

線路内に設備を追加設置せずに「自動化レベル GOA2.5」に対応した自動運転システムを開発

瀬戸直人

人口減少や高齢化の進行に伴う将来的な鉄道運転士の不足により、列車運行を維持できなくなる可能性が指摘されている。この対策として、運転業務の効率化・省力化が必要であるため、国土交通省の「鉄道技術開発費補助金」^{a)}を活用し、車両の自動運転や運行管理自動化に向けた要素技術開発を進めてきた。具体的には、線路内に設備を追加せず、「自動化レベル GOA2.5」^{b)}に対応する自動運転システムを開発した。開発フィールドは長野電鉄(株) (以下、長野電鉄)で行い、2023年8月から2024年2月にかけて本自動運転システムの実証試験を実施し、基本動作検証(停車位置に対する停止位置精度±50cm以内)を完了した。本報では、実現した自動運転システムの概要と実証試験の概要に関して紹介する。

キーワード：鉄道自動運転, 自動化レベル, 地方鉄道, 地上子

1. はじめに

鉄道を取り巻く環境は年々変化し、特に地方では人口減少により鉄道利用者が減少している。人口減少の影響は鉄道事業者にも波及しており、運転士や保守作業員等の鉄道係員の確保、養成が困難になってきており、特に経営環境の厳しい地方鉄道において、係員不足が深刻な問題となっている。国民生活に多大な影響を与える鉄道にとって事業の維持等の面からこれらは重要な課題となっており、鉄道事業者が現状の営業形態(利用者数の維持、運転士不足の解消、鉄道運行費用の削減や運行本数の維持)を維持するための技術の一つとして、車両の自動運転や運行管理の自動化が望まれている。

鉄道における運転士の乗務しない自動運転は、これまでに人などが容易に線路内に立ち入ることができない踏切道のない構造や高架構造であること、駅にホームドアが設置されていること、ATO^{c)}地上子^{d)}が各駅に複数設置されていること等の要件を満たした箇所、例えば、新交通やモノレールの自動運転で実現されている。一方で、踏切道がある等の一般的な路線では、九州旅客鉄道(株)の様一部の路線で実施されているものの導入数は非常に少ない。

鉄道事業者においては、より一層の業務の効率化・省力化が必要となっており、その一環で一般的な路線での自動運転の導入が求められている。自動運転を導入することにより、従来、運転業務を行っていた乗務員による乗客へのサービス提供や車内のセキュリティの向上、柔軟なダイヤ設定やダイヤ乱れ時の臨時運行等、鉄道に対する多様化・高度化するニーズにも対応することが可能となる。

以上の背景を受け、一般路線、特にATO地上子が多く設置されていない地方鉄道において、線路に設備を追加設置せずに自動運転を実現するために技術開発を進めてきた。

2. 鉄道の自動化レベル概要






鉄道の乗務形態による自動運転の分類を「自動化レベル(GOA)」と呼ぶ。GOAに応じた乗務形態の説明と国内導入状況に関して図-1に示す。図の太枠で示す「自動化レベル GOA2.5」は、列車の先頭に運転免許(動力車操縦者運転免許)を持たない係員が乗車する。係員の業務はドア開閉、緊急停止操作、避難誘導等であり、現行の運転士が行っている操縦行為を担わせるものではない。そこで、車両の走行に関わる

a) 2023年度「列車前方検知等の鉄道自動運転に向けた要素技術の開発」

b) 「自動化レベル GOA2.5」は、列車の先頭に運転免許(動力車操縦者運転免許)を持たない係員が乗車し、緊急停止操作、避難誘導等を行う。

c) 「ATO」は、「Automatic Train Operation」(自動列車運転装置)の略。

d) 地上子: 「地上子」は位置認識のため地上側に設ける装置で、車両に搭載された車上子と情報伝送を行う。

自動化レベル (IEC(JIS)による定義 [※])	乗務形態のイメージ (〔 〕内は係員の主な作業)	国内の導入状況
GoA0 目視運転 TOS	 運転士(および車掌)	路面電車
GoA1 非自動運転 NTO		踏切道がある等の一般的な路線
GoA2 半自動運転 STO	 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
GoA2.5 (緊急停止操作等を行う係員付き自動運転) ⇒IEC及びJISには定義されていない	 列車の front に乗務する係員 [緊急停止操作、避難誘導等]	無し
GoA3 添乗員付き自動運転 DTO	 列車に乗務する係員 [避難誘導等]	一部のモノレール
GoA4 自動運転 UTO	 係員の乗務無し	一部の新交通 等

※IEC 62267(JIS E 3802):自動運転都市内軌道旅客輸送システムによる定義
(IEC:国際電気標準会議(International Electrotechnical Commission) 電気及び電子技術分野の国際規格の作成を行う国際標準化機関)

GoA: Grade of Automation
TOS: On Sight Train Operation, NTO: Non-automated Train Operation,
STO: Semi-automated Train Operation, DTO: Driverless Train Operation, UTO: Unattended Train Operation

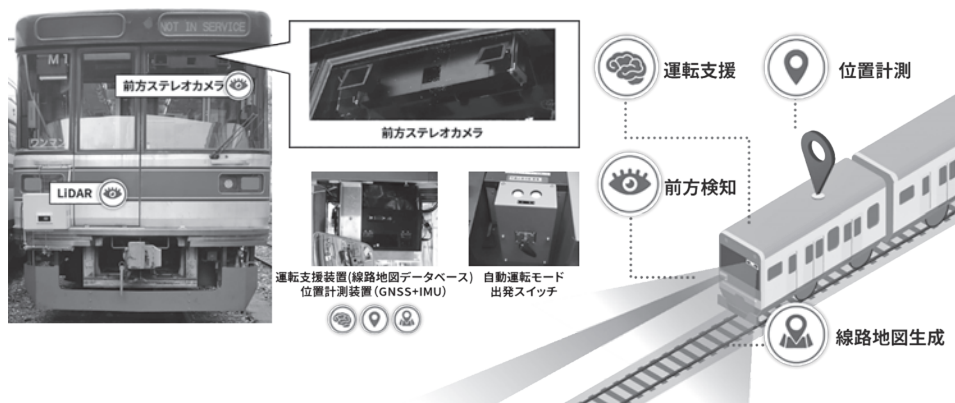
出典: 鉄道における自動運転技術検討会のとりまとめ(概要)より作成
URL: <https://www.mlit.go.jp/tetudo/content/001512320.pdf>

図一 鉄道の乗務形態による分類(自動化レベル)

制御(加減速制御, 駅での定位置停止制御)や, 緊急停止操作の実行を支援するための前方障害物(以降, 支障物と記す)検知と通知は全て自動で実行する。「自動化レベル GOA2.5」実現には前述した機能を開発し, 自動運転のリスクとなり得る事象の発生を低減させるため, 自動運転システムの信頼性(例: 停止精度の向上, 支障物検知精度の向上, 機器故障発生率の低減等)を十分に確保する必要がある。

3. 自動運転システムの概要

開発した自動運転システムは図一2に示す様に, 既存の車両に前方ステレオカメラ, LiDAR^{e)}, 運転支援装置, 位置計測装置(GNSS^{f)}とIMU^{g)}を搭載)を追加することで実現している。前方運転支援装置は主に2つの機能を有している。第1の機能は, 前方ステレオカメラで撮影した前方画像を用いて支障物を検知し, 運転免許を所持しない乗務員へ危険であることを知らせる機能である。第2の機能は, GNSSや

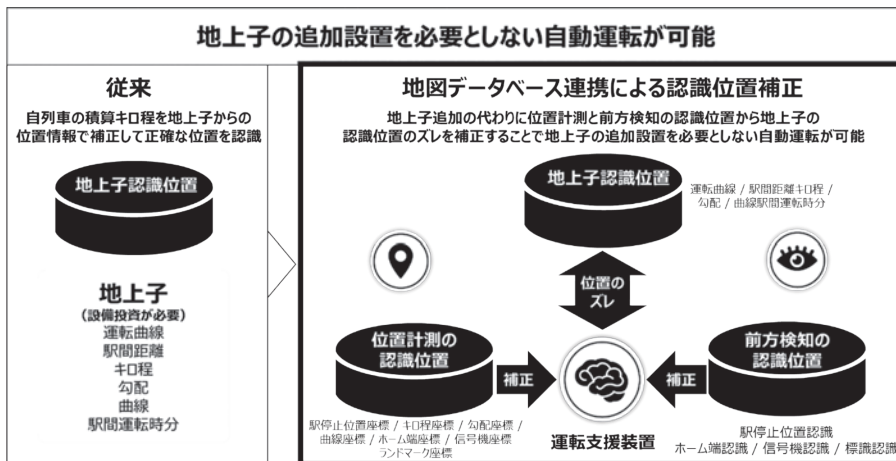


図一2 開発した自動運転システム構成

e) 「LiDAR」は, 「Light Detection and Ranging」の略であり, レーザーの照射により, 離れた物体までの距離情報を3D画像として得る技術。

f) 「GNSS」は「Global Navigation Satellite System」の略であり, 汎地球測位航法衛星システムを指す。

g) 「IMU」は「Inertial Measurement Unit」の略であり, 慣性計測装置を指す。



図一三 従来の運転制御と地上子を追加設置しない自動運転制御のイメージ

IMU，速度計などにより自車位置を高精度に測定・推定し，その位置情報を用いて，運転支援装置内に保存される線路地図データベースと照合し，加減速制御や停車制御を自動で行う機能である。自動運転を実現するためには，車両の走行位置を正確に把握する必要があり，従来は図一三左図に示す様に，線路内に地上子を追加設置して正確な位置や運転情報を把握する必要があった。しかし，地上子を追加設置する場合，設置・維持管理に係るコストへの懸念があることから，地上子の追加設置を必要としない自動運転システムを開発した（図一三右図）。本来地上子が有すべき情報を，位置計測装置の計測結果を運転支援装置で統合することで，地上子を追加設置しない自動運転を実現している。

一方で，GNSSによる位置計測は，空が開けていないと計測精度が低下する課題があり，駅は多くの箇所屋根があるため，別の手段で停止精度を向上させる必要がある。そこで駅内に安価且つ容易に設置可能な独自標識（以降，ランドマークと記す）を製作し，前方ステレオカメラとLiDARで正確に測距することで停止精度の向上を図っている（写真一）。ランドマークのデザインは線路に設置されている他の標識と重複しない，且つ形状を特定しやすいように特定の角を切り落とした形状としている。また，塗料は日中の太陽光や夜間の周囲の照明による反射を防止するため，独自の反射防止塗料を採用している。写真一で示すように，黄色と黒色の2色を混在させているのは，LiDARによる検出精度を向上させるためである。LiDARは物体の反射率の違いから形状を特定するため，ランドマークの中に反射率の異なる塗料を混在させることで検出精度を向上させている。ランドマークの構造や塗料の工夫と独自の検知アルゴリズムによ



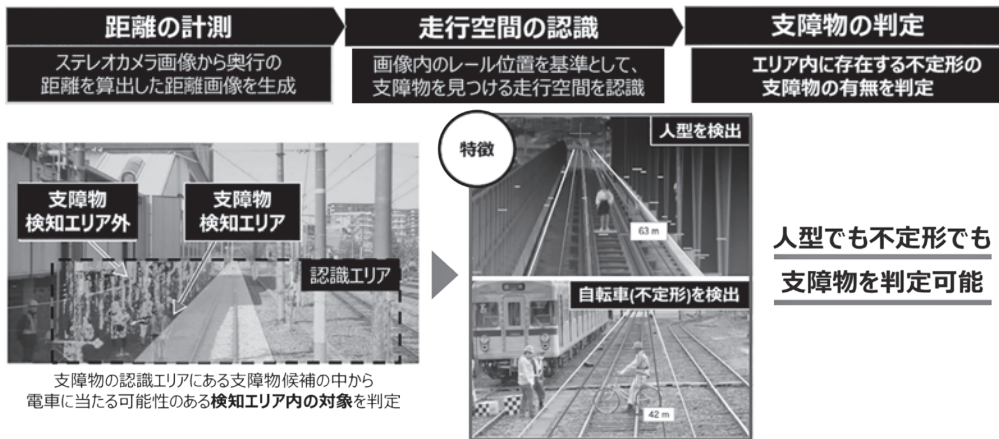
写真一 駅停車用ランドマーク（左：日中画像 右：夜間画像）

り，独自のデータセットと評価指標を用いて評価した結果，誤検知率0.1%を実現している。

以上の様に既存車両上に搭載した様々なセンサと線路地図データベースを組み合わせることで，高精度な自動運転を実現している。

4. 安全性を向上させるため支援機能

開発した自動運転システムには，安全性を向上させるためにGOA2.5係員を支援する機能として，支障物検知機能を搭載しており，線路上の支障物（列車の運行に支障をきたす物体）を自動で検知し，係員に音や光でブレーキ操作を促す機能を備えている。開発した支障物検知機能の動作に関して図一四に示す。処理の流れとして，第一に前方ステレオカメラで撮影した画像から奥行き距離を算出した距離画像を生成する。第二に生成した距離画像に対して，線路のレール位置を基準として支障物を見つける空間を検知エリア



図一 4 支障物検知の動作



図一 5 カーブを通過する際の補助灯の動作イメージ

として定義する。最後に検知エリア内の対象を支障物として判定する。本検知機能は人に限らず不定形の物体も検知エリア内であれば支障物と判定可能であることを特徴としている。

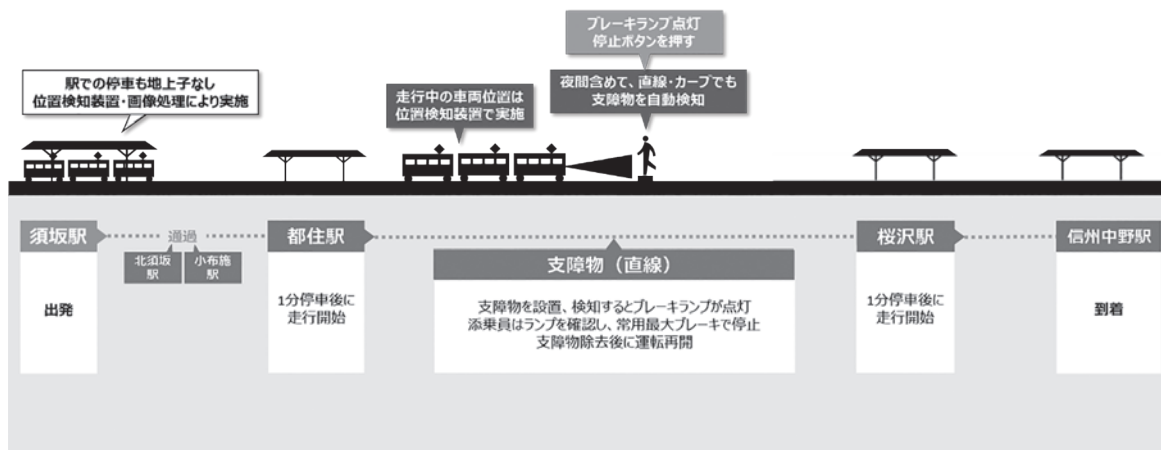
また、夜間は画像が暗くなるため、前部標識灯（厳密には前方を照らす照明ではなく、夜間などに車両の前方から自身の存在を確認させるために点灯させるもの）を利用して前方の支障物検知を行うが、従来車両に設置されている前部標識灯は、照射方向が車両前方のみであるため、カーブ等の曲線区間では、実際の進行方向が前方に対して横方向になるため、前部標識灯の照明が照らされてない。従って、カーブの先の支障物を検知するためには、カーブ方向を照らす必要がある。そこで、支障物検知機能の性能をカーブ区間においても確保するため、列車位置連動の視界確保のための補助灯を開発した。図一 5 にカーブを通過する際の補助灯の動作イメージを示す。夜間の通常走行では、前部標識灯を点灯させながら、GNSSにより自車位置を測位し、地図データベースで位置を照合しながら走行している。自車位置が地図データベース上で

カーブに到達したと判定した際は、補助灯を点灯しカーブを通過する（カーブ通過後は補助灯を消灯する）。本機能を搭載することで、夜間における支障物検知の性能向上を図っている。

5. 実証試験の概要

本実証試験は長野電鉄長野線の一部区間（須坂駅－信州中野駅間）で夜間の線路閉鎖した環境で実施した。図一 6 に示す様に須坂駅を開始駅として、自動運転モード出発スイッチにより走行を開始し、位置や速度の情報をもとに、運転支援装置で加減速制御および停車駅での停車制御を実施した。停車制御に関して、各駅の停車位置に対して±50 cm 以内の停止位置精度を確認した。

また、支障物検知機能の性能確認も夜間を含めて実施しており、途中の走行区間（直線部）に人物に見立てた模擬支障物を線路上に設置し、前方ステレオカメラで模擬支障物を検知して乗務係員を模擬した運転士に通知し、手動で停車する試験を実施した。結果、時



図一 6 自動運転実証試験の流れ

速 70 km での走行時に 200 m 手前で模擬支障物を検知し、運転士の操作で模擬支障物に衝突する前に車両を停止できることを確認した（過去の夜間試験において、人間が視認できる限界距離は 110 m ~ 130 m であった）。

一方、本実証試験を通して、カメラでの撮影が困難な逆光や対向照明等の環境条件のもとで、支障物検知に課題があることを確認した。そのため当社では前述した劣悪条件下で支障物を安定して検知できるシステムの実現を目的として、現在の前方ステレオカメラと LiDAR の機能向上と、それぞれを組み合わせたシステムの試作・検証を進めている。

6. おわりに

本稿では、線路内に設備を追加せず、「自動化レベル GOA2.5」に対応する自動運転システムを紹介した。自動運転システムとしては将来的に、「自動化レベル GOA3」以上の自動運転への対応も目指しており、今後は前方ステレオカメラの画像情報や LiDAR の測距データを組み合わせて、更に長距離である 350 m 先の支障物検知の実現を目指す（在来線の最高

速度はおおよそ 100 km/h 以下であり、100 km/h での制動距離が約 350 m)。また、地形や天候の影響を考慮し、列車位置に応じた最適なセンサを自動的に選択することで、自己位置の特定精度を向上させる技術開発を進めていく予定である。さらに、各装置を設置性に優れた最適な装置として開発を進め、自動運転の本格的な運用に向けて幅広い列車に適用可能なシステム開発に取り組む。また、安全性と利便性の追求に加え、個々の鉄道事業者のコンセプトに沿ったソリューションを提供していく。

JCMA

《参考文献》

「鉄道における自動運転技術検討会」、鉄道における自動運転技術検討会のとりまとめ（概要）（国土交通省）資料 P2、令和 4 年 9 月 13 日

【筆者紹介】

瀬戸 直人（せと なおと）
東芝インフラシステムズ(株)
インフラシステム技術開発センター
自動化・画像応用システム開発部
列車走行安全支援システム開発プロジェクトチーム
スペシャリスト

