

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－

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)

-FY2018 Center of World Intelligence Project for Nuclear Science/Technology
and Human Resource Development-

廃炉国際共同研究センター
東京工芸大学

Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science
Tokyo Polytechnic University

福島研究開発部門
福島研究開発拠点
Fukushima Research Institute
Sector of Fukushima Research and Development

January 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

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 －

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

廃炉国際共同研究センター

東京工芸大学

（2019 年 11 月 5 日受理）

日本原子力研究開発機構（JAEA）廃炉国際共同研究センター（CLADS）では、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（以下、「本事業」という）を実施している。本事業は、東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子力発電所の廃炉等を始めとした原子力分野の課題解決に貢献するため、国内外の英知を結集し、様々な分野の知見や経験を、従前の機関や分野の壁を越えて緊密に融合・連携させた基礎的・基盤的研究及び人材育成を推進することを目的としている。平成 30 年度の新規採択課題から実施主体を文部科学省から JAEA に移行することで、JAEA とアカデミアとの連携を強化し、廃炉に資する中長期的な研究開発・人材育成をより安定的かつ継続的に実施する体制を構築した。

本研究は、研究課題のうち、平成 30 年度「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」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移動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、学校法人東京工芸大学が実施した成果に関するものである。

廃炉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)
– FY2018 Center of World Intelligence Project for Nuclear Science/Technology and Human Resource
Development –

Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science

Tokyo Polytechnic University

Fukushima Research Institute, Sector of Fukushima Research and Development

Japan Atomic Energy Agency

Tomioka-machi, Futaba-gun, Fukushima-ken

(Received November 5, 2019)

The Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science (CLADS), Japan Atomic Energy Agency (JAEA), had been conducting the Center of World Intelligence Project for Nuclear Science/Technology and Human Resource Development (hereafter referred to “the Project”) in FY2018. The Project aims to contribute to solving problems in nuclear energy field represented by the decommissioning of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc. 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”.

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	2
付録 成果報告書	5

Contents

1. Outline of Center of World Intelligence Project for Nuclear Science/Technology and Human Resource Development	1
2. Accepted Proposal in FY2018.....	2
Appendix Result Report	5

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。)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(平成31年度より新設)に再編した。

2. 平成 30 年度採択課題

平成 30 年度は「共通基盤型原子力研究プログラム」、「課題解決型廃炉研究プログラム」、「国際協力型廃炉研究プログラム」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 30 年 5 月 22 日（火）～6 月 22 日（金）
平成 30 年 5 月 22 日（火）～7 月 12 日（木）※日英共同研究のみ
- ・ 提案数：
 - 共通基盤型原子力研究プログラム 49 課題（若手研究 14 課題、一般研究 35 課題）
 - 課題解決型廃炉研究プログラム 28 課題
 - 国際協力型廃炉研究プログラム 5 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、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、表 2-1 に掲げる 19 の採択課題を決定した。

表 2-1 平成 30 年度採択課題一覧（1/3）

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
炉心熔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

表 2-1 平成 30 年度採択課題一覧 (2/3)

課題名	研究代表者	所属機関
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

【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

表 2-1 平成 30 年度採択課題一覧 (3/3)

課題名	研究代表者	所属機関
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	大学共同利用機関法人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

国際協力型廃炉研究プログラム（日仏共同研究）

課題名	研究代表者	所属機関
採択なし	—	—

本報告書は上記のうち、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」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.

平成 30 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 30I107)

成果報告書

平成 31 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平成 30 年度「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」の成果を取りまとめたものです。

目次

概略	iii
1. はじめに	1-1
2. 業務計画	
2.1 全体計画	2. 1-1
2.2 平成 30 年度の成果の目標及び業務の実施方法	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
(1) セマンティックマップを用いた経路強化学習	2. 2-1
(2) 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	2. 2-1
2.2.4 研究推進	2. 2-2
3. 平成 30 年度の実施内容及び成果	
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
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
3.2 サーベイマップ生成のためのセマンティックマップ SLAM	
(再委託先：中央大学)	3. 2-1
3.2.1 シミュレーション環境構築	3. 2-1
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 セマンティックマップを用いた経路強化学習	3. 3-1
3.3.2 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. 3-5
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
表 3-1	実験用クローラロボット仕様の概略	3. 3-5

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	近赤外カメラから得られる水の画像の例	3. 1-2
図 3-4	推定されたセンサ間の位置姿勢関係	3. 1-3
図 3-5	開発したシミュレーション環境ツール	3. 2-1
図 3-6	3次元点群情報	3. 2-1
図 3-7	OctoMap ライブラリにより生成した3次元マップ	3. 2-2
図 3-8	Collada(.dae)形式マップデータの例	3. 2-3
図 3-9	データ授受のインターフェイス	3. 2-3
図 3-10	本事業で構築したシミュレータ	3. 3-1
図 3-11	3次元マップのボクセル化	3. 3-2
図 3-12	3次元マップのCollada形式への変換	3. 3-2
図 3-13	Collada形式マップのChoreonoidによる読み込み	3. 3-2
図 3-14	試作した仮想ロボットのモデル	3. 3-3
図 3-15	3次元マップ上に配置された仮想ロボット	3. 3-4
図 3-16	実験用レスキューロボットの基本設計（モータ配置と筐体設計）	3. 3-6
図 3-17	実験用レスキューロボットの外観	3. 3-6
図 3-18	移動経路提示システムの画面設計とシステム構成	3. 3-7
図 3-19	移動軌跡情報提供のための実ロボットのローカル座標系	3. 3-8

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及び、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業務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。

平成 30 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、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を行う。センサ類の選定及び調達を完了させ、並行して 3 次元測距システムの構築及び異種複数センサ間キャリブレーションの手法を構築する。キャリブレーション済みのセンサデータを、環境特徴量の分布情報を付加したセマンティックな点群データとして統合するセンサ統合処理手法を構築するとともに、入手したセンサ類を用いて、単体で動作するキャリブレーション済みのセンシングシステムを完成させる。「サーベイマップ生成のためのセマンティック SLAM」では、シミュレーション環境構築を行う。LiDAR(Light Detection and Ranging)を含めたセンサ類からのデータを模擬し、効果的なデータの構造を決定し、決定されたセンサ類と対応するデータの構造をもとに仮想の 3 次元セマンティックマップにおけるシミュレーション環境を構築する。ロボットの行動パラメータ及びマップに関するデータ授受のインターフェイスを構築する。様々な環境条件下でのシミュレーション実験及び検証を可能にするため、想定した環境条件における仮想の 3 次元セマンティックマップを簡単に製作可能なツールの開発を完了させる。「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、セマンティックマップを用いた経路強化学習システムを開発する。クローラロボットが仮想地図環境で経路を学習するためのシミュレーション環境を構築する。シミュレータには 3 次元物理演算が可能なソフトウェアを利用し、後述にて開発する実験用クローラロボットのシミュレーションモデル開発を行う。実センサ情報をもとに生成された 3 次元セマンティックマップと本シミュレータを統合する。また、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にも着手し、実験用クローラロボットの設計と開発を行う。学習シミュレータとの連携システムの開発に着手し、実験用クローラロボットによる学習結果の実行を目標とする。また、学習により得たロボットの安全な移動経路は複数獲得されるため、それらのオペレータへの提示システムの設計を行う。広域セマンティックマップ生成のために、実験用クローラロボットが実際に移動した経路、距離等の情報を提供できるよう仕様を議論しながらシステムを接続する。

平成 30 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、センサ類の選定及び調達を完了させ、並行して 3 次元測距システムの構築及び異種複数センサ間キャリブレーションの手法を構築した。キャリブレーション済みのセンサデータを、環境特徴量の分布情報を付加したセマンティックな点群データとして統合するセンサ統合処理手法を構築するとともに、入手したセンサ類を用いて、単体で動作するキャリブレーション済みのセンシングシステムを完成させた。また、センサ間キャリブレーションにおいては、特徴的なテクスチャパターンを利用し、テクスチャパターンに固定した座標系に対する距離画像センサと近赤外センサのそれぞれの位置姿勢関係を推定することで、両センサ間の相対的な位置姿勢を推定する手法を構築した。このキャリブレーションにより近赤外線情報と距離情報の統合が可能となり、近赤外センサ情報として表される環境特徴量の位置的な分布情報を付加した点群データとして表現する処理が可能となり、キャリブレーション済みのセンシングシステムが完成した。「サーベイマップ生成のためのセマンティック SLAM」では、LiDAR を含めたセンサ類からのデータを模擬し、効果的なデータの構造を決定した。決定されたセンサ類と対応するデータの構造をもとに仮想の 3 次元セマンティックマップにおけるシミュレーション環境を構築した。ロボットの行動パラメータ及びマップに関するデータ授受のインターフェイスを構築した。様々な環境条件下でのシミュレーション実験及び検証を可能にするため、想定した環境条件における仮想の 3 次元セマンティックマップを簡単に製作可能なツールの開発を完了さ

せた。また、LiDAR からの膨大な 3 次元情報の効率的なデータ圧縮が可能であり、様々な情報量を容易に含める 8 分木データ構造を採択した。Windows® 10、Visual Studio® 2017 環境でシミュレーション環境を構築しシミュレーションツールの開発を完了した。ロボットの行動パラメータとマップデータに関して、それぞれのデータ形式（ファイル）を定義し、開発したシミュレーションツールにおけるデータ読込、出力を可能にした。開発したシミュレータツールの UI 上でのマウスのクリックだけで簡単にマップの制作が可能な機能を追加した。「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、クローラロボットが仮想地図環境で経路を学習するためのシミュレーション環境を構築した。シミュレータには 3 次元物理演算が可能なソフトウェアを利用し、後述にて開発する実験用クローラロボットのシミュレーションモデル開発を行った。実センサ情報をもとに生成された 3 次元セマンティックマップと本シミュレータを統合した。シミュレーション環境のソフトウェアには Choreonoid を採用した。3 次元物理演算ライブラリには AGX Dynamics を採用し仮想地図環境における学習環境を構築した。また、Choreonoid 上で動作可能な実験用クローラロボットのモデルを製作し、さらには仮想的な 3 次元セマンティックマップを反映した仮想環境の構築、その環境上での実験用クローラロボットモデルの学習を確認した。また、実験用クローラロボットの設計と開発に着手し、基本機能の開発を終了した。学習シミュレータとの連携システムの開発に着手し、実験用クローラロボットによる学習結果の実行を行った。また、学習により得たロボットの安全な移動経路は、複数獲得されると考えられるため、それらのオペレータへの提示システムの設計を行った。広域セマンティックマップ生成のために、実験用クローラロボットが実際に移動した経路、距離等の情報を提供できるよう仕様を議論しながらシステムを接続した。実験用クローラロボットは 2 つの胴体クローラと 4 つのサブクローラ（フリッパ）で構成され、階段や不整地の踏破が可能となる仕様であり、ロボット本体の基本設計と開発を完了した。また、シミュレータにて学習した結果をロボットで実行し、学習結果にもとづく基本的な動作を実現した。仮想環境で学習した移動経路が複数出力された場合のオペレータへの提示システムを設計し、シミュレータ画面上において最終的に学習した複数の経路が表示され、オペレータが対応する番号やマウスのクリックにより実際のロボットで実行する経路を選択する仕様とした。実験用クローラロボットの移動情報は、ローカル座標系として時間単位での移動量（3 次元空間上での x 、 y 、 θ 軸における移動量）として使用を決定し、広域セマンティックマップ生成のためのシステムで読み込み可能な形式にすることによりシステムを接続した。

平成 31 年度としては、平成 30 年度にて得た成果を用いて、環境特徴量の分布情報を取得する 3 次元測距システムや局所セマンティックマップ生成、広域セマンティックマップ生成技術の開発、オペレータによるロボットの移動経路学習結果提示・選択システムの構築を行い、それぞれの要素技術を接続しモックアップ施設などでの検証実験を行う。

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移動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

生成された広域サーベイマップは意思決定機関へ提供されることを前提とし、後の減災・廃炉・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及び、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業務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、学習結果は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)。

本業務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。本業務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業務の特徴であり、本業務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。

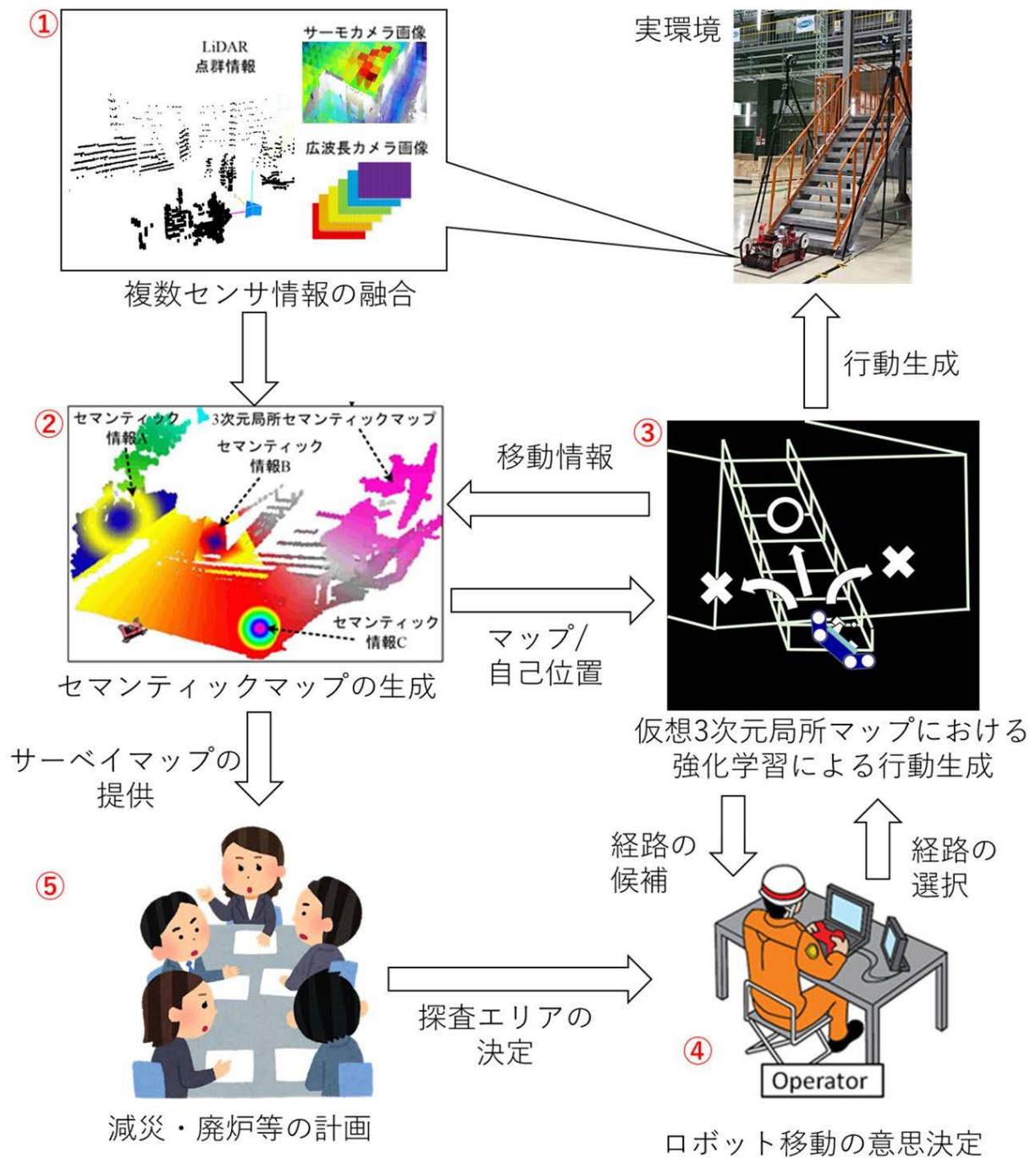


図 1-1 本業務における提案システム全体イメージ

2. 業務計画

2.1 全体計画

本業務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業務を進める。「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、平成 31 年度から各要素技術の統合と評価を開始し、最終年度の平成 32 年度では1つのシステムとして統合、最終評価を行う。本業務の全体計画表を表 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、本業務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業務を遂行する。

表 2-1 全体計画における研究開発年次スケジュール

作業項目			H30年度	H31年度	H32年度
項番	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ル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 平成 30 年度の成果の目標及び業務の実施方法

平成 30 年度では各要素技術や装置の開発と構築、基礎的な動作の検証、次年度のためのシステム間接続の仕様調整を行う。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

平成 30 年度では、表 2-1 における(1)-①の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を実施する。センサ類の選定及び調達を完了させ、並行して 3 次元測距システムの構築及び異種複数センサ間キャリブレーションの手法を構築する。キャリブレーション済みのセンサデータを、環境特徴量の分布情報を付加したセマンティックな点群データとして統合するセンサ統合処理手法を構築するとともに、ここまでに入手完了したセンサ類を用いて、単体で動作するキャリブレーション済みのセンシングシステムを完成させる。

2.2.2 サーベイマップ生成のためのセマンティック SLAM

平成 30 年度では、表 2-1 における(2)-①のシミュレーション環境構築を実施する。LiDAR を含めたセンサ類からのデータを模擬し、効果的なデータの構造を決定する。決定されたセンサ類と対応するデータの構造をもとに仮想の 3 次元セマンティックマップにおけるシミュレーション環境を構築する。ロボットの行動パラメータ及びマップに関するデータ授受のインターフェイスを構築する。様々な環境条件下でのシミュレーション実験及び検証を可能にするため、想定した環境条件における仮想の 3 次元セマンティックマップを簡単に製作可能なツールの開発を完了させる。

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

(1) セマンティックマップを用いた経路強化学習

クローラロボットが仮想地図環境で経路を学習するためのシミュレーション環境を構築する。シミュレータには 3 次元物理演算が可能なソフトウェアを利用し、後述にて開発する実験用クローラロボットのシミュレーションモデル開発を行う。実センサ情報をもとに生成された 3 次元セマンティックマップと本シミュレータを統合する。

(2) 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

実験用クローラロボットの設計と開発に着手する。開発はレスキューロボット Kenaf の開発実績を有する株式会社ソーウェエンジニアリングと協調して設計開発を進める。クローラロボットの基本機能の開発を終了する。学習シミュレータとの連携システムの開発に着手し、実験用クローラロボットによる学習結果の実行を目標とする。また、学習により得たロボットの安全な移動経路は、複数獲得されと考えられるため、それらのオペレータへの提示システムの設計を行う。広域セマンティックマップ生成のために、実験用クローラロボットが実際に移動した経路、距離等の情報を提供できるよう仕様を議論しながらシステムを接続する。

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。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。

3. 平成 30 年度の実施内容及び成果

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、異種複数のセンサから得られる情報を統合するために必要なセンサ間の位置姿勢関係のキャリブレーション手法を構築した。ここで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

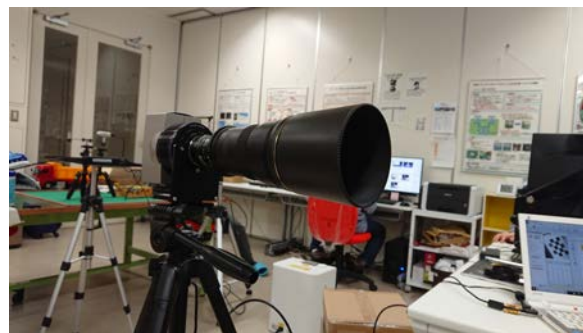


図 3-2 近赤外線カメラ

(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。例えば、図 3-3 は水の吸光波長 (970 nm 付近) で計測した近赤外画像の例である。この例は、950~1700 nm を計測可能なカメラに、800~1900 nm を透過可能な近赤外線フィルタを組み合わせ計測した結果である。可視光では、水は透明に見えるが、近赤外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（文献(1)）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、その他のフィルタ及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。

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。本研究では、この問題を PnP 問題（Perspective-n-Point Problem、文献(2) など）として定式化し、事前にセンサ間の位置姿勢関係を推定することで解決した。具体的には、既知のパターンや既知の形状の物体を両センサから同時に計測し、その幾何的な対応関係を求め、最適化計算を行うことでセンサ間の座標系の変換行列を推定するキャリブレーション手法を構築した。

本手法の有効性を示す上では、RGB-D（RGB color model with Depth processing）センサを用いて原理検証を行った。そのセンサ間の位置姿勢関係の推定結果が図 3-4 であり、上記の手法を用いることでセンサ間の位置姿勢関係が推定可能であることを確認した。最終的にはレーザを用いて広大な範囲の計測が可能な LiDAR を用いる予定である。距離センサとして RGB-D センサを用いた計測系を構築しておくことで、後に LiDAR から得られる距離情報と RGB-D センサの距離情報の比較による点群位置合わせを行うことで RGB-D センサと LiDAR の位置姿勢推定を行うことが可能であるため、LiDAR から得られた3次元形状データと近赤外線センサなどの他のセンサから得られた物理量との統合が可能である。



図 3-3 近赤外カメラから得られる水の画像の例
（左：可視光画像、右：近赤外画像）

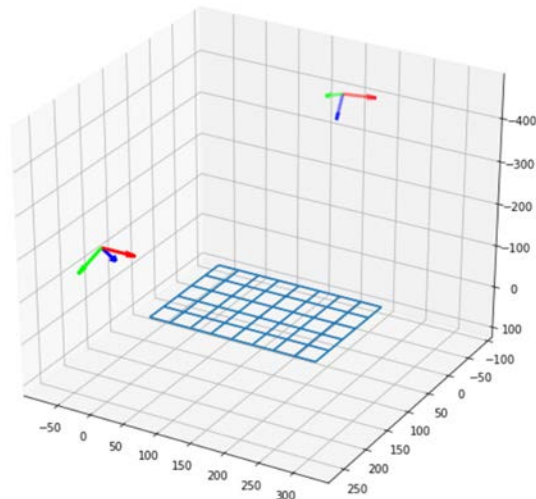


図 3-4 推定されたセンサ間の位置姿勢関係

以上をもって、環境中の距離情報と環境中の特徴的な物理量の分布情報を統合し、3次元的に取得するためのセンシングシステムの構築を完成させた。

参考文献

- (1) テレビ朝日 報道ニュース：“福島第一原発 1 号機 汚染水の漏洩箇所特定”
<https://www.youtube.com/watch?v=XwSgLKgGgwo> (2014 年 5 月 29 日付 記事)
- (2) M. A. Fischler and R. C. Bolles: “Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography”, Communications of the ACM, 24-6, pp. 381-395, 1981.

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 シミュレーション環境構築

千葉工業大学グループでのセンサ情報の処理が完了される前には、本要素技術における実センサ情報を用いた局所セマンティックマップの生成（中央大学グループ）及びそれらを利用したロボットの行動生成のための強化学習（東京工芸大学グループ）の研究進捗が困難である。従って、仮想環境を模擬したシミュレーション環境を構築する必要がある。

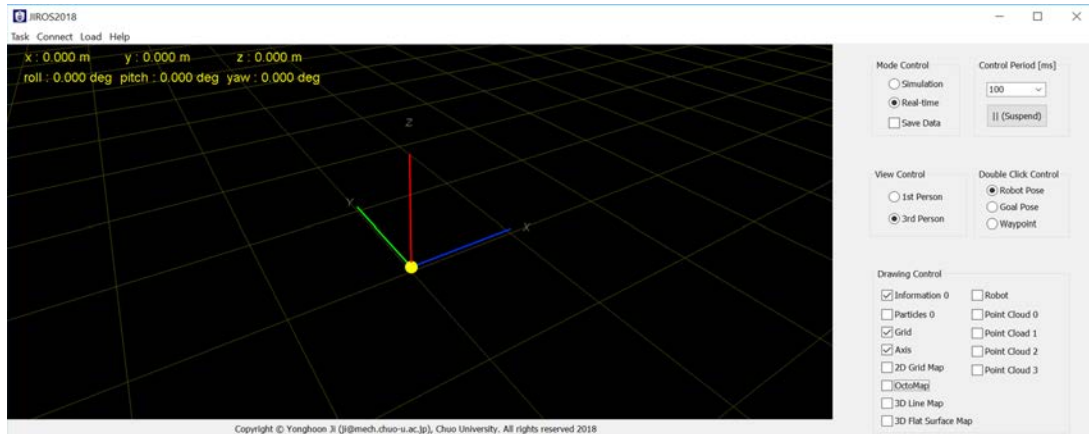
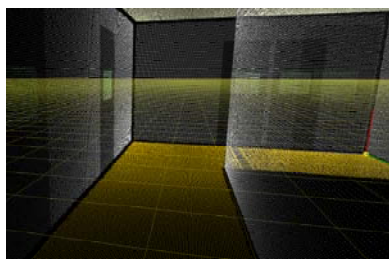


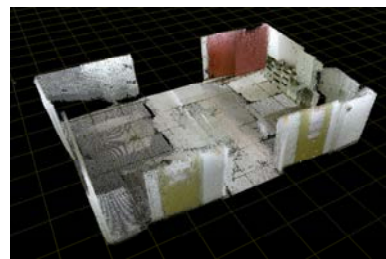
図 3-5 開発したシミュレーション環境ツール

図 3-5 に Windows® 10、Visual Studio® 2017 環境で開発したシミュレーション環境構築のためのツールを示す。環境の 3 次元情報を効果的に表現するため OpenGL ライブラリ⁽¹⁾を導入した。ツール画面の黒い背景の部分が 3 次元情報を描画するための OpenGL 画面であり、真ん中に示す(X、Y、Z)座標軸は環境の世界座標系を意味する。

図 3-6 は開発したツールを利用して描画したシミュレーション環境における 3 次元点群情報を示しており、図 3-6(a) は手動で生成した仮想環境における 3 次元点群情報、図 3-6(b) は複数視点の RGB-D センサ（Microsoft Kinect v2）から取得したデータを統合した 3 次元点群情報を示す。次年度からは千葉工業大学グループから処理された LiDAR 情報を使用する計画である。3 次元点群処理ライブラリとしては PCL（Point Cloud Library）⁽²⁾を導入した。PCL の 3 次元点群データ構造を利用することにより(X、Y、Z)の 3 次元位置情報だけでなく、その位置に対応する環境のセマンティック情報（熱源、水源等）も容易に表現することが可能である。



(a)



(b)

図 3-6 3 次元点群情報：(a) 手動で生成した仮想環境、(b) RGB-D センサから取得した実環境

しかし、密な環境情報を表す数多くの 3 次元点群情報をそのまま扱うと、東京工芸大学グループとのデータ授受のインターフェイス構築が困難であると予想されるため、環境の 3 次元情報に適したコンパクトなデータ表現構造を新たに導入する必要がある。そこで本要素技術の研究課題では、3 次元ボリューメトリック情報を効率的に表現可能な OctoMap ライブラリ⁽³⁾を使用することで、3 次元点群情報をコンパクトに圧縮し、3 次元セマンティックマップを生成する。OctoMap の 8 分木データ構造は、メモリの側面で効率的であるものの、図 3-6 のようなすべての 3 次元点群データをそのまま OctoMap ライブラリに入力すると、非常に計算の負担が大きくなる。従って、事前処理として、数多くの点群データに 3 次元立方体形状の格子を導入し、中心に近い 1 個の点のみをデータとして取る voxel grid filter⁽²⁾を用いる。これにより均一に点群の密度を減少させることが可能となり、以降の作業で実行する演算量を削減することが可能である。OctoMap ライブラリを用いて生成された図 3-6 の 3 次元点群情報に対応するそれぞれの 3 次元マップの様子を図 3-7 に示す。

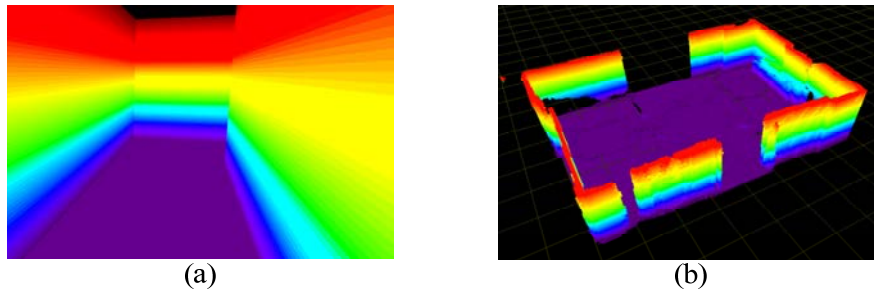


図 3-7 OctoMap ライブラリにより生成した 3 次元マップ：(a)手動で生成した仮想環境、
(b)RGB-D センサから取得した実環境

次に、中央大学グループと東京工芸大学グループ間のデータ授受のインターフェイス構築に関して説明する。まず、開発したツールを用いて作成した 3 次元マップを東京工芸大学グループにおけるロボットの行動生成のために利用するには、マップデータの形式を定義する必要がある。具体的には、東京工芸大学グループが強化学習を実行するために使用する Choreonoid が読み込めるデータ形式にマップデータを変換して出力する必要がある。従って、マップデータを図 3-8 に示すような Collada(.dae)形式で出力し東京工芸大学グループに渡すことで、3 次元マップ情報と Choreonoid との統合を完了させる。ここで、出力した Collada(.dae)形式には、マップ情報を構成する各立方体の中心点の位置と一辺の長さ情報がすべて記載されている。また、東京工芸大学グループから生成されたロボットの行動生成データを中央大学グループにおける SLAM の実装のためのロボットの予測移動軌跡情報として用いるためには、ロボットの行動データの形式を相互間に統一する必要がある。従って、図 3-9(a)のようにロボットの行動データ形式を定義した。図 3-9(b)は東京工芸大学グループにおける実ロボットの行動データをもとに、開発したツール（図 3-5）を用いて復元したロボットの予測移動軌跡である。以上のように、東京工芸大学グループと中央大学グループとのシステムの接続を完了させた。

```

1 type: Collision
2 elements:
3 -
4 type: Shape
5 translation: [4, 10.72, -0.16]
6 geometry: { type: Box, size: [0.32, 0.32, 0.32]}
7 -
8 type: Shape
9 translation: [4.32, 10.72, -0.16]
10 geometry: { type: Box, size: [0.32, 0.32, 0.32]}
11 -
12 type: Shape
13 translation: [4.64, 10.72, -0.16]
14 geometry: { type: Box, size: [0.32, 0.32, 0.32]}
15 -
16 type: Shape
17 translation: [4.96, 10.72, -0.16]
18 geometry: { type: Box, size: [0.32, 0.32, 0.32]}
19 -

```

中心点の座標

一辺の長さ

図 3-8 Collada(.dae)形式マップデータの例

t [s]	Δx [m]	Δy [m]	$\Delta \theta$ [deg]
1	0	0	0
2	0.210305	-0.10526	-4.10875
3	0.197511	0.283542	-1.77501
4	0.228055	0.115542	2.583196
5	0.045512	-0.00544	-42.9781
6	0.000612	-0.00121	-49.0147
7	0.182273	-0.05202	2.005212
8	0.238492	0.177251	6.125777
9	0.228661	-0.00218	-3.78153
10	0.010085	-0.00096	32.18555
11	0.009011	-0.01011	41.92867
12	0.012527	-0.05118	20.22835
13	0.230158	-0.00082	-3.49823
14	0.211889	-0.03084	1.44966
15	0.207558	-0.08334	-1.33175
16	0.017111	-0.00202	-0.9213

(a)

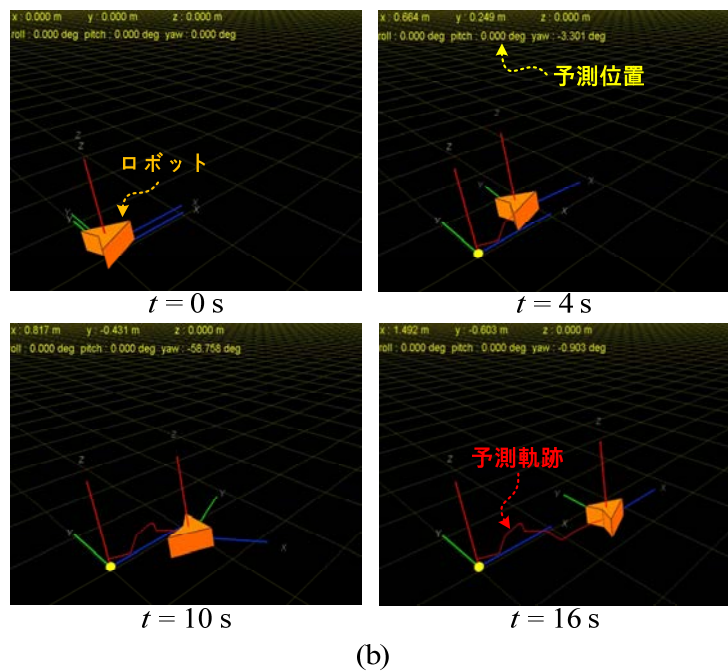


図 3-9 データ授受のインターフェイス : (a) ロボットの行動データの形式、
(b) 復元したロボットの予測移動軌跡

参考文献

- (1) <https://www.opengl.org/>
- (2) <http://pointclouds.org/>
- (3) A. Hornung, K. M. Wurm, M. Bennewitz, C. Stachniss, W. Burgard, "An Efficient Probabilistic 3D Mapping Framework Based on Octrees," Autonomous Robots, Vol. 34, No. 3, pp. 189-206 (2013).

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 セマンティックマップを用いた経路強化学習

セマンティックマップは 3 次元仮想環境の地図であり、その地図データをシミュレータにより取り込み 3 次元物理演算ライブラリを用いて、仮想的なロボット（以下、仮想ロボット）のモデルが安全な移動経路を学習するシステムの基礎的な構築を行った。学習シミュレータのプラットフォームとしては産業技術総合研究所にて開発された Choreonoid⁽¹⁾を採用し、物理演算ライブラリには株式会社ブイエムシーから販売されている Algorix 社の AGX DYNAMICS⁽²⁾を採用した。本事業にて構築したシミュレーション環境の外観を図 3-10 に示す。

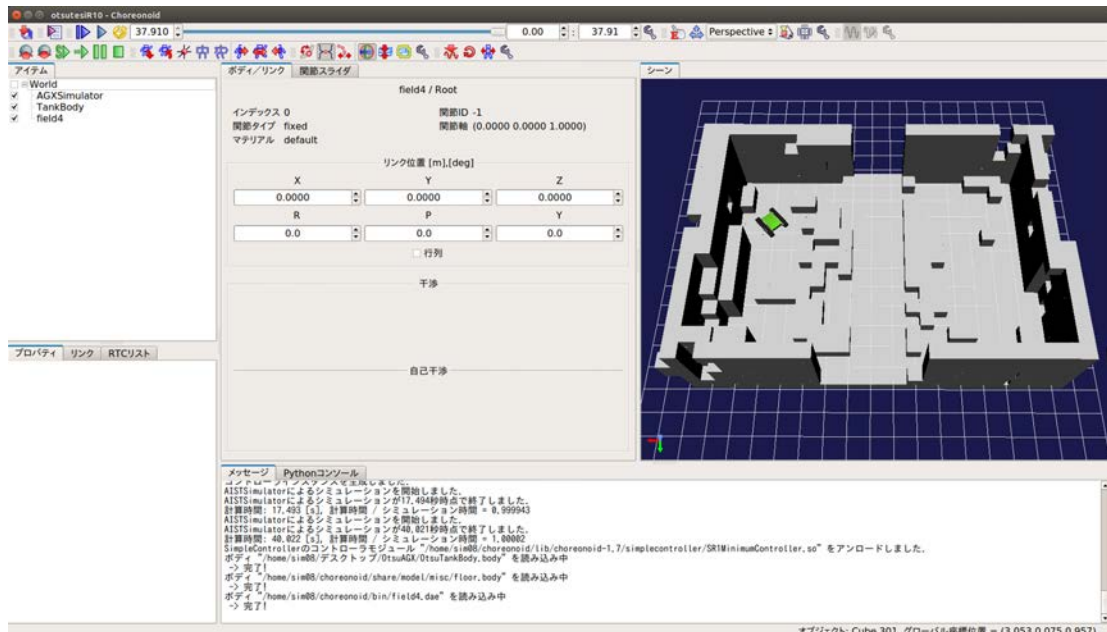


図 3-10 本事業で構築したシミュレータ

Choreonoid に読み込む地図データは、基礎的なシステム接続検証として中央大学が所有している図 3-7(b)の実環境データを、図 3-11 の様にボクセルデータに変更して解像度を削減し Collada 形式へ変換する（図 3-12）。その後、Choreonoid にて読み込むと図 3-13 のように 3 次元マップ形状を保持したまま取り込むことが可能であり、仮想ロボットによる移動経路学習などを実現する環境が構築できた。本事業で構築したシミュレータの環境モデルは Choreonoid 上で用いる衝突用データ（反発係数）等の付加情報も設定できるように構成されている。今後は、環境データの高精細化と環境モデルに対する様々なセマンティック情報の付与を行う。

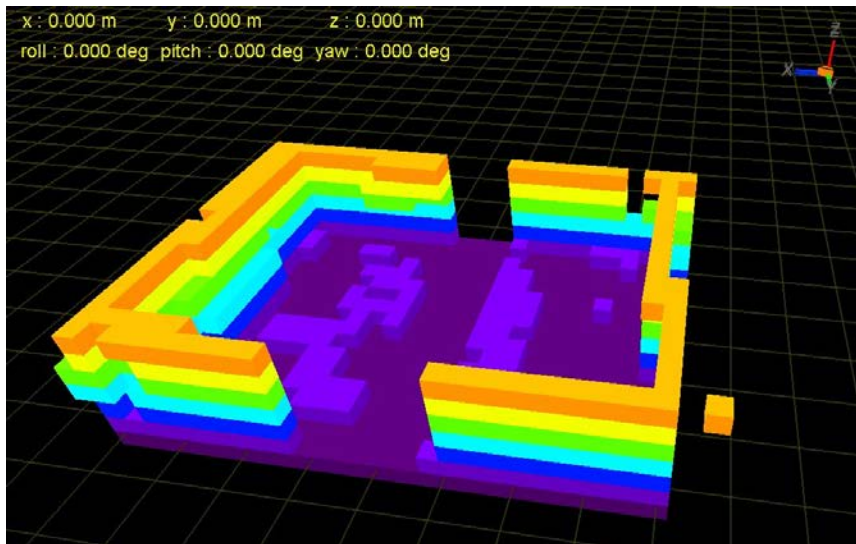


図 3-11 3次元マップのボクセル化

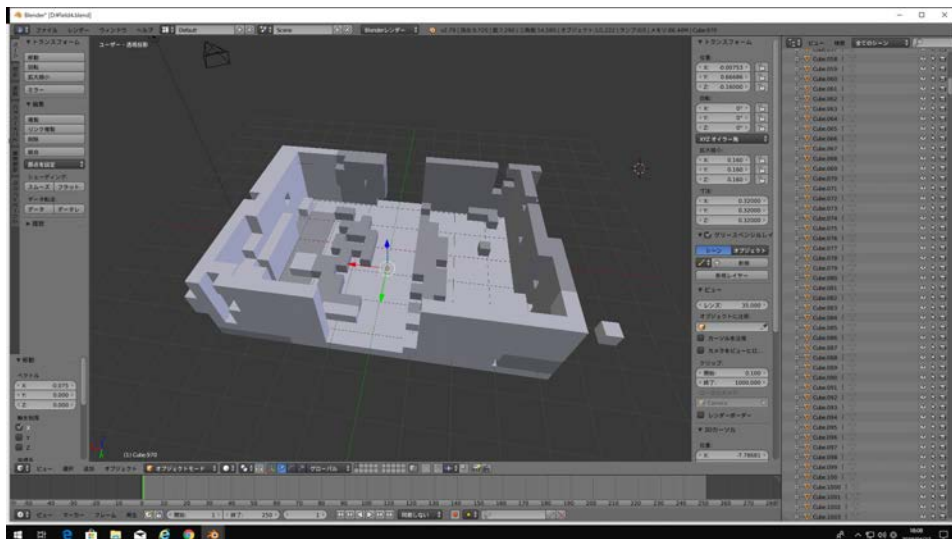


図 3-12 3次元マップの Collada 形式への変換

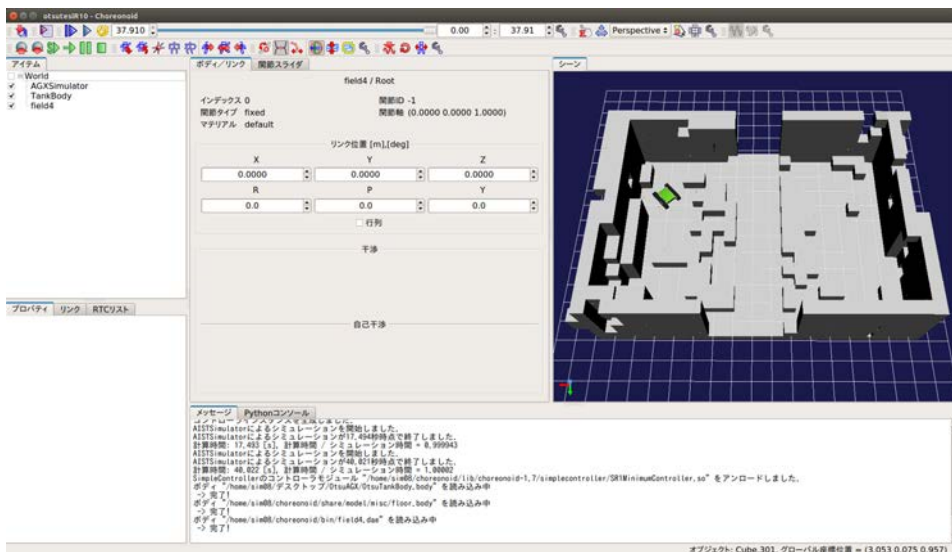


図 3-13 Collada 形式マップの Choreonoid による読み込み

次項にて報告する本事業で開発する実験用レスキューロボットを模した基本的な仮想ロボットのモデルデータ製作も行った。モデルデータはChoreonoidにて読み込める形式であり、移動のための指令値がプログラム上から指示できるよう設計されている。制作した仮想ロボットのモデルデータを図 3-14 に示し、シミュレータ内の 3 次元マップ上に配置されたロボットモデルの外観を図 3-15 に示す。本モデルデータは、平面上の基本的な移動は可能となるが、段差や障害物を乗り越えるためのフリッパはモデル化されていない。今後継続してモデルデータの改良が必要である。

平成 30 年度において、仮想ロボットには強化学習である Q 学習のアルゴリズムをもとに、簡単な学習機能を組み込み、簡単な移動（例えば目的地への移動や、衝突回避）などの行動が確認できた。簡単な動作だけを実現しているため今後は複雑な経路の学習や、その結果の検証作業、ヒトが見やすい学習結果の可視化なども今後の課題となり継続して取り組んでいく。

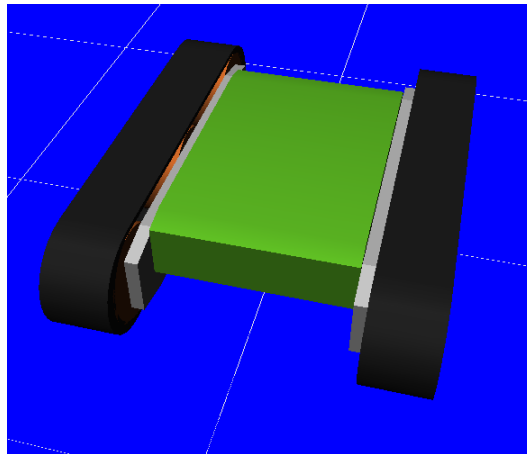


図 3-14 試作した仮想ロボットのモデル

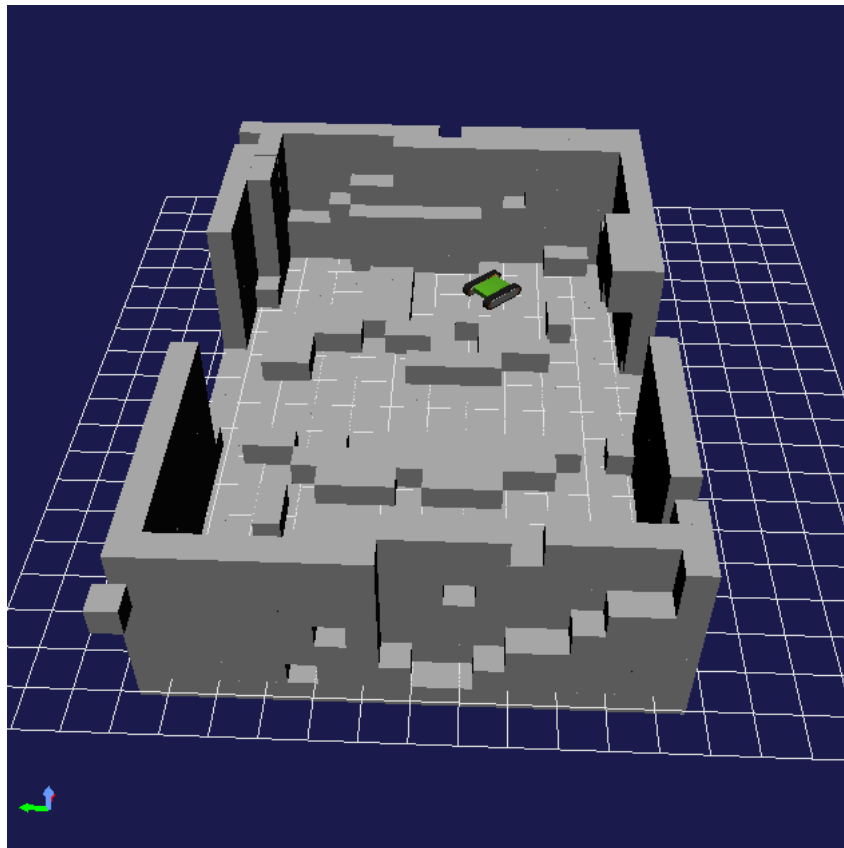


図 3-15 3次元マップ上に配置された仮想ロボット

3.3.2 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 年度では、まず実験用レスキューロボット（以下、実ロボット）の設計と開発に着手した。まず、実ロボットの仕様を表 3-1 のように設定し、基本形状はクローラロボット型とした。実ロボットは胴体クローラによる移動機構以外にも、障害物や階段も移動、踏破できるように 4 つのサブクローラ（フリッパ）を搭載する仕様とした。これらの仕様にもとづき、設計した実ロボットの図面を図 3-16 に示す。

表 3-1 実験用クローラロボット仕様の概略

大項目	中項目	小項目・詳細		
機能仕様	本体	・ 前後移動，超信地旋回が可能なクローラ機構であること		
		・ クローラベルトはゴム等の滑りにくい素材であること		
		・ バッテリーは本体内部ないしは側面に固定できること		
		・ 本体上部にセンサを取り付ける櫓が搭載されていること		
	フリッパ	・ フリッパはクローラ機構であること		
		・ 本体に4つのフリッパが搭載されていること		
		・ 各フリッパは独立制御が可能であること		
		・ 本体との接続軸を中心に無限回転が可能であること		
		・ クローラベルトはゴム等の滑りにくい素材であること		
寸法仕様	本体寸法	縦 (W1)	550 mm	以上であること
		横 (D1)	300 mm	以上であること
		高 (H1)	100 mm	以上であること
	クローラ寸法			
		縦 (W2)	300 mm	以上であること
		横 (D2)	40 mm	以上であること
		高 (H2)	100 mm	以上であること

実ロボットの設計にもとづき開発した実ロボットを図 3-17 に示す。図 3-17 の実ロボットには、動作試験用のバッテリーと電源コントローラ、ラップトップ PC（以下、PC）が搭載されている。動作試験を実施し、直進動作や旋回など、使用を満たす基本動作が行えることを確認した。PC から指令値を出力し移動を制御することも可能である。

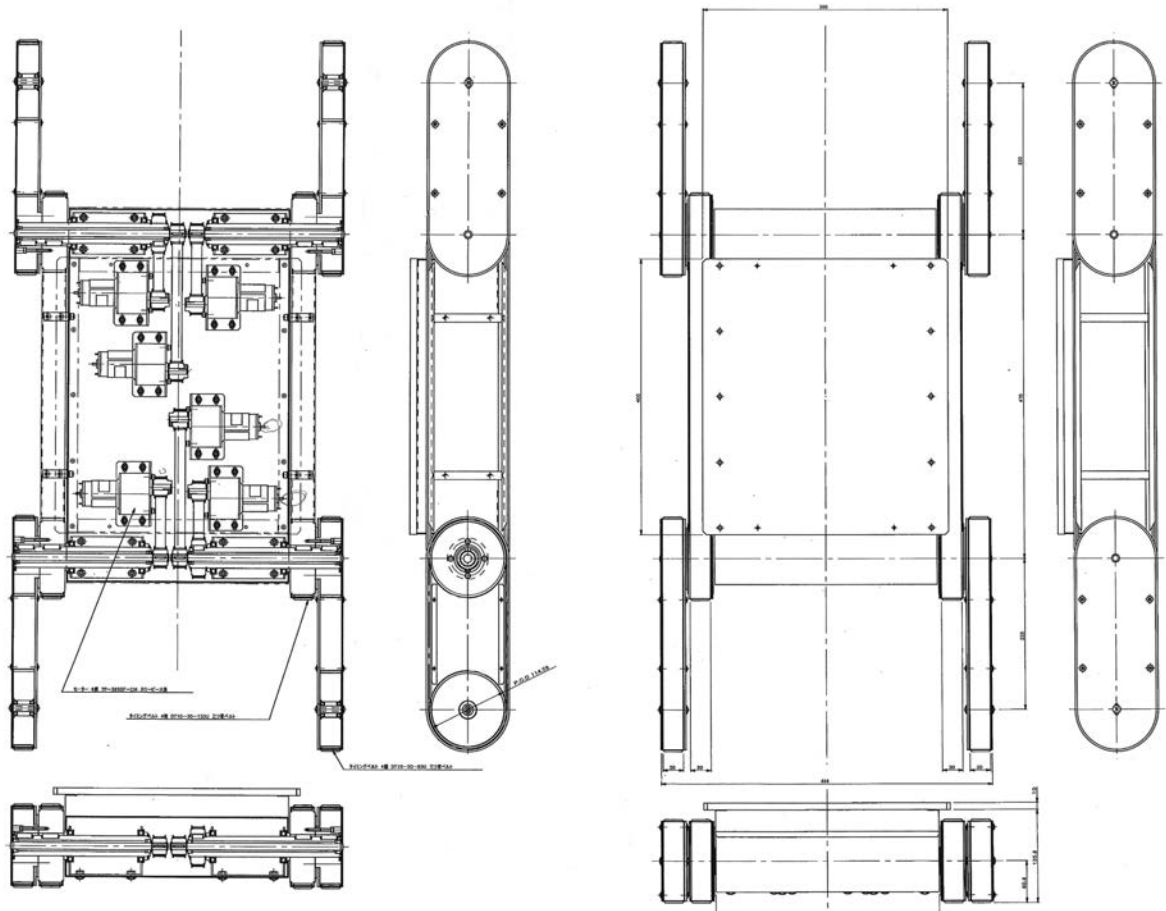


図 3-16 実験用レスキューロボットの基本設計（モータ配置と筐体設計）

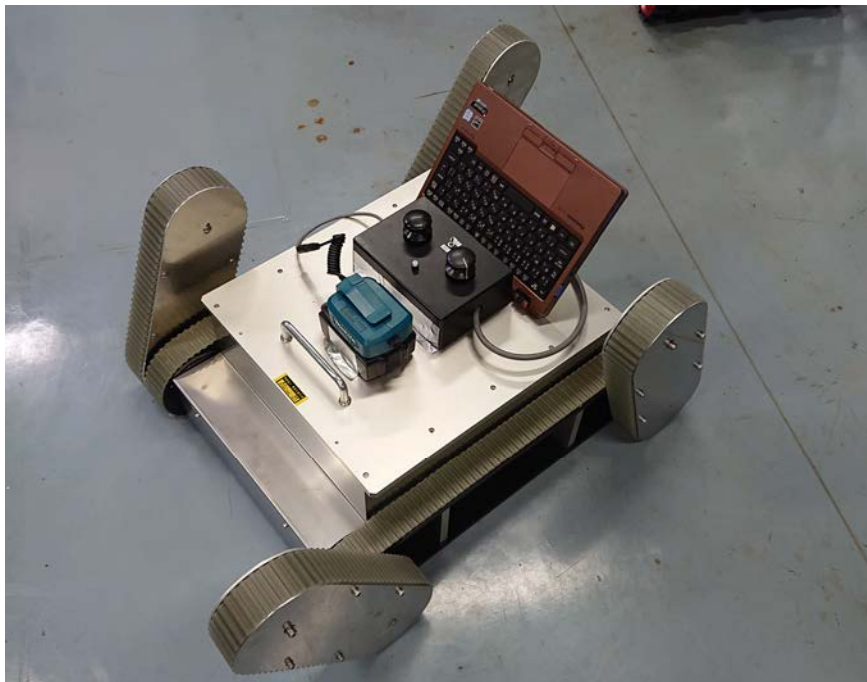


図 3-17 実験用レスキューロボットの外観

実ロボットが実行することとなる学習シミュレータで獲得する移動経路は複数獲得され、と考えられ、最終的な経路の意思決定を行うのは実ロボットのオペレータである。そのため、学習シミュレータで獲得した移動経路の提示システムの設計を行った。本事業で開発するオペレータへの経路提示システムは図 3-18 に示す構成と操作画面で構成される。実ロボットによる 3 次元マップ情報を仮想ロボットが学習し、移動に安全な経路を学習した結果をシミュレータ上に表示し、その各経路にナンバリングがなされるようにする。オペレータは経路にナンバリングされた番号のボタンをクリックもしくはタイプし、選択された経路の方策（強化学習で獲得される制御則）を実ロボットに転送し、実ロボットはその方策をもとに移動を開始する。

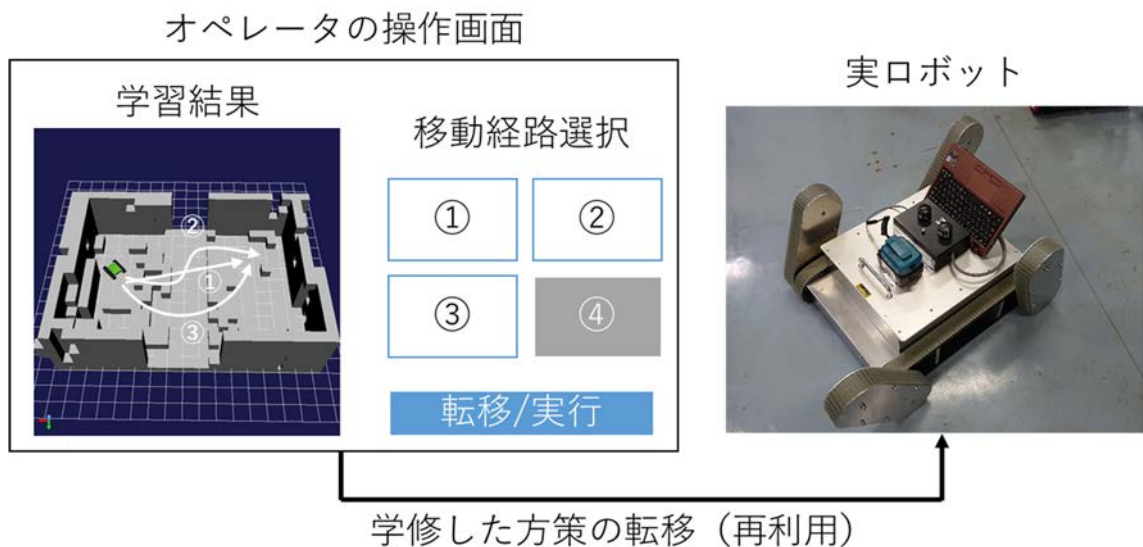


図 3-18 移動経路提示システムの画面設計とシステム構成

実ロボットは仮想ロボットにて学習した経路を実行し、実環境の移動を行うが、実際に移動した軌跡も重要な情報であり、中央大学グループの広域セマンティックマップ生成のシステムに移動軌跡情報を転送できるよう仕様を議論しシステムを接続した。移動軌跡情報はサンプリング毎に取得された移動量変化分（ Δx 、 Δy 、 $\Delta \theta$ ）で構成され、実ロボットのローカル座標系は図 3-19 により定義した。図 3-19 では、実ロボットを俯瞰した状態の座標系である。クローラロボットが不整地を走行した場合、移動軌跡情報を取得したとしても誤差が多いと考えられる。そのため、実ロボット内蔵のロータリエンコーダをはじめ、ジャイロセンサなども活用し移動軌跡情報の高精度化も検討する必要がある。

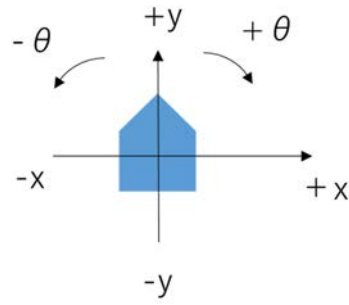


図 3-19 移動軌跡情報提供のための実ロボットのローカル座標系

上記のローカル座標系を考慮して、さらに実ロボットのロータリエンコーダ等から試験的に移動軌跡情報を取得し、中央大学のシミュレータに読み込ませた結果が図 3-9 である。これにより、実ロボットとセマンティック SLAM を接続するためのデータ授受のインターフェイス構築が完了した。

参考文献

- (1) <https://choreonoid.org/ja/>
- (2) <https://www.vmc-motion.com/14416057938792>

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（再委託先研究者）間との web ミーティングを毎月行った。平成 31 年 3 月には進捗・成果とりまとめのために全体会議を東京工芸大学厚木キャンパス 10 号館にて実施し、年度内の進捗や成果の確認だけでなく、次年度に向けての課題整理や研究開発作業を確認した。他にも、廃炉国際共同研究センター遠隔技術ディビジョン遠隔システム開発グループのグループリーダーである川端邦明博士と本研究における議論を行った。特に、実験用レスキューロボット開発やシステム構成、実験場として国立研究開発法人日本原子力研究開発機構福島研究開発部門櫛葉遠隔技術開発センターモックアップ階段施設を使用するための実験条件等を議論した。

また、環境やロボット種類が異なる状況下での強化学習における転移学習法として計算機実験を行った成果を、ロボティクス・メカトロニクス講演会 2019 in Hiroshima にて発表するために「強化学習における方策転移度合い決定法の開発」というタイトルで論文投稿を行い、令和元年 6 月に発表予定である。

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移動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い、それぞれの要素技術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

それぞれ、異種複数のセンサから得られる情報を統合するために必要なセンサ間の位置姿勢関係のキャリブレーション手法を構築し、環境中の距離情報と環境中の特徴的な物理量の分布情報を統合し、3次元的に取得するためのセンシングが可能となった。また、セマンティック情報を表示可能な3次元点群情報シミュレーション環境を開発し、セマンティックマップの作成と実ロボットとの接続が可能となった。実験用のクローラロボットを設計開発し、動作を確認した。3次元セマンティックマップにおける強化学習を実現するための物理演算シミュレーション環境を構築し、学習とその結果を実験用クローラロボットにて実行可能であることを確認した。

以上のことから、平成30年度の業務目標を達成し、今後は各要素技術の統合に向けた要素技術開発と統合、モックアップによる検証実験を行う予定である。さらには本事業の最終的な応用も考慮し、提案システムの耐放射線性に関しての議論も今後行っていく。

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	1
比透磁率 ^(b)	(数字の) 1	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 ^(c)	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	ジーメンズ	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
光束度	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
照射度	ルクス	lx	lm/m ²	m ⁻² cd
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のみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてののみ使用される。
(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
粘着力のモーメント	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
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角加速度	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	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
表面電荷密度	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=0.1 MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322 Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1 nm=100 pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852 m
バイン	b	1 b=100 fm ² =(10 ¹² cm) ² =10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600) m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、 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	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 =0.1 Pa s
ストークス	St	1 St=1 cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1 cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻²
フオト	ph	1 ph=1 cd sr cm ⁻² =10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1 cm 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=1 Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(a)	Oe	1 Oe ≡ (10 ³ /4 π) 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=1 cGy=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=4.1858 J (「15℃」カロリ), 4.1868 J (「IT」カロリ), 4.184 J (「熱化学」カロリ)
ミクロン	μ	1 μ =1 μm=10 ⁻⁶ m

