鉄道自動運転に向けたセンサー技術の高度化とデータベース生成技術

Advanced Sensor and Database Generation Technologies for Autonomous Train Operation Systems

大嶽　達哉 OHDAKE Tatsuya　　本間　朗 HOMMA Akira　　瀬戸　直人 SETO Naoto　　服部　陽平 HATTORI Yohei

鉄道分野では，少子高齢化を背景に運転士不足が問題となっており，その解決策として自動運転への期待が高まっている。一方で，自動運転の導入には多額の設備投資を要することから，導入コストの低減が求められている。

東芝は，自動運転の実現に向けて，運転支援技術を高度化し，位置補正用のATO（自動列車運転装置）地上設備（以下，ATO地上子と略記）の追加なしで，駅の停止位置に精度良く停止できる鉄道自動運転システム（以下，自動運転システムと略記）の実証試験を進めている。そのために必要となる長距離から近距離までカバーする遠近対応ステレオカメラ，高性能な小型長距離LiDAR（Light Detection and Ranging），高精度な位置検知技術，及び運転支援装置を開発した。更に，その導入推進に必要なデータベース生成技術の開発に取り組んでいる。

In the railway industry, automatic train operations are a focus of growing expectations as a means of addressing the shortage of train operators associated with the declining birthrate and population aging. However, high implementation costs are a critical issue that must be overcome to achieve the practical deployment of autonomous train operation systems.

With the aim of realizing a high-performance, low-cost autonomous train operation system, Toshiba Corporation has developed the following advanced sensor technologies: (1) near- and far-range stereo cameras, (2) compact, high-performance, long-range light detection and ranging (LiDAR), (3) high-accuracy position detection technology, and (4) a train operation assistance system. We are now conducting verification tests of a prototype autonomous train operation system designed to stop trains precisely at station stopping positions without the addition of automated train operation (ATO) equipment for position correction. We are also developing database generation technology required to promote system implementation.

1. まえがき

鉄道分野では，少子高齢化に伴う乗務員確保の困難を背景に，自動運転への期待が高まっている。一方で，自動運転の導入には技術開発や新たな設備投資が必要である。また，自動運転の導入に向けて，安全と信頼性を実証し，適用実績を蓄積することが求められている。

東芝は，自動運転システムの実証試験を進めている。**図1**に，ATO地上子の追加を必要とせず，駅の停止位置に精度良く停止可能にする自動運転システムを示す。列車は，ステレオカメラ，長距離LiDAR，GNSS（Global Navigation Satellite System）などを用いた高度な位置検知技術を使って列車位置を検知し，運転支援装置でブレーキなどを制御して，駅の停止位置に精度良く停止する。

ここでは，自動運転に向けた運転支援技術の高度化と実証試験について述べる。更にその導入推進のため，それらを支えるデータベースの生成技術についても述べる。

2. 運転支援技術の高度化と実証試験

センサー技術を応用した自動運転システムを実現するためには，制動距離が長いという鉄道特有の特性を踏まえた長距離前方監視技術に加え，ATO地上子に依存せず列車位置を正確に把握する位置検知技術が必要である。また，これらを統合する運転支援技術が求められる。

この章ではまず，長距離前方監視技術に取り組んだ遠近

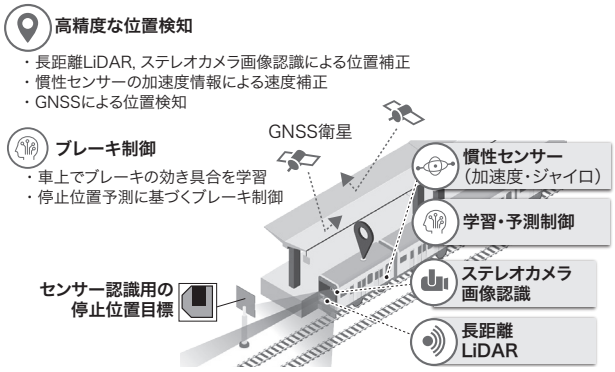


図1. ATO地上子の追加が不要な自動運転システム

高度な位置検知技術とブレーキ制御などにより，ATO地上子の追加がなくても，駅の停止位置に精度良く自動で停止できる。

Autonomous train operation system without need for additional ATO equipment

対応ステレオカメラ及び小型長距離LiDARの開発状況を述べる。次に，位置検知技術の高精度化に向けた開発状況と，それらセンサー情報を統合・制御する運転支援技術について述べる。

2.1　遠近対応ステレオカメラ

遠距離監視に対応すると，近くに焦点を合わせにくくなる一方，駅構内や低速走行時には近中距離の監視も重要である。従来のカメラ構成では，遠距離監視に必要な解像度や，低照度環境における撮像性能，及び近距離監視に必要な画角を同時に満たすことが難しかった。そこで，鉄道用LED（発光ダイオード）前灯の照射範囲と監視距離を踏まえ，遠距離用レンズと近中距離用レンズを組み合わせた高解像度で遠近対応が可能なステレオカメラを試作した。

カメラ基板の撮像素子には，フルハイビジョンの約12倍に相当する約2,455万画素のグローバルシャッター（全画素を同時に露光する機能）搭載CMOS（相補型金属酸化膜半導体）イメージセンサーを採用した。レンズは，列車前方250～350 mの遠距離を撮影する水平画角16°の遠距離用レンズと，5～250 mの近中距離を撮影する水平画角69°の近中距離用レンズを上下に配置して1ユニットとした。更に，CMOSイメージセンサーを上下に分割して，上側の素子を遠距離用に，下側の素子を近中距離用に割り当てることで，一つのCMOSイメージセンサーで両方の画像を撮影可能とした。遠距離用と近中距離用の画像サイズは，それぞれ5,200×1,495画素である。また，高解像度画像の伝送速度とデータ処理負荷を考慮し，二つの画像を常時同時に出力する方式ではなく，列車速度や走行環境に応じて出力画像を切り替える方式を採用した。これにより，遠距離監視性能を高めつつ，画像処理のリアルタイム性を確保した。**図2**に，試作した遠近対応ステレオカメラの外観を示す。この結果，高解像度映像の取得と撮像データ伝送に関する基本機能の確認を完了し，実証試験に向けた要素技術を確立した。

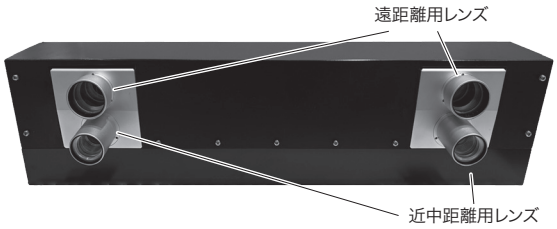


図2. 遠近対応ステレオカメラの外観
遠距離用レンズと近中距離用レンズを組み合わせて，遠距離から近距離まで撮影する。
Prototype near- and far-range stereo camera

2.2　小型長距離LiDAR

LiDAR技術は，自動車分野の自動運転などで活用が進んでいるが，鉄道に適用するためには，長距離で安定して対象物を検知できる性能が不可欠である。

当社は，長距離高解像測距のために，独自のセンサーと専用処理LSIを用いた同時並列処理（画像処理など）により，同時測距点数を増大させるとともに，車両搭載に適した送受を備えた光学機構を採用した小型長距離LiDARを開発した[(1)]。

これまで車外で性能評価を行っていた長距離LiDAR試作機を車載化するため，光学機構を維持したまま処理ボードなどを再設計し，体積を約80 %削減した。また，既存列車の運転席ガラスの赤外透過率を測定した結果，性能低下が無視できないことを確認した。このため，透過率の高い窓を新たに車両に設置した。この結果，小型長距離LiDARを，車載常設可能とした（**図3**(a)）。実際に小型長距離LiDARで，

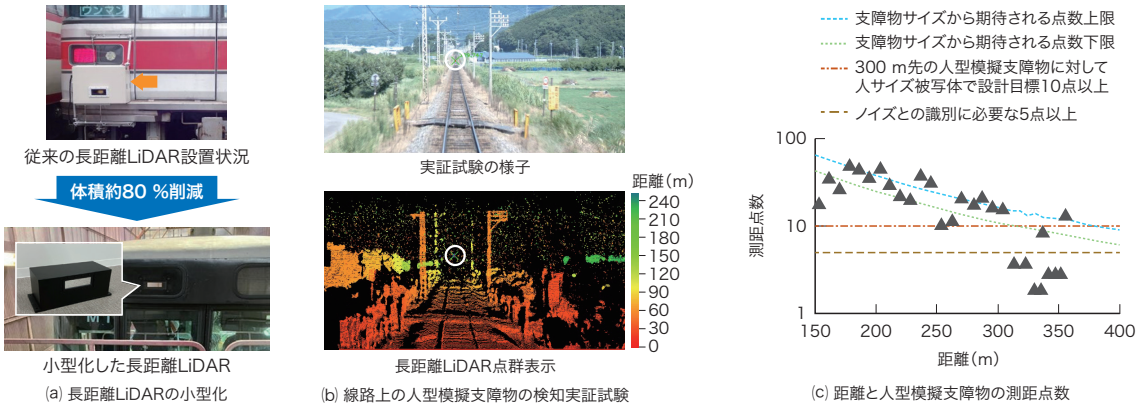


図3. 小型長距離LiDAR設置状況と支障物検知実証試験
小型長距離LiDARを車内の行き先表示スペースに格納した。300 m先でも安定した人物検知を可能とした。
Compact long-range LiDAR installed on rolling stock and view of obstacle detection tests

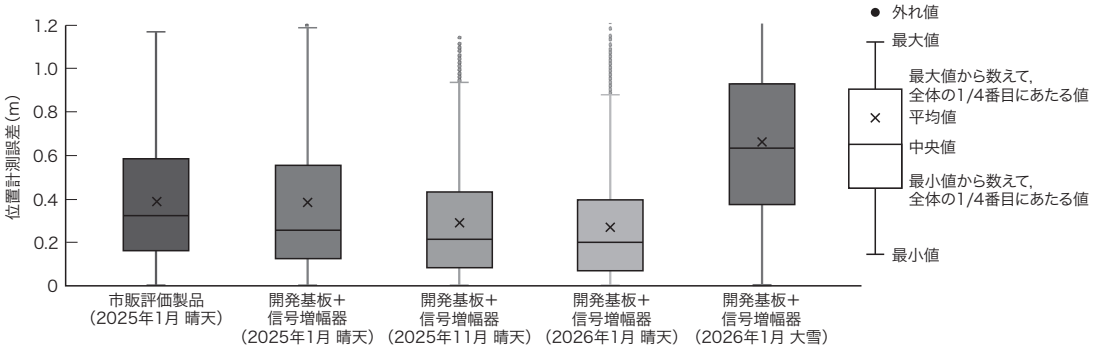


図4. 位置計測誤差の分布

大雪時は晴天時に比べ，位置計測誤差が大きい。

Distribution of position measurement errors

前方支障物の検知性能を検証した。線路上に人型模擬支障物を配置し，走行中に取得した小型長距離LiDARの点群データを評価した(図3(b))。支障物の位置は，小型長距離LiDARと遠近対応ステレオカメラの画像データを組み合わせて表示した。この結果，昼夜を問わず300 m先の人型模擬支障物に対して，ノイズとの識別に必要な5点以上の測距点数を取得するとともに，人サイズの被写体で，設計上の目標である10点以上の点群取得を確認した(図3(c))。

2.3 高度な位置検知技術

走行中と停止中の列車位置を正確に把握することは，自動運転における加減速制御や停止制御を正確に行う上で重要である。従来は，車輪に取り付けた速度発電機(TG)の回転数を積算して列車の位置を求めていたが，車輪の空転・滑走や車輪径の変化などにより，位置検知精度が低下する問題があった。そこで，TGに依存しないGNSSを用いた位置検知技術を開発し，位置検知の高度化を進め，実走行環境での検証を進めている[2]。更に，その有効性を確認するため，長野電鉄(株)の協力の下，GNSSのセンチメートル級補正信号を活用して，平坦区間(長野電鉄須坂駅～信州中野駅)と山線区間(信州中野駅～湯田中駅)で，各複数回往復する実証試験を実施した。実証試験は晴天時と大雪時の条件で実施し，橋梁(きょうりょう)と駅舎下を含む走行環境において，GNSSのFIX率(全てのGNSS測位データの中で高精度な位置情報(FIX解)が得られた割合)を測定した。結果は，天候によらず97 %以上であった。

また，位置計測誤差の分布を**図4**に示す。2本のレールの中心線上で，GNSS測定値に最も近い位置を真値と仮定した。晴天時の位置計測誤差(二乗平均平方根誤差)は平坦区間，山線区間ともに約0.3 mであり，位置計測誤差の目標値である0.5 m以内を満足した。この結果，晴天時は市販評価製品と同程度の精度があることが分かった。

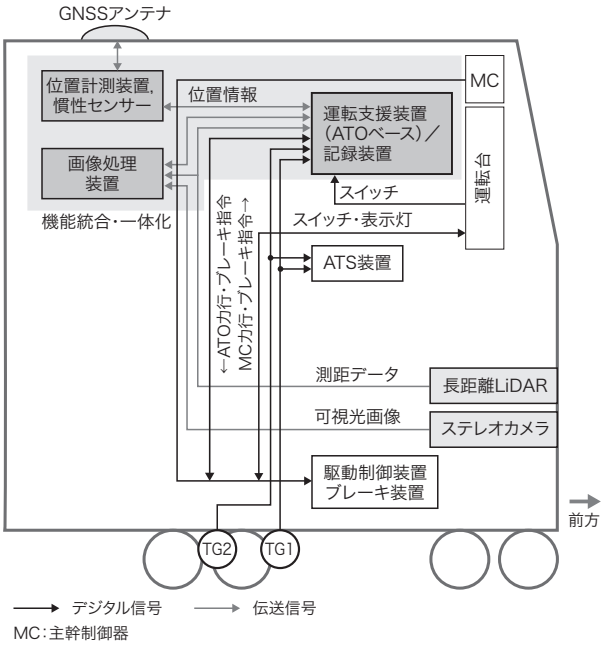


図5. 運転支援装置の周辺構成

各種センサーと接続された運転支援装置が，各種センサー情報を走行制御に活用する。

Configuration of train operation assistance system

一方，大雪時は晴天時に比べて精度が低下した。これは，含水量の多い雲やアンテナカバーへの積雪による信号減衰が原因と考えられる。このため，GNSSが不安定な場合は，GNSSと並行稼働する慣性センサーによる自律計測へ自動的に切り替えるとともに，自律計測結果を地図データベース上の座標と照合し，マップマッチングとキロ程(線路起点からの距離)換算によって位置情報の補正を行う。

2.4 運転支援装置

運転支援装置は，当社で活用実績のあるATOをベースにした構成である。この装置は，位置計測装置や画像処理装

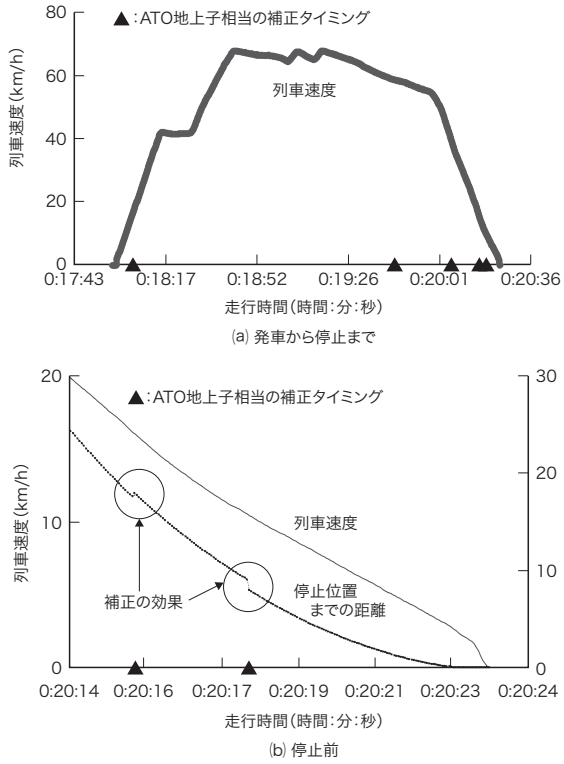


図6. 列車速度のグラフ

通常のATOと同様にATO地上子相当のポイントで自己列車位置を補正し，駅の停止位置に精度良く停止できる。

Changes in train speed when stopping at station

置などのセンシング処理装置のインターフェースを実装し，各種センサーの情報を，力行・ブレーキなどの走行制御に反映できる(**図5**)。従来のATOは，ATO地上子と結合する場所だけで位置補正をする。一方，運転支援装置は，各種センサーから連続的に位置情報を取得できる。しかし，従来のATOの制御を極力適用するために，ATO地上子相当のタイミングでGNSSから測位データを取得し，位置補正を行い，停止位置までの距離を把握する方式を採用した。**図6**に，運転曲線と呼ばれる走行時間に対する列車速度のグラフと，GNSSにより駅の停止位置までの距離を補正した軌跡を示す。

この技術を使って，実際に自動運転システムの走行実証試験を実施し，運転支援装置による駅間の自動走行，駅の停止位置への高精度な停止ができることを確認した。

3. データベース生成技術

自動運転では，現在の自己列車位置だけでなく，前方の勾配，曲線，分岐器，踏切，駅設備などを走行距離と対応付けて把握する必要がある。このため，線路中心線，ランドマーク(停止目標位置など)，及び沿線鉄道設備などの座標データ

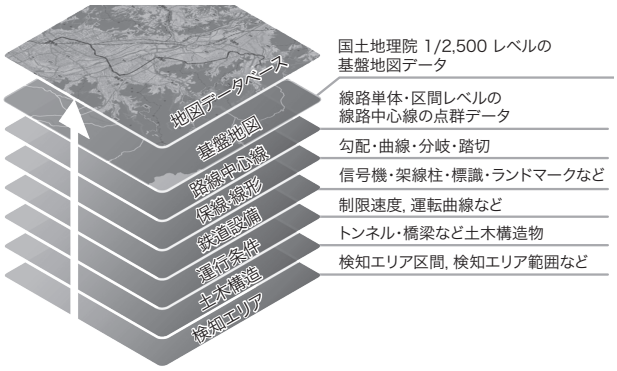


図7. 地図データベース

基盤地図などの情報と結び付いた複数種類のレイヤーから成るデータ構造である。

Multilayered map database

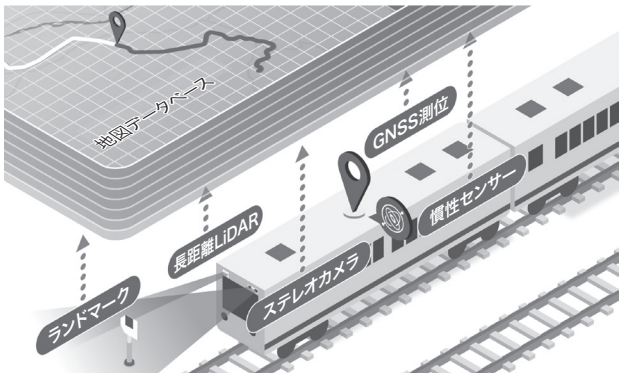


図8. 地図データベースの生成

各センサーと車両からの実走行データで，地図データベースを補正していく。

Generation of map database corrected using sensor and running data

にひも付けた地図データベース(**図7**)が，走行制御と前方監視の基盤となる。

一方で，鉄道事業者が保有する図面は，用地境界や設備配置を示すものが多く，自動運転に必要な線路中心の高精度座標や，実走行に即した勾配・曲線情報が十分に整備されているとは限らない。また，図面上のキロ程と実際の走行軌跡に差異がある場合，停止目標位置からの距離と測地座標の対応付け作業は大きな労力を要するため，省力化が必要となる。また，自動運転の高度化には地上設備情報だけでなく，運転士の操作ノウハウを反映した走行制御も重要である。

3.1　地図データベース生成技術

地図データベース生成の労力削減のため，国土地理院の地図などから作成した初期座標，又は位置計測装置を搭載した車両の走行軌跡を用いて線路中心線を生成し，GNSS,

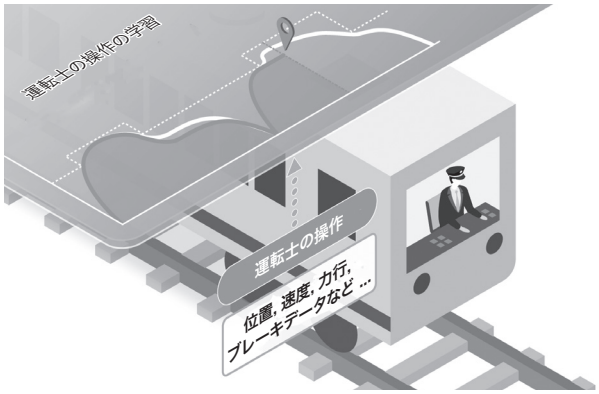


図9. 運転士の操作データの学習
机上で作成した運転曲線と実走行データとを比較して，運転士の操作の特徴を推定する。
Learning from manual operations

慣性センサー，ステレオカメラなどの実走行データを重ね合わせて補正する方式を検討している(**図8**)。

まず，線路中心線に相当する基盤データを作成し，実走行データによって位置ずれを補正することで，勾配変化点や沿線鉄道設備の位置情報を段階的に地図データベースに付加する。これにより，路線延伸や，設備更新，工事後の線形変更，地震などによる座標変化にも柔軟に対応可能な地図データベースの構築を目指している。生成した地図データベースは，列車位置の管理に加え，運転曲線の作成，支障物検知エリアの設定，ランドマーク認識の補助，設備点検データとの連携にも活用することを見据え，開発を進めている。

更に，地図データベースを基盤として，各種データを統合することで，自動運転の導入準備と将来の保守・運行高度化を同時に進めている。

3.2 運転曲線データベース生成技術

従来，運転士は見通しの悪い第4種踏切(遮断機や警報機のない踏切)や分岐器通過時などにおいて，図面に表れない現場の状況を考慮し，経験に基づいて速度を調整していた。こうした運転士のノウハウは，図面情報だけでは運転曲線データベースに十分反映できない。

このため，運転士の操作データを学習し，運転曲線データベースとして活用する手法を検討している。これにより，運転曲線データベース作成を省力化するとともに，図面情報だけでは把握しにくい鉄道運転ノウハウを取り込み，自動運転へ反映することを図る。具体的には，車両に運転支援装置と記録装置を搭載し，**図9**に示すように，位置，速度，力行，ブレーキなどの記録データから運転曲線を描画して加減速の特徴点を抽出した。これにより，運転士の操作データの蓄積と分析を行い，図面に現れないノウハウを学習し，自動運転に向けて運転曲線データベースへの反映を目指す。

以上，地図データベースを基盤として，運転曲線，支障物検知エリア，ランドマーク認識補助，設備点検などの各種データベースを効率的に生成し，自動運転，設備保守，運行最適化への活用を図る。

4. あとがき

鉄道分野への自動運転の導入推進のため，ATO地上子を追加せずに，駅の停止位置に精度良く停止できる自動運転システムに必要なセンサー技術，運転支援装置，及びデータベース生成技術を開発し，自動運転の実証試験を行った。

今後，開発した技術の更なる高度化を図り，安全と信頼性を確保した上で，鉄道DX(デジタルトランスフォーメーション)を活用したデジタル革新によって，鉄道システムの効率化・省力化の実現に貢献していく。

ここで述べた取り組みの一部は，国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて実施した。

謝　辞

開発に際し，実車環境をご提供いただいた長野電鉄(株)に深く感謝の意を表します。

文　献

⑴ 鈴木美彦，ほか．カメラとLiDARが連動する自動運転向け前方検知．サイバネティクス．2023，**28**，1，p.10–13.
⑵ 瀬川泰誠，ほか．“走行安全支援用前方支障物検知技術の開発 その3―鉄道自動運転に向けて―”．第59回鉄道サイバネ・シンポジウム論文集．2022，論文番号507.


大嶽　達哉　OHDAKE Tatsuya, Ph.D.
総合研究所 インフラシステムR&Dセンター
自動化・画像応用システム技術開発部
博士(工学)　日本写真測量学会会員
Automation and Image Applied Systems R&D Dept.


本間　朗　HOMMA Akira
モビリティ・インフラソリューション事業部
鉄道情報システム部
Railway Information Systems Dept.


瀬戸　直人　SETO Naoto
総合研究所 インフラシステムR&Dセンター
自動化・画像応用システム技術開発部
Automation and Image Applied Systems R&D Dept.


服部　陽平　HATTORI Yohei
モビリティ・インフラソリューション事業部
鉄道システム技術第一部
Railway Systems Engineering Dept.1