

# 列車前方監視のための カメラとセンサを用いた支障物検知手法

影山 棕\* 長峯 望\* 吉野 純樹\*

Obstacle Detection Method Using Cameras and Sensors for Train Forward Surveillance

Ryo KAGEYAMA Nozomi NAGAMINE Junki YOSHINO

In train forward surveillance, it is important to establish sensing technology to reliably detect distant obstacles in front of trains. Therefore, we have developed a method for detecting obstacle in front of trains using cameras and sensors. The developed method detects obstacles such as people and vehicles by combining multiple sensors within the detection area around the railroad tracks. In this paper, we report on the results of a study of sensor configurations suitable for obstacle detection, the detail of detection algorithm using cameras and LiDARs or a stereo camera. In addition to these, the relationship between distance to obstacles and detection performance is also reported.

キーワード：列車前方監視, 支障物検知, カメラ, LiDAR, センサフュージョン

## 1. はじめに

鉄道のさらなる安全性の向上のために線路内支障物との接触事故リスクを低減することは重要である。列車前方監視システムによる線路内支障物の検知技術は、運転士が前方の安全を確認する負担を軽減できるとともに、将来の自動運転（ドライバレス運転）を実現する上で重要な技術である。近年、自動車分野では事故防止のためにカメラやセンサを用いた運転支援システムが普及しており、鉄道においてもこのようなセンシング技術の活用が運転支援の方策として有効と考えられる。しかし鉄道の場合、自動車より高速で走行し、制動距離も長い。そこで我々は、自動車分野の運転支援システムより遠方を監視可能なシステムの構築を目指して、鉄道向けの運転支援のためのカメラやセンサを用いた支障物検知手法の開発を行っている<sup>1)</sup>。

本稿では最初に、各センサの特性について述べ、特に検知すべき線路内支障物の特徴に基づいて、支障物ごとの検知に適したセンサ構成について机上検討で整理した結果を示す。次に代表的なセンサ構成（カメラ＋LiDARおよびステレオカメラ）を用いた検知アルゴリズムを開発し、試験や実際の列車で得られたデータに基づき、距離ごとの支障物に対する検知性能を検証した結果を示す。

## 2. 支障物検知についての要件整理

開発する支障物検知手法の要件整理のため、環境条件

および検知対象の目標を設定した。また、検知目標を満たすためのセンサ構成について、センサの特性、および検知すべき支障物の特徴に基づいて整理を行った。

### 2.1 検知目標の設定

目標設定にあたり、日本国内における線路内や沿線の支障物との接触事故の状況について把握するため、過去の事故データについて調査を行った。具体的には、(公財)鉄道総合技術研究所の鉄道技術推進センター会員に公開されている「鉄道安全データベース」<sup>2)</sup>に登録された事故情報のうち、過去20年間(2001年～2021年)において列車と支障物の接触による事故および大規模列車遅延に繋がった事例の計8,343件について傾向を分析した。時間帯別の事故の発生件数を図1に示す。営業列車が運行されている時間帯については、昼夜関係なく事故が発生しうることが確認された。また支障物別の発生件数を集計したものを図2に示す。最も事故発生件数の多かった支障物は人物であり、全体の半数以上であった。次いで自動車や二輪車との衝突が多く発生していることが分かった。以上より本研究では、昼夜問わず同等の精度で、線路内に侵入した人物・自動車・落石・倒木などの立体物を検知することを目標とした。

### 2.2 センサの特性についての整理

主に自動車での運転支援システムを中心に用いられている代表的なセンサについて特性を比較したものを表1に示す。単眼カメラは物体に反射した光を撮像素子に取り込んで測定を行う方式のセンサであり、物体の色や質感を把握できる。したがって、単眼カメラで取得された画像から物体があるかどうかの検知だけではなく、種類

\* 情報通信技術研究部 画像解析研究室

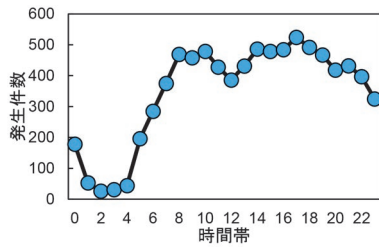


図1 時間帯別の事故発生件数

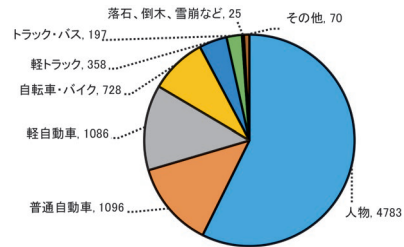


図2 支障物別の事故発生件数

表1 代表的なセンサの特性

|         |      | 物体の識別性能   | 3次元形状把握性能 | 夜間の照度低下への頑健性   | 車内設置の可否         |
|---------|------|-----------|-----------|----------------|-----------------|
| カメラ     | 単眼   | ○         | ×         | △(周辺の光源の有無による) | ○               |
|         | ステレオ | ×         | ○         | △(周辺の光源の有無による) | ○               |
| LiDAR   |      | △(反射率による) | ○         | ○              | △(ガラスの厚さ/材質による) |
| ミリ波レーダー |      | ×         | ×         | ○              | ×               |

○：適用可能 △：適用条件に限られる ×：適用不能

表2 支障物別の検知に適したセンサ構成

| 支障物      | 昼夜 | カメラ            |                | LiDAR                  |
|----------|----|----------------|----------------|------------------------|
|          |    | 単眼             | ステレオ           |                        |
| 人物       | 昼  | ◎              | ○              | ○/車内設置時△(ガラスの厚さ/材質による) |
|          | 夜  | △(周辺の光源の有無による) | △(周辺の光源の有無による) | ○/車内設置時△(ガラスの厚さ/材質による) |
| 自動車      | 昼  | ◎              | ○              | ○/車内設置時△(ガラスの厚さ/材質による) |
|          | 夜  | △(周辺の光源の有無による) | △(周辺の光源の有無による) | ○/車内設置時△(ガラスの厚さ/材質による) |
| 落石<br>倒木 | 昼  | ×              | ○              | ○/車内設置時△(ガラスの厚さ/材質による) |
|          | 夜  | ×              | △(周辺の光源の有無による) | ○/車内設置時△(ガラスの厚さ/材質による) |

◎：物体の識別まで可能 ○：物体の有無を検知可能 △：条件によっては検知不可 ×：検知不可

を識別することができる。一方、夜間で照度が低下するとき、特に周辺に照明などの光源が無い場合は物体の像が不鮮明になり性能が低下する。ステレオカメラは複数（基本的には2台）の単眼カメラで構成されており、三角測量の原理で物体の3次元形状を把握することができるが、夜間は単眼カメラと同様、周辺に光源が無い場合は性能が低下する可能性がある。

LiDARは波長900～1,500nm前後の近赤外線レーザーを用いて物体からの反射波の測定を行うセンサであり、昼夜を問わず対象物をレーザー一点の集合である点群データとして把握できる。機種によっては遠方の物体も検知可能であるが、レーザー一点は位置と反射率の情報しか持たないため、対象の反射率の差異が大きくない限りは物体の種類を正しく識別することは困難である。また、ガラスによってレーザーが減衰あるいは反射するため、車内に設置する場合は性能が低下する（ガラスの厚さ・材質にもよる）。ミリ波レーダーはミリ波を用いて物体からの反射波の測定を行うセンサである。用いるミリ波の帯域幅によっては遠方の物体の有無を高解像度で検知できるが物体の3次元形状の把握はできない。

### 2.3 支障物の特徴についての整理

線路内支障物のうち、検知目標としている人物・自動車・落石・倒木について検知対象としての特徴を整理した。人物、自動車についてはそれぞれ服装や車種の違いなどによる見た目の差はあるものの形状の特徴ははっきりとしており、全体が見えていれば、人物は頭部・胴体・手足があることから、自動車は車体・タイヤがあることから、識別が可能である。一方、落石や倒木などは見た目からそれらの種類を識別することは難しい。

### 2.4 支障物検知のためのセンサ構成

検知対象となる支障物ごとに、検知に適したセンサ構成を整理した結果を表2に示す。なお、表2においてステレオカメラの性能については単眼カメラと切り分けるため、2つのカメラの画像から得られた奥行の情報のみを用いて検知を行うものと仮定する。人物や自動車のように形状の特徴が決まった対象は、表に二重丸で示すように、環境照度が高ければ単眼カメラにより物体の種類を識別することが可能である。一方夜間はカメラの認識性能が低下する可能性があるため、照度に依存せずに検

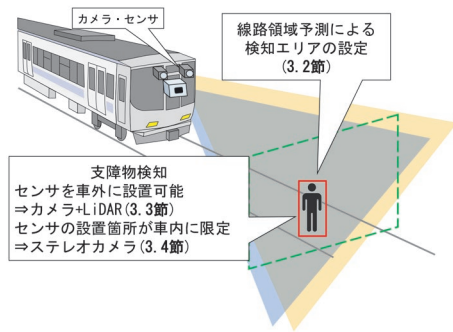


図3 支障物検知手法の全体像

知対象までの距離を計測できる LiDAR との併用が望ましい。センサを車外設置できない場合は、駅や車両基地構内など、ある程度周辺の照度が確保できる環境下ではステレオカメラの使用が望ましい。落石・倒木は形状の特徴が一定ではないため LiDAR やステレオカメラにより線路内にある何らかの立体物として検知が可能と考えられる。

### 3. 支障物検知手法

#### 3.1 提案手法の全体像

前章で整理したセンサ構成にしたがって、支障物検知手法を開発した。開発手法の全体像を図3に示す。画像から線路領域を予測することで検知エリアを設定し、複数のセンサから得られた情報を組み合わせて、主に列車からの見通しが確保出来る区間で支障物を検知することを目的とする。本研究ではセンサを車外に設置できるケースとしてカメラと LiDAR、センサの設置位置が車内に制限されるケースとしてステレオカメラを用いた支障物検知手法を開発し、それぞれの性能評価を実施した。以降の節で各手法の詳細について述べる。

#### 3.2 検知エリアの設定

列車前方から安全な場所にいる対象を過剰に検知することなく、線路周辺の支障物を適切に検知するためには、検知処理の前段階において列車が走行する線路空間を認識し、その周辺に検知エリアを設定することが必要である。そこで、カメラの画像から、列車が走行する左右レール間の領域（線路領域）の予測に基づく検知エリア設定手法を開発した。検知エリアの設定方法を図4に示す。最初に、画像中の特定の領域を画素単位で抽出する深層学習手法であるセマンティックセグメンテーションにより線路領域を予測する（Step.1）。予測の誤りによって、本来必要な線路領域以外の画素も線路領域として出力されることがあるため、画像下端の所定の範囲（図4中の赤枠）に含まれる領域のみを最終的な検知エリアとして

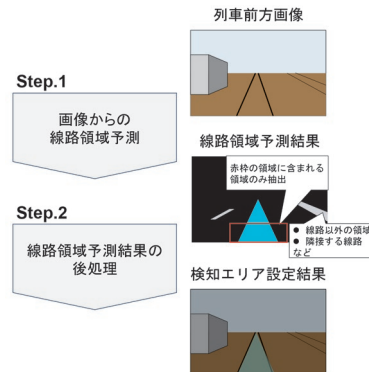


図4 検知エリア設定手法のイメージ



図5 検知エリア設定の例

出力する後処理を行い、自列車の進行方向に相当する線路周辺に検知エリアを設定する（Step.2）。出力結果の例を図5に示す。線形が異なるシーンでも同様の精度で線路領域が抽出できることを確認した。また、軌間と建築限界の幅の比率に基づいて検知エリアを建築限界の範囲内に拡張することも可能であることを確認した。

#### 3.3 カメラと LiDAR による支障物検知手法

##### 3.3.1 検知手法の詳細

カメラと LiDAR による支障物検知のイメージを図6に示す。提案手法では、遠方まで照度を問わず検知性能を確保することを目的として、カメラの画像と複数台の LiDAR から得られた点群データを用いる。最初に画像と点群データのそれぞれの情報から、物体がある可能性が高い領域を推定する。画像については、画像を均等に区切る格子ごとに、物体検出用の深層学習モデルを用いて物体の位置、大きさ、存在確率、種別および種別の判定確率を予測する。一方、点群データについては地面のデータを取り除く前処理を行った上で、レーザーの密度が閾値を超えて高くなる領域を物体候補点群として抽出する。次にカメラから見た LiDAR の設置位置の情報を利用して、物体候補点群を画像に投影し、画像からの格子ごとの検知結果と重ね合わせて比較する統合処理を行う。物体候補点群の中心がある格子についてはほぼ確実に物体があると言えるため、その格子における物体の存在確率は、画像から予測した値に関わらず 100% とし、また物体の大きさについても物体候補点群の大きさを採用する。物体の種別判定については、深層学習で予測された判定確率がある閾値より高いならば深層学習の予測結果をそのまま採用し、そうでなければ、点群によって

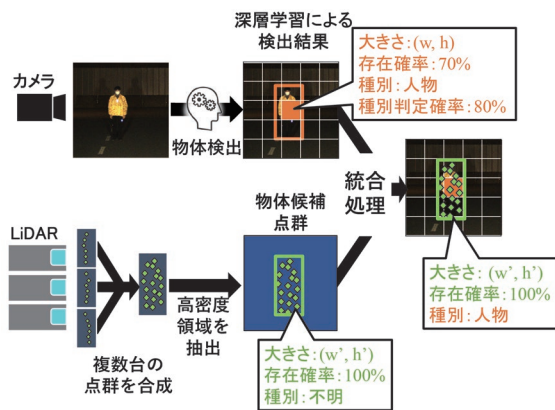


図6 カメラとLiDARによる支障物検知手法

表3 試験に用いたカメラとLiDARの諸元

|       |                      |                         |
|-------|----------------------|-------------------------|
| カメラ   | 解像度                  | 水平 4,096px × 垂直 2,160px |
|       | レンズ焦点距離              | 35mm                    |
|       | 画角                   | 水平 22.9° × 垂直 12.1°     |
|       | フレームレート              | 約 10fps                 |
| LiDAR | レーザー照射角              | 15°                     |
|       | 視野範囲あたりの0.1秒間のレーザー点数 | 約 24,000点               |

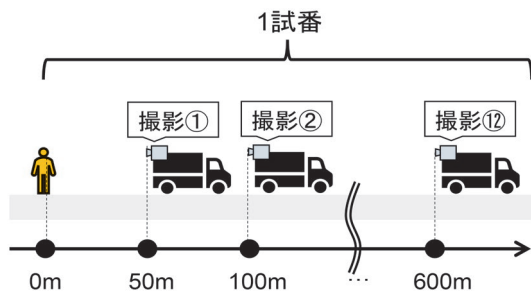


図7 試験方法のイメージ

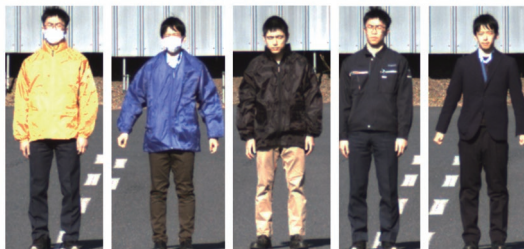


図8 被写体の例

確実に検知はされているものの、画像でそれが何に相当するか分からなかったものとして「種別不明」と判定する。カメラ単体で検知を行う場合は低照度下で物体の存在確率が低下し、物体を見逃すケースが発生するが、物体候補点群を重畳することにより、ある程度の照度まで物体を種別も含めて認識できるようになり、極度の低照

度下でも、少なくとも物体の有無については把握することができる。

### 3.3.2 検知手法の性能評価試験

カメラとLiDARによる検知手法の性能評価試験を、長距離の直線区間（全長1,500m）が確保できる日本自動車研究所 城里テストセンター内の試験道路（NV・多用途試験路）にて実施した。試験時は実際の鉄道車両にセンサを取り付けた状態を模擬するため、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LiDAR9台、LED前照灯2台を設置した。カメラとLiDARの諸元は表3に示す通りである。試験方法のイメージ図7に示す。静止する被写体に対して50mおきに600m離れた地点まで計12回、10秒間（画像100フレーム分）の定点撮影を繰り返した。被写体1つに対する12回の一連の撮影を、以降は1試番と定義する。被写体は図8に示すように、服装が異なる人物とした。

### 3.3.3 距離ごとの検知性能

距離ごとの検知性能として、試番ごとにそれぞれの撮影箇所でも得られた100フレームの画像と対応する点群データを対象として、検知率、認識率を算出した。ここで、検知率は画像中で物体が存在する位置の正解値付近に正しく物体があることを予測できたフレームの割合である。また、認識率は画像中で物体が存在する位置の正解値付近に正しく物体があることが予測でき、かつその物体の種別が正しい種別と一致したフレームの割合である。

ある人物の試番に対する昼間・夜間の検知・認識結果の例を図9に示す。夜間は画像のみの場合、約300m先で検知を示す緑色の枠が消失しているが、画像と点群を併用した場合は昼間と同じ位置に枠が表示されており、検知できていることが分かる。また点群データの粗密と検知性能の関係把握するため、夜間の人物に対する検知結果について、2~9台分のLiDARから得られた点群データで検知処理を行った際の検知率をプロットしたもの（10試番平均）を図10に示す。図10より、LiDARの台数を増やすにつれて、距離ごとの人物検知率が向上する傾向が確認された。さらに、距離ごとのLiDARの台数と検知率の関係を直線近似することで、対象に対してLiDAR12台分、14台分のレーザーが当たった場合の検知率を推定した（図10中に茶色、赤色の点線で併記）。図より、LiDAR14台分（0.1秒・1m<sup>2</sup>あたり約25点）のレーザーが被写体に照射されたとき、500m先での検知率は95%以上と推定され、ほぼ確実に検知できる可能性があることが分かった。ただし今回の検証試験はセンサ・被写体ともに静止した状態で取得したデータを用いているため、列車が走行中の検知性能については引き続き検証を行う必要がある。

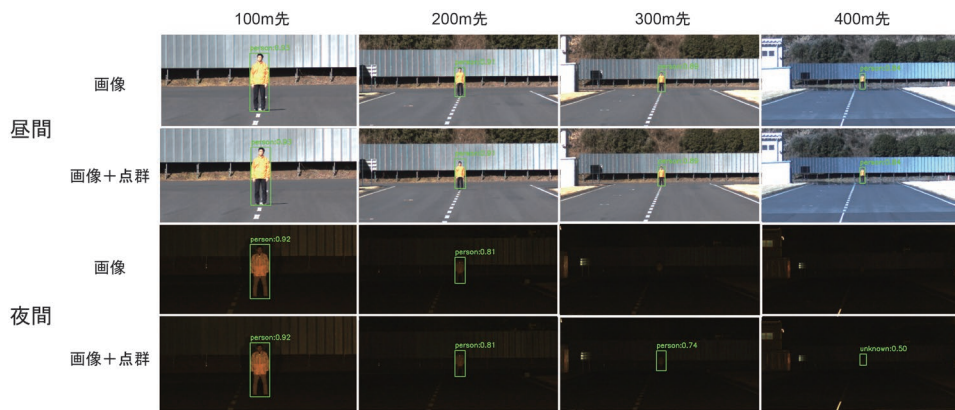


図9 夜間の人物検知結果の例

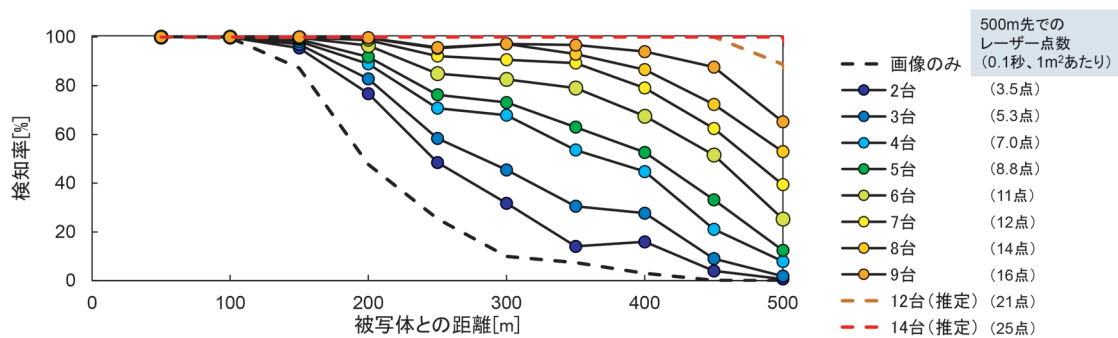


図10 夜間の人物の距離ごとの検知率

### 3.4 ステレオカメラによる支障物検知手法

#### 3.4.1 検知手法の詳細

センサを車内に設置するという制約条件があることを踏まえ、ステレオカメラを用いた検知手法を開発し、性能検証を実施した。開発手法では、左右のカメラの画像から、各画素にカメラからの奥行きをマッピングした深度画像を得る。カメラの位置を原点とする3次元の座標系において地面はある平面として数式で表現でき、カメラの設置高さや俯角を与えることにより、深度画像中でのおよその地面の位置、物体の地面からの高さを推定できる。これにより、図11のように、深度画像から地面に対して一定以上の高さを持つ領域のみを抽出することで、画像中の立体物を抽出する。これらのうち、4.1節の手法で設定した検知エリア内に存在する立体物を、線路内支障物として抽出する。

#### 3.4.2 検知性能の評価試験

開発手法による検知性能の評価試験を、車両基地構内で実施した。撮影時は車両の最後尾にカメラを設置した。カメラの諸元は表4に示す通りである。また、線路内支障物に対して、列車を遠ざかる方向に走行させて撮影を行った。被写体としては図12に示すように、作業員および作業員が線路内に置き忘れる可能性があるものとして工具箱を選定した。

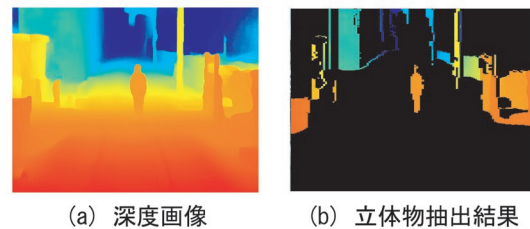


図11 深度画像からの立体物抽出結果の例

表4 試験に用いたステレオカメラの諸元

| 解像度      | 水平 1,024px × 垂直 768px |
|----------|-----------------------|
| レンズ焦点距離  | 25mm                  |
| フレームレート  | 10fps                 |
| 左右カメラ間距離 | 25cm                  |



図12 被写体の例 (左: 人物, 右: 工具箱)

### 3.4.3 距離ごとの検知性能

画像から距離ごとの検知性能を評価するため、フレームごとの検知の有無をカウントし、距離10mごとに検知率を集計した。フレームごとの被写体との距離は、前方映像の軌道面における画素単位の移動量と試験時の列車走行経路の全長の対応づけによって推定した。

作業員、工具箱に対する検知結果の例を図13に示す。開発手法によって、ある程度地面からの高さを持つ物体については深度画像中で立体物として検知できることが確認された。また昼間、線路内に立つ人物について、被写体からの距離ごとの検知率（昼間20試番、夜間22試番の平均）を図14に示す。昼間については、被写体との距離が90m以内であれば、検知率が90%以上となることが分かった。車両基地構内を走行する車両の速度を40km/h、列車の減速度を4km/h/s、運転士が支障物に気付いてブレーキをかけるまでの時間（反応時間）が1秒と仮定して、支障物発見時から列車停止までの距離を試算すると約90mとなることから、構内のように約40km/h以下で走行する区間であり、十分な照度が確

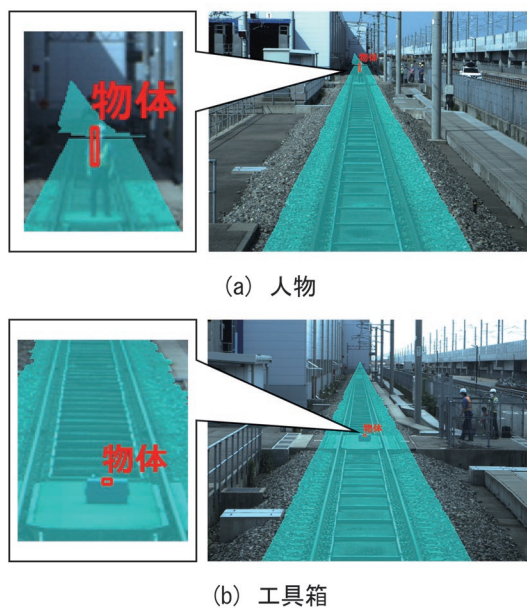


図13 ステレオカメラによる検知結果の例

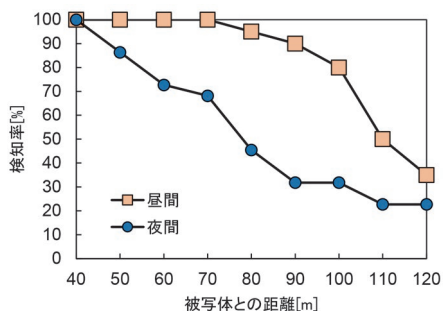


図14 距離ごとの検知率（昼間、立位の人物）

保される環境であれば、提案手法による検知が可能と考えられる。

## 4. まとめ

本研究では、運転士の支援のためにカメラやセンサを用いて列車から線路内の支障物を検知するためのセンサ構成を検討し、検知手法の開発ならびに性能検証を実施した。

過去の線路内支障物に起因する列車と支障物の接触事故のデータに基づき、支障物検知における目標を「昼夜ともに、線路内における立体物を検知すること」として設定した。次に支障物検知に用いられる代表的なカメラやセンサの特性を整理し、対象支障物の検知に適したセンサ構成を検討した。

検討したセンサ構成（カメラとLiDARおよびステレオカメラ）による検知手法を開発し、性能評価を行った。カメラとLiDARを用いた支障物検知手法によって、最大LiDARを9台利用し、点群密度を0.1秒・1m<sup>2</sup>あたり16点以上とすることで、昼夜問わず400m先の人物を90%以上の検知率で検知できることを確認した。また処理に用いるLiDARの台数と検知性能の関係から、14台のLiDAR（0.1秒・1m<sup>2</sup>あたり25点の点群密度）を用いることで500m先の支障物を95%以上の検知率で検知できる見通しを得た。またセンサの設置箇所が車内に限定される条件を想定してステレオカメラによる検知手法を開発し、車両基地構内で実車に搭載し性能評価を行った結果、昼間立位の人物を90m先までは90%以上の検知率で検知できることを確認した。

今後は、センサ技術の発展に伴って、より高性能なカメラやLiDARを開発手法に対して適用することで検知距離のさらなる向上に取り組む。また、事故に直結した事例が残っていないため本稿では対象としなかったが、沿線の火災や架線飛来物など、列車の運行に影響を与えられとされるその他の異常事象についても検知を可能にするセンサ構成の検討や、検知手法の開発を行う。

## 謝辞

本研究における走行試験の実施にあたり、西日本旅客鉄道株式会社には多大なご協力をいただいた。この場を借りて厚くお礼申し上げる。

## 文献

- 1) 影山 椋, 長峯 望: 列車前方監視のためのセンサフュージョンによる支障物検知手法の検討, 第29回鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL2022), S4-3-4, 2022

2) 鉄道総合技術研究所 鉄道技術推進センター：鉄道安全

データベース (2023年2月27日閲覧)