

廃炉創造ロボコンにおけるデブリ回収用小型探査車の開発

A Development of a Small Exploration Vehicle for Debris Recovery in a Decommissioning a Nuclear Reactor Creation Robot Contest

千田 泰和¹⁾
指導教員 富田 雅史¹⁾

1) サレジオ工業高等専門学校 機械電子工学科 電子制御システム研究室

近年、福島原子力発電所での廃炉作業では燃料デブリの取り出しが大きな課題となっている。そこで本研究では、原子炉格納容器内に入りデブリを回収することを目的とし、そのためのロボットの開発を行い、廃炉創造ロボコンに出場する。本論文ではロボット構成とデブリ回収用小型探査車について報告する。

キーワード： 福島原子力発電所, 廃炉作業, 燃料デブリ回収, 廃炉創造ロボコン

1. 緒言

廃炉創造ロボコンとは、日本原子力研究開発機構が主催する大会である。この大会では、ロボット製作を通じて若い世代に「廃炉」に興味を持ってもらうと同時に、実践的な課題発見能力、課題解決能力を身につけてもらうことを目的としている[1]。2011年に発生した東日本大震災によって福島第一原子力発電所は甚大な被害を受けた。震災直後から現在まで原子炉施設の解体などの廃炉に向けた作業が進められている。現在は、使用済み燃料の一部を除き取り出しが完了している。東京電力のロードマップによると福島第一原発の燃料デブリの取り出しが2021年までに開始される予定であった。しかし、現在までのところ燃料デブリの取り出しは成功していない。今後は1号機、2号機の燃料デブリの取り出しが大きな課題になる。筆者はこの課題をこれまでNHKロボコンで培った経験を生かして解決できないかと考え、本コンテストに参加した。

本論文ではデブリを回収する小型探査車の開発、調査用ドローンの制御、回路について報告する。

2. 課題概要

第9回廃炉創造ロボコンの課題は、福島第一原子力発電所2号機原子炉格納容器内部調査である。競技フィールドを図1に示す。競技は格納容器内部を模したフィールドのスタートゾーンにロボットを置き、ロボットを視認できないオペレーションルームからカメラなどの情報を頼りに操作を行う。ロボットは、原子炉格納容器(PCV)に設置されている所員用エアロックであるX-1ペネストレーション(以下X1ペネ)からPCV内にアクセスするルートを使用する。グレーチング上を10m程度走行し、急角度の階段を約1.5m降下する。降下後、階段下にラン

ダムに配置された燃料デブリを模した1辺10mmの立方体(アクリル製)の対象物を回収し、来た道に戻り、再度格納容器外に帰還する。制限時間は10分となっており、回収したデブリの数や帰還までにかかった時間、ロボットの技術力、アイデア、完成度などが評価の対象となる。

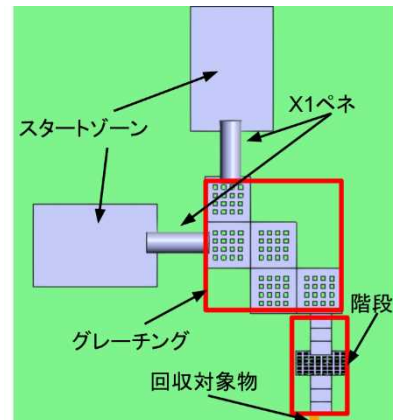


図1 競技フィールド図

3. 課題解決方法

本研究では課題解決方法として3台のロボットを開発することにした。ロボットの全体構成を図2に示す。まず、X-1ペネへの侵入と、グレーチング上を走行し他のロボットを運搬するポーターロボット。次に階段下の調査、デブリ回収を行うデブリ回収用小型探査車(以下プロローラー)。そして内部の調査と俯瞰視点によってプロローラーのサポートを行うドローン。この3台のロボットを連携させて競技を行う。

ポーターロボットにドローンとプロローラーを搭載した状態からスタートする。ポーターロボットはオペレーションルームと有線で制御を行う設計とした。オペレーターは、カメラの映像を頼りに

X1 ペネ、グレーチング上を走行し階段手前までポーターロボットを移動させる。次にドローンをポーターロボットから分離し、離陸させ上空で待機させる。このドローンは無線でオペレーションルームのオペレーターとつながっており、カメラの映像と LIDAR からの情報をもとに操縦を行うことになる。その後、プロローラーをポーターロボットから分離し、階段下に向けて射出する。プロローラーは階段下に降下後、外殻を展開し階段下の調査とデブリの回収を行う。プロローラーは無線でオペレーションルームとつながっており、カメラ映像とドローン操縦者からの指示をもとにデブリの回収を行う。その後、ポーターロボットがプロローラーにつながっているワイヤーを巻き取り、階段の上まで引き上げる。その後、ドローンをポーターロボットに着陸させ固定する。プロローラーとドローンがポーターロボットに合体したことを確認したのち来た道に戻り、PCV 内からロボットを回収し、課題を達成する。

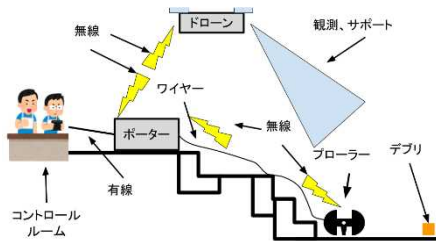


図2 全体構成

4. プロローラーロボットの概要

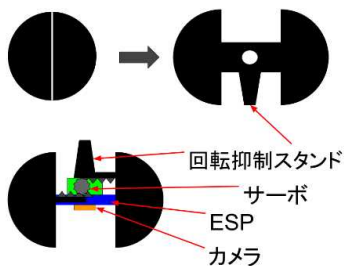


図3 プロローラーの構成

図3にプロローラーの構成図を示す。プロローラーは、階段下の探査とデブリ回収を行うロボットとした。機体設計では Autodesk Fusion を使用した。本体は、展開機構、駆動機構が一体化している。また、機体は球形であるため、駆動機構の反力によって機体が回転し、適切な走行が困難である。そのため、機体後方に回転抑制スタンドを付けることにより機体の回転を抑制し安定した走行を実現している。

本体はねじを除くすべてのパーツをプラスチックとし、全て 3D プリンターで出力した高強度、高剛性の PLA 製のものとなっている。また各部品の締結には M2 ネジと高い引張強度を持つ結束バンドを使用している。デブリ回収時はサーボモーターで

外殻と回転抑制スタンドを展開する。外殻はタイヤとして走行、落下時の姿勢制御、落下の衝撃吸収、デブリの格納、放射線の外部流出防止の機能を持っている。展開後はローテーションサーボモーターで外殻を回転させて移動を行う。デブリを外殻内に格納できる位置まで移動し、外殻を閉じデブリをロボット内部に格納し放射線の外部流出を防ぐ。

プロローラーの制御にはマイコン (ESP32-S3) を使用する。ESP の機能を利用して ESP をサーバ化し、通信に利用する。映像の配信は HTML ファイルを利用してブラウザで表示できるようにした。コントローラーの制御信号は、Python ファイルを用いて WebSocket を利用し送信する。コントローラーには DUALSHOCK4 を使用する。

5. 結言

本研究で製作した小型ロボットの外観を図4に示す。現在、小型探査車 (プロローラー) の製作はハードウェア、ソフトウェアともに完成しており、実際に想定通りの動作ができることを確認している。しかし、外殻の耐久性とデブリの回収性能にはまだ不安が残るため、改良が必要である。また、ドローンの制御に使用する ROS2 のセットアップが完了している。今後はドローンに搭載する LIDAR 等の周辺機器の実装を行う。

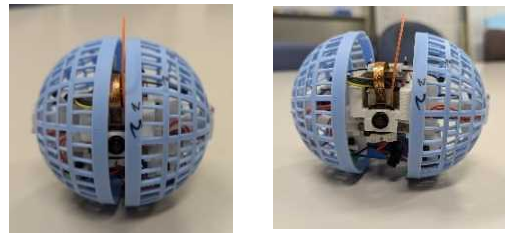


図4 開発したプロローラー (右: 展開前、左: 展開後)

6. 今後の予定

現時点でプロローラーの製作は概ね完了しており、細かな手直しが残っているのみである。今後はドローンの LIDAR、カメラ等のサポート機能の開発を行っていく予定である。

文献

- [1] 廃止措置人材育成高専等連携協議会, “第9回廃炉創造ロボコン実施要項”
- [2] 廃止措置人材育成高専等連携協議会, 競技フィールド図 <https://fdecomi.fukushima-nct.ac.jp/2024/field.html>
- [3] 東京電力, 廃炉について https://www.tepco.co.jp/decommission/towards_decommissioning/Things_you_should_know_more_about_decommissioning/answer-01-j.html
- [4] 東京電力, 廃炉に向けたロードマップ <https://www.tepco.co.jp/decommission/project/roadmap/index-j.html>
- [5] JAXA, 宇宙探査イノベーションハブ 変形型月面探査ロボット https://www.ihub-tansa.jaxa.jp/topics/transformable_lunar_robot.html