

列車運行の自律化



新井 英樹

Hideki Arai

前 信号技術研究部長
(現 研究開発推進部 JR部長)

はじめに

日本における生産年齢人口の減少による影響が様々な産業分野で深刻化しています。鉄道においても、今後の運転士などの鉄道従事者の確保が課題となっています。そのため、列車運行に係る省人化が求められています。

現在、列車の運転操縦を自動化し、列車先頭に人が乗務しない形態のドライバレス自動運転が、国内の新交通システムで実施されていますが、今後、踏切があるなどの一般的な鉄道の路線におけるドライバレス自動運転が実現されることにより、運転業務の省人化が期待されます。

鉄道総研では、運転業務だけではなく、列車運行管理業務を含めた列車運行全体に係る省人化を目指し、大課題「列車運行の自律化(自律運転)」に取り組みました。本稿では、自律運転に必要な要素技術と、それら要素技術を組み合わせた自律型列車運行制御システムのプロトタイプを用いて鉄道総研の所内試験線にて実施した自律運転の実証試験について紹介します。

列車運行の自律化(自律運転)とは?

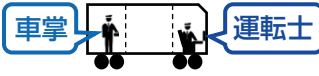


鉄道の運転の自動化レベル(GOA: Grades Of Automation)は、国際電気標準会議(IEC: International Electrotechnical Commission)の国際規格であるIEC 62267:2009(JIS E 3802:2012):「自動運転都市内軌道旅客輸送システム(AUGTシステム)ー安全要求事項」で定義されており(GOA2.5[※]除く)、運転士や係員の乗務形態により分類されています¹⁾(表1)。

従来、踏切があるなどの一般的な路線では、自動運転が行われておらず、非自動運転GOA1に区分されます。地下鉄などの一部路線では、運転士が列車の先頭に乗務する半自動運転GOA2が導入されています。GOA3、GOA4が、いわゆるドライバレス自動運転であり、国内では、踏切がなく、人などが容易に立ち入ることができない構造の新交通システムに導入されているのみです。また、海外においても、貨物列車を除く旅客列車のドライバレス自動運転は、踏切のない新交通システムや地下

※ GOA2.5

GOA1やGOA2の運転士は、動力車操縦者運転免許を有しており、列車先頭の運転台に乗務し、列車の運転操縦(GOA2では、基本、駅間での運転操縦は不要)をしています。GOA2.5では、動力車操縦者運転免許を有しない「自動運転係員」が列車先頭の運転台に乗務し、緊急停止操作などを行う形態の自動運転です。なお、GOA2.5は、IEC 62267(JIS E 3802)では定義されておらず、国土交通省の「鉄道における自動運転技術検討会」のとりまとめ(2022年9月13日公表)で定義されたものです。

表1 鉄道の運転の自動化レベル (GOA) 区分

自動化レベル (IEC(JIS)による定義)	乗務形態のイメージ	国内の導入状況
GOA 0 目視運転	運転士(および車掌) 	路面電車
GOA 1 非自動運転	運転士 	踏切道がある等の一般的な路線
GOA 2 半自動運転	運転士 [列車起動、緊急停止操作、 避難誘導等]	一部の地下鉄 等
GOA 2.5 ※IEC, JISでは未定義 緊急停止操作等を行う 係員付き自動運転	列車の先頭に乗務する係員 [緊急停止操作、避難誘導等]	JR九州香椎線
GOA 3 添乗員付き自動運転 (ドライバレス)	列車に乗務する係員 [避難誘導等]	一部のモノレール
GOA 4 自動運転 (無人運転)	係員の乗務なし 	一部の新交通 等

国土交通省「鉄道における自動運転技術検討会のとりまとめ」, 令和4年9月13日を元に作成
<https://www.mlit.go.jp/tetudo/content/001512320.pdf>

鉄に導入されているのみです。

GOA2以上の自動運転では、列車の駅出発から駅停車までに必要となる加速、減速の制御を自動化し、車上で有する運転パターンに従って駅間を走行します。これにより、現状の運転業務の省力化や省人化が図れます。一方、鉄道総研が提案する自律的な列車運行(自律運転)では、踏切のある一般的な路線でのドライバレス自動運転の実現により、列車運行の基本となる運転業務のさらなる省人化を目指すだけでなく、列車運行管理業務を含めた列車運行全体として、人手を要しない賢い列車運行を目指しました。人手は、列車運行ではなく、人ならではのお客さまサービスに集中させるという考え方に基づいています²⁾。具体的には、ドライバレス自動運転の列車自らが、線路内や沿線の支障物、保守作業や災害による運転規制、旅客流動や消費電力などの運行に関わる情報を車上で集約し、それら情報に基づいて、列車自らが進路上の安全を判断し(車上で運行判断を行い)、地上の信号設備(転てつ機や踏切)を車上から無線通信により制御しながら、安全かつ柔

軟に運行できることを自律運転と呼びます。また、本稿では、自律運転を可能とするシステムを自律型列車運行制御システムと呼びます。

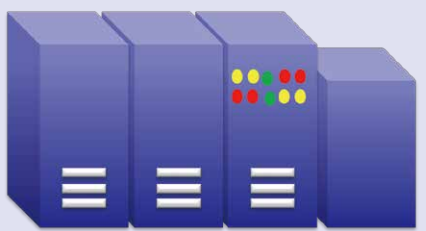
自律型列車運行制御システムを構成する要素技術

自律運転を可能とする自律型列車運行制御システムを構築するためには、以下の5つの要素技術が必要であり、それらの技術確立に向けた研究開発に取り組みました³⁾(図1)。

- 技術① カメラやLiDAR (Light Detection and Ranging) センサーによる線路内や沿線の「前方支障物検知技術」
- 技術② 線路内・沿線の状態や車両の状態などを集約する情報基盤である鉄道ダイナミックマップと、鉄道ダイナミックマップ上の情報に基づいて、「車上で自動的に運行判断をする技術」
- 技術③ 無線通信により、「車上から地上の転てつ機や踏切を直接制御する技術」
- 技術④ ダイヤ乱れ時の遅延波及防止・早期遅延回復などの運転整理や省エネルギー

④：自動的な運行管理技術

線区全体の運行情報



防災・保守情報含む



①：前方支障物検知技術

③：車上からの地上設備制御技術

図1 自律型列車運行制御システムを構成する5つの要素技術

運転のための広域での「運行管理を自動的に行う技術」

技術⑤ 公衆通信回線の利用やサイバーセキュリティも考慮した「列車間通信・情報共有技術」

ここでは、上記の技術①と技術②を紹介します。

前方支障物検知技術

鉄道総研では、カメラとLiDARセンサーの融合による線路内・沿線の支障物検知アルゴリズムを開発しました⁴⁾(図2)。

通常の可視光カメラでは、物体に反射した光を撮像素子に取り込むことにより、物体の色や質感を把握できるため、カメラ画像を処理する

ことにより、物体の有無だけでなく、物体の種別を識別することができます。しかしながら、昼間においては問題ないものの、夜間においては、照度が不足することにより検知性能が低下します。一方、LiDARセンサーは、波長900～1,500nm前後の近赤外線レーザーを照射し、物体からの反射波を捉えることにより測距を行うセンサーであり、昼夜を問わず物体をレーザー点の集合である点群データとして把握できます。よって、カメラによる画像の処理結果とLiDARセンサーによる点群データを統合処理することにより、夜間での検知性能低下を防ぐことができます。

夜間における人物を検知対象とした、カメラ

⑤：公衆通信回線の利用も含む
列車間通信・情報共有技術

サイバーセキュリティー
に対応した通信技術

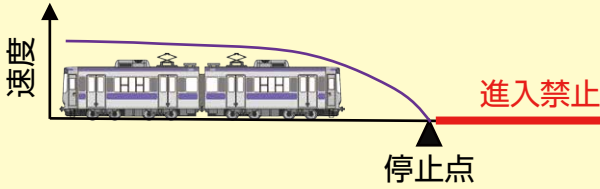
前後駅の旅客情報



前後・近接列車の位置情報

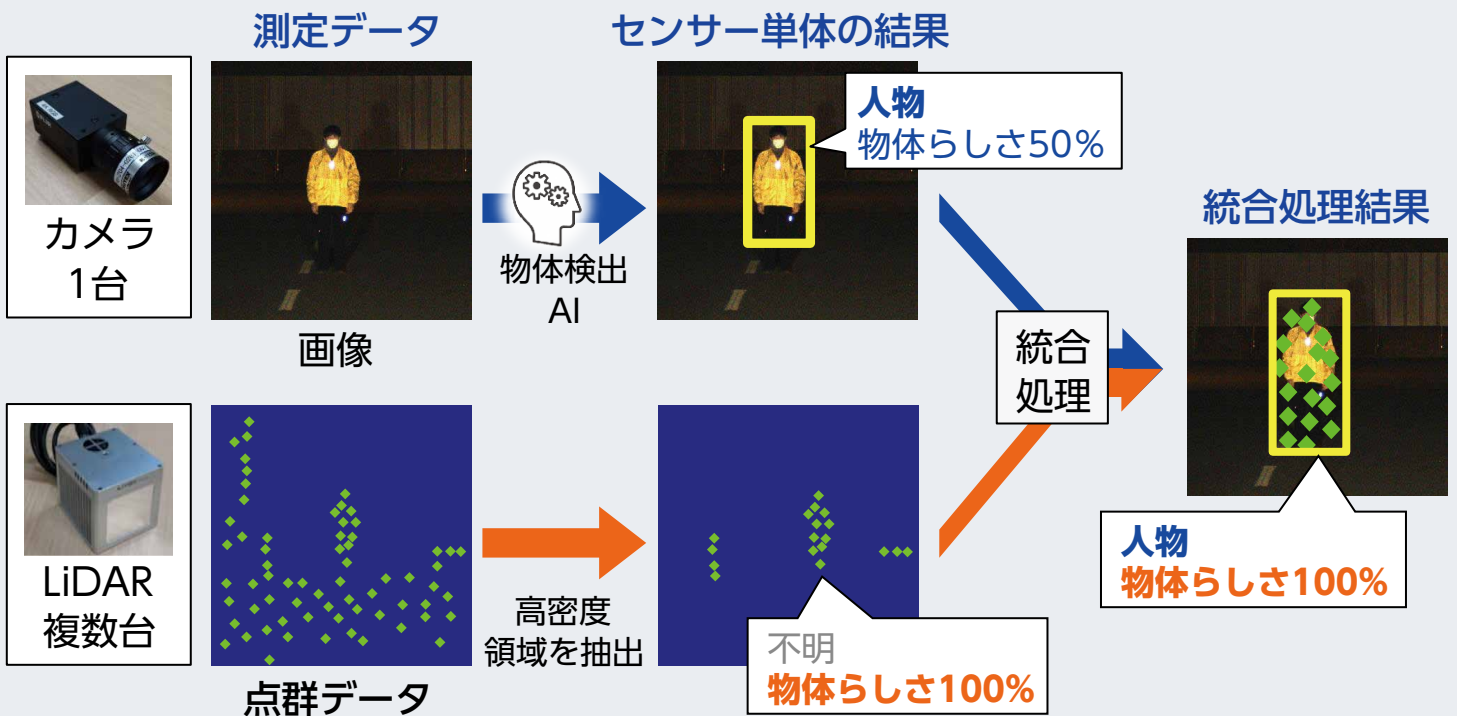


車上での運行判断



②：車上での自動的な運行判断技術

図2 カメラとLiDARセンサーの融合による支障物検知のイメージ



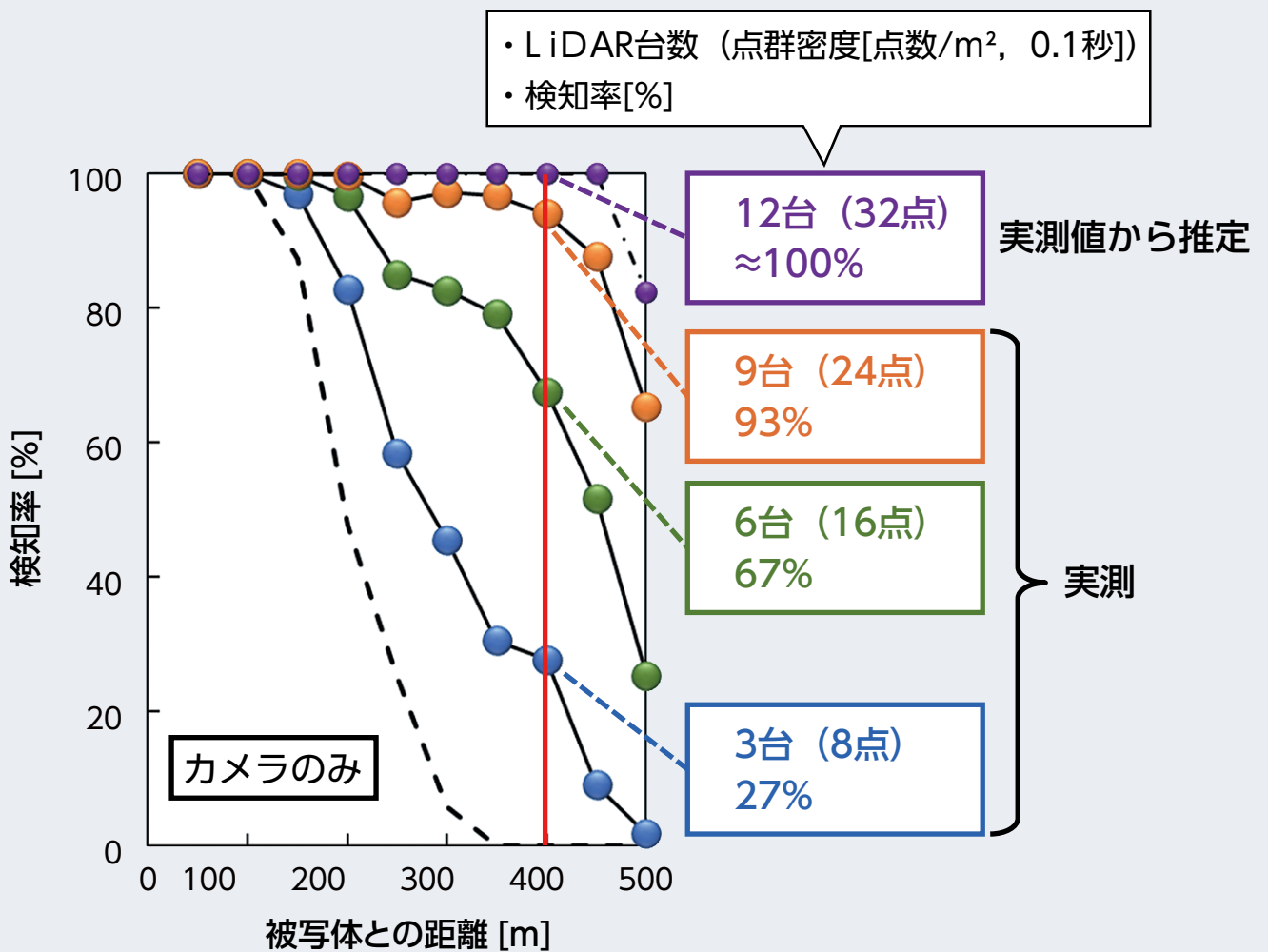


図3 カメラとLiDARセンサーの融合による人物検知性能 (夜間)

とLiDARセンサーの融合による検知性能評価試験を実施しました。なお、試験では、カメラとLiDARセンサーを列車に搭載した状態ではなく、実際の鉄道車両に取り付けた状態を模擬するために、地上から高さ約1.5mのトラックの荷台上にカメラ1台とLiDARセンサー9台、そしてLED前照灯2台を設置し、静止している被写体からの離れが50mごとの地点において、定置にて画像と点群データを取得しています。晴れた夜間ですが、現状、カメラ1台とLiDARセンサー9台で、400m先の人物を90%以上で検知できることを確認しました(図3)。また、LiDARセンサーからのレーザー点群密度[※]が上がることにより、検知率が向上することを試算しています(図3中のLiDARセンサー12台は、点群密度に基づく検知率を机上で試算した結果)。

鉄道ダイナミックマップによる 車上での自動的な運行判断技術

現在の列車運行では、多くの列車が関係する広域の運行判断は、指令所の指令員が、そして現場の運行判断については、乗務員が行っています。一方、自律運転では、各列車にて運行判断に必要となる各種状態情報を集約し、車上で状態情報に応じた自動的な制御(ある地点までに停止する、ある区間を徐行する、あるいは停止禁止区間を避けて停止するなど)や自動的な運行再開判断を行います。車上で状態情報の集約や自動的な運行判断を行うための情報基盤と

※ レーザー点群密度

検知対象物に対して、レーザーの点が多いくらい当たるかを示す値で、1m²あたりの点数で表現します。

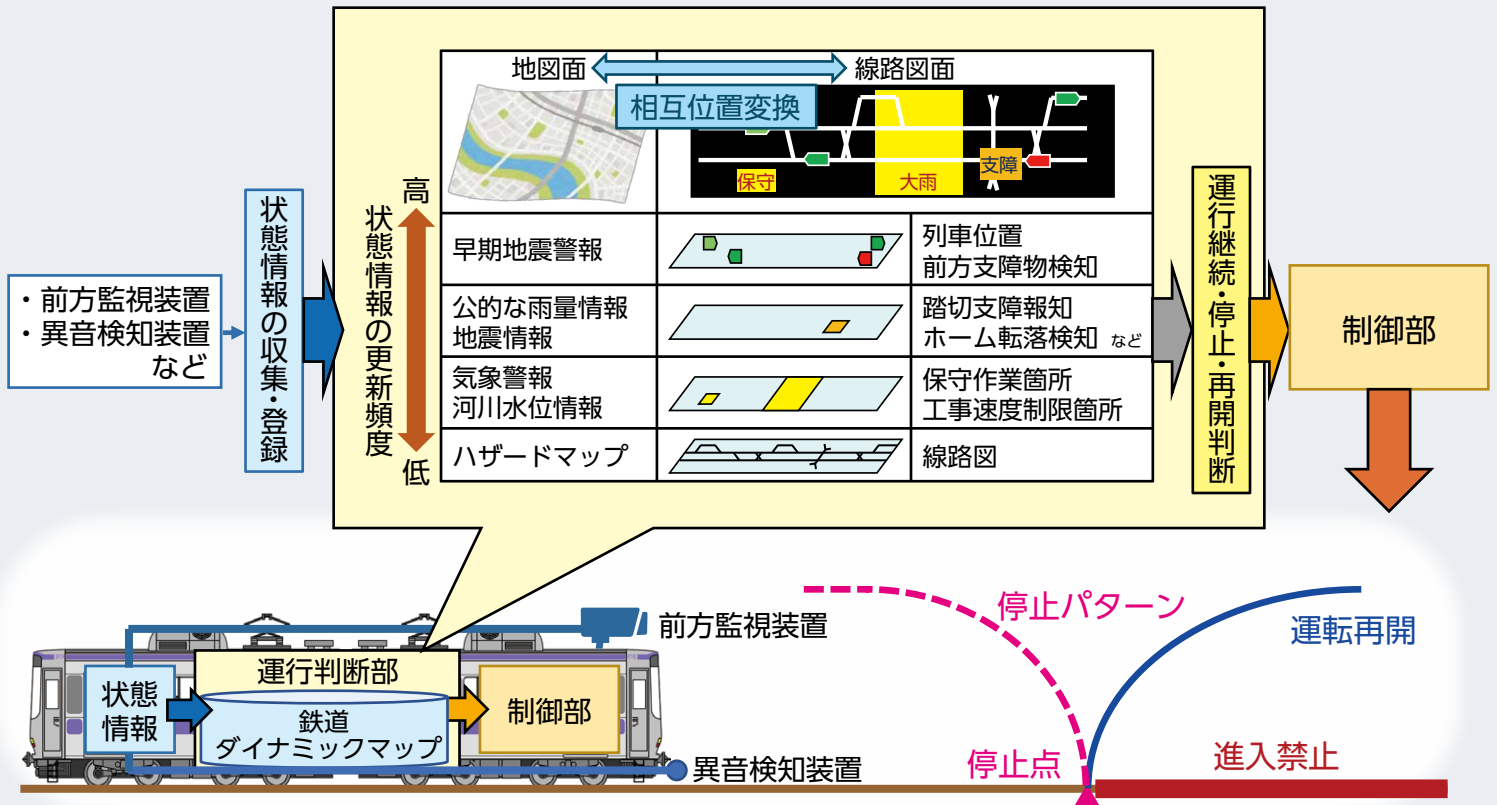


図4 鉄道ダイナミックマップ

して、鉄道ダイナミックマップを開発しました⁵⁾ (図4)。

鉄道ダイナミックマップは、地図面と線路図面から構成され、各種状態情報の更新頻度に応じて区分された階層構造となっています。例えば、突発的な状態の変化が考えられる前方支障物検知の情報は更新頻度が高く、長期間にわたる大規模な計画的工事の情報は更新頻度が低いといったイメージです。また、地図面と線路図面の相互位置変換機能を有しており、キロ程を基準にした鉄道特有の状態情報と地図上の位置を基準にした気象情報などの公的な状態情報を統合し、時系列的に管理することが可能です。

列車の運行に影響を及ぼす線路内・沿線の状態情報、降雨量・風速といった気象に関する状態情報に異常がある場合には、それら状態情報

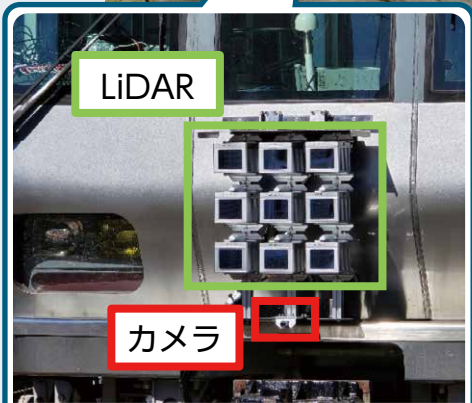
が鉄道ダイナミックマップに登録され、各列車は、走行経路上にある異常を自列車の現在位置をもとに探索・知得することができ、その情報を基に、各列車が自動的な列車停止や自動的な運転再開を行います。

自律運転の実証試験

前方支障物検知技術や車上での自動的な運行判断技術を含む5つの要素技術を実装した自律型列車運行制御システムのプロトタイプを用いて、鉄道総研の所内試験線にて自律運転の実証試験を行いました。

実証試験を通じて、

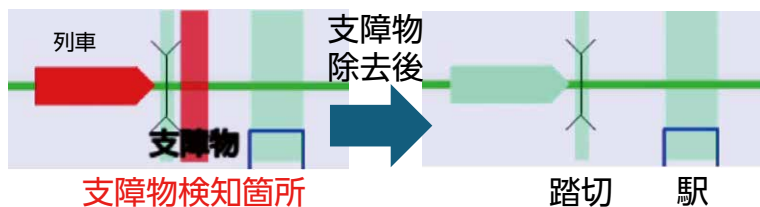
- 試験列車が設定した運転パターンに従って、車上からの無線通信により地上の信号設備(転てつ機や踏切)を制御しながら自動走行



列車前方監視装置

支障物例
(マネキン)

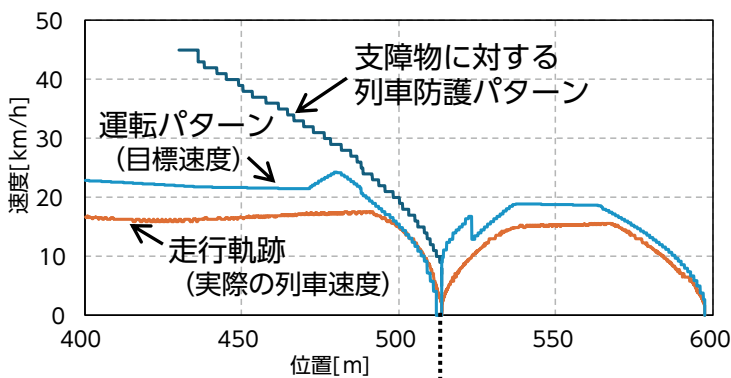
鉄道ダイナミックマップへの線路内支障物の登録



支障物検知箇所

踏切 駅

支障物手前への自動的な停止と 支障物除去後の自動的な運転再開の制御



支障物検知時の自動停止制御 自動運転再開制御

できること。

- 列車前方監視装置 (図5上) が検知した線路内支障物の情報が、車上の鉄道ダイナミックマップに登録されること (図5中)。
- 鉄道ダイナミックマップ上の情報をもとに車上で列車の停止の可否を判断し、要の場合は支障物手前に停止できること。また、線路内支障物除去後には、車上で自動的に運転再開可否を判断し、可の場合は自動走行を開始できること (図5下)。

など、正常時、異常時の機能検証を行い、自律運転の実現可能性を確認できました。

自律型列車運行制御システム (自律運転) の適用効果

自律型列車運行制御システム (自律運転) により、車上での自動的な運行判断や自動的な運行管理が可能となるため、運転業務のみならず指令など列車運行管理業務を含めた省人化が図れるとともに、運行の柔軟性による、お客さまサービスの向上や保守作業間合いの確保、複数列車の動きを考慮した省エネルギー運転などが可能となります。また、車上からの無線通信による転てつ機の直接制御により、特に、列車本数が少なく、駅の配線が単純で規模が小さな地域鉄道において、駅機器室の削減も可能となります (図6)。

なお、要素技術の一つである前方支障物検知技術は、自律運転だけではなく、踏切のある一般的な

図5 鉄道総研所内試験線での自律運転の実証試験例

路線でのドライバレス自動運転を進めるための技術として活用することができます。さらに、鉄道ダイナミックマップを活用した情報共有ならびに運行判断の自動化技術、あるいは運行管理の自動化技術は、現在の列車運行管理業務の省力化に活用することもできます。

おわりに

本稿では、列車運行の自律化(自律運転)について紹介しました。前方支障物検知技術における耐環境性(雨や雪に対する検知性能評価)や鉄道ダイナミックマップを活用した車上での自動的な運行判断のためのシナリオの拡充など、課題はありますが、課題解決を着実に進め、高度な自動運転である自律運転により列車運行に係る省人化を可能とし、鉄道の持続的発展に貢献して行きます。 **RRR**

文献

- 1) 鉄道における自動運転技術検討会とりまとめ(令和4年9月13日): <https://www.mlit.go.jp/tetudo/content/001512132.pdf> (参照日: 2025年4月28日)
- 2) 展望 列車運行の自律化がめざす鉄道の未来: RRR, Vol.80, No.2, pp.2-7, 2023
- 3) 新井英樹: 自動運転の高度化, 第37回鉄道総研講演会要旨集, pp.37-46, <https://www.rtri.or.jp/events/kouen/bugud90000000opv-att/37abstractcollection.pdf> (参照日: 2025年4月28日)
- 4) 影山 椋, 長峯 望: カメラと複数のセンサーで列車を線路内支障物から守る, RRR, Vol.81, No.6, pp.16-21, 2024
- 5) 太田 佑貴, 祇園 昭宏, 西本 翔, 櫻井 勇輝: 状態情報をつないで迅速な運行判断を支援する, RRR, Vol.82, No.1, pp.34-39, 2025

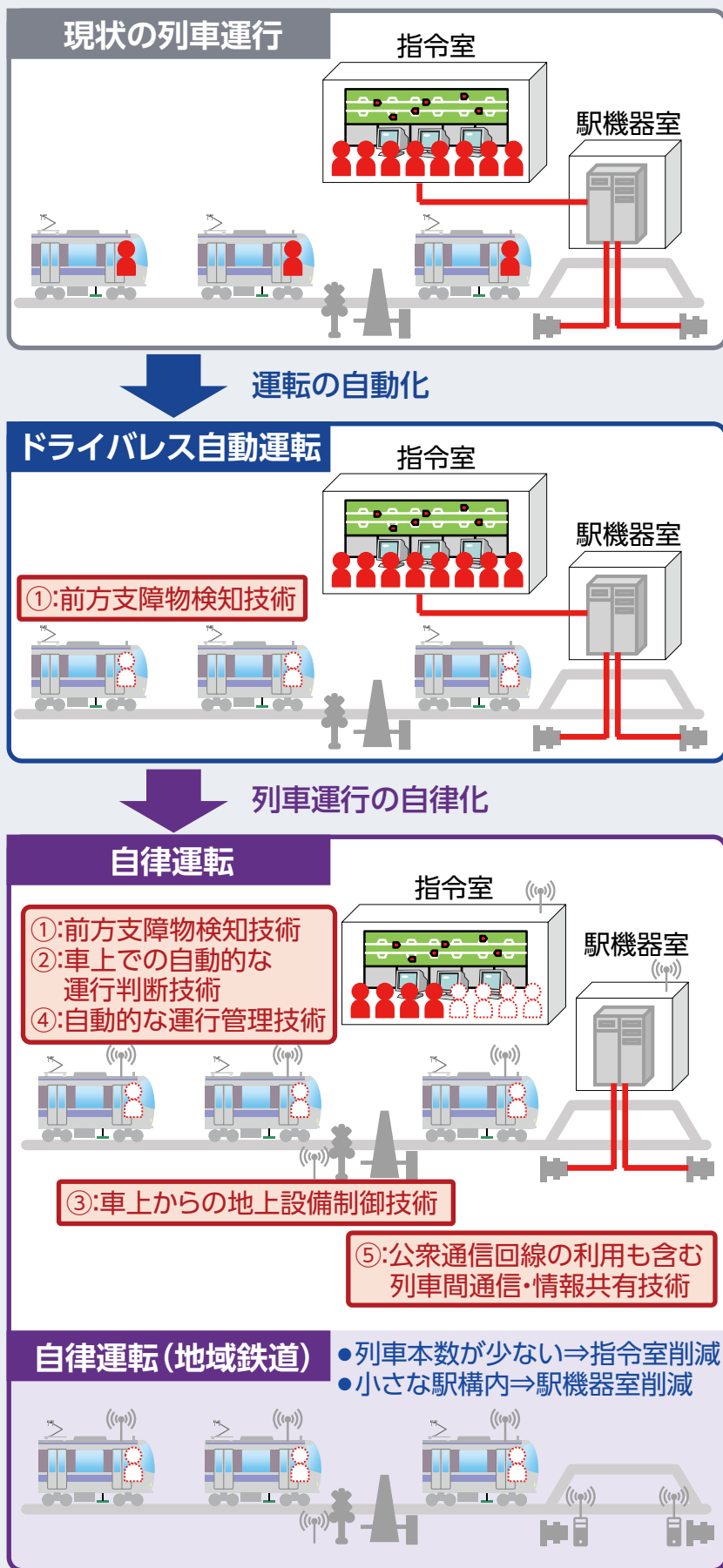


図6 自律運転での省人化イメージ (現状の列車運行やドライバレス自動運転との比較)