

鉄道車両の走行安全性向上に寄与する 前方検知装置

Forward Obstacle Detection Sensor for Advanced Train Operator Assistance Systems Ensuring Safety

高橋 雄介 TAKAHASHI Yusuke 二神 拓也 FUTAGAMI Takuya 瀬川 泰誠 SEGAWA Taisei

我が国では、少子高齢化に伴い列車運行に関係する人手が不足してきていることへの対応として、自動運転導入に向けた技術開発を加速している。自動運転を実現する上で、踏切を含む路線において列車前方の走行軌道の安全性を確保するために、運転士の目視に代わる前方監視技術を確立する必要がある。

東芝グループは、列車の自動運転を目指す、走行安全支援システムの構成要素の一つとして、前方監視カメラ映像を解析して支障物を検出する前方検知装置を開発している。試作機を製作して実車両に搭載し、様々な環境下で試験映像データを収集・蓄積・解析することで、運用環境下でも安定した検出性能を確保できるよう検証と改良を進めている。

The movement toward the development and introduction of autonomous train operation systems has accelerated in Japan, due to the labor shortage related to train operations accompanying the shift to an aging society with fewer children in recent years. From the viewpoint of ensuring the safety of forward tracks including crossings, the introduction of forward monitoring techniques is becoming essential as a replacement for the current visual surveillance performed by train operators.

The Toshiba Group has been developing a forward obstacle detection sensor, incorporating image processing techniques to detect obstacles using images captured by a stereo camera system, as a key element of advanced train operator assistance systems aimed at realizing autonomous train operations. In order to secure the stability of detection performance in practical environments, we have been conducting a succession of verification tests and improving the performance of the sensor through analysis of image data collected and accumulated using a prototype unit installed on actual trains under various conditions.

1. まえがき

我が国の総人口は、既に長期的な減少局面に入っており、急速な高齢化と生産年齢人口の縮小に伴い、公共交通の要員減少とマーケットの縮小という二つの危機に直面している。このような状況の下で、利便性を損なわずにサービスの質を高めながら、鉄道事業を継続させること及び発展させることが、鉄道会社にとって重要な課題となっている。全国的に運転士や保守作業員などの鉄道係員の確保・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では、深刻な問題となっている。そこで、より一層の業務の効率化・省力化が必要となっており、その一環として運転士が乗務しない自動運転の導入が求められている。

近年、都市部の鉄道及び一部の地方鉄道において、ドライバレス自動運転の導入が、議論され始めている。2018年末以降、多くの鉄道事業者が参加する形で自動運転技術に関する検討会が開催されている⁽¹⁾。これまでも自動運転は実用化されているものの、人などが容易に線路内に立ち入れない高架構造に限定されるなど、自動運転を前提に建設された新交通システムにとどまっている。一方、運転士

の乗務を前提に建設された一般的な路線では、踏切などが存在するため、安全・安定輸送の観点から自動運転を導入することが困難である。

そこで、前述の検討会では、踏切などが存在する一般的な路線を対象に、センサー技術・ICT（情報通信技術）・無線技術などを利用した最新の列車制御技術も導入し、自動運転の実現に必要な技術要件の検討を進めている。その一つとして、運転士の目視に代わって列車前方の走行軌道の安全性を確認する、前方監視技術を確立する必要がある。

東芝グループは、2015年度から国土交通省の鉄道技術開発費補助金の支援を受けて、車載前方監視カメラで主に支障物を検知する前方検知装置を含む走行安全支援システムを開発した⁽²⁾。ここで開発した前方監視技術をベースに、更なる高精度化・高機能化を目指して、現在も列車の自動運転を支援する前方検知装置の開発を進めている。

ここでは、開発している前方監視技術の概要、及び前方検知装置の試作機の性能評価結果について述べる。

2. 前方監視技術の概要

近年、自動車の安全運転支援や自律走行向けに、自転車

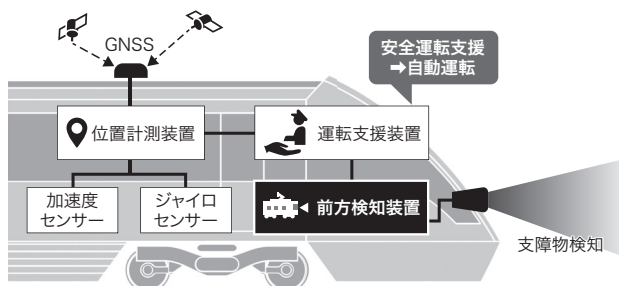


図1. 走行安全支援システムの概要

運転士を支援するシステムで、前方検知装置が運転士の目の代わりとなる。

Outline of train operator assistance system

両の前方や周囲の状況を認識する技術の開発が活発に行われている。東芝グループも、自動車の安全運転支援システムを構成する要素技術の一つとして、カメラ映像を用いた画像認識技術を開発してきた。この技術を鉄道車載カメラ映像処理に応用して、走行中に前方や周囲の状況を判別し、全球測位衛星システム（GNSS）で自車両位置を把握した上で、不安全な事象の発生を検知し、リアルタイムに運転士へ通知する走行安全支援システム（図1）を開発した。

このシステムは、三つの装置から構成されている。具体的には、車両前方にある支障物を検知する“前方検知装置”、GNSSなどを利用して車両の位置を計測する“位置計測装置”、及びこれらの装置から出力された検知結果・計測結果をリアルタイムに運転士に通知する“運転支援装置”の三つである。

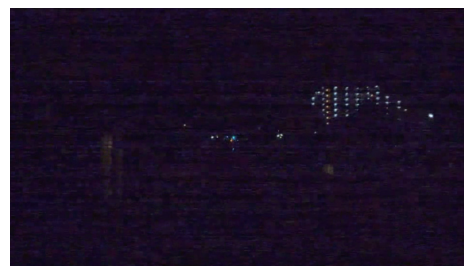
3章以降では、前方検知装置について述べる。

3. 前方検知装置

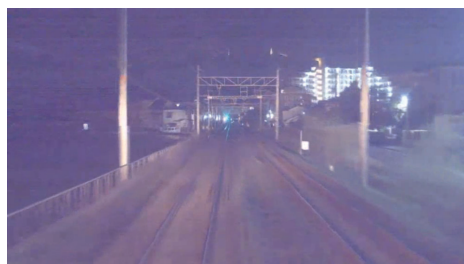
前方検知装置は、車両との接触事故の発生頻度が高い夜間でも、前方の不安全事象を検知する必要がある。前方検知装置のキー技術は、撮影した画像の視認性低下を抑える“画像鮮明化技術”と、車両前方の軌道上にある不定形の支障物を検知する“前方支障物の画像認識技術”の二つである。

3.1 画像鮮明化技術

自動車用の安全支援システムに対して、鉄道向け特有の問題として“検知距離の長さ”が挙げられる。鉄道は、レール上を鉄の車輪で走行して滑ることで発生する空転の問題と乗客の安全性確保の観点から、ブレーキを作動させてから止まるまでの制動距離が自動車に比べて非常に長くなる。また、制動距離は走行速度に応じて長くなる。近年の車両では、夜間の前灯による前方200 m先での照度が1 lux程度になるため、これより先では、人間の目で支障物を確認する



(a) 目視に近い画像



(b) 開発手法を適用したカメラ画像

図2. 画像鮮明化技術の適用による視認性の向上

夜間の目視では前方の視認性が低下するが、開発手法を適用したカメラ画像では鮮明な画像が得られた。

Improvement of visibility through application of image sharpening technique

ことは難しい。現在、200 m先までの支障物を検知して運転士の目を支援・代替することを目標として、画像鮮明化技術を開発している。

東芝グループは、以下に述べるカメラ制御と画像処理を組み合わせることで、視認性の高い画像を取得する手法を開発した。カメラは、軌道上が最適な明るさとなるようにシャッター速度やホワイトバランスを制御したり、暗い画像の場合にはアンプを使った信号増幅や撮影した複数枚画像のフレーム加算を行ったりする。これらの手法を適用した鮮明化前後の比較画像を、図2に示す。図2(b)の開発した手法を適用したカメラ画像は、遠方まで鮮明な画像が得られていることが分かる。

3.2 前方支障物の画像認識技術

二つ目のキー技術は、前方支障物の画像認識技術である。左右二つのカメラから成るステレオカメラで取得した映像から、前方の支障物を認識するアルゴリズムを、図3に示す処理フローを用いて述べる。

このアルゴリズムは、三つの機能ブロックで構成されている。一つ目は、ステレオカメラ画像から奥行き方向の距離を算出して距離画像を生成する“距離計測機能”である。二つ目は、並行して画像上のレールを検出し、当該車両が走行する領域を認識する“走行空間認識機能”である。三つ目は、両者の結果を用いて走行するレール上に支障物があ

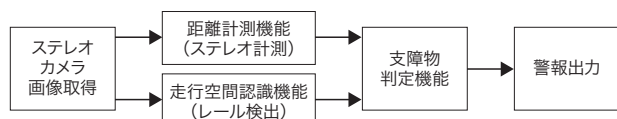


図3. 前方支障物検出アルゴリズムの処理フロー

ステレオカメラ画像からレールを検出し、距離計測により支障物を検出する。

Flow of processes of forward obstacle detection algorithm

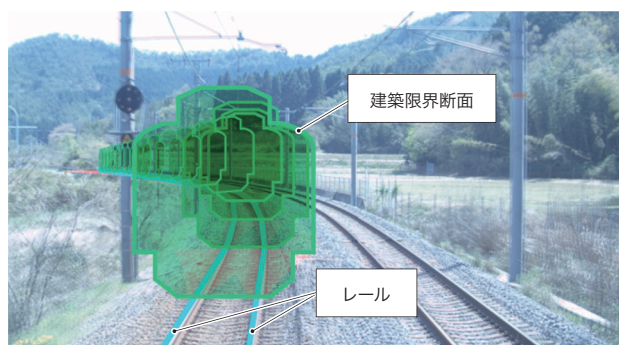


図4. 走行空間認識機能

レール検出結果から、3次元的な走行空間を認識する。

Loading gauge recognition function

るかどうかを判定する“支障物判定機能”である。

まず、距離計測機能では、あらかじめ求めておいたレンズ歪み（ひずみ）や左右二つのカメラ間の光軸ずれを補正し、左カメラと右カメラで見える像の違いから、三角測量の原理により距離を算出して距離画像を生成する。

次に、この距離計測機能と並行して実行する走行空間認識機能では、ステレオカメラの片方のカメラ画像を利用してレールを検出する（図4の水色の線）。そして、検出したレールを基準として、レールより上方に位置する車両限界や建築限界の3次元的な空間を考慮して、図4中に緑色領域で示した当該車両が走行する空間を設定する。この空間が、支障物の探索エリアとなる。ここで、位置計測装置で計測した車両位置に基づいて、駅・踏切・設備などに応じて設定する探索エリアを変更できるようにも工夫している。同時に、レールの分岐部では、自車両の走行先のレールだけを選択して走行空間を認識する仕組みも導入している。

最後に、支障物判定機能について述べる。検出したレール上の距離値に基づいて、基準となる地面の高さより所定の値以上高いと判定される立体の候補領域を求めた後、各候補領域についてサイズなどの詳細な属性を判別して、支障物候補を検出する（図5の有色（緑色と赤色）部）。走行空間内に支障物候補が存在する場合（図5の赤色部）には、

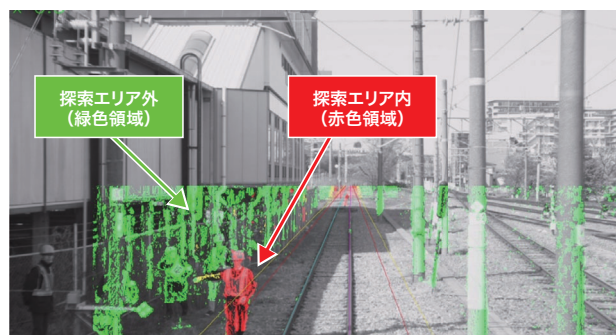


図5. 支障物判定機能

支障物候補の中から、探索エリア内にある対象を判定する。

Obstacle discrimination function

“軌道上に支障物あり”として警報を出力する。図5は、人物の赤色領域が建築限界内にあると判定して、そのまま走行すると接触する可能性があるかと判断した例である。

上述の画像認識技術について、実車試験を重ねて次の課題を抽出した。高さが低い支障物ほど、レールより上方の車両限界内に含まれる見掛け上の面積が小さくなり、枕木などの道床との分離抽出が困難になるため、支障物の検出率が低下する。また、遠方ほど距離計測の分解能が低くなるため、同様に支障物の検出率が低下する。そこで、距離計測機能において、より信頼性の高い計測点だけを選別することで、ノイズを低減して距離計測の精度を高めた。また、走行空間認識機能の基礎となるレール検出において、探索範囲の最適化などによりレール検出精度を高め、支障物の探索エリアの推定を高精度化した。

更に、支障物の検出以外にも、完全なドライバーレス自動運転への移行過程において必要となる、標識認識や信号機認識などの機能も実装した。

これらの処理を組み合わせ、実車両で撮影した試験映像データに対して処理を実行し、性能評価を進めている。

3.3 試験

車両に仮設した前方検知装置の試作機を、図6に示す。ステレオカメラと画像認識処理基板が一体化したユニットになっており、車両前方のフロントガラス部などに設置する。現在、リアルタイム動作に向けて実装中であり、被写体や環境を変えながら様々な評価映像データを収集して検知技術の改良を進めている。

前述の画像鮮明化技術の性能確認は、雨や、霧、日照などを人工的に制御できる設備を持つ環境試験場などで実施し、更に、営業路線を走行して実環境下での様々な課題抽出も行ってきた。沿線走る自動車の前照灯や、西日による画像の白飛び、トンネル出入り口での瞬間的な画像の

白飛び・黒潰れなどで検知不能となる場合があり、対策中である。

また、前方支障物の画像認識技術の性能確認として、主に営業路線を走行して様々な環境下でレール検出のロバスト性を確認する試験や、車両基地内などで支障物の種類や位置などを変えて支障物検出の性能確認を定量的に評価する試験を行っている。表1に示すような、様々な試験映像



図6. 車両に仮設した前方検知装置の試作機

カメラと画像認識処理基板が一体となったユニットを、車両前方のフロントガラスに設置した。

Prototype unit temporarily installed on windshield of train

表1. 試作機の試験条件一覧

List of test conditions for evaluation of prototype unit

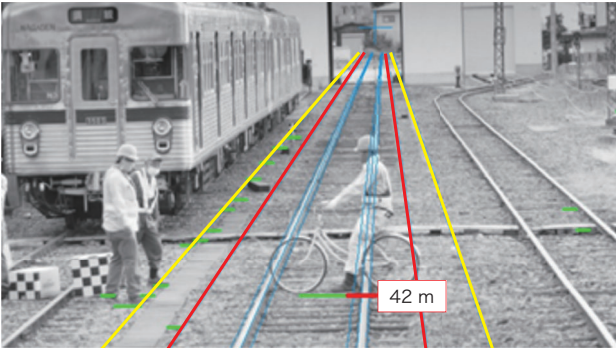
項 目		種 別
外部環境	時間帯	昼間、夜間、明け方、夕方
	天候	晴れ、曇り、雨、雪
	軌道周辺	明かり部、トンネル部
	軌道脇の照明	なし、灯火
	対向列車の前灯	なし、灯火
	駅ホーム	なし、左、右、左右
	車止め（終端）	なし、あり
自車両条件	カメラ設定	バージョン
	前灯	なし、ハロゲン、HID、LED
	カメラ設置位置	左、中央、右
線路	線路形状	直線、曲線
	線路分岐	なし、2分岐、3分岐以上
	線路幅	狭軌、標準軌、混線
	勾配	なし、下り、上り
	道床	通常（バラスト）、コンクリート、なし（鉄橋など）
	沿線線路	単線、複線
	沿線影（架線など）	なし、あり
支障物	種別	人物、自転車、軽自動車、段ボール、土砂
	数量	0、1、2以上
	状態	人物の場合：立位、座位、伏臥位（ふくがい）
	向き	人物の場合：正面、横
	動き	人物の場合：両手振り、片手振り、横断歩行
	色	白色、黒色、その他の色
	位置	探索エリア内、探索エリア外

HID：高輝度放電灯 LED：発光ダイオード

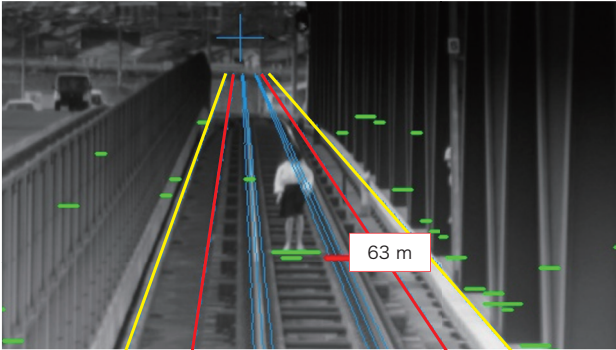
データの収集及び評価を継続している。

このような条件下における評価結果の例を、図7に示す。図7(a)は、昼間のレール付近の建築限界外に立つ人物や隣線車両は検出せず、レール上で自転車にまたがった人物だけを検出するとともに、人物までの距離も計測できていることが分かる。また図7(b)は、営業路線内に人形を設置して走行試験した際の例である。

これらの試験映像を基に、自社で規定した標準評価映像データセットを用いて、試作した前方検知装置の性能を評価した試験結果の一例を、表2に示す。ここでは、昼間の



(a) 車両基地構内で自転車を検出



(b) 営業路線内で人形を検出

図7. 前方の支障物を検出処理した例

様々な種類の対象や距離などの条件を変えて、支障物検出性能を検証した。

Examples of processed images of forward obstacles

表2. 試作機の試験結果の一例

Examples of test results obtained by prototype unit

支障物	検出距離
自転車に乗った人物	200 m
人物（立位）	200 m
人物（座位）	180 m
段ボール（450（高さ）×450（幅）mm）	150 m
段ボール（300（高さ）×300（幅）mm）	100 m
人物（伏臥位）	80 m

車両基地構内に停車した状態で、支障物の種別ごとに検出率が90%以上となる距離を検出距離として記載した。従来に比べて、高さが低い支障物でもより遠方まで検出できるようになった。このほかにも、黒色系の衣服を着た人物では、それ以外の色に対して検出率が10%程度低下することや、夜間は周辺照明や車両の前灯種別で検出性能が大きく変動することが分かった。

また、現時点では、前灯点灯時に運転士が目視確認できる前方200 m先までの範囲に存在する支障物を検出する前方検知装置として開発しているが、今後、自動運転への適用も視野に入れ、更なる検出距離の延長・検出精度の向上を図っていく。

4. あとがき

列車の自動運転に向けた安全運転支援技術として、前方監視カメラ映像の解析により支障物を検出する前方検知装置を開発した。試作機を実車両に搭載し、様々な環境下での試験映像データを収集・蓄積・解析し、運用環境下でも安定した検出性能を確保できるように、検証と改良を進めている。

2021年度からは、国土交通省の鉄道技術開発費補助金の支援を受け、自動運転の実現に向けた要素技術の開発を進める。その中で、鉄道事業者と連携し、営業路線での試験を通じて検証と改良を繰り返して検出性能を上げるとともに、自動運転に必要な機能・システムの検討を実施する計画である。

今後、開発した技術を基にCPS（サイバーフィジカルシステム）技術として深化させ、運転士や保守員などに代わるインフラシステムの実現だけでなく、インフラサービスやデータサービスへと展開し、鉄道事業において重要な安全・安心を確保した上での効率化・省力化の実現により、鉄道インフラの強靱化に貢献していく。

文 献

- (1) 国土交通省, “鉄道における自動運転技術検討会”. <https://www.mlit.go.jp/tetudo/tetudo_fr1_000058.html>, (参照 2021-04-12).
- (2) 高橋雄介, ほか, “走行安全支援向け前方障害物検知技術の開発: 安全な運転支援を目指して”, 第54回鉄道サイバネ・シンポジウム論文集, 東京, 2017-11, 日本鉄道サイバネティクス協議会, 2017, 論文番号 530.



高橋 雄介 TAKAHASHI Yusuke
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
人工知能学会会員
Toshiba Infrastructure Systems & Solutions Corp.



二神 拓也 FUTAGAMI Takuya, Ph.D.
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
博士(情報科学) 電子情報通信学会・システム制御情報学会会員
Toshiba Infrastructure Systems & Solutions Corp.



瀬川 泰誠 SEGAWA Taisei
東芝インフラシステムズ(株)
府中事業所 鉄道情報システム部
Toshiba Infrastructure Systems & Solutions Corp.