

# 画像認識による特殊信号発光機の視認確認手法

鵜飼 正人\* 長峯 望\*

## A Visibility Check Method for Obstruction Warning Signal

Masato UKAI Nozomi NAGAMINE

An obstruction warning signal is an 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 allows real-time and off-line checking of the visibility of obstruction warning signals in the daytime or the nighttime. The method which we have developed, an image processing method using a near infrared camera, proved that it could track and detect specific blinking of signal correctly not only in a static system but in a vehicle installed system. Finally, we report the results of functional field tests.

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

### 1. はじめに

踏切において、障害の存在を列車および運転士に伝える手段として特殊信号発光機（図1。以下、特発）があり、安全確保のために重要な設備となっている。特発は800m手前から連続的に視認できることが必要で、設置時にはその点滅を目視で確認しているものの、その後の構造物の敷設や、草木の成長などで見通しが遮られたり、強風や地震などの影響で特発自身の向きが変わり、視認が得られなくなる場合がある。必要により視認確認の検査を行っているが、あくまで主観的な確認であり、800m地点から特発を通過するまで連続的に、かつ定量的に視認確認するのは困難である。また、特発は異常時のみ発光する方式であるため、確認検査のために実際に特発を発光させることは、昼間の運転時間帯には難しいという課題を抱えている。また、設置個数もかなりの数にのぼるので、効率的な確認の仕組みが望まれている。

そこで第一ステップとして、視認確認用近赤外線LEDを付加した特発と、近赤外線対応カメラ及び画像認識アルゴリズムを実装した携帯型パソコンからなるプロトタイプ装置を開発し、フィールド試験を通じて機能と有効性の検証を行った<sup>1)</sup>。

さらに次のステップとなる車上確認型システムについても基礎的な検討を進めた。



図1 特殊信号発光機（点滅型）

### 2. 地上型視認確認装置

#### 2.1 発光装置の概要

現在普及している特発の光拡散度合いより、狭い指向角度で視認確認できれば、特発は正しい向きに設置されていると判断できる。日中の時間帯でも運転に支障をきたさないよう、不可視光線の利用を検討した結果、指向性を考慮して不可視のLEDを適用することとした。

赤外線や紫外線は目に見えないため、不可視光LEDとして適用可能であるが、紫外線は人体への影響が危惧されるので、赤外線側の波長を検討した。780nmより長波長側が不可視域となるが、LEDを高出力に設計できることや、一般的なカメラの感度特性は波長が長くなればなるほど低下するので、ピーク波長850nm及び940nmの近赤外線LEDを検討した。拡散角度については、現行の拡散角度より幾分狭い、全角20°程度を目標とした。

#### 2.2 発光装置の試作

800mも離れると、LEDの配置パターンを変えても、映像中では丸い点としか映らない。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、これらの周辺光と識別するのは難しい。さらに鉄道沿線においては、目標の特発以外の信号機や標識、沿線の外灯など、様々な波長の光が混在している。そこで、このような外乱光と識別するため、特定のパターンでLEDを点滅させ、それを画像認識することで当該LEDを特定する手法を検討した。

最適な点滅パターン、周波数、電流、並びに点灯LED数を評価するために、見通し800mでのフィールド試験

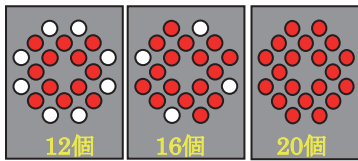
\* 信号通信技術研究部（信号）

特集：信号通信技術

を行った。30mA程度の電流では、点灯LED数が20個以下になると検知率の低下が見られた。50mA以上通電すると、点灯LED数を減らしても、検知率の大きな低下は認められなかった（図2）。ただし電流値に関しては、電源装置の関係で50mA以上通電することは難しいことがわかった。LEDの数を増やしたほうが認識性能の面では有利であるが、実装面積にも制限があるのでこれらを考慮して設計した。試作した850nm及び940nm近赤外線LEDの仕様を表1に示す。

【試験条件】

- ・電流(mA) 30,40,50,70
- ・点灯LED数 12,16,20個
- ・焦点距離 160mm
- ・絞り F32



LED数 \ 電流	30mA	40mA	50mA	70mA
12個			96%	
16個		99%	99%	
20個	98%	99%	100%	100%

図2 LEDの電流及び点灯数と検知率の関係

表1 近赤外線LEDの仕様

ピーク発光波長	850 nm, 940 nm
反射強度	200 mW/Sr
拡散角度(半値角)	全角 15 deg.
実装個数	40個

2.3 近赤外線カメラの概要

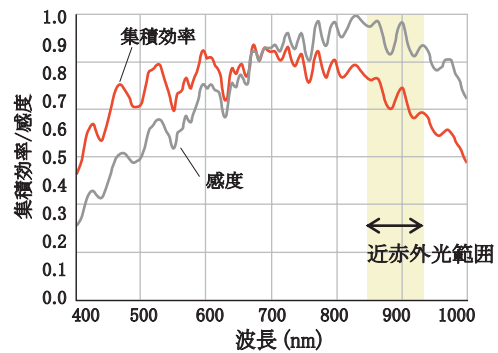
受光装置として、LEDのピーク波長940nmに比較的高い感度を有する近赤外線カメラを検討した（図3、表2）。一般的にカメラ感度は、集積効率と感度の指標で評価するが、図4のカメラの分光感度特性が示すように、一般的なカメラに比べ、検討したカメラの近赤外光領域における感度は明らかに高く、画質の向上が期待できる。



図3 近赤外線カメラ

表2 近赤外線カメラの諸元

映像素子	CMOS
セルサイズ	8.0 μm × 8.0 μm
解像度	1312 (H) × 1082 (V)
実効素子サイズ	10.48mm × 8.64mm
レンズマウント	Cマウント
フレームレート	108 fps
カメラタップ数	2



(出典: PhotonFocus社カタログより)

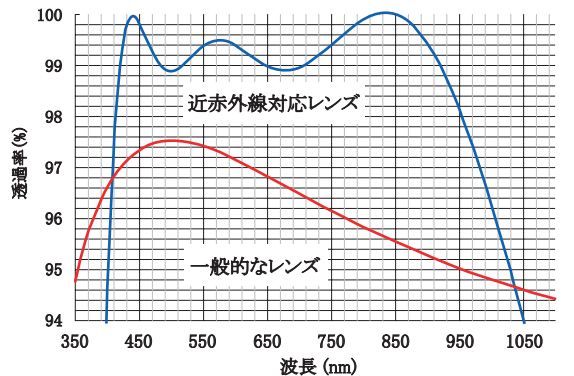
図4 近赤外線カメラの分光感度特性

2.4 近赤外線対応レンズの概要

焦点距離を  $f$ 、撮影距離を  $Wd$ 、画面の幅を  $Ws$ 、撮像素子の幅を  $s$  とすると、焦点距離と画像中の被写体の大きさの関係は、 $f = Wd \times s \div Ws$  で表される。画像処理で点滅を検知するのに、最低でも3pixel程度の画素数が必要である。従って、特発の直径よりも若干大きい120mm程度の幅を3pixel程度の幅で撮影するためには、検討したカメラでは画像の水平ピクセル数が1312pixelになるので、 $Ws$ は52480mmとなる。また、カメラのセル幅は8.0 μm、撮像素子幅は10.496mm、先述の撮影距離に対する要求から  $Wd$ は800mとなる。これより  $f$ は約160mmとなる（表3）。選定した近赤外線対応レンズは図5に示すように、一般的なレンズに比べ近赤外域の透過率が高いため、近赤外線対応カメラとの組み合わせで、鮮明な近赤外線画像を撮影することができる。

表3 近赤外線対応レンズの諸元

焦点距離	10～250mm
ズーム	電動
フォーカス	電動
絞り	電動
レンズマウント	Cマウント
寸法	110 × 100 × 197.5mm
適応波長	430nm - 950nm



レンズ1枚の各コーティングにおける透過率実測値  
(出典: 株式会社スペーステクニカル情報より)

図5 近赤外線対応ズームレンズの透過率特性

### 2.5 画像認識アルゴリズムの開発

特定のパターンで点滅するLEDをノイズと識別して認識するアルゴリズムを開発した。隣接する画像フレームにおいて、LEDの点/滅の位相変化がある場合は“1”，無い場合は“0”としてフレーム間差分を行い、差分の結果が“1”の時は明るい領域を、結果が“0”の時は暗い領域を取り出す二値化処理を行う。上記の処理を全フレームに対して行い、結果画像の論理積を取ることで、常時点灯している信号機や太陽光などの外乱が除かれ、当該LEDの発光領域のみが抽出される（図6）。

上段は入力画像で、左から右に時間軸に沿って推移する。2段目は隣接フレーム同士の差分後画像を示す。なお、丸は発光機の点滅、三角はノイズを示している。3段目は差分画像に対する二値化処理後画像を表している。この図の例のように、点滅パターンが10011…の場合、位相変化に対応して、フレーム間差分の絶対値として出力される符号は1010…となる。4段目は各二値化画像の論理積画像を表している。論理積の結果、“1”の領域が1画素以上あれば検知できたとする。

ところで通常は、LEDの点滅と画像取り込みは非同期である。そこで、発光機の点滅周波数の2倍以上の周波数で画像を取り込む。取り込まれた映像に対して1フレームずつ位相をずらしながら画像処理を行う。点滅パターン長だけフレームをずらしても検知できない場合は、視認できないと判断する。これにより発光と画像取り込みが非同期であっても、点滅を検知することができる。

### 2.6 画像認識アルゴリズムの評価試験

開発したアルゴリズムを評価するために、見通し800mでのフィールド試験を行った。日中から夜間にかけて500試番実施した中で、497回正常に検知できてお

り、検知率は99.4%であった。このうち2回は未検知、1回は誤検知であった。誤検知は周辺の自動車に反射したものを検知したものであった。

次に、視認角度の評価を行うために、発光機をターンテーブルに乗せ、左右に1度ずつ回転させ画像認識率を測定した。その結果、左右に5°程度回転すると検知率が下がり、6°以上回転すると検知できなくなった。これはLEDの拡散角度(半値角)の仕様とほぼ一致している。このことから、指向性は±5°程度で、特発よりも狭いことを確認した。

日中、夜間を通して正しく当該点滅を認識できたことから、環境光に対する画像認識アルゴリズムの頑強性が証明された。現在普及している特発の視認角度より指向性の狭いLEDを正しく認識することで、実際に特発が正しく設置されていると客観的に判断することができる。

### 2.7 地上型視認確認プロトタイプ装置の開発

図7に、近赤外線カメラ及び携帯型タブレットPCから構成する地上型視認確認装置のプロトタイプを示す。また、視認確認用LEDを増設した新型特発装置を撮影する作業イメージを図8に示す。受光側装置は、近赤外線対応ズームレンズを装着した近赤外線対応カメラを三脚に取り付け、タブレットPCと接続して使用する。タブレットPCには、画像認識プログラムに加えて、カメラ画像の録画・編集機能を有する画像ビューアプログラムをインストールして使用する。鉄道総研の所内、さらに実際に800m離れたレール環境において、LEDの点滅パターン及び周波数、特発の回転角度などの条件を変えながら、撮影、検知、画像記録まで、実使用を想定した検証試験を実施し、プロトタイプ装置としての有効性を確認した。

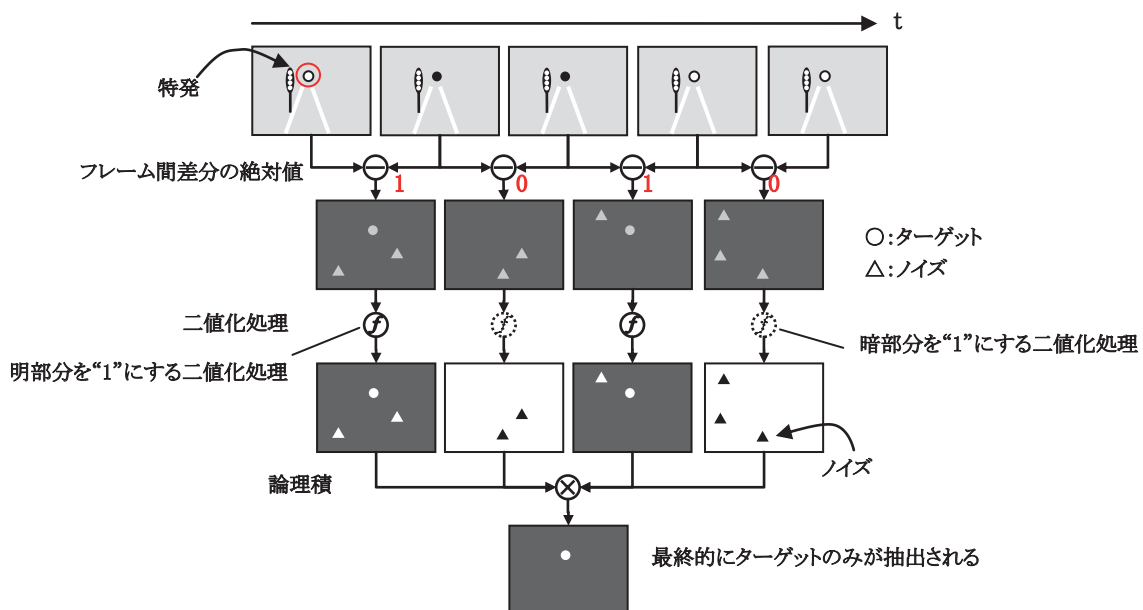


図6 画像認識アルゴリズムの流れ



図7 地上型視認確認プロトタイプ装置

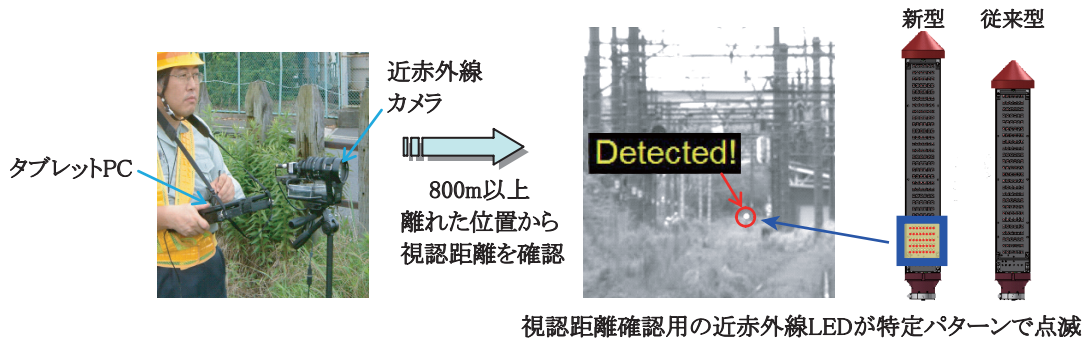


図8 特殊信号発光機の視認確認システム

### 3. 車上型視認確認システムの開発

#### 3.1 システムの要求仕様

発光機は前章と同じ考え方であるが、認識装置を検測車などに搭載して車上から確認する、車上型視認確認システムに求められる機能や技術を以下のように整理した。

- ・車両の進行や車両動揺の影響により、映像中、LEDの映る位置は一定ではない。ターゲットの動きを想定した、映像ブレに対して頑強な認識アルゴリズムの開発
- ・0～800m間で絶えずターゲットを捕捉する技術
- ・ブレに対する耐性を図るためLEDの高周波点滅化
- ・高周波点滅を実現するための制御装置の改良
- ・高周波点滅に追従できる高フレームレート（100fps/s～）、かつ近赤外線領域に感度のあるカメラの選定
- ・カーブ等でも適切な視野を維持するための、パン・チルト雲台機構の開発

以上の技術要件を踏まえてシステムの基礎検討を行った。

#### 3.2 テスト用映像データによる一次検証

車両の進行に伴って、車載映像ではターゲットの特発のみならず、当該踏切の中継用特発や次の踏切の特発など、映像中に次々と特発が現れることが想定される。このように、複数の特発が同時に映る映像を処理しなければならない。複数の特発を区別して認識するアルゴリズムを開発するために、800m超の直線、カーブや勾配区間に、異なる点滅パターンで発光する特発を連続設置して、撮影試験を実施した（図9）。試験は、8種類の発光パターンと周波数の組み合わせを用意し、5箇所の試験用特発毎に異なる点滅条件を設定した。また試番毎に当該箇所の設定も変えながら撮影した。撮影時間帯についても、朝方から夕方にかけてと、環境光の違いによる影響が評価できるよう配慮した。

地上確認型の画像認識アルゴリズム（以下、Step1）を適用した場合でも、ブレが少ない等の条件がそろえば、図10に示すようにパターンを識別して検知できる。

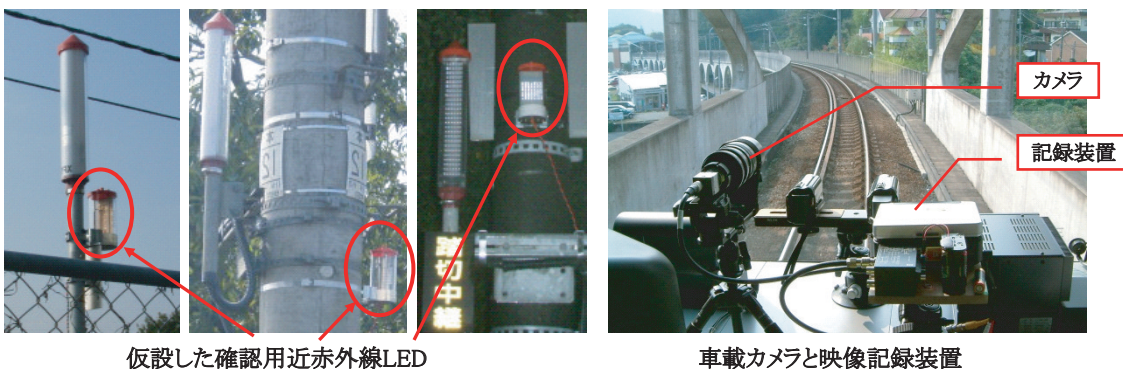


図9 車上確認型システムの基本構成

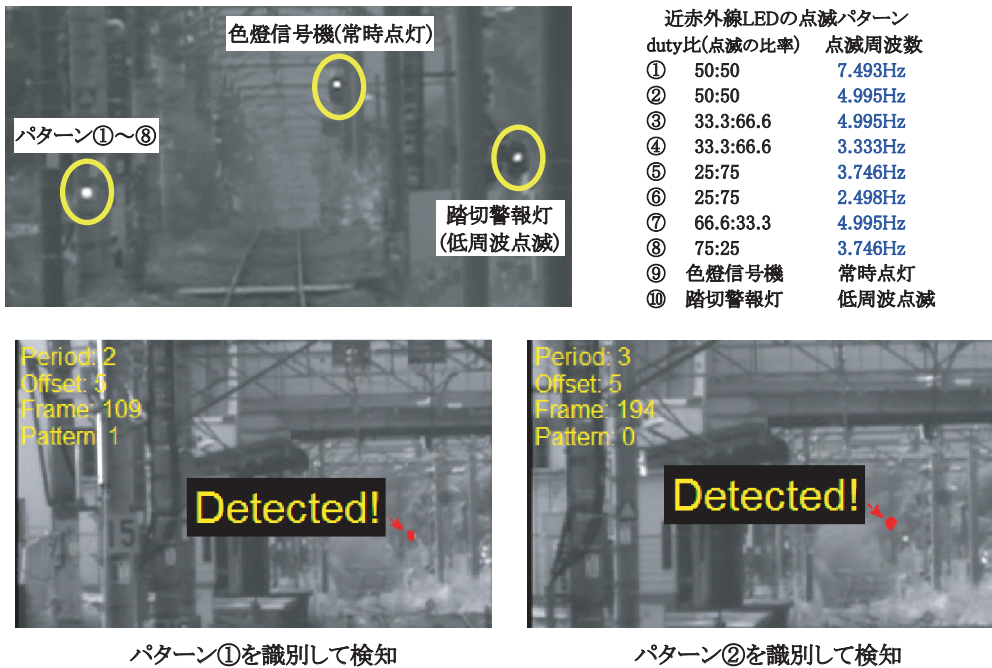


図 10 車載映像による試験用特発の認識結果

### 3.3 画像認識アルゴリズムの改良

Step1 のアルゴリズムでは、画面内のターゲットの位置は動かないことを前提としていたため、ターゲットの位置と共にその大きさが変化する場合でも、正しく認識できるよう、アルゴリズムの改良を検討した。

まず発光側の点滅周波数を上げ、それに合わせて受光側も高フレームレートカメラを適用する。100フレーム/秒程度の高速カメラで撮影すると、二つの連続する画像間にはたかだか 10ms の違いしかない。このため、たとえ移動している車両で撮影したとしても、隣接画像はほぼ同じ画像になる。Step1 のアルゴリズムにより抽出される発光体の軌跡からオプティカルフローを求め、その交点から線路消失点 (FOE) を求める (図 11)。ある時刻  $t$  の画素位置  $(x_t, y_t)$  に対して、FOE から放射状に発生する 1 フレーム時間の移動量を差し引くことで、当該画素の前フレームの位置  $(x_{t-1}, y_{t-1}) = (x_t - \Delta_x, y_t - \Delta_y)$  を求める。こうして隣接フレーム間の微小移動量を補償した後、再度、点滅の位相変化に応じた抽出処理を行うことにより、常灯信号機や踏切警報灯などの外乱が除かれ、ターゲットの特発のみを検知することができる。

### 3.4 点滅パターンによる目標物検出手法の検討

10011...等、特定の点滅パターンを検出するには、ある程度の長さの画像データが必要である。ここではこの画像データ集合を画像履歴データと呼ぶ。まずは現在の画像データからさかのぼって L フレーム分の画像データを格納する。時間経過と共に新しい画像データが得られたら、履歴データの最も古い画像データと差し替える (ラウンドロビン方式)。図 12 (a) に静止状態の場合の履歴データの更新方法を模式的に示す。目標物が移動する場合は、履歴データを作成する際に、前述のオプティカルフローから求まる移動方向と速度情報から得られる新しい位置のデータを格納することで、静止状態と同じアルゴリズムで検出が可能となる (図 12 (b))。

### 3.5 目標物の追尾フィルタの検討

最初に検出した LED を前述のオプティカルフローを用いて連続的に追尾する手法として、カルマンフィルタとパーティクルフィルタによる追尾方法を検討した (表 4)。線形モデルを仮定しているカルマンフィルタに対し、パーティクルフィルタは設定した確率に応じて複数の

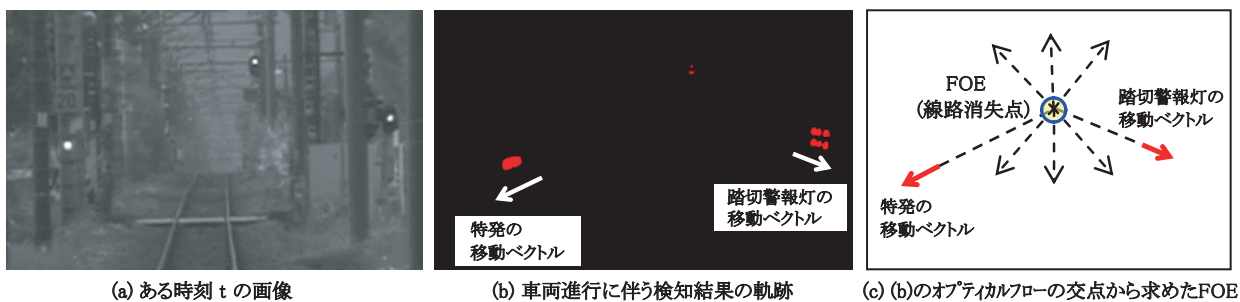


図 11 オプティカルフローを用いた線路消失点推定アルゴリズム

特集：信号通信技術

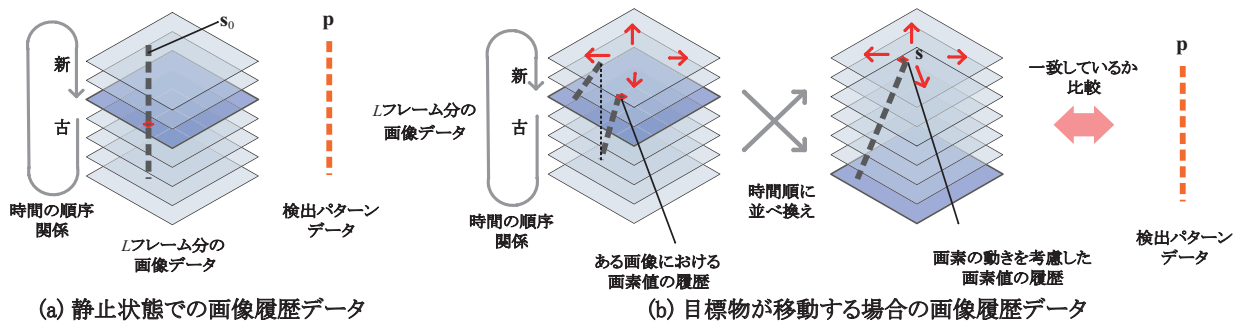


図 12 画像履歴データの作成方法

LED 候補位置（パーティクル）を与え、評価値によって最終的な候補位置を絞り込む方法である。実験の結果、カルマンフィルタは比較的滑らかな追尾軌跡が得られたが、カメラ振動等で急激に目標物が動いた場合の追従性能はパーティクルフィルタに優位性が見られた（図13）。

搭載している。線路全体を映す遠方カメラ映像から画像処理でレールを自動検出し、得られたレールから推定したFOEを望遠カメラの視野目標として雲台を制御する、PC 制御プログラムを作成した。所内試験を通して機能検証を行い、基本的な性能を確認した。

表 4 パーティクルフィルタの設定パラメータ

設定項目	設定値
パーティクル集合のパーティクル数	10
暫定的パーティクル集合のパーティクル数	50
距離に対する重要度の重み $\alpha$	2.0
パーティクル作成時正規分布の標準偏差	5.0

4. まとめ

点滅型特発の 800m の視認確認を効率よく高精度で行う手法として、視認確認用の近赤外線LEDを付加した特発と、近赤外線対応CMOSカメラ及び画像認識アルゴリズムを実装した携帯型パソコンからなるプロトタイプ装置を開発し、昼間、雨天など様々な環境下で性能評価試験を実施し、実用化に向けて問題のないことを確認した。今後は車上型視認確認システムの実用化をめざして、高フレームレートカメラによる高速画像取り込み、Pan-Tilt 雲台を制御して特発を捕捉するアルゴリズム、大容量高速画像記録技術などの開発を進めていく予定である。

また近年、LED 信号機を高周波で点滅させ情報を伝送する、信号機を活用した可視光通信システムにおいて、カメラを光通信の受信デバイスにする「イメージセンサ通信」が提案されている<sup>2, 3)</sup>。通信距離や空間分解能、ロバスト性に特長を有するイメージセンサ通信技術は、本研究を促進させるうえで有効な情報となる。特に、通信ノイズに対する強い耐性を有するといわれている拡散符号化などの技術の適用を今後検討していきたい。

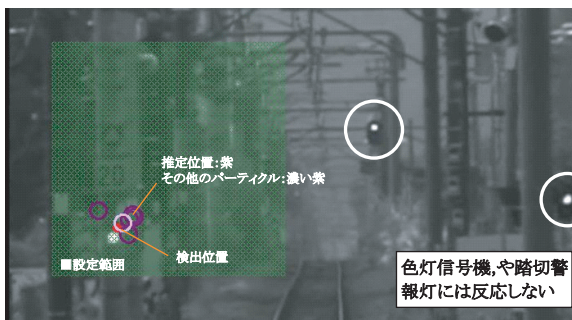


図 13 パーティクルフィルタによる目標物の追尾結果

3.6 曲線運行時の対象物トレース方法の検討

カーブや勾配区間においても、望遠カメラ映像内にターゲットとなる特発を捕捉するため、上下左右に回転首振りができる Pan-Tilt 雲台を製作した（図 14）。微細な縦横の揺れを低減するジャイロスタビライザーを2基

文 献

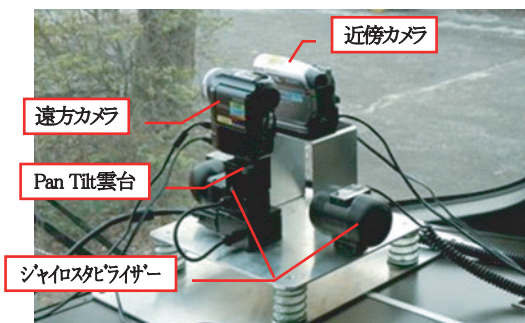


図 14 防振性能を備えた Pan-Tilt カメラ雲台

- 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) 山里敬也: LEDアレイと高速度カメラを用いた可視光通信のITSへの応用, FundamentalsReview, Vol.3, No.2, pp.45-53, 2009
- 3) 増田恭一郎他: LED信号機と車載カメラを用いた可視光通信における階層的符号化方式, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J90-A, No.9, pp.696-704, 2007