鉄 道 総 研 報 告

特集：信号通信技術

特殊信号発光機の視認確認手法の車上への適用

長峯　望*　鵜飼　正人*

A Visibility Check Method for Obstruction Warning Signals by Cab-mounted Camera

Nozomi NAGAMINE　Masato UKAI

An obstruction warning signal is important signalling equipment used at a level crossing. However, it is not possible to check the visibility of such equipment during the train operating hours, because this would require interruption of providing traffic service. In this paper, we propose a method that employs near infrared LEDs, and can check the visibility of obstruction warning signals in the business hours. It has been proven that the method which we have developed, namely an image processing method using a near infrared camera and a pan-tilt camera by feedback control installed on a vehicle, can track and detect specific blinking of signal correctly. Finally, we report the results of functional field tests.

キーワード：特殊信号発光機，踏切，視認確認，画像処理，近赤外線 LED，近赤外線カメラ

1．はじめに

沿線において列車運転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，踏切障害物検知装置，限界支障報知装置，落石警報装置などと連動して発光信号を現示するものであり，安全確保のために重要な設備である。

また，信号が常に現示されている常置信号機とは異なり，列車を停止させる必要が生じたときに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することのできる性能を有することと定められている。800m 以上の距離からの視認確認は，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，前記のとおり，異常時のみ信号を現示する方式であるため，必要な視認距離の確保について，列車の運転時間帯に確認することが難しい点が課題となっている。そこで，運転時間帯でも列車運行に支障を与えず，かつ，作業員の主観に依らず定量的に確認するための手法について研究を行ってきた[1－3)]。本稿では，これらの手法を車上に適用するために，点滅回路を用いて不可視光線である近赤外線 LED を特定周期で点滅させる機能を有する特殊信号発光機，当該 LED を撮影する視野制御雲台付近赤外線カメラ，及び当該 LED の点滅を認識する画像処理アルゴリズムについて開発を行ったので，現車による評価試験の結果と共に報告する。

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」を対象とした。

2．検査の現状と視認確認のための基本構成

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 800m 離れた位置から目視で確認しているが，その後の建物や設備の新設や移転，草木の成長などで見通しが遮られたり，その他の影響により特殊信号発光機自身の向きが変わることで，設置個所から 800m 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，必要により視認確認の検査を行っており，視認性が確保できない場合には，特殊信号発光機の中継を設けたり，特殊信号発光機の角度調整や，草木の伐採などを行っている。

踏切に設置された特殊信号発光機の視認確認の検査では，踏切側，特殊信号発光機側と視認確認地点側に作業員がそれぞれ分かれ，踏切側の作業員が支障報知装置を扱い，特殊信号発光機を実際に発光させ，それを視認確認地点側の作業員が目視にて視認性を確認し，必要によりカメラ等で撮影を行う。新設や交換時に視認性が確保できない場合は，無線機等で双方の作業員が連絡を取り合いながら，設置向きの調整を行い，視認性を確保する。このような従来の手法は定量的な評価とは言えず，作業員の主観に依存しているという問題がある。また踏切か

＊　信号・情報技術研究部　信号システム研究室

ら 800m 以上のある地点だけでの確認であり，800m の地点から特殊信号発光機を通過するまで，連続した視認性の可否を確認することはできていない。さらに，視認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，作業効率が悪いことも問題として挙げられる。また，特殊信号発光機の設置総数も相当数にのぼるため，高精度で高効率な視認確認手法の開発が強く望まれている。

2.2 要求仕様の整理

これらの問題を解決するために，作業効率や視認確認の連続性などの点を考慮し，車上検測方式を対象として開発を行った。

車上検測方式としては，検測車による方法と，営業車による方法が考えられる。検測車による方法では，検査データに検測車からキロ程を得られること及び，測定装置の大きさ等の制約条件が少ないことが利点としてある。また，営業車による方法では，検測車と同様に常設し測定を行う方法と，測定機を信号関係社員が持って添乗し，測定する方法がある。いずれの場合にも測定機の小型化が重要となるが，特に，後者の場合は，測定機にある程度の可搬性が必要となる。その一方，測定ミスがあった場合にも，追加測定が容易にできるといった利点がある。

以上，発光機側と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のようになる。

発光機側の要求事項

- 現状の支持柱に設置可能
- 現状の発光機能を低下させない
- 測定時に，列車運行を支障しない
- 現状の拡散角度に対応した視認確認が可能

測定機側の要求事項

- 客観的な視認性の評価が可能
- 連続して視認性の確認が可能
- 複数の特殊信号発光機を区別して視認確認が可能

これらを要求事項とし，次節に示す車上型視認確認手法を提案した。

2.3 車上型視認確認のための提案手法

日中の時間帯でも列車運行に支障をきたさずに視認確認する方法としては，電波や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が考えられる。この場合の電波や不可視光線は，現状の特殊信号発光機の光拡散度合いより強い指向性が要求される。電波に比べ，不可視光線は特殊カメラを用いることで結果が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人間が映像を見ることで容易に確認ができることから，不可視光線を用いることとした。

不可視光線としては紫外線側と赤外線側があるが，紫外線側の波長は人体への影響が危惧されるので，LED を用いて赤外線側の波長の光を発光させる方式を検討した。780nm より長波長側が不可視域と言われているが，LED の入手のしやすさや，一般的なカメラの感度特性は波長が長くなるにつれて低下するので，ピーク波長 850nm 及び 940nm の近赤外線 LED を検討した。現行の特殊信号発光機の拡散角度（半値角）は±15°であるので，使用する LED の半値角は±12°程度を目安に選定した。受光側については LED のピーク波長に感度を有する近赤外対応のカメラ及びレンズを用いることとした。

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，映像中ではほとんど点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ので，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，外灯など，様々な波長の光が混在している。このような外乱光が多い中で，当該近赤外 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を取り除き，当該 LED を特定することで視認確認を行うこととした。

また，隣接する特殊信号発光機を正しく識別するために，それぞれの特殊信号発光機ごとに違った点滅パターンを登録し，明滅するものとした。つまり，特殊信号発光機ごとの決まった電文を車上に対して送り，電文を車上側で認識するものである。概念図を図 1 に示す。

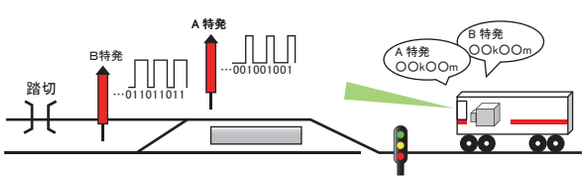


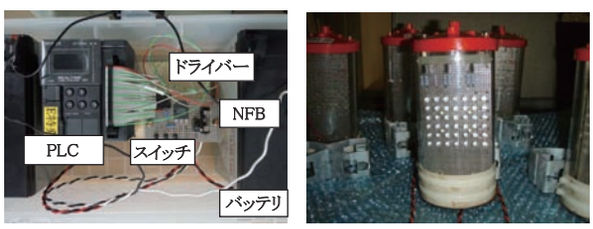
図 1　提案手法概念

3．装置構成

発光機に用いる LED の波長はピーク波長が 850nm を選定して，近赤外線 LED 点滅制御機の試作機を製作した。カメラのフレームレートの設定変更（25fps，30fps，60fps など）に対応できるように，点滅の周期を 1msec 単位で任意に設定できるようにし，ディップスイッチによって 8 種類の点滅パターンを切り替えられるようにし

た。また，後述の符号化方式を用いた際に 3bit ～ 14bit 分の情報を伝送できるようにするため，ヘッダと符号化を考慮して 32bit までの符号長が入力できるようにした。制御方式についてはプログラマブルロジックコントローラ（PLC）を用いた。制御器の様子を図 2（a）に示す。発光機については，現行の特殊信号発光機で使用している機構（基板，アクリル円柱，ケーブル）を用いて，作成した（図 2（b））。

受光側については，カメラはソニー製 XC-EI50，レンズは KOWA 製 LMVZ9990-IR を用いた。



(a) 制御器　　(b) 発光機

図２　試作機

４．点滅パターンと画像認識アルゴリズム

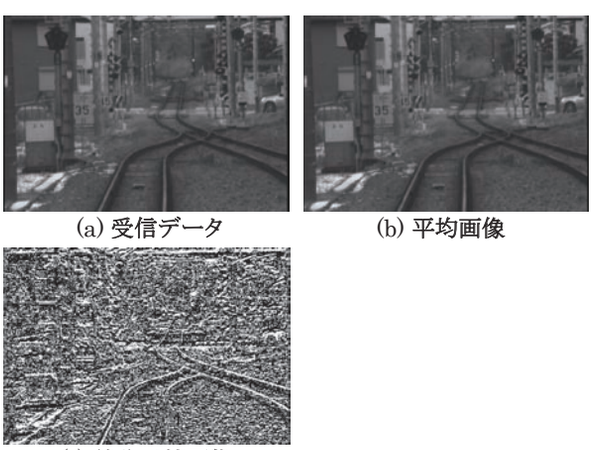
点滅パターンとしては，環境の変化に対して耐性のあるマンチェスタ符号化方式を用いることとした[4)]。

マンチェスタ符号化方式とは，符号化クロックレートを送信データ内に埋め込むための方法で，0 や 1 が長く連続することがないという特徴がある。その結果として，受光の平均レベルが変動しても復調の閾値に影響せず，同期信号が無くても同期ができる。そのため，本件のような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デジタルデータの符号化は，「0」なら「01」に，「1」なら「10」となるように符号化する方式で，「1」と「0」のバイナリ状態を，静的な値ではなく遷移として定義付け，立上りエッジと立下りエッジという 2 つの可能な遷移に対して，ロジックレベルの「0」と「1」（あるいはその逆）を割り当てることによって，2 種類の定義を行う。すなわち符号化によって得られる点滅パターンは，クロック信号とデータとの排他的論理和により行うことができる。

この符号化はデータに 0，1 が偏りなく出現し，0 と 1 の出現する回数が同等という特徴があるため，復号化のための閾値としてデータの平均値が利用できる。したがって，環境変化の著しい場面やノイズが混在する状況においても復号化における閾値の調整が不要であり，受信データからの復号化が容易である。復号化の処理としては，平均を求め，平均との差分を取ることで（もしくは平均値を閾値とした閾値処理により），デジタルデータとすることができる。デジタル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，符号化前のデータとして復号化できる。これを画像処理に適用した場合，ある k フレーム目の画像を F_k と表し，その各画素値を $f_k(i,j)$ とし，k フレーム目から L フレーム分の平均画像を $\bar{f}_k(i,j)$，$\bar{f}_k(i,j)$ と $f_{k+n-1}(i,j)$ の差分画像を $g_{kn}(i,j)$，$g_{kn}(i,j)$ を符号パターン σ に合わせて二値化したものを $G_{kn}(i,j)$ とすると，次式で表すことができ，符号パターンのみを取り出した画素が $H_k(i,j)$ となる。最終的に ρ_k=1 ならば視認確認を良とし，ρ_k=0 ならば，視認確認を否とすることによって，k フレーム目による視認確認の有無を行うものである。

$$
\begin{aligned}
&\bar{f}_k(i,j) = \sum_{n=1}^{L} f_k(i,j)/L \\
&g_{k_n}(i,j) = f_{k+n-1}(i,j) - \bar{f}_k(i,j) \\
&\sigma = \sigma_1\sigma_2 \ldots \sigma_L \ \ for\ \sigma_i = \{-1,1\} \\
&G_{k_n}(i,j) = \begin{cases} 1 & if \quad g_{k_n}(i,j)\times\sigma_n \geq 0 \\ 0 & if \quad g_{k_n}(i,j)\times\sigma_n < 0 \end{cases} \\
&H_k(i,j) = \prod_{n=1}^{L} G_{k_n}(i,j) \\
&\rho_k = \prod_{j=1}^{image_height} \prod_{i=1}^{image_width} H_k(i,j)
\end{aligned}
\tag{1}
$$

画像処理による復号の様子について，受信データの一部を図 3（a）に，受信データから求めた平均値を図 3（b）に，受信データと平均値の差分により求めたデジタルデータを図 3（c）に示す。



(a) 受信データ　　(b) 平均画像

(c) 差分二値画像

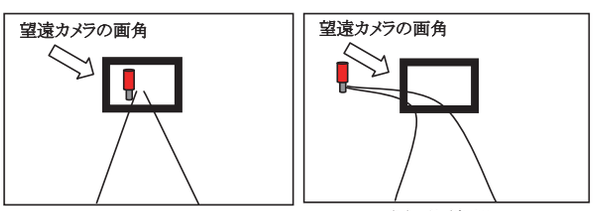
図３　画像処理による復号の様子

５．近赤外線カメラの視野制御

5.1　視野制御の必要性

望遠をしない広角カメラで 800m 先を見ると，1 画素あたりの横幅が数 10cm ～ 1m となり，特殊信号発光機が完全に 1 画素以下に埋もれてしまうため，点滅させたとしても認識することは非常に困難である。また，望遠カメラを使用した場合，特殊信号発光機を 1，2 画素で映そうとすると，試作装置での構成では焦点距離 f が

90mm となる。この場合，画角 θ は，焦点距離を f，撮影距離を L，とすると，θ=atan(L/2/f) × 2 となり，4° 程度になる。このようなレンズで前方を見た場合の撮影範囲は図 4（a）に示すような運転台からの視線の中央の四角で囲った範囲の部分となり，全体を撮影できない。直線区間ではこの図のように遠方においても運転士の注視点を捕捉できているが，図 4（b）のような曲線区間の先に特殊信号発光機がある場合は，運転士の注視点は左の特殊信号発光機を見ているはずであり，この場合は望遠系のカメラにおいては特殊信号発光機を捕捉できない。したがって，800m の遠方をカメラで捕捉しようとすると，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。そこで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効率的に行う手法を開発した。



(a) 直線部　(b) 曲線部

図４　曲線区間において視野が外れる様子

5.2　レール抽出アルゴリズム

レールはカメラ近傍では比較的強いエッジが観測され，しかもその曲率は緩くほとんど直線的である。さらに，カメラからの距離が遠くなるにつれてその間隔が狭くなるという特徴を有する。そこでレールを，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ような既開発のアルゴリズムを用いた[5]。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。レール検出アルゴリズムを実際の線路映像に適用した結果を図 5 に示す。図 5（a）は雨天の雨粒によるノイズ，図 5（b）は逆光によるハレーションであるが，どの条件においても，ほぼ良好にレールを検出し，消失点を求めることができた。

(a) 雨天　(b) 逆光

図５　レール抽出結果

5.3　視野制御方法と雲台の校正

望遠カメラを常に注視点に向けるためには，広角カメラ映像からレールを検出して，目標となる注視点を取得する。望遠カメラを搭載した視野制御雲台に対して，注視点が画面ほぼ中央に映るように信号をフィードバックして送ることで，望遠カメラで注視点を追尾することが可能となる。

このように，広角カメラの映像から抽出した消失点の情報を用いて望遠カメラの位置を制御するためには，広角カメラの映像から取得したレール消失点座標と視野制御雲台のピッチ角，ヨー角が各々どこに相当するのかの対応を保持していなければならない。そこで走行前に，広角カメラの映像の 1 点と，視野制御雲台で制御された近赤外線画像の 1 点を対応づける座標を登録するキャリブレーションプログラムを開発した。図 6 はキャリブレーションを行っている画面であり，左下が広角カメラの映像である。赤枠で示した領域が近赤外線カメラと同等のズーム率を表しており，拡大した画像が右下，近赤外線カメラの画像が右上となる。それぞれの画像が同等に見えるように調整し，キャリブレーション座標として，プログラムに教師座標として登録する。少なくとも 4 点の対応点を登録することで，キャリブレーションが正確に行われ，これにより，レール抽出アルゴリズムで抽出された座標に正しく視野制御できるようになる。

図６　視野制御雲台のキャリブレーション画面

6．現車試験

6.1　地上仮設

作成した試験用特殊信号発光機，制御器，視野制御雲台，点滅検知アルゴリズムの性能を評価するために，現行の特殊信号発光機と同一の支持柱に試験用特殊信号発光機を仮設し，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。試験場所については，五日市線秋川～武蔵引田間とし，下り方の起点から表 1 に示す

個所に設置した。

表１　試験用特殊信号発光機の仮設位置

試験機名	駅・駅間	踏切名	機器名称	設置キロ
A	秋川－武蔵引田	代継第二踏切	XF2	6k040m
B	秋川－武蔵引田	淵上第一踏切	XF2	6k100m
C	秋川－武蔵引田	代継第二踏切	XF1	6k259m
D	秋川－武蔵引田	淵上第一踏切	XF1	6k548m
E	秋川－武蔵引田	引田踏切	XF1	7k029m

前記したとおり特殊信号発光機は視認性が確保できない場合については，中継を設けている。設置した踏切に対して，下り側の特殊信号発光機は，代継第二踏切，淵上第一踏切は中継を設けており，XF2 まで設置されていた。また，引田踏切は中継が無く，本体のみであった。設置位置を図 7 に，各々の試験機の仮設状況を図 8 に示す。

6.2　車上測定

車上測定については，拝島～武蔵五日市間を折返し運転する編成に添乗し，武蔵五日市方運転台の助手席側に設置し，12 時から 18 時まで 6 試番測定を行った。昼間から夕方にかけての環境光の違いによる影響が評価できるよう配慮した。点滅パターンについては，0 から 7 までを 3 ビットで表現し，それぞれのビットについて，「0」なら「01」に，「1」なら「10」となるようにマンチェスタ符号化し，符号化された 6 ビットに対して電文の最初を認識するためのスタートビット 4 ビット「1100」を付加した 10 ビットからなるパターンを用いた。例えば，「5」という情報を送信するなら「1100100110」が点滅パターンとなる。5 つある試験用特殊信号発光機については，それぞれの特殊信号発光機が異なるパターンとなるようにして試験を行った。

車上における測定機の構成を図 9 に示す。広角カメラによる映像を PC で画像解析し，レール消失点情報に基づく制御信号を視野制御雲台に送り，近赤外線カメラの向きを制御するものである。近赤外線カメラの映像はレコーダで長時間記録できるものとした。それぞれの実際の様子を図 10 (a) に，システムが動作している様子を図 10 (b) に示す。

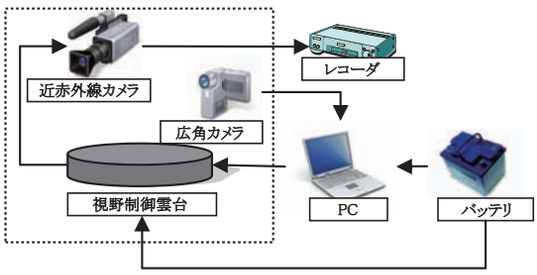


図９　車上測定機構成図

(a) 車上測定外観　　(b) 車上測定システム画面

図 10　車上測定の様子

6.3　結果

試験機 A ～ E を検知している様子をそれぞれ図 11 に示す。また，それぞれの試験機の検知結果についてまとめたものを図 12 に示す。図 12 は横軸がキロ程，縦軸が試験機の番号を表しており，▲がそれぞれの試験機を設置しているキロ程，△が視認されるべきキロ程を示している。◇で表している部分が，システムが試験機を検知でき，視認確認ができたとされる箇所である。キロ程の算出については，踏切のキロ程や各信号設備の設置キロ程を参考に，映像を見ながらフレーム単位で目視により

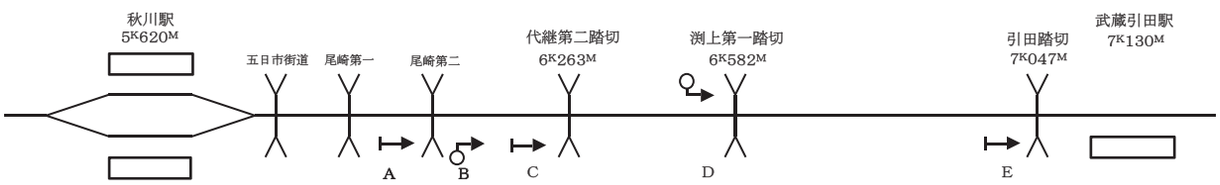


図７　試験用特殊信号発光機の設置位置

図８　試験用特殊信号発光機の仮設の様子

対応づけたものである。

試験機 A，B，C，D については，おおよそ視認されるべき地点から正確に視認確認がされ，特に，試験機 B については視認されるべき地点より 600m 以上手前の地点から視認確認が良であった。これは，試験機 B が中継であること，見通しが十分に取れていること，車両振動が影響しなかったこと，視野制御が良好に機能したことによると考えらえる。また，各試験機の視認確認の結果に歯抜けや試験機 A における 5k450m 付近について未検知があるのは，車両の振動が影響して，点滅検知アルゴリズムがうまく認識できなかったためである。さらに，試験機 A，B の 5k800m 付近や試験機 D の 6k150m 付近において視認確認がなされていない箇所がある。これについては，レール抽出アルゴリズムがうまく機能せず，正しい方向に視野制御できず望遠カメラが特殊信号発光機を捕捉できなかったことが原因である。試験機 E については，800m 程度手前から認識されるべきであるが，設置位置から 600m 程度手前から視認確認ができたという結果であった。これらの検知ミスも，他と同様に，車両振動と視野制御の不具合が原因であった。また，どの試験機においても，100m ～ 150m 程度手前の近距離においては，望遠カメラを使用している関係で，視野に入らず，未検知となることが分かった。

また，試験機 C は曲線区間の先に存在し，視野制御を行わないと視界に入らない位置に設置されているが良好に検知できており，視野制御の有効性が確認された。

7．まとめ

特殊信号発光機の 800m の視認確認を車上から効率的に高精度で行う手法として，点滅回路を用いて不可視光線である近赤外線 LED を特定周期で点滅させる機能を有する新しい特殊信号発光機，曲線運行時においても当該 LED を適切に撮影する視野制御雲台付近赤外線カメラ，及び当該 LED の点滅を検知する画像処理アルゴリズムについて開発を行った。また，現車試験によって，性能評価試験を行い，基本機能としての有効性を確認した。

今後は，未検知や誤検知を少なく確実に連続視認検知できるよう最適化された点滅パターンと点滅検知アルゴリズムの開発，同一空間に複数の特殊信号発光機が設置されている環境においても，個体識別が可能な近赤外線発光の制御方式の開発，分岐点情報を加味した進行方向追従方法による視野制御雲台の開発，視認確認画像のキロ程と特殊信号発光機の設置キロ程のリンク手法などについて研究を進めていく計画である。

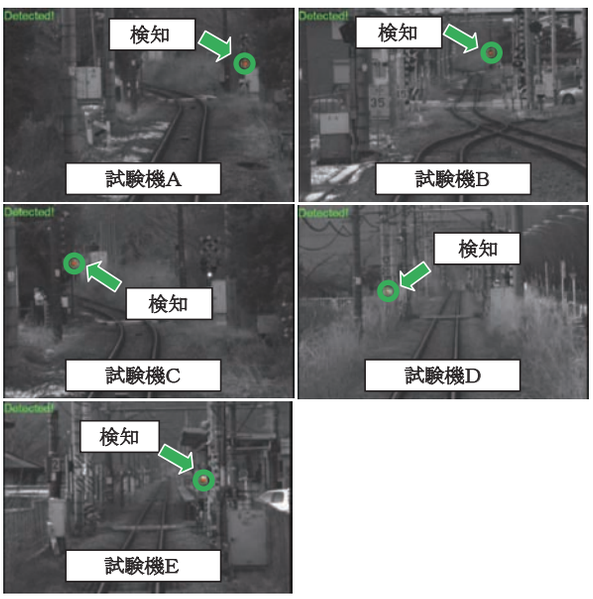


図 11　システムが視認性を検知している様子

文　献

1）鵜飼正人 , 長峯望 : 画像認識技術による特殊信号発光機の視認確認 , 第 47 回鉄道サイバネ・シンポジウム論文集, Vol.47，No.9，pp.696-704, 2010
2）鵜飼正人 , 長峯望 : 画像認識による特殊信号発光機の視認確認手法 , 鉄道総研報告 , Vol.25, No.5, pp.41-46, 2011
3）長峯望 , 鵜飼正人 : 特殊信号発光機の視認性確認手法 , 電気学会研究会資料 . TER, 交通・電気鉄道研究会 2009（1），31-35, 2009-02-04
4）小野瀬一志ら , : わかりやすい LAN の基礎 , オーム社 , 1995
5）ボグダン友幸那須 , 鵜飼正人 : Rail Extraction for Driver Support in Railways, IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 2010.

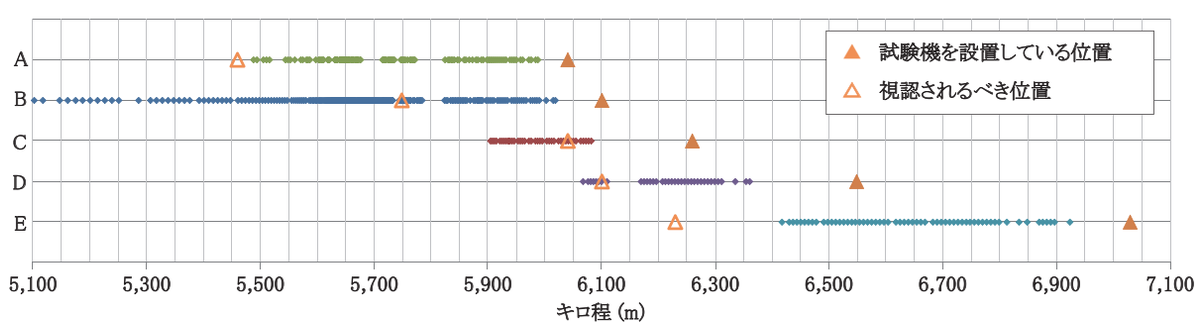


図 12　視認確認結果