

加速器トンネルでのロボット活用の検証

VERIFICATION OF ROBOT UTILIZATION IN ACCELERATOR TUNNEL

川端康夫^{#, A)}、松田浩朗^{A)}、松元和伸^{A)}、田頭茂明^{B)}、
富井洋平^{C)}、石井恒次^{D)}、山本 昇^{D)}、別所 光太郎^{D)}、吉岡正和^{E)}

Yasuo Kawabata^{#, A)}, Hiroaki Matsuda^{A)}, Kazunobu Matsumoto^{A)}, Shigeaki Tagashira^{B)},
Yohei Tomii^{C)}, Koji Ishii^{D)}, Noboru Yamamoto^{D)}, Kotaro Bessho^{D)}, Masakazu Yoshioka^{E)}

^{A)} TOBISHIMA Corp., ^{B)} Kansai Univ., ^{C)} ALSOK, ^{D)} KEK, ^{E)} Iwate Univ.

Abstract

Since 2019, we have been operating a disaster prevention system that realizes real-time position information of workers and two-way information transmission in the J-PARC MR accelerator tunnel. In the research, we have been working on the development of a system that can be used immediately in the event of a disaster by adding various functions and making it a system that is easy for users to use on a daily basis. Currently, we are considering the use of robots and drones to further improve safety and work efficiency. For example, we would like to utilize these robots for parts that rely on human measurement, such as radiation monitoring after beam stoppage and measurement of various instruments. We expect that an advanced disaster prevention system can be accomplished together with the robots and the developed disaster prevention system. Running tests were conducted in an MR tunnel using an autonomous traveling robot "REBORG-Z" in 2021. A drone was also brought into the tunnel and a flight test was conducted. Various issues have been found in these tests, which are detailed in the text. Also, from the viewpoint of the disaster prevention systems and the worker support, the possibility of utilizing robots and drones will be discussed.

1. はじめに

トンネル内で火災等の事故が起きた際、避難経路の選択は生死に直結する。過去にも交通トンネルの建設時や供用時の災害で多数の死傷者が生じている。東日本大震災の発災時では J-PARC MR トンネル内で作業員が被災したが、適切な脱出経路が用いられなかった。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た。作業員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。作業員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員位置情報を把握することがキーポイントとなる。

これまでの加速器施設では放射線防護の観点から、「入域管理」と「被ばく管理」を主眼としてきた。前者は PPS (Personal Protection System) [1] と呼ばれ、鍵管理により入域時(鍵が抜き取られた状態)には加速器運転が不可の状態になる。後者はフィルムバッジとアラーム線量計を併用し、個人の被ばく総線量とリアルタイム線量を管理している。これらに加え作業員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。問題はトンネル内では GPS (Global Positioning System) による測位が出来ず、新たな測位網の構築が必要である。さらに、加速器施設は外部の通信網と遮断した高度なセキュリティ環境が求

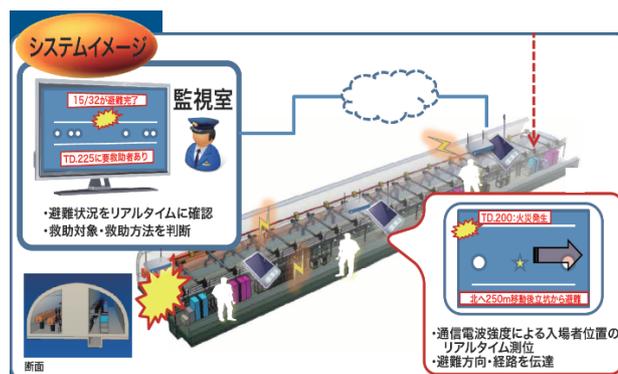


Figure 1: Concept of a disaster management system in ILC.

められる、特殊性がある。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 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 [2, 3] 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員の位置を特定するとともに、管理者と作業員が効率よくコミュニケーションがとれ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 [4, 5] 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)

[#] yasuo_kawabata@tobishima.co.jp

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 [6, 7] 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申請して採択され、J-PARC MR に開発した防災システムを導入 [8-10] している。

現在、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を検討している。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。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。ま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課題が見つかっており、本文ではそれらを詳述する。また防災システムとの連携及び作業支援の観点から、ロボット・ドローン活用の可能性についても議論する。

2. 加速器トンネル用の防災システムの概要と活用上の課題

2.1 防災システムの概要

① 独立したネットワーク網の構築

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 を用いて環境構築を行った。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いる。システム管理の観点から、専用のスマートフォンと時計型ウェアラブルを準備し、ユーザーに携帯してもらうこととした。

② 災害時に避難誘導が行えるシステム整備

施設利用者の位置や動線を把握、発災時に適正な避難誘導が行えるシステムの構築を行った。AP (アクセスポイント) は MR トンネル内の全周に沿って 30 ヶ所 (50m 毎) に設置。AP は中央制御棟だけでなく電源棟・搬入棟にも設置して日常使用の利便性を向上した。停電時対策としてはリチウム蓄電池を用い、AP とサーバーの電力を数時間以上供給することが可能である。また AP 電源は、加速器稼働・停止時に対し、自動的にシステムの ON/OFF を行うことで、AP の耐放射線性能を確保した。

③ 双方向コミュニケーションが行えるアプリ開発

緊急時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る ICT 防災アプリを開発した。繋がっている AP を作業者の位置としてリアルタイムでマップ上に表示した。またグループ毎にメッセージ送受信を表示するとともに、メッセージを全員向けかグループ内向けかに選択できるようにしている。さらに既読機能を設け、送信場所を含んだ全メッセージの保存も行っている。情報伝達の利便性向上として、写真添付やスタンプの整備を行った。Figure 2 にサーバーアプリ、Fig. 3 にモバイルアプリの画面を示す。

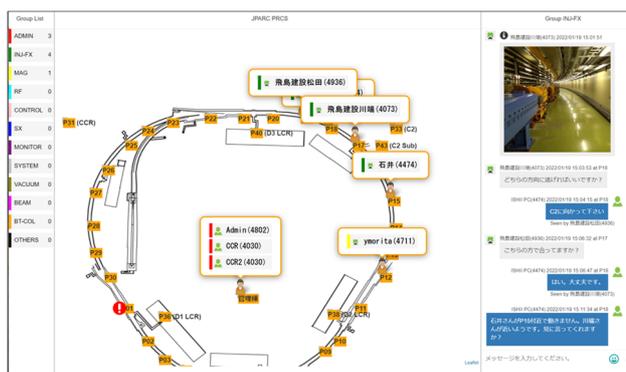


Figure 2: A web screen on the server application.



Figure 3: Screen examples on the mobile application.

④ 日常的に使用できる付加機能の追加

日常的に使用することで災害時に有効活用できる、という概念のもと、様々な付加機能を開発して追加している。Figure 4 に映像通話による遠隔作業を支援している様子を示す。他に放射線測定と測定位置を自動的に記録するアプリや、トンネル内の危険箇所 (高放射線量・通電中) を表示し、領域に近づいたらスマホのバイブで知らせる注意喚起アラートアプリの導入も行っている。



Figure 4: A picture of the remote work support.

2.2 防災システムの運用上の課題

防災システムの各種機能の充実を日々図っているが、現場での利用率 (利用者の数) は半分程度であり、使用されている機能も限定的である。防災アプリの入ったス

スマートフォン携帯を入坑時に義務化するには、スマートフォンと作業員の紐づけや、携帯していないと入域不可等のシステム整備が必要である。管理者側は、発災時の漏れのない人身掌握に繋がるため、全員必ず携帯していることが重要である。一方で、単純に義務化するだけでは作業員の負担を増やすだけであり、このジレンマの解決策が現状最大の課題となっている。

3. ロボット・ドローンの活用

3.1 ロボット・ドローンの活用概念

防災システムの運用上の課題の解決には、加速器施設内でのルール作りや使用者の意識改革が必要であり、当初使い慣れていないものも活用する過程で使うことが当たり前になってゆくものと考えていた。また活用にあたって利便性の向上や必然性が明確になれば、いずれは標準的なシステムとして活用されるはずと考えていた。一方で外来作業員は毎回同じ作業員が従事するわけではなく、携帯を義務づけるのは作業員の負担が大きい。管理者側も不携帯者のトンネル入域不可のシステムを構築等が必要となり、高度(高額)なシステムアップグレードが必要である。適当な手段を検討していたところ、民間で行われているロボットによる巡回警備の活用を思い付き、可能性を検討することとなった。以下にロボット、及びドローンの活用概念を示す。

- ・作業員に自動で追従するロボットを導入することで、作業員は端末携帯が不要になる。ロボットには端末の他、重量が重い酸素ボンベ等、有効な防災グッズを携帯させることも可能である。
- ・巡回ロボットにすることで、ロボット台数を減らすことが可能である。巡回時に作業場所や入域者数を把握しておき、発災時に自動で駆け付けてサポートを行う。
- ・巡回の場合、機器類の監視や計器類の自動読み取りも可能で、日常の異常も同時に監視することができる。
- ・ビーム運転停止直後など、人が入域できない時間帯(J-PARC の場合運転停止後 4 時間)でも、ロボットを走行させることでトンネル内加速器の機器状況が確認可能である。
- ・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ことが可能。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。

3.2 J-PARC MRトンネルでの試行

ロボットによる巡回警備や屋内でのドローンによる監視飛行は既に民間で活用が始まっている。巡回警備ロボットと屋内ドローンの双方を開発している、総合警備保障(ALSOK)に協力してもらい、ロボット・ドローンのトンネル内試験デモを実施した。また研究開発用台車ロボットを購入しての試行も実施した。

1) 自律走行ロボットの試行適用

自律走行ロボットである「REBORG-Z(ALSOK の自動



Figure 5: Autonomous traveling robot "REBORG-Z".



放射線測定機能

放射線センサ

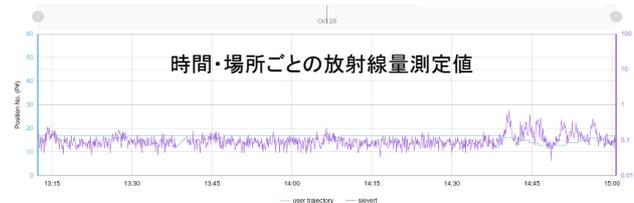


Figure 6: Measurement of radiation dose by "REBORG-Z".

警備システム)を MRトンネル内に持ち込み、走行試験を行った。自律走行を行うにはトンネル内のマッピングが必要である。マッピングには手動走行を行う必要があるが、MRトンネルでは1回の手動走行でマッピングは完了し、およそ500m程度の区間を半日で設定することができた。一方で500mものマッピングデータは重く、処理等に時間がかかってしまうことも判明した。トンネル一周の場合、データを細分化して接続処理を施す必要がある。マッピングデータを用いたトンネル内の自律走行の様子を Fig. 5 に示す。狭隘で電磁石機器等が多数設置されている MRトンネル内においても自律走行が可能で、障害物や作業員に対して接触することなくマッピング内を走行することを確認した。これにより「入坑者の入退場の最終確認」、「加速器停止後の放射線測定」、「遠隔作業支援」、「設備状況の自動記録」、「入坑者への注意喚起」等への対応が期待できる。

簡単な適用例として、REBORG-Z に端末と放射線センサを持たせ、放射線測定機能(時間・場所ごとの放射線量の自動測定)を実施した。この様子をFig. 6に示す。特に問題は見られず、きちんと放射線測定数値が得られている。またトンネル内計器類のモニタリングも実施してみた。こちらは映像取得の場所やカメラ角度と性能等、細かい調整が必要であることが判明した。理想的には走行しながら取得した映像の自動解析で計器類の値が読み取れば良いが、トンネル内の蛍光灯(光源)の加減や走行スピードの問題でかなり難しい。現状では指定した場所に止まって撮影するしかなく、何百ヵ所という設定が必要となっている。止まっての撮影は時間的にも現実的ではなく、さらなる工夫が明らかに必要である。

2) 自律飛行ドローンの試行適用

自律飛行ドローン(ALSOK の完全自律飛行ドローンを活用した警備システム/現在開発中)を用いた飛行試験を J-PARC トンネル内で実施した。GPS が届かない屋内で自律飛行ができるドローンを製作・提供している会社は世界でも少ない。ALSOK は Skydio 社製のドローンを用いた警備システムの開発しており、SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) 技術を用いて自律飛行している。GPS を必要としない一方で現状で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。このため我々の防災システムの特徴である独立したネットワーク網とは相容れず、試験では手動で飛行操作をした。Fig. 7 で示すように、トンネル内の広い空間においては問題なく飛行することができたが、機器の裏側等の狭い空間へは障害物に対する安全距離の影響で入っていくのが困難であった。加速器トンネル内のドローン飛行については、外部ネットワークとの接続と共に、狭い空間への飛行(障害物に対する安全距離の設定値調整)等が課題となっている。



Figure 7: Flying drone over the accelerator.

3) 研究開発用台車ロボット(メガローバー)の試行

巡回警備ロボットは一般的に高価であるため、入域作業員全員分を準備することは予算的に現実ではない。安価な追従型ロボット台車が開発できれば、巡回警備ロボットと相補的な役割を担うため、開発をすることにした。Figure 8 に開発した台車ロボットを示す。本ロボットは 2D-



Figure 8: Dolly robot with function to follow person.

LiDAR を備えており、走行しながら周辺の障害物のマッピングが可能である。併せてカメラも備えており、映像認識により人を検知することが可能で、障害物を回避しつつ人に追従できることを確認した。追従性能に課題があり、今後改良を重ねていく予定である。また作業員へのサポートという観点で、MR トンネル内において、携帯端末や防災グッズの輸送に関する検証を実施する予定である。

4. 今後の展開

試行中のロボット技術(J-PARC DX-SSRobotecs 2.0)については、数多くの課題が残るものの防災システムの根幹に寄与する可能性は大いに感じられる。今後は、導入コストに対する効果を考慮しながら、開発を進めていく。

最後に他施設への展開について言及する。本防災システムは加速器研究施設に留まらず様々な施設での活用が可能と考える。各施設の要望に合わせた機能を付加して日常的な利用を促進し、かつ災害時に作業員のリアルタイム位置表示を避難等に活用すれば、どの施設でも有効な防災システムとなりえるだろう。我々は J-PARC の MR 加速器トンネルで本防災システムを導入、開発研究を継続中である。ぜひとも他施設でも同様のシステム開発・導入を検討して頂き、切磋琢磨して研究開発を推進していきたい。願わくは本論文を読んで興味を持たれた方は、我々にぜひともコンタクトして頂きたい。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。

参考文献

- [1] F. Hiroki, H. Yoshikawa, Y. Takeuchi, and K. Kubo, "PERSONAL PROTECTION SYSTEM IN J-PARC LINAC", 第1回日本加速器学会年会, 2004, 8.
- [2] 松田浩明, 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.
- [3] 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.

- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 川端康夫、松田浩朗、松元和伸、田頭茂明、石井恒、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.
- [7] 川端康夫、松田浩朗、松元和伸、田頭茂明、石井恒、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.
- [8] 川端康夫、松田浩朗、松元和伸、田頭茂明、石井恒、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.
- [9] 川端康夫、松田浩朗、松元和伸、田頭茂明、石井恒、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.
- [10] 川端康夫、松田浩朗、松元和伸、田頭茂明、石井恒、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.