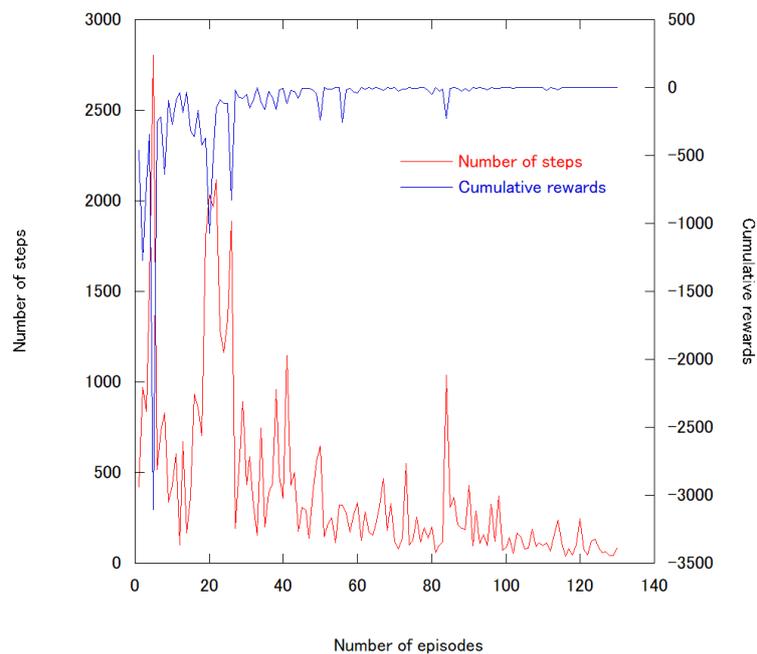


図 3-32 3次元局所マップにおける強化学習で得られた学習曲線

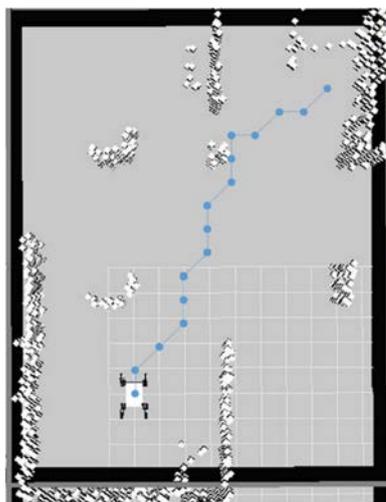


図 3-33 学習した移動経路

図 3-32 の学習曲線から、ロボットモデルが計 130 回のエピソードを繰り返し、徐々に行動回数の減少と取得報酬値の増加が見て取れる。これによりスタート位置からゴールまでの経路を学習できたと言える。なお、今回のシミュレーションにおける強化学習は約 140 時間程度かかっており、環境モデルの最適化や使用計算機の変更による学習シミュレーションの高速化が今後の課題である。

次に、シミュレーションにて獲得した方策を実験用レスキューロボットに転送し学習結果を活用して実環境（図 3-30）においてもスタート地点からゴール地点まで到達できるか実験を行った。前述のとおり、シミュレーションのロボットモデルと実機の実験用レスキューロボットでは実行可能な移動コマンド（前進、旋回等）は同等の移動量となるようにプログラミングされており、今回は C++言語にて実験用レスキューロボットの制御プログラムを開発した。本実験で使用した実験用レスキューロボットの構成は図 3-34 に示す通り、センサとしては LiDAR のみを搭載し、IMU や近赤外カメラなどは搭載していない最小構成である。強化学習で獲得した方策を利用する場合、ロボット自身が環境状態（自己位置）を観測して方策からその時取るべき行動の価値を出力する。本実験では、実験用レスキューロボットの自己位置推定法としてはロボット内に内蔵されているロータリエンコーダを利用したオドメトリにより実装されている。

シミュレーションにて獲得した方策を実験用レスキューロボットで使用し、実世界で動作した結果を図 3-35 に示す。図 3-35 では左右への旋回の繰り返しや前後移動の繰り返しなど探査の場面は示されていない。実験結果により実験用レスキューロボットは、スタート地点からシミュレーションで獲得した経路を参照しゴールまで到達することができた。しかし、自己位置推定におけるオドメトリの誤差により、実際の移動経路とシミュレーションで獲得した経路に差が発生した。これにより、壁への接触やオドメトリ誤差が累積し、学習結果とは異なる方向への移動が見て取れる試行も存在した。シミュレーションにおける物理演算の摩擦係数設定と、実環境における地面とクローラベルトの摩擦が異なることが原因であると考えられる。今後はオンラインで LiDAR の情報を参照し自己位置推定を行い、オドメトリとは異なる誤差の累積が発生しないシステム構成での実ロボットによる評価検証が今後の課題となる。また、実ロボットの実験においても不整地における実験を実施していないため、より様々な環境での評価も今後の課題となる。

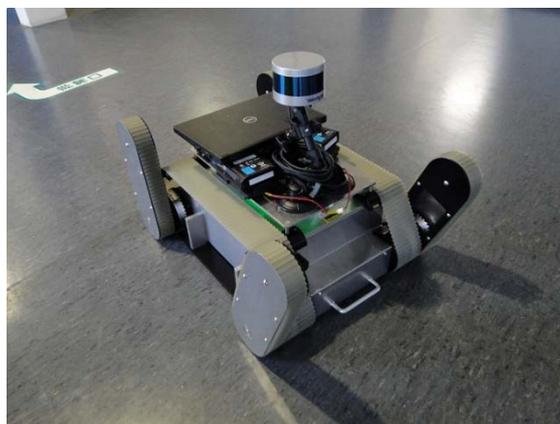


図 3-34 LiDAR を搭載した実験用レスキューロボット



図 3-35 実ロボットの移動結果の例

参考文献

- (1) 東京工芸大学, 廃炉国際共同研究センター, “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(委託研究) –平成30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 2019-022, 日本原子力研究開発機構, Jan. 2020.
- (2) 株式会社コレノイド, “Choreonoid ホームページ”, <https://choreonoid.org/ja/> (Access: 2020/04/20).
- (3) VMC Motion Technologies 株式会社, “AGX Dynamics とは”, <https://www.vmc-motion.com/%E8%A3%BD%E5%93%81-%E3%82%B5%E3%83%BC%E3%83%93%E3%82%B9/agx-dynamics/> (Access: 2020/04/20) .
- (4) Watkins, C. J. C. H., P. Dayan, “Q-Learning”, Machine Learnig 8, pp.279-292 (1992).

3.4 研究推進

本研究を推進するにあたり、各研究項目の担当者間にてメールベースの議論やミーティングでの進捗報告、仕様調整を行った。また、JAEA 廃炉環境国際共同研究センターの川端邦明博士ともプロジェクトの推進や実験内容に関して議論を行った。JAEA 檜葉遠隔技術開発センターの階段モックアップを利用した開発技術の評価実験を令和元年 8 月と令和 2 年 1 月の計 2 回実施し、提案手法改善のための有益なデータを得た。評価実験では各研究者の研究室に所属する学生も複数人参加し、人材育成の側面でも有益な実験であったと考えられる（図 3-36）。

現場投入への具体的な課題抽出のために、東京電力ホールディングス株式会社の協力のもと福島第一原子力発電所の現地視察を実施した。

研究成果の発信においては、ロボティクス・メカトロニクス 講演会 2019 in Hiroshima (ROBOMECH2019) や Fukushima Research Conference 2019 (FRC2019)、第 20 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 (SI2019)、ロボティクスシンポジア 2020 で発表を行ったとともに、学会開催中に最先端技術の情報収集や交流を行った。さらに現在、学術論文誌にも投稿中である。令和 2 年 1 月には、アメリカ合衆国にて開催された 2020 IEEE/SICE International Symposium on System Integration にて研究代表者を筆頭に「SS06 Robot Behavior Control and Environmental Sensing」という Special session を Principal organizer として企画した。5 件の研究グループから災害対応ロボティクスや環境センシングに関連する研究発表があり、技術・研究の深い議論、情報収集・交換を行った。



図 3-36 JAEA 檜葉遠隔技術開発センターでの実験風景

4. 結言

本研究では、自然災害をはじめ原子力などの災害現場において、初動時の被害状況収集活動や原子力建屋内の環境モニタリングを実施できるように、広域サーベイマップ生成を行う半自律ロボットシステムの開発を目的とし、以下に示す3つの要素技術の研究開発を行った。また、それぞれの要素技術の接続試験や連携の確認、実際のモックアップ試験場での動作確認や評価を行った。

- (a) 色情報や形状だけでなく、環境中に存在する熱源や放射線源、水源、その他の物質の存在による特徴的なセンサ情報（以下、環境特徴量）を統合するカメラシステム
- (b) 状況把握用建屋内サーベイマップ生成とロボットの移動経路学習のためのセマンティック SLAM (simultaneous localization and mapping)
- (c) SLAM により生成された仮想環境におけるロボットの移動経路学習と安全な経路提示システム

令和元年度における研究の成果は次のとおりである。「高精度サーベイマップ生成のためのセンサ統合による環境センシング」では、近赤外カメラと RGB-D センサ、および 3 次元 LiDAR を備えた、ロボットに搭載可能な計測システムを構築した。実験では、各種センサの情報を統合することで近赤外情報を 3 次元的に提示可能であることを検証し、そのデータを用いて水源が視認可能であることを確認した。過去に作成した既存のサーベイマップを参照し、自己位置データなどを用いて既存情報からの差分を検出することにより、新たな環境センシング結果を補完し、高精度化した。テストデータを用いることにより、計算機上でアルゴリズム構築を完了した。オドメトリなどから得られる自己位置情報のみでは精度が不十分な場合に対し、3 次元点群位置合わせ手法である ICP (Iterative Closest Point) を用いることで、複数視点から計測した複数の計測データを精緻に統合し、視野を拡張する手法を構築した。得られた広範囲の 3 次元データに対して、距離ベースのフィルタや水平面に対し IMU を用いた傾斜フィルタを施すことで、距離センサの信頼度を考慮して高精度化を行った。「サーベイマップ生成のためのセマンティック SLAM」では、LiDAR からの 3 次元点群データを用い、静止状態におけるロボット周囲の環境の形状情報に対する局所 3 次元マップを生成する手法を構築した。環境特徴量の分布情報を含む点群データを処理し、セマンティックマップを生成する技術の開発を完了した。実際のロボットに搭載した LiDAR から得られた環境の形状情報を持つ 3 次元点群データを、平成 30 年度に構築した八分木データ構造のマップに変換する処理を実現した。また、仮想的に模擬した熱源・水たまりの属性クラスを付与した 3 次元点群データから、局所 3 次元セマンティックマップの生成を可能にした。ロボットのオドメトリと IMU (inertia measurement unit) から測定される姿勢（ロール、ピッチ、ヨー角）データを用い、3 次元空間内を移動するロボットの 6 自由度自己位置・姿勢推定を行う手法を確立した。探査環境における広域セマンティックマップを生成するため、推定されたロボットの 6 自由度位置・姿勢情報に基づき、ロボットの移動中に生成された複数の局所セマンティックマップを統合する手法を構築した。ロボットの 6 自由度の位置・姿勢推定に関しては、基礎的な 6 自由度の運動学を解いて実装した。この際、オドメトリによる誤差が発生するため、提案した

環境の特徴量の分布情報を応用した ICP (iterative closest point) アルゴリズムを通じてロボットの位置・姿勢誤差を修正する手法を採用し、統合されたセマンティックマップの精度を向上させた。「3次元セマンティックマップを用いたクローラロボットの経路強化学習と提示」では、平成30年度で開発した実験用クローラロボットを用いて、セマンティックマップで仮想的に学習した仮想ロボットの最適移動経路を実ロボットに組み込み、実環境内の自律移動を実現した。また、実環境での移動を想定した、制御システムの開発とクローラロボットの移動機能の改良も行った。セマンティックマップにより学習したロボットの移動経路は複数存在し、最終的な移動経路の判断はオペレータが行う。そのため、セマンティックマップにより学習した経路をオペレータに3次元地図を活用して提示する手法と、経路の選択インターフェースを構築した。選択された経路情報を実ロボットに転送するシステムも構築した。シミュレーション内の仮想ロボットと実クローラロボットが同機能となるように制御プログラムを調整して、学習結果を実ロボットに転移するシステムを開発し、学習結果に基づく実ロボットの自律移動を実現した。また、クローラロボットのクローラベルト幅の変更などによる移動性能向上を行った。シミュレーションによる仮想環境内の複数経路取得も実施し、シミュレータ上の3次元地図上での経路表示と移動経路の出力機能も開発した。オペレータがシミュレータから出力された移動経路を選択し、CSV形式で保存された強化学習の方策を実ロボットへ転送するシステムを実現した。

本研究の提案システムは原子力発電所建屋内における動作も目指しているため、耐放射線性の議論が重要となる。本年度の調査により、搭載センサのすべてが耐放射線性を有していないことが明らかとなった。そのため、耐放射線性を有した代替センサの調査や、現在所有している機器の耐放射線性試験も令和2年度への課題である。

以上のことから、令和元年度の業務目標を達成した。今後は各要素技術の統合、モックアップによる検証実験を複数回行う予定である。その実験結果も踏まえ、システムの改善、最終試験による提案システムの評価を実施する。

This is a blank page.

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
光照射量	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 =10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的關係は、 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 _e =(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「△」は対応關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

