

列車運行の自律化

信号・情報技術研究部長
川崎 邦弘



1. はじめに

鉄道では、安全・安定輸送のために様々な自動化システムが導入されてきた。最新のデジタル技術を活用して列車運行を自律化することにより、気象や旅客流動などの情報に基づく安全かつ柔軟な運行を少ない地上設備で実現することが期待できる。本講演では、鉄道総研が考える自律化の定義と効果、現在の自動運転システムとの関係を示し、その実現に必要な技術の確立と課題解決に向けた研究開発計画を紹介する。さらに、将来のシームレスなモビリティサービスにおいて、自律列車が果たす役割について述べる。

ドライバレス運転を実現する技術として自動運転がある。自動運転における列車制御は、あらかじめ定めた運転曲線に沿って列車の加速、減速などを自動で行うものである。現在の自動運転は、地上の運行管理装置や駅制御装置で集中的に行う運行システムの下で地上の信号機や転てつ機などを制御するシステムが一般的である。

自動運転は、人が担っていた役割をどこまでシステムに持たせるかによって、幾つかの種類がある。鉄道の列車運行に関する自動化の程度の分け方は、都市鉄道の指令／制御システムの要件を定めた国際規格 IEC 62267 (JIS E 3802)¹⁾によって定義されている GoA (Grade of Automation) が用いられる (図1)。

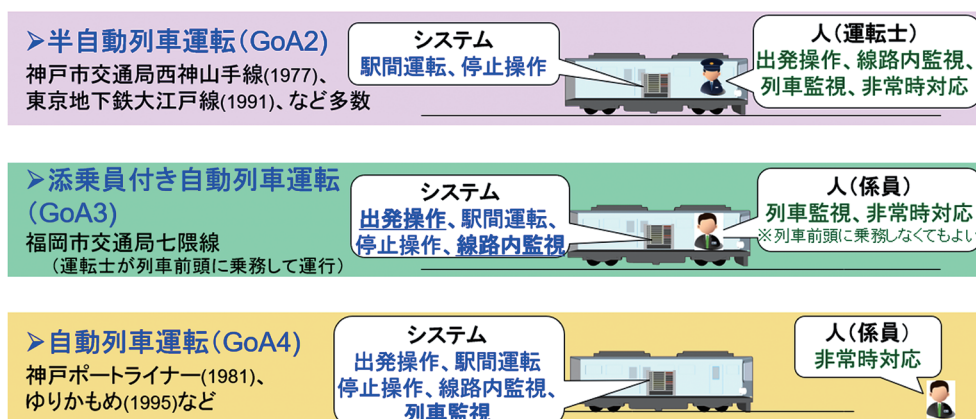
日本では、容易には線路内に立ち入ることができない専用軌道 (高架構造で踏切がなく、駅のホームドアが完備されている路線) においては、GoA4の無人運転が実現されている²⁾。

国土交通省では、2018年度から「鉄道における自動運転技術検討会」(座長 東京大学 大学院 古関教授) を設置し、列車の前頭に運転資格を持たない係員が

2. 列車運行の「自律化」とは

2.1 自動運転の現状と課題

生産年齢人口の減少などによる運転士不足や列車運行のさらなる安全性向上などを目的として、ドライバレス運転に資する技術開発が求められている。



GoA : Grade of Automation (IEC 62267)

図1 自動運転の種類

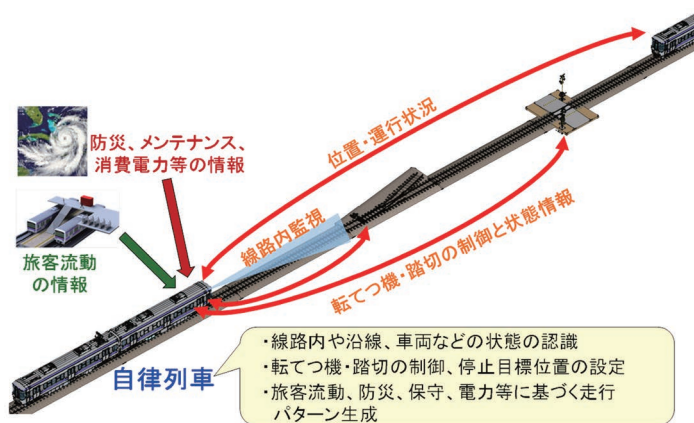


図2 自律型列車運行システム

乗務して自動運転を行う方式 (GoA2とGoA3の間のためGoA2.5と仮呼) 以上のグレードの自動運転を、踏切などがある一般線区で実施する場合の技術的課題の抽出と要件の検討を始めている³⁾。この場合の技術課題としては、列車前方の線路内などの安全監視や異常時の乗客の避難・誘導などが挙げられている。

2.2 列車運行の自律化

運転士の操縦によらず個別の列車走行制御が自動でできるようになると、これを活用して、自然災害などの情報に応じて安全に自動で停止や徐行を行うことや、ラッシュ時の遅延制御や早期回復、省エネルギー運転などの、柔軟できめ細かい列車走行制御による利便性の向上が期待される。

ただし、都市部においてこのような柔軟できめ細かい制御を集中型のシステムで実現しようとした場合、情報が集中する地上設備の制御判断の負荷や、地上一車上間で伝送する情報量が膨大となる。このため、概してシステム規模が大きくなり、システム構築が困難になるうえ、一部の地上装置の故障がシステム全体に波及することも懸念され、故障リスクや脆弱性が増加してしまう恐れもある。また、地方線区においては、地上設備の削減に対するニーズが特に強い。

そこで、地上の集中制御の負荷を軽減するため、列車自身が運行に必要な情報を収集し、転てつ機など地上の信号設備と直接通信を行い、安全を確認しながら速度を安全に制御する自律型の列車運行システムの研究開発を行う。

これは、地上の運行制御システムによって制御されるのではなく、列車が停止位置と走行速度を判断、設定して自分を制御する列車運行制御システムである。すなわち、個々の列車が、前後列車と近接列車の状態、

沿線・線路内の状態、転てつ機・踏切等の状態の情報に基づいて、転てつ機・踏切を制御して進路を設定し、線路内の安全監視を行いながら、適切な停止目標位置と走行パターンを判断して自動で走行することが「列車運行の自律化」である(図2)。

3. 自律化のメリットと効果

3.1 自律化のメリット

列車運行の自律化により、自列車周辺の詳細な情報を使って迅速に異常を検知でき、異常解消後の安全確認も早くできるため、現場で迅速に運転再開の判断が可能となる。また、一部の列車の周辺で異常が発生して減速・停止が必要となっても、安全に支障しない区間の列車には波及しないという効果も期待できる。

例えば線路内の支障を検知して一時的に列車が停止した場合でも、異常が解消して安全に進行できる状態になった時点で、列車が線路内の状態を判断し、安全を確認しながら運転を再開できる。また、斜面崩壊など運転再開に時間がかかるような場合には、列車が自ら状況を判断して後方の駅に戻るように運行計画を変更し、後方の列車と情報交換をしながら安全を確保した上で後方の駅に移動し、乗客を降車、避難させることも可能となる。

さらに、自律化によって安全に関わる機能が車上に集約されるため、万が一地上との通信ができなくなった場合でも、車上からの前方監視などの機能により安全を確保できる範囲内で運行を継続することも可能となる。

3.2 期待される効果

自律型の列車運行システムでは、都市部や幹線系の線区を中心に、旅客の混雑などによる朝ラッシュ時の遅延の影響を受けにくく、かつ早期に回復させるよう

な運行、省エネルギー運転などの効果が期待される。さらに、将来的に、MaaS (Mobility as a Service) のようなシームレスなモビリティサービスにおいて、鉄道が中心的な役割を果たすうえでも必要な技術と考えている。また、線形が比較的簡素な地方線区においては、地上制御装置を省略し、現場の信号装置は転てつ機と踏切だけでできるなど、地上設備の削減が可能となり、低コスト化の効果も期待できる(図3)。

4. 自律化の実現に向けた研究開発

4.1 RESEARCH 2025における研究開発計画

RESEARCH 2025における鉄道の将来に向けた研究開発課題の一つである「列車運行の自律化」では、線路内・沿線の状態、防災・保守、旅客流動に関するデジタル情報に基づいて、列車が沿線設備を制御しな

がら自律的に、安全かつ柔軟に運行する自律型列車運行制御の要素技術の確立を目的とする(図4)。

具体的には、以下の5つの技術に関する研究開発に取り組むことを計画している。

①線路内・沿線の異常検知

列車上に設置したカメラや距離センサーで線路内や沿線の状態を連続的に取得し、画像解析技術等によって進路上の異常を検知する技術を確認する。目標としては、列車の前方600m先の異常検知を目指しており、曲線区間等のように列車から直接見通せない箇所での異常を検知するための地上システムも検討する。

研究開発を進めるにあたっては、RESEARCH 2020において開発した列車前方監視手法⁴⁾や遠赤外線画像式踏切内異常検知装置⁵⁾、90GHz帯ミリ波による線路内異常検知システム⁶⁾等の技術を活用する。特に、列車前方監視システムについては、現在、ディープラー

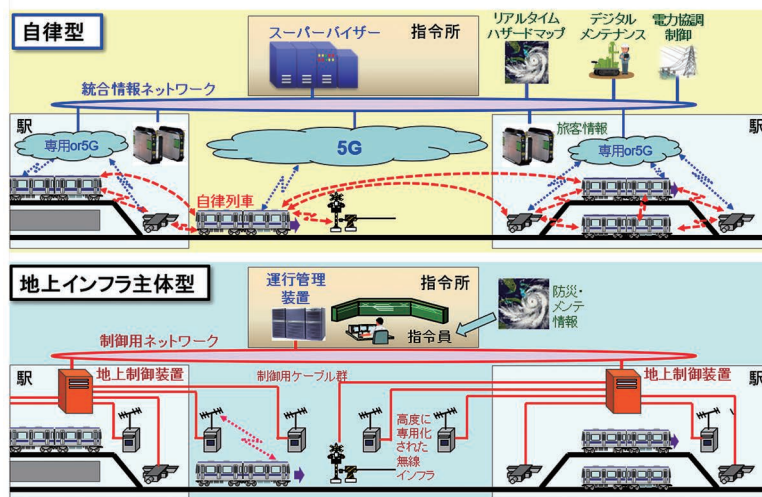


図3 地上集中型の自動運転と自律型の比較

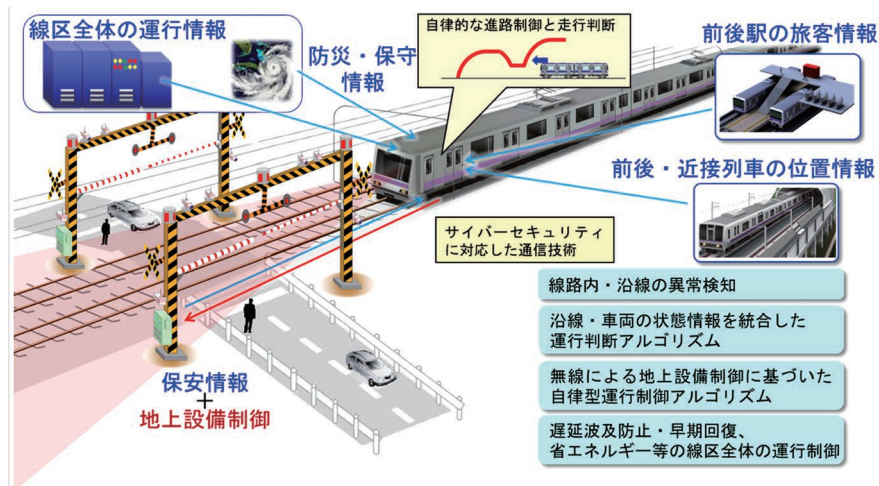


図4 列車運行の自律化に向けた研究開発課題



図5 ディープラーニングを用いた列車前方の人物検知手法による検知率の検証結果例(昼間・立位の場合)

ニングを用いることによって、昼間に立っている人であれば離隔距離300mにおいて90%以上の確率で検知でき、最遠で475m先を検知できる技術レベルまで到達している(図5)。今後、レーダー等のセンサーを複数組み合わせるセンサーフュージョン技術などのデジタル技術を適用して性能向上を図ることで、目標を達成したいと考えている。

この研究開発によって得られる成果は、一般線区でのGoA2.5以上の自動運転を実現するためにも必要な技術であり、列車前頭に運転士以外の係員が乗務する場合の支援システムとして安全性向上に寄与すると考えている。

②沿線・車両の状態情報を統合した運行判断アルゴリズム

前後列車の位置、線路内・車両機器の異常情報などにに基づき、列車が走行の可否を自律的に判断し、自ら運転曲線を作成して走行制御を行うための要素技術を確立する。具体的には、複数の状態情報から列車が進行する線路上のリスクを評価し、走行する際の速度パターンを生成する技術を開発する。なお、この技術については、「激甚化する気象災害に対する鉄道の強靱化」において開発されるリアルタイムハザードマップの出力情報を活用することも想定して開発を行う。

研究開発を進めるにあたっては、RESEARCH 2020において開発した情報ネットワーク活用によるリアルタイム列車運行制御システム⁷⁾の考え方を活用する。これは、詳細な列車の位置情報に基づいて運転曲線レベルで列車をきめ細かく制御する方式で、種々の状態に基づく柔軟な列車の運行を実現させるための技術として開発したものである。

③無線による地上制御に基づいた自律型運行制御アルゴリズム

列車がもつダイヤ情報と前後・近接の列車の位置情報に基づいて、列車から地上の転てつ機と踏切を制御する手法を開発する。

この技術は、特に地方線区においてニーズの強い地

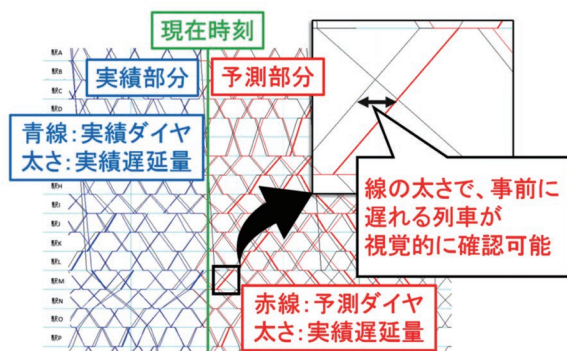


図6 ニューラルネットワークによる列車遅延の予測例

上設備を削減した低コストなシステムの実現に寄与できるものと考えている。

研究開発を進めるにあたっては、RESEARCH 2020において開発に取り組んだ、無線を利用した車上主体の踏切制御システム⁸⁾や、ネットワーク上のコンピュータに連動論理を構築するための基礎的な技術⁹⁾も活用する。

④遅延波及防止・早期回復、省エネルギー等の線区全体の運行制御

上で示した①～③の技術によって、列車が自律的に走行できるシステムは構成できるが、都市圏輸送等においては、地上の運行管理装置による集中制御と車上分散制御の連携を図ることで、省エネルギー運転やダイヤ乱れ時の早期回復運転等のより柔軟で決め細かい列車制御を実現する技術が必要となる。そこで、広域的な運行状況や旅客流動を把握・整理して各列車における運行判断の材料となる情報を提供するスーパーバイザーの構築技術を開発する。なお、この技術を開発するにあたっては、「電力ネットワークの電力協調制御による低炭素化」において開発するリアルタイム省エネ運転アルゴリズムも活用する。

研究開発を進めるにあたっては、RESEARCH 2020において開発した列車運行電力シミュレータ¹⁰⁾や、リア

ルタイム情報を用いた遅延・乗車率の予測手法(図6)¹¹⁾を発展させて活用する予定である。

この技術は、地上集中型の自動運転システムにおいても、省エネ・遅延回復などの要求を併せて実現するための要素技術として活用できるものと考えている。

⑤サイバーセキュリティに対応した通信技術

自律化の実現に必要な基盤技術として、列車の運行制御に係る情報をリアルタイムで伝送するための通信技術を開発する。列車運行の自律化に必要な情報の伝送に対する要件を定義したうえで、列車～列車間の直接通信のほか、列車～地上設備(転てつ機・踏切)との通信や、複線区間での対向列車経由での列車間通信など、複数の伝送経路を想定した場合の伝送品質の把握と評価を行い、システム構成と仕様を提案する。

この研究開発にあたっては、RESEARCH 2020で開発・提案した鉄道運行向け統合情報ネットワーク用プロトコル¹²⁾や、90GHz帯ミリ波通信技術¹³⁾なども活用し、サイバーセキュリティを考慮した通信システムの提案を目指す。

この技術は、自律化だけでなく、鉄道における運行制御やメンテナンス、旅客サービスのための情報伝送手段として寄与できると考えており、国内において2020年度から商用サービスの開始が予定されている5G(第5世代移動通信システム)の活用も検討する。

4.2 自律化の実現に向けたロードマップ

2020年度からスタートする次期基本計画の中では、まず自律化に必要な要素技術を確立し、最終年度の2024年度末に鉄道総研の所内試験線において試験用電車を使用した実証実験を行うことを計画している。

2020年度～2024年度の5年間の研究開発によって得られる成果は、最終目標である自律化のためだけに

はなく、現行の自動運転システムの一般線区等への導入、展開にも資する技術として提案していくことを考えている。

自律化された列車が営業線区で走行できるレベルに至るには十数年かかるものと見込んでいるが、現在の運行管理・保安システムからの移行方法も含め、一つずつ課題を解決しながら、実現を目指していきたいと考えている(図7)。

5. 将来のモビリティサービスにおける自律列車の役割

自律化された列車は、旅客の流動や設備の状態、また気象やエネルギー消費量などの情報に基づいて安全かつ柔軟に運行することが可能となる。このため、気象災害による影響を回避するためのリアルタイムハザードマップシステム、設備状態をリアルタイムで共有できるデジタルメンテナンスシステム、そして省エネ運転を可能とする電力協調制御システムと連携することで、図8に示すように、旅客がモード間をわたって目的地に移動するなかで、平常時はもちろんのこと、気象災害や運行支障などの異常が発生した時でも、モビリティサービスのダウンタイムを極力短くしてサービスを速やかに再開、継続するための重要な役割を果たすことが可能となろう。

6. おわりに

本講演では、2020年度からスタートする新基本計画RESEARCH 2025において鉄道の将来に向けた研究開発課題の一つとして取り組む「列車運行の自律化」について、鉄道総研が考える自律化された列車運行制御システムの姿と、その実現に向けた研究開発計画を紹介した。

列車運行の自律化により、低コストでありながら、さらに安全・安心な輸送サービスが提供できるシステムを実現させたいと考えている。しかし、自律化を実現するためには、線路内の監視や情報セキュリティに対応した情報伝送、複数の情報を基に列車同士が協調して地上設備を制御する手法など、難易度の高い課題を着実に解決していかなければならない。海外においても、自律列車の開発が進められているが、地上からの制御に拠らずに列車が自律的に走行するシステムの開発は各国でも非常に難易度の高い課題として認識されており、世界各国の研究者との共同での研究開発も視野に入れて取り組

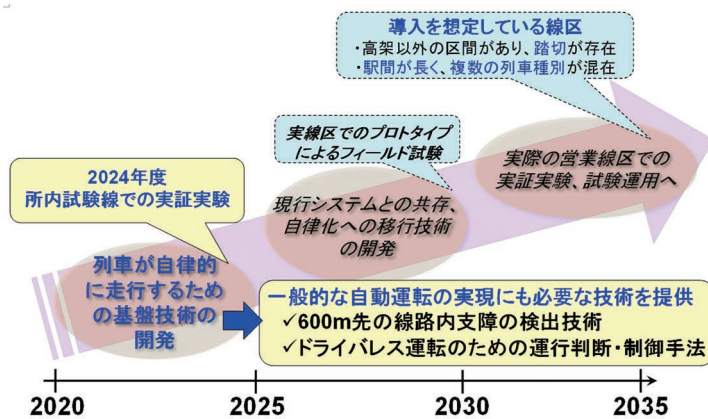


図7 自律化の実現に向けたロードマップ



図8 MaaSを始めとするシームレスなモビリティサービスの実現に寄与する技術

む必要があると考えている。

次期基本計画においても、国内外の鉄道事業者や先端技術を有する研究機関・メーカー・大学と連携させて頂きながら、鉄道の維持・発展に資する技術を創出するための研究開発に鋭意取り組んでいきたい。

なお、本講演で述べた内容の一部には、総務省の「電波資源拡大のための研究開発」による研究が含まれている。

参考文献

- 1) IEC 62267:2009 “Railway applications – Automated urban guided transport (AUGT) – Safety requirements”, IEC, 2009
- 2) 水間 毅：鉄道における自動運転の歴史と今後、計測と制御, 第56巻, 第2号, pp.93-98, 2017
- 3) 国土交通省, “鉄道：鉄道における自動運転技術検討会 - 国土交通省”, 国土交通省ウェブページ, 2019-12-18, https://www.mlit.go.jp/tetudo/tetudo_fr1_000058.html
- 4) 長峯 望, 向嶋宏記, 中曽根隆太, 酒井信弘, 東家崇明, 福井省三, 吉村英晃：深層学習を用いた単眼カメラによる列車前方の人物検知手法, 電気学会 交通・電気鉄道研究会, TER-19-025, 2019
- 5) 中曽根隆太, 長峯望, 向嶋宏記, 押味良和：画像処理による踏切用人物検知に関する検討, 鉄道総研報告, Vol. 33, No. 7, pp.17-22, 2019
- 6) 川崎邦弘, 中村一城：ミリ波技術の鉄道応用に関する動向, 鉄道総研報告, Vol. 30, No. 1, p.54, 2016
- 7) 杉山陽一, 岩田浩司, 山本春生：運行管理と保安制御を融合した列車運行制御システムの基礎検討, 鉄道総研報告, Vol. 32, No.5, pp.35-40, 2018
- 8) 藤田浩由, 新井英樹：無線による踏切制御手法, R R R, Vol. 74, No. 1, pp.24-27, 2017
- 9) 潮見俊輔, 遠山喬, 寺田夏樹, 押味良和, 国崎愛子：クラウド型連動装置の連動論理処理に関する検討, 第26回鉄道技術連合シンポジウム (J-Rail2019) 講演論文集S2-5-5, pp.378-381, 2019
- 10) 武内陽子, 小川知行, 森本大観, 今村洋一, 美濃部晋吾, 杉本祥一：列車運行電力シミュレータの開発, 鉄道総研報告, Vol.30, No.8, pp.5-10, 2016
- 11) 辰井大祐, 中挾晃介, 國松武俊：ニューラルネットワークによる列車運行予測手法, 鉄道総研報告, Vol. 31, No. 10, pp.29-34, 2017
- 12) 中村一城, 川崎邦弘, 竹内恵一, 流王智子：列車運行向け情報統合ネットワークの提案, 鉄道総研報告, Vol. 32, No. 5, pp.41-46, 2018
- 13) 鉄道総研, “世界初, 90GHz 帯を用いて時速240kmで走行する列車と地上間で每秒1.5ギガビットのデータ伝送に成功”, 鉄道総研プレスリリース, 2019-01-29, https://www.rtri.or.jp/press/is5f1i0000009urq-att/20190129_001.pdf