

## 加速器トンネルでの活用を目指す安全装備輸送ロボットの開発

### DEVELOPMENT OF SAFETY-EQUIPPED TRANSPORT ROBOT AIMING FOR UTILIZATION IN ACCELERATOR TUNNEL

川端康夫<sup>#, A)</sup>、松田浩朗<sup>A)</sup>、松元和伸<sup>A)</sup>、田頭茂明<sup>B)</sup>、  
富井 洋平<sup>C)</sup>、石井恒次<sup>D)</sup>、山本 昇<sup>D)</sup>、別所 光太郎<sup>D)</sup>、吉岡正和<sup>E)</sup>  
Yasuo Kawabata<sup>#, A)</sup>, Hiroaki Matsuda<sup>A)</sup>, Kazunobu Matsumoto<sup>A)</sup>, Shigeaki Tagashira<sup>B)</sup>,  
Yohei Tomii<sup>C)</sup>, Koji Ishii<sup>D)</sup>, Noboru Yamamoto<sup>D)</sup>, Kotaro Bessho<sup>D)</sup>, Masakazu Yoshioka<sup>E)</sup>  
<sup>A)</sup> TOBISHIMA Corp., <sup>B)</sup> Kansai Univ., <sup>C)</sup> ALSOK, <sup>D)</sup> KEK, <sup>E)</sup> Iwate Univ.

#### Abstract

Since 2019, the J-PARC MR accelerator tunnel has been operating a disaster prevention system that realizes real-time location information and two-way information transmission of workers. We have added various functions to create an environment that is easy for workers to use daily, and have worked on developing a system that can be used immediately in the event of a disaster. Furthermore, in order to reduce the burden on workers, we have begun to consider the use of robots and drones. Using a network of disaster prevention systems that take measures against power outages, we are proceeding with development assuming that safety goods necessary for disaster prevention will be automatically transported to workers in tunnels by robots and drones. We are also considering the use of these robots and drones for areas that currently rely on human measurement, such as radiation monitoring after the beam is stopped and measurement of various instruments. In 2022, we prepared a commercially available trolley robot and conducted tests with functions such as following human detection, automatic movement to a specified position, remote control, and safe stop. In this article, we will focus on the test results of the developed transport robot and refer to the use of robots and drones in the accelerator tunnel.

#### 1. はじめに

東日本大震災の発災時では J-PARC MR トンネル内で作業者が被災した。しかしながら 100 m 以内に脱出棟があったにもかかわらず、500 m 以上離れた入域箇所から通常の手続きを経て避難をした。適切な脱出経路が用いられなかったのである。幸い津波は J-PARC を襲わなかったが、避難誘導という観点からは大きな課題が残ってしまった。作業者の安全確保は防災システム上、極めて重要なテーマである。作業者がトンネル内のどこに居るのか、どの方向へ逃げているのか、あるいは動けなくて助けを求めているのか、リアルタイムでの作業者位置情報を把握することがキーポイントとなる。作業者の位置や動線がわかるシステムが実現できれば、病気や事故、災害時の安全性が大いに高まるものと期待される。近年 ICT (Information and Communication Technology) を活用した DX (Digital transformation) 技術の飛躍的な進歩が見られる中、GPS (Global Positioning System) が届かない屋内空間における測位も格段の進歩を遂げてきた。筆者らもモバイル端末を利用した屋内向け測位センサネットワーク技術の開発 [1, 2] に取り組んでいる。

Figure 1 は ILC のような大規模な地下の加速器施設での防災システムの概念を示している。閉鎖空間である大規模な加速器トンネルでの運用において、緊急時にモバイル端末を活用して作業者の位置を特定するとともに、管理者と作業者が効率よくコミュニケーションがとれ

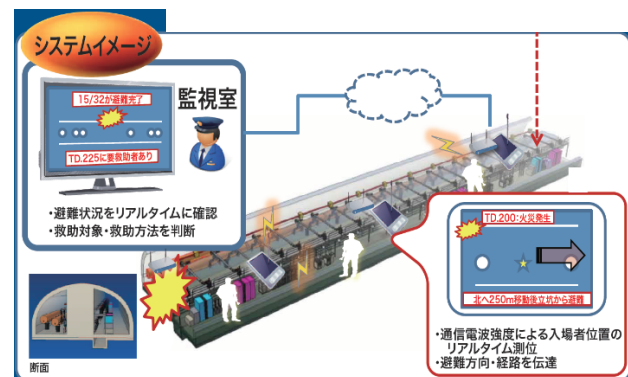


Figure 1: Concept of a disaster management system in ILC. る防災システムの構築を目指す。これまでの研究では開発したシステムを加速器施設等で試験し、実用化に向けた使用性や精度の検証 [3, 4] を行ってきた。また J-PARC MR の一部区間に通信装置 (AP: アクセスポイント) を複数台配置してシステムの実証検証を行った。J-PARC は陽子加速器であるため、中性子を含んだ放射線環境下における各装置の耐久性等の研究 [5, 6] が必須である。さらに 2019 年度、厚生労働省の科学研究費補助金に採択され、J-PARC MR に開発した防災システムを導入[7-9]を果たしている。

2021 年度より、更なる安全性向上や作業の効率化を実現するため、ロボットやドローンの活用の検討を開始した。開発した防災システムと連携させることで、利便性の高い防災システムが構築できるものと期待している。

<sup>#</sup> yasuo\_kawabata@tobishima.co.jp

2021 年度に自律走行ロボット“REBORG-Z”を用いて MR トンネル内で走行試験を行った[10]。さらに 2022 年度は、比較的安価な 360° 回転駆動装置を有する台車ロボットを整備し、加速器トンネルの防災に必要な機能を付加し、ICT 防災システムのネットワーク環境下での試行検討を行った。また、台車ロボットを発着基地とした自律飛行ドローンもトンネル内に持ち込み、飛行試験を行った。これら試験では様々な可能性や課題が見つかり、本文ではそれらを詳述する。

## 2. 加速器トンネルにおけるロボット・ドローンの活用検討

### 2.1 安全輸送ロボットの開発の背景

既にあらゆる分野でロボットやドローンを活用する時代であり、かつてできなかったことが当たり前になっている。一方、加速器施設においても放射線下の種々の制約により、人が直ちに対応できないことや限られた空間での作業を強いられており、これらを解決する手段を取り込むことで、作業効率、利便性を向上させ、肝心の研究における自由度を高めることができる。

### 2.2 ロボット・ドローンの活用の狙い

これまで閉空間にいるユーザーとの連絡等を円滑に行うことを目指し、双方向コミュニケーションが容易な Wi-Fi を用いて ICT 防災システムの環境構築を行ってきた。高度なセキュリティ環境を提供するだけでなく、発災時においても稼働するロバストな防災システムにしており、ロボット・ドローンを運用する基盤ができています。防災システム導入の経験を踏まえ、ロボット・ドローン活用の狙いを以下に挙げる。

- ・ 加速器停止中であれば、24 時間 365 日のロボットの巡回で、あらゆる状況を確認できる。
- ・ 加速器停止後の放射線測定をロボットが代用することで、測定時間の短縮や被ばく管理に有効である。
- ・ ロボットに作業員を追従する機能が加われば、個人端末(防災用端末)の携帯は不要となる。
- ・ ロボットには消火器や AED 等も搭載可能であり、防災システムの位置情報と連動できれば、緊急時にそれらを速やかに運搬することもできる。
- ・ ロボット巡回中に、ロボットのカメラで機器類の監視や計器類の自動読み取りを行うことで、各種異常の早期発見に繋がる。
- ・ 装置類の背後などロボットがアクセス難しい領域は、ドローンを飛行させてカバーする。
- ・ ドローンの充電基地局をロボットに運ばせることで、ドローンの航続時間の課題を解消する。
- ・ ロボットによる巡回警備は、既に様々な民間施設で活用されている。
- ・ 屋内でのドローン飛行も、民間で活発な運用が実現されつつある。
- ・ ドローンは有人地帯での補助者無し目視外の飛行(レベル 4)に向け、各種機能が向上してきている。一方で法整備も進んできており、防災領域での適用

ニーズが高まっている。

### 2.3 ロボット・ドローンの活用検討上の課題

2021 年度は、民間で運用されている自律走行ロボット“REBORG-Z”を MR トンネルで試行したが、非常に高価なものとなっている。MR トンネルのような 1km を超える広大な空間をカバーするには何台ものロボットが必要となり、費用面から現実的でない。また完成されたロボットに、加速器トンネルに有用な付加的機能を追加することは、費用がさらにかかる結果となる。一方ドローンに関しては、バッテリーによる飛行時間の限界と積算重量の制限があり、課題となっている。

## 3. 安全輸送ロボット、ドローンの MR トンネルでの試行

### 3.1 安全輸送ロボットの開発と試行

活用検討上の課題を踏まえ、Fig. 2 に示す 360° 回転駆動装置を有する台車ロボットに対し、タブレット PC、360° カメラ、2D-LiDAR、センサ付きバンパーを搭載した。以下では台車ロボットの各種機能と J-PARC MR トンネルでの試行状況を、写真と共に説明する。

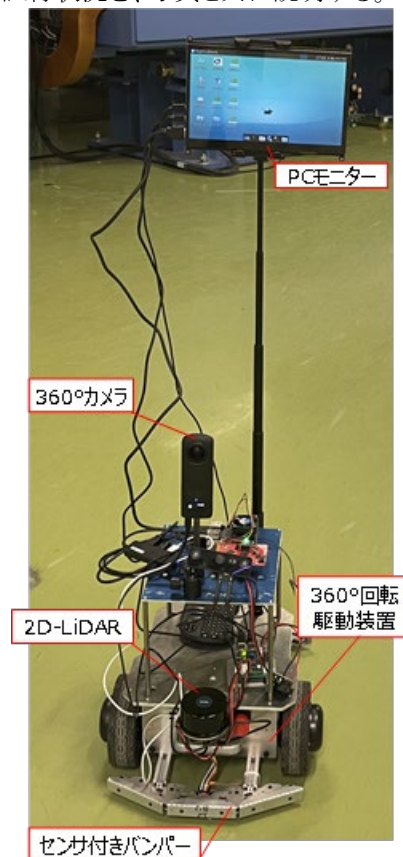


Figure 2: Appearance of safe transportation robot.

#### 3.1.1 作業者に寄り添う追従機能(Figure 3)

作業者と一定の距離をとりながら、移動に合わせて追従する。カメラで人を検知し、人の存在する方向へ移動するプログラムを組んでいる。作業者との距離測定は 2DLiDAR が担っている。

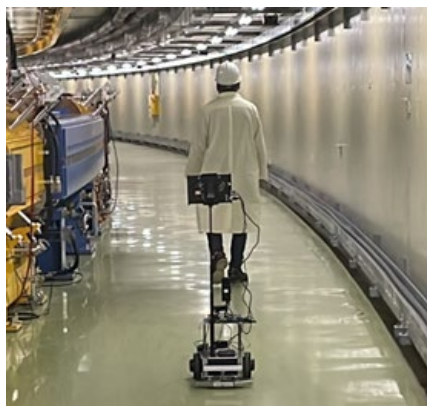


Figure 3: Follow-up function that is close to the worker.

### 3.1.2 自律走行機能 (Figure 4)

単独でプログラミングされたルート进行する。所定の位置で停止・方向転換し、各種計器のモニタリング等を行う。2DLiDARにより周辺の状況をマッピングし、作成したマップから指定ルートを进行する。途中、360°カメラで計器を読み取ることが可能である



Figure 4: Autonomous driving function.

### 3.1.3 衝突回避機能 (Figure 5)

走行路に障害物があれば、自らそれを検知し、回避行動を取ってもとの走行路に戻ることができる。



Figure 5: Collision avoidance function.

2DLiDARで障害物を検知し、障害物を回避後は設定ルートに復帰するようになっている。またバンパーに接触すると即時停止を実施する。

### 3.1.4 遠隔操作機能 (Figure 6)

緊急時や現場とのコミュニケーションが必要な時に、遠隔監視者が台車ロボットをハンドリングして現場に向かわせ、台車ロボットのモニターなどを用いて現地とシームレスなコミュニケーションを行うことができる。防災システムのネットワークを介してロボットの位置、走行経路などの情報、周辺映像が取得できるため、地上からの確な操作が可能である。



Figure 6: Remote control function.

自律走行を行うには、事前に手動走行してマッピングを行う必要がある。MRトンネルではおよそ500m程度の区間を、半日1回の走行で設定することができた。自律走行ロボット「REBORG-Z (ALSOKの自動警備システム)」を持ち込んだ際には、500mのマッピングデータは重く、処理等に時間がかかっていた。今年度開発した台車ロボットでは、これら課題に対して短時間での処理が可能なアルゴリズムを完成させた。

### 3.2 ドローンの活用方法の検討と試行

台車ロボット上にドローンの発着基地を設けることによりドローンの常時充電が可能となる。Figure 7にその様子を示す。所定の位置まではロボットで移動、ロボットがいけないところをドローンで対応させることで、トンネル内全域がカバーする。ドローンの航続距離問題を解決できるものと考えている。



Figure 7: Drone landing base on transport robot.



Figure 8: Trial study of autonomous flight of drones.

過年度から行っている MR トンネル内でドローンの試行も継続している (Fig. 8)。GPS が届かない屋内で自律飛行ができるドローンは通信速度の速いネットワーク環境が必要で、外部と多大なデータやり取りが必須である。防災システムのネットワークを外部接続させて試験をしているが、制約条件が多数あって満足できる形でのネットワーク構築が未だ実現できていない。作り上げた防災システムとの両立を目指し、努力を続けている。

#### 4. まとめ

加速器トンネルに入域した作業者の位置情報がリアルタイムでわかり、地上の管理者と作業者が効率よくコミュニケーションを取れるような防災システムを開発し、2019年より J-PARC の MR 加速器トンネルで運用を開始した。独立したネットワーク網を構築、災害時に避難誘導が行えるシステムを整備し、双方向コミュニケーションが行えるアプリを開発、日常的に使用できる付加機能の追加などを行っている。2021 年度よりロボット・ドローン技術を使った更なる防災システムの向上を図るべく、開発研究を開始した。

2022 年度はロボット技術 (J-PARC DX-SS Robots 2.0) の発展に傾注した。台車ロボットに、作業者に寄り添う追従機能、自立走行機能、衝突回避機能、遠隔操作機能を整備し、J-PARC MR トンネル内で試験走行を実施した。また台車ロボットに、ドローン及び充電基地を運搬させることを念頭に、トンネル内や地上での模擬試験等を実施した。しかしながら、加速器トンネル内のロボット・ドローンの活用には、まだ多くの課題が残っている。低コスト化を狙った台車ロボットは、運用場所に合わせた作り込みが必要である。今回開発した台車ロボットの追従機能についても、追従者の同定問題が課題として挙げられる。屋内ドローンについてはメーカーとのネットワーク接続が必要であり、その確立が障壁となっている。メーカーの選択肢も少なく、市場の発達を待つのが得策と、現状では判断している。

防災システムに関しては完成したと考えており、今後は J-PARC の他の研究施設や、国内外での加速器施設への展開を目指していきたい。また ILC (International Linear Collider) など将来における研究施設での採用を積極的に狙うことを考えている。ロボット・ドローンについ

ての今後は、市場での発展を注視しながら、トンネル内作業や防災の効率化や省人化を目指し、開発研究の検討をすすめていく所存である。最後に、これまでの取り組みを紹介した HP を J-PARC の HP にリンクした。興味を持たれた方は、是非アクセスして頂きたい。これまで研究開発してきた経験を共有したいと考えている。

<https://j-parc.jp/safety/PRCS/>

#### 参考文献

- [1] 松田浩朗、松元和伸、田頭茂明、“無線 LAN 測位の測位精度に関する研究”、土木学会第 67 回年次学術講演会講演概要集、pp.549-550, 2012.
- [2] S. Tagashira, Y. Kanekiyo, Y. Arakawa, T. Kitasuka, and A. Fukuda, “Collaborative Filtering for Position Estimation Error Correction in WLAN Positioning Systems,” IEICE Trans. on Communications, Vol. E94-B, No.03, pp. 649-657, 2011.
- [3] 川端康夫、松田浩朗、松元和伸、小林薫、田頭茂明、大場俊幸、吉岡正和、“加速器施設における測位センサネットワークに基づく放射線管理・防災システムの開発”、第 11 回日本加速器学会年会, 2013, 8.
- [4] 川端康夫、松田浩朗、松元和伸、田村琢之、小林薫、田頭茂明、山本祐輔、前田修、大場俊幸、吉岡正和、“測位センサネットワークによる加速器施設の防災・放射線管理のための位置管理システムの開発”、第 12 回日本加速器学会年会, 2014, 8.
- [5] 川端康夫、松田浩朗、松元和伸、田頭茂明、石井恒次、大森千広、芝田達伸、吉岡正和、“放射線環境下 (J-PARC) における測位センサネットワークシステムの耐久性と防災用アプリの適用計画”、第 15 回日本加速器学会年会, 2017, 8.
- [6] 川端康夫、松田浩朗、松元和伸、田頭茂明、石井恒次、大森千広、芝田達伸、吉岡正和、“J-PARC における測位センサネットワークシステムの装置と防災用アプリの試験適用”、第 16 回日本加速器学会年会, 2018, 8.
- [7] 川端康夫、松田浩朗、松元和伸、田頭茂明、石井恒次、大森千広、吉岡正和、“J-PARC MR における測位センサネットワーク装置と防災用アプリの全域実装”、第 17 回日本加速器学会年会, 2019, 8.
- [8] 川端康夫、松田浩朗、松元和伸、田頭茂明、石井恒次、大森千広、吉岡正和、“J-PARC MR における専用ネットワーク装置とモバイルアプリによる防災システムの構築”、第 18 回日本加速器学会年会, 2020, 8.
- [9] 川端康夫、松田浩朗、松元和伸、田頭茂明、石井恒次、大森千広、吉岡正和、“J-PARC MR 防災システムの進展”、第 19 回日本加速器学会年会, 2021, 8.
- [10] 川端康夫、松田浩朗、松元和伸、田頭茂明、石井恒次、大森千広、吉岡正和、“加速器トンネルでのロボット活用の検証”、第 20 回日本加速器学会年会, 2022, 10.