

特殊信号発光機の視認性確認システムと設置支援手法

長峯 望* 會田 学*
 中曽根 隆太* 鵜飼 正人**

Visibility Checking System and Installation Support for Obstruction Warning Signals

Nozomi NAGAMINE Manabu AIDA
 Ryuta NAKASONE Masato UKAI

Obstruction warning signals has two problems with respect to their visibility. First, currently it is not possible to check their visibility of such equipment secured by its being unmasked during the train operating hours, because this would cause traffic interruption. For this problem, we have developed visibility checking system. Second, their installation has required a lot of time and labor in the field survey, because the installation position must be determined in consideration of the outlook from the train cab. For this problem, we have developed an installation support method using the video image sequences from the train cab. In this paper, we report on the details and results of these two developments.

キーワード：特殊信号発光機，視認性確認，近赤外線，画像処理，設置支援，シミュレーション

1. はじめに

特殊信号発光機が抱える視認性確認に関する2つの問題に対して画像処理技術を用いて解決を図った。1つ目は、現在、定期検査にて視認性確認を実施しているが、異常時のみ発光する設備であるため運転時間帯での確認が難しく、夜間におけるメンテナンスが必要となりコスト増などが問題となっている。これに対して、視認性確認システムを開発した。2つ目として、設置工事において、列車運転台からの見通しなどを配慮して設置位置を決定する必要があるが、現地調査に多くの労力を要している。これに対して、列車運転台からのビデオ映像を用いた設置支援ツールを開発した。本稿ではこれら2つの開発およびその結果について報告する。

2. 視認性確認システム

2.1 特殊信号発光機の視認性

沿線において列車運行に支障を与える事態が発生した場合に、その異常を運転士に伝え緊急停止させる手段として特殊信号発光機がある。特殊信号発光機は、踏切支障報知装置（押しボタン）、踏切障害物検知装置、限界支障報知装置、落石警報装置等と連動して発光信号を現示するものであり、安全確保のための重要な設備である。また、信号が常に現示されている常置信号機とは異なり、

* 信号・情報技術研究部 信号システム研究室

** 信号・情報技術研究部

列車を停止させる必要が生じたときのみ信号を現示するため、特殊信号発光機が正常に現示されることを平常時に運転士が確認することはできない。

特殊信号発光機は、昼間、晴天時において、800m以上の距離から信号現示を確認できる性能を有することと定められている。視認性確認は、新設や交換、または定期検査等の際に作業員の目視によって行われている。しかしながら、特殊信号発光機は、異常時のみ信号を現示する方式であるため、列車の運転時間帯に現示をさせて、必要とされる視認距離を確認することが難しい。

なお、本稿における「視認性」とは、規定された距離において特殊信号発光機が見通しているか否かを指す用語であり、特殊信号発光機が十分な輝度を有しているか否かを示すものではない。輝度については、基準値以上の印加電圧があり、LED部分を覆っている筒状の亚克力板の汚損状態が基準値以下であれば肉眼で視認するのに十分な輝度を持つように設計・製造されていることで保証されており、これらは通常の定期検査にて管理・確認されている。

また、特殊信号発光機は、回転点灯する「回転形」と、棒状に点滅する「点滅形」があるが、本稿では、「点滅形」を対象としている。

2.2 検査の現状と視認性確認のための基本構成

2.2.1 特殊信号発光機の検査の現状

特殊信号発光機の新設や交換時には実際に発光させ、その点滅を視認性確認地点（踏切から最大800m離れた

特集：信号通信技術

地点や中継の特殊信号発光機が建植されている地点) から目視で確認している。しかし、その後の建築物等の新設や移転、草木の成長等による見通しの遮蔽、あるいは何らかの影響による特殊信号発光機自体の向きの変化により、設置個所から視認性確認地点までの距離において視認が得られなくなる場合がある。そのため、特殊信号発光機に対しては、定期検査に加えて必要の都度、視認性確認の検査が行われている。視認距離が確保できない場合には、中継となる特殊信号発光機の新設や特殊信号発光機の角度調整、あるいは、草木の伐採等を行うことにより踏切から最大 800m の距離からの視認性を確保している。

現行の手法では、視認確認地点から特殊信号発光機が「見える」か「見えない」といった評価が、作業員の主観に依存しているため、定量的な評価とは言えない。また、踏切から最大 800m までのある任意の地点での確認であり、視認性確認地点から列車が特殊信号発光機を通過するまでの、連続した視認性の可否については、確認されない。さらに、視認性確認の検査のために実際に特殊信号発光機を発光させることは、昼間の運転時間帯では現実的に難しいため夜間に実施されることが多く、作業効率が悪く、作業コストがかかる点も問題として挙げられる。現状、特殊信号発光機の設置総数は相当数にのぼるため、高精度で効率的な視認性確認手法の開発が強く望まれている。

2.2.2 要求仕様の整理

発光機側と連続的な視認性確認を行う測定機側それぞれについて要求仕様を整理すると概ね以下ようになる。

発光機側の要求事項

- (1) 現行の支持柱に設置可能であること
- (2) 現行ケーブル (1 ペア) のままで構築可能であること
- (3) 現状の発光機能を低下させないこと
- (4) 測定時に、列車運行を支障しないこと
- (5) 現状の拡散角度に応じた視認性確認が可能なこと

測定機側の要求事項

- (1) 客観的な視認性の評価が可能であること
- (2) 連続した視認性の確認が可能であること
- (3) 複数の発光機を区別して視認性確認ができること
- (4) 効率よく検査が可能であること
- (5) 検査不合格時の状況把握が可能であること

2.2.3 提案手法概要

運転時間帯でも列車運行に支障をきたさずに視認性確認する方法として、不可視光線を特殊信号発光機から送信/発光し、その到達状態を確認する方法を選定した。不可視光線は専用カメラを用いることで結果が可視映像として得られるため、誤検知や未検知といった事象が発生した場合においても、人間が映像を見ることで容易に状況の把握ができ、対応策の検討が容易になる。不可視

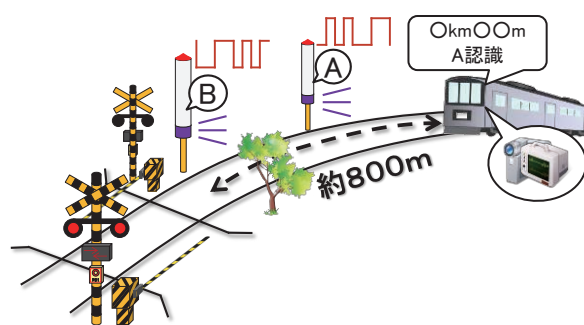


図 1 視認性確認システムの概念

光線として赤外線を選定し、LED を用いて近赤外線波長の光を発光させる方式とした。

普通に点灯した近赤外線 LED を 800m 離れた地点から、近赤外線の帯域に感度のあるカメラで撮影した場合、集積させた LED の形状を多少変化させても、映像中では概ね点 (ドット) としてしか映らない。また、太陽光には可視光以外にも赤外波長光も大量に含まれているため、LED 光源を単純に点灯させただけでは、太陽光に含まれるこれらの周辺光と区別して認識することは難しい。さらに鉄道沿線においては、目標の特殊信号発光機以外に信号機や標識、沿線の店舗のネオン、街灯等、様々な波長の光が混在している。このように外乱光が多い中で、近赤外線 LED を正しく認識し、検知する必要がある。そこで、近赤外線 LED を特定のパターンで点滅させ、その点滅パターンを画像処理にて認識することで外乱光と区別し、当該 LED を特定することで視認性確認を行うこととした。つまり、特殊信号発光機毎に決まった電文を測定機に対して送り、電文を測定機側で認識するものである。検査システムの全体イメージを図 1 に示す。特殊信号発光機が「自分は特殊信号発光機である」という ID をビット列として符号化し、近赤外線 LED を ON/OFF させる。この点滅を列車運転台に搭載した近赤外線カメラで撮影し、撮影映像を画像処理することにより点滅 ID を認識する。ID を認識できた場合に、その特殊信号発光機の視認確認を「良」とする。この際、特殊信号発光機毎に ID を変えることで、個体識別することが可能であるが、あまりに多種類の特殊信号発光機 ID を設定可能にすると、現場設定の管理が煩雑となるため、保持するパターンを 2 つのパターンのみとした。基本パターンを「A」とし、システムによる検査がうまく行かない場合等の特情に対して「B」パターンを例外的に設定可能とした。

2.2.4 検出方式

車上検出方式としては、検出車による方法と営業車による方法が考えられる。測定ミスがあった場合に、追加測定が容易にできるといった利点を考慮し、営業車による車上検出方式を対象として開発を行った。なお、営業

車による車上検出方式の場合、検査結果に対するキロ程の結び付けは、広角カメラの映像のフレームあたりの画素移動量と、設備表データのキロ程から算出する。

2.3 点滅パターンと画像認識アルゴリズム

点滅パターンとしては、受光の平均レベルが変動しても復調の閾値に影響しないため環境の変化に強いマンチェスタ符号化方式を用いた。したがって、本件のように環境がさまざまに変化し、信号強度が不安定となる受信データにおいても復号することが可能となる。マンチェスタ符号化方式における符号化データの {0,1} を {滅灯, 点灯} と割り当てることとした。

復号の画像処理としては、まず受光レベルの平均との差分を取った後に二値化する。二値化されたデータは送信時と同じクロックと排他的論理和をとることで、復号される。

2.4 近赤外線カメラの視野制御

2.4.1 視野制御の必要性

広角カメラで800m先を見ると、1画素あたりの横幅が数10cm～1mとなり、特殊信号発光機が1画素以下に埋もれるため、点滅させたとしても認識することが困難になる。また、望遠カメラを使用した場合、特殊信号発光機をある程度の大きさで映すことは可能であるが、画角は狭角となり視野から外れる可能性がある。したがって、800mの遠方を望遠カメラで捕捉するためには、曲線等における列車進行方向を認識し、カメラの視野制御を行う必要がある。広角カメラの映像からレールを抽出し、レール消失点を求めることで視線方向を定めて、望遠カメラの視野制御を行う手法を用いた¹⁾。

2.4.2 レール抽出アルゴリズム

レールを、短い直線と曲線セグメントを連結した線成分として表現する既開発アルゴリズムを用いた^{1) 2)}。近傍領域処理で特定したレールテンプレートの左右レールの終端部を中心に、当該テンプレートのレールの曲率を考慮して、次候補のレール線分を左右それぞれ数本発生させる。その中から、レール画像と最もマッチングする候補が選択される。遠方にゆくほど探索領域を細かく分割しながら、次領域のレールを繰り返し抽出することでレール抽出を行う。

2.4.3 視野制御方法と雲台の構成

望遠カメラを常にレール消失点に向けるためには、広角カメラ映像からレールを抽出して、目標となる消失点を取得する必要がある。望遠カメラを搭載した視野制御雲台に対して、消失点が画面ほぼ中央に映るように信号をフィードバック制御することで、望遠カメラが消失点に追従する。

2.5 制御器・発光機の構成

発光機については、現行の赤色LEDに対して近赤外線LEDが追加される分、7cm程度長手方向に延びるだけである。そのため、現行の特殊信号発光機の支持柱に設置が可能である。制御器については、現行の制御器を変更せずに、検査用のアダプタとして近赤外線用制御器を追加する方式とした。現行品と開発品の比較および、開発品制御器の外観を図2に、制御器および発光機の構成を概念的に示したものを図3に示す。

近赤外線用制御器内に実装される切替りレーによって、現行の制御器の赤色LEDと近赤外線LEDの発光制御の切替えを行う。また、検査中に、支障報知装置（押しボタン）が扱われたり、障害物検知装置が動作した際に、赤色の特殊信号発光機が優先して発光するように、入力条件となる検出Rに対して、支障報知装置（押しボタン）と障害物検知装置の条件を直列に挿入している。

また、発光機の回路構成については、現行の1ペアケーブルで構築可能とするために、赤色用LEDと近赤外線用LEDを逆極性で並列に構成し、切替りレーによって極性の反転が行われ、順方向に電流が流れるとき赤色に、逆方向に電流が流れるときに近赤外線が発光するように構成している。これによって、取替の際には、配線は現行品と同等の配線のみでよい。これは施工の際にケーブルの新設・撤去を必要とせず、システム導入時における施工負担の軽減を考慮したものである。

2.6 経年劣化と検知性能について

JIS C 8105-3において、発光機の全光束が点灯初期に対して70%まで低下した状態を劣化と定めている³⁾。



図2 現行品と開発品の比較

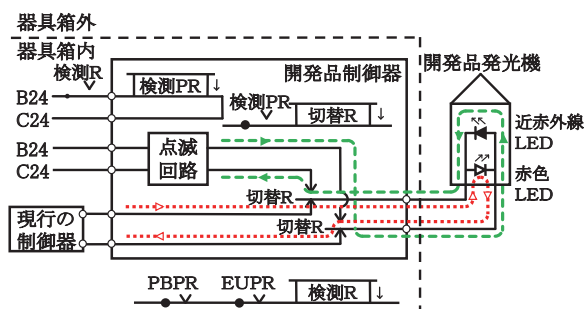


図3 制御器・発光機の構成（案）

特集：信号通信技術

そこで、経年劣化については、定格電流における発光強度が初期値の70%に下がった値を劣化指標とすることとした。

70%までの低下については、LEDメーカーが公開しているデータを元に算出した。一日に点灯させる時間にも依存するが、時限装置（タイマー回路）を用いることで概ね10年から15年の耐用期間を期待できることが分かった。

また、分光放射輝度計にて初期点灯時の70%の発光強度になるように電圧調整を行っての劣化状態を模擬し、本システムの視認性試験を実施した。その結果、10万ルクス程度の環境下（晴天昼太陽光）において、800m手前からの視認が十分にできることを確認した。

2.7 他設備への影響について

本システムは近赤外線を発光するため、他の近赤外線波長帯を用いている設備への影響評価を実施した。対象とした設備は、踏切障害物検知装置（レーザー式）、踏切障害物検知装置（3DLR式）、大型支障物検知装置、保守用車用踏切制御装置である。これらの設備について、不正な動作が発生しないこと、および、動作を妨害しないこと、を念頭に実物での評価試験を実施し、実際の建植設置においては、開発品の近赤外線による既存設備の不正動作や通常動作の妨害が起こらないことを確認した。

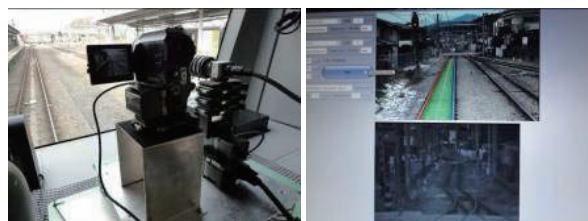
2.8 現車試験

営業線にて特殊信号発光機の視認性確認システムの性能確認試験を実施した。現行の特殊信号発光機と同一の支持柱に開発品を仮設し、営業車にて日中帯に測定することで、本手法の有効性を確認した。近赤外線カメラとしてSONY製XC-EI50、視野制御雲台としてFLIR MCS社PTU-D46-70、近赤外線LEDとしてVISHAY製TSAL6100を用いた。点滅パターンについては3bitのID情報をマンチェスタ符号化し“1100”のスタートビットを付加したパターンとした。設置については、3踏切に対して本体と中継をそれぞれ1機ずつの計6機

設置した。試験する車上装置の設置状態を図4(a)に、システム画面を図4(b)に示す。

それぞれの試験対象特殊信号発光機（以下、試験機）の認識結果を図5に示す。横軸がキロ程、縦軸が試験機の番号を表している。また、踏切のシンボルがそれぞれの踏切を表しており、×のシンボルが試験機の設置位置を示し、▲のシンボルが視認されるべきキロ程（踏切から800m手前、もしくは、中継が設置されているキロ程）を示し、IDを受信できて視認確認を可とした地点に◆をプロットしている。

試験機A'、試験機Aおよび試験機B'については、視認されるべきキロ程よりも十分に手前から認識ができた。しかし、構内（5k700m～5k900m付近）の分岐器通過による急激な方向転換により、急曲線と同様に視野制御の動作が間に合わず、画面補足を外れる事象が発生した。試験機Bおよび試験機Cについては、視認されるべきキロ程よりも十分に手前から認識ができた。試験機C'については視認されなかったが、これは、本物の特殊信号発光機より2m程度低い設置高さに設置したため、手前にある踏切器具箱に隠れ、終始見えない状態であったためであることが確認された。各発光機をシステ



(a) 車上装置外観 (b) 車上測定機の画面

図4 装置構成



図6 検知結果例

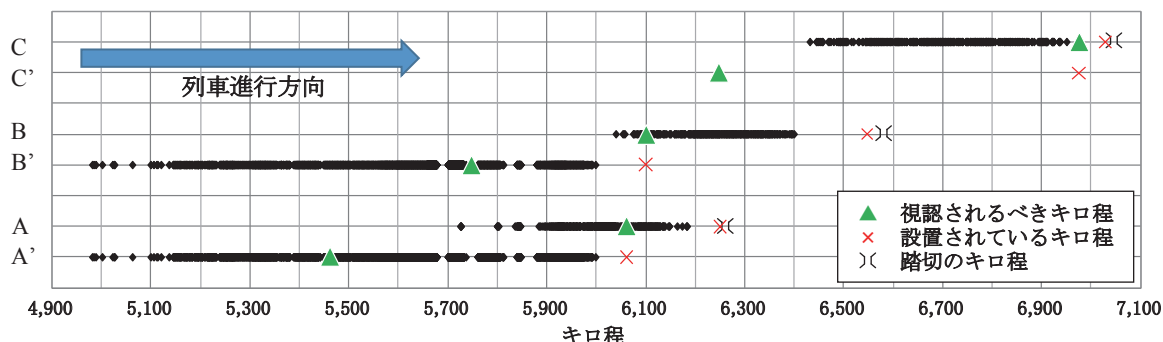


図5 視認性確認システムの検知結果

ムで認識した様子を図6に示す。検知結果としてこのような映像が取得されるため、検査結果が不合格となった場合に、遮蔽物の確認や、発光機が正しい方向を向いているのか等、対策の検討に役立てることができる。

3. 設置支援手法

3.1 設置位置の検討における現状の課題

特殊信号発光機の設置工事にあたっては列車運転台からの見通しなどを配慮して設置位置を決定する必要があるが、現状では実地で模擬の特殊信号発光機を作業員が設置予定位置で持ち、その位置を視認距離（例えばその特殊信号発光機から800m離れた距離）だけ離れた位置から確認することで設置位置の検討が行われている。この際に見通しが得られなければ、模擬の特殊信号発光機の位置を前後させて、再度見通せるか否かの検討を実施する。この検討作業は設備を管理している部署と運転を担当する部署のそれぞれの担当者による共同の立会いのもとで実施されるため、日程調整・現地立会いともに、多くの時間を要するものであり、実際に設置が完了するまでの時間が長くなる一つの原因となっている。この問題を解決するために、ビデオカメラ等で撮影した列車前方映像を用いて、新設や移設する予定の特殊信号発光機の設置後の運転台から視覚的状况を確認することができれば、机上での設置位置の確認、修正が可能となり、設置位置の検討を実地で行う労力を削減できるようになるため、有効であると考えられる。さらに、列車運行などの制約を受けずに設置位置の検討が行えるメリットがある。

3.2 設置支援手法の構成

設置支援手法は、運転士が運転中に見る列車の前方の様子を撮影した前方撮影画像と、計画している設置位置などを入力データとし、前方撮影画像に特殊信号発光機を表示した画像をシミュレーション出力する。シミュレーションにあたっては、列車前方映像における3次元空間を推定する必要がある。そこで、射影変換行列を求める際の制約条件として、画面上に映るレールおよび軌間などの鉄道固有の情報を用いることで、2次元である画像から3次元の実空間への変換を可能とした⁴⁾。

設置支援手法は、「前方撮影画像に対するキロ程算出」、「前方撮影画像内のレール抽出と座標変換」、「計画位置から前方撮影画像座標系への変換」の処理によって構成される。

また、本手法は、直線や曲線などの線形による見通しを支援するものであり、途中の障害物に対する見通しを考慮するものではない。

3.3 前方撮影画像に対するキロ程算出

前方撮影画像の各フレームでの画素単位での速度を計

測し、画像フレーム - 画素単位距離データを求めた上で、縮尺を変換することにより画像フレーム - 実距離（キロ程）データを作成する。このデータ変換処理は前方撮影画像の俯瞰化、画像フレーム - 画素単位速度計測、画像フレーム - 画素単位距離算出、画像フレーム - キロ程データ作成のサブプロセスから構成される。

3.3.1 前方撮影画像の俯瞰化

前方撮影画像から列車の速度を計測するには、単位時間における画像内の対象物の移動量を計測すればよい。移動量を正確に計測するためには、画面の見かけ上の長さで実際の長さの比がどこでも同じになるように補正しておく必要がある。そこで、前方撮影画像のレール面を真上から俯瞰して撮影した画像となるよう射影変換し、その画像に対して速度を計測する。

3.3.2 画像フレーム - 画素単位速度計測

俯瞰化した画像に対して、移動量を計測するための領域を画像内に設定し、動画の1フレームごとの移動量から速度を求める。計測する領域は計測誤差による影響を少なくするために複数設定し、複数の領域から計測された移動量について、明らかに誤差を多く含んでいる値を除外し、残りの計測結果を平均して対象フレームでの移動量を求める。各領域の移動量は二乗平均誤差が最小となるパターンマッチング（SQDIFF）によって行った。

この計測では、画像解像度や設定したエリアのサイズ・数または映像シーンの種別（たとえば踏切道のようなテクスチャの分散値が少ない状況）によって、ミスマッチングによる誤計測が発生する。そこで、得られた速度に対してカルマンフィルタ推定を行い、車両の加速度および減速度に制約を設けることで補正を行った。カルマンフィルタでの推定パラメータは、走行方向の位置、速度、加速度とし、加速度または減速度が設定した閾値を超える場合は観測ベクトルを異常値とみなし、状態を更新せずに前回値を用いることとする。

3.3.3 画像フレーム - 画素単位距離算出

距離については、各フレームでの速度を累積することで画素単位での距離データを作成する。

3.3.4 画像フレーム - キロ程データ作成

画像フレーム - 画素単位距離データと設備位置とフレームの参照データを用いて、参照データの区間ごとに画像フレーム - 画素単位距離の拡大・縮小を行い画像 - キロ程データを作成する。

3.4 前方撮影画像内のレール抽出と座標変換

前方撮影画像に写っているレール位置を参照して特殊信号発光機の設置位置を定める。そのための、レールの抽出とレール位置の座標変換を行う。画像からレールを抽出し、抽出された画像上のレール位置からレールのセンターラインを算出し、この位置を画像基準座標系から

特集：信号通信技術

列車基準座標系の実空間上の座標に変換する。この際、レール抽出は既開発アルゴリズム¹⁾を適用した。

3.5 計画位置から前方撮影画像座標系への変換

前方画像とそのキロ程、レール位置、特殊信号発光機の計画位置のデータから、現在の前方撮影画像から見ることで特殊信号発光機の前方向撮影画像上の位置を求める。求められた位置に対して、「画像の画素サイズ」、「画像の高さに対する実際の地上設備の高さ」を与え、画面上での大きさを求め、拡大・縮小し特殊信号発光機画像の画素値を置き換えることで表示する。

3.6 シミュレーション結果

実際の前方撮影映像と仮に作成した特殊信号発光機の位置のデータを用いてシミュレーション手法の有効性を検証した。検証用データとして、JR 在来線での映像データ、走行距離 11km、総撮影時間 20 分、画像サイズ 720 × 480 画素のデータを用いた。カルマンフィルタにおける加速度・減速度の閾値は 4km/h/s に設定した。画像フレーム - 画素単位距離データから画像フレーム - キロ程データの作成については、設備位置が既知の参照データとして、ATS-P 地上子を用いた。



図8 建築限界を表示した例

前方映像への特殊信号発光機の表示として、離れ 2m、高さ 2.5m に設定し、シミュレーションした結果を図 7 に示す。丸で囲った領域にシミュレートした特殊信号発光機が描かれている。遠方から特殊信号発光機に近づくにつれて、レールに沿って正しい位置に表示されていることがわかる。使用用途によって求められる精度が異なるが、特殊信号発光機の設置位置の検討に関しては十分な精度でシミュレーションできていることを確認した。

さらに特殊信号発光機と同一のキロ程に建築限界を表示させた例を図 8 に示す。これにより、設置位置を検討する設計者が建築限界までの余裕距離を意識しながら設計をすることが可能となる。

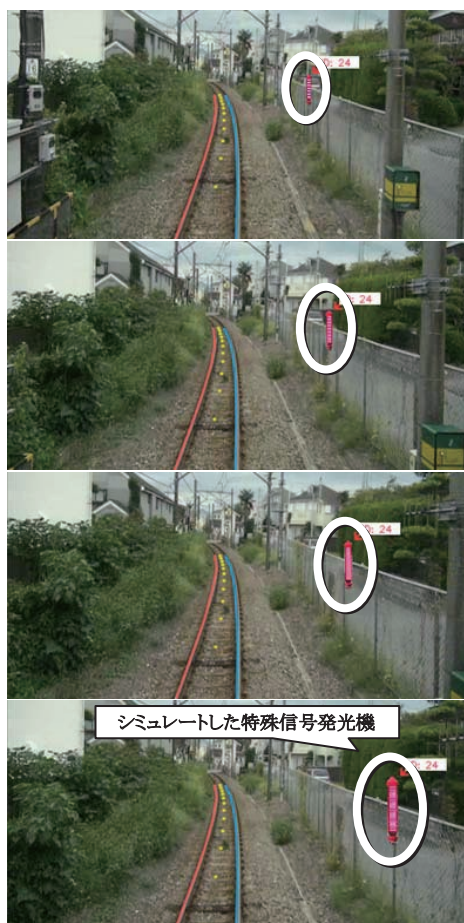


図7 シミュレーション結果

4. おわりに

特殊信号発光機の視認性確認を自動化するため、近赤外線 LED を用いたシステムを開発し、現車試験にて視認性確認が可能であることを示した。現在、天候や日照量の変化等の環境変化に対する視認性確認の長期試験を行っており、その後の実用化を目指す。

特殊信号発光機の設置位置の検討作業を効率化するために、列車前方向画像上に特殊信号発光機の画像を重ねて表示するシミュレータを開発し、運転士からの特殊信号発光機の見え方を仮想的に表現することで、信号位置の確認と修正を行えるようにした。今後、遠方レールの検出に対して改良を行い、さらなる精度向上を目指す。

文献

- 1) 長峯望, 鶴飼正人: 列車前方監視のためのカメラ視野制御, 電気学会論文誌, Vol.134-D, No.10, pp.921-929, 2014
- 2) 長峯望, 鶴飼正人: イメージセンサ通信を用いた鉄道信号設備の視認性確認手法, 電気学会論文誌, Vol.134-D, No.11, pp.969-977, 2014
- 3) JIS C 8105-3 照明器具 第 3 部: 性能要求事項通則, 2011
- 4) 長峯望, 鶴飼正人: 列車前方映像を用いた地上設備の設置位置シミュレータの精度検証, 電気学会交通・電気鉄道研究会資料, TER-14-047, 2014