

- 鉄道一般
- 車両
- 軌道
- 構造物
- 防災
- 電力
- 信号通信
情報
- 材料
- 環境
- 人間科学
- 浮上式鉄道

列車前方の安全を見張る

列車の安全な運行を確保するための信号機や前方線路の確認は、基本的に運転士の目視に依存していることから、安全を支援する前方監視システムが望まれています。運転士の安全確認のバックアップを目的とした最近の画像処理研究の成果と取り組みとして、徐行予告信号機の検出、回転型特殊信号発光機の動作状態の認識、点滅型特殊信号発光機の視認距離の確認、並びに線路内の障害物を車上から検出する各手法について紹介します。



鵜飼 正人
Masato Ukai
信号・情報技術研究部
信号システム研究室
主任研究員
[専門分野] 画像処理、
画像認識、情報処理



長峯 望
Nozomi Nagamine
信号・情報技術研究部
信号システム研究室
副主任研究員
[専門分野] 画像処理、
画像認識、情報処理

はじめに

最近の自動車には、道路の白線を認識して車線逸脱を防いだり、前方の車両や歩行者などの障害物を認識する機能を備えているものがあります。このように、近年の車載画像処理を始めとした情報通信技術の進歩は目を見張るものがありますが、鉄道総研においても、高度な視覚機能を有する画像認識に関する研究開発¹⁾を進めています。

鉄道の安全監視システムは、実現形態によって車上監視型と地上監視型に分類されます。車上監視型は、高度な画像認識アルゴリズムが求められるものの、地上設備が不要なのでコスト面

や保守面で有利なうえ、監視結果を車両制御に即座に反映できるという特長があります。今回紹介する監視対象も、全て車上から直接検出することを目指して取り組んでいる事例です。

徐行予告信号機の認識

徐行信号機は列車に徐行を示す重要な信号設備ですが、ATSなどのシステム的な防護はありません。徐行区間は運転士に対し点呼時に通達されるものの、夜間、濃霧、降雪といった視界不良時は確認しづらいという、ヒューマンエラーによる信号機の見落としが起これば、列車の安全性が著しく低下し

ます。運転士の前方確認を支援するために徐行信号機を検知する画像処理アルゴリズムを開発しました。信号機を確実に検知するためには、信号機になるべく近づいた時点の画像を処理するのが望ましいですが、徐行区間の開始を示す図1(a)の徐行信号機を直近で検知したのでは、規制速度に

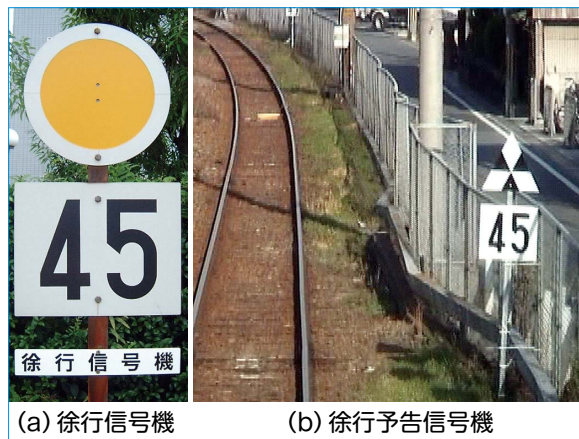


図1 臨時信号機

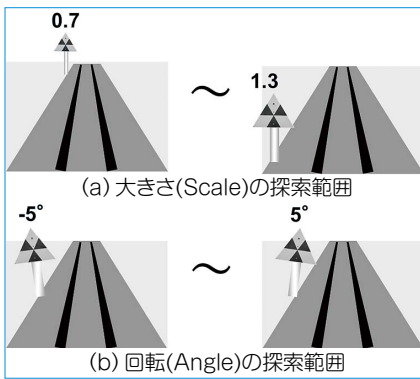


図2 見えの変化に対応した探索範囲の設定

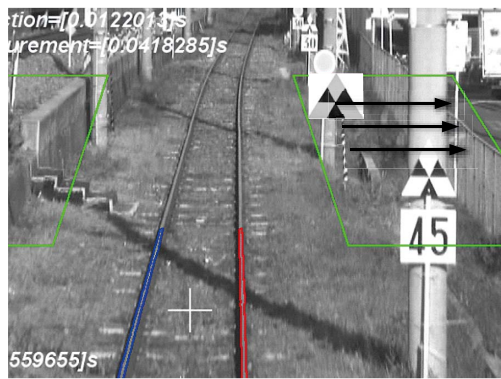


図3 レールを基準とした探索範囲の設定



図4 制限速度数字の読み取り

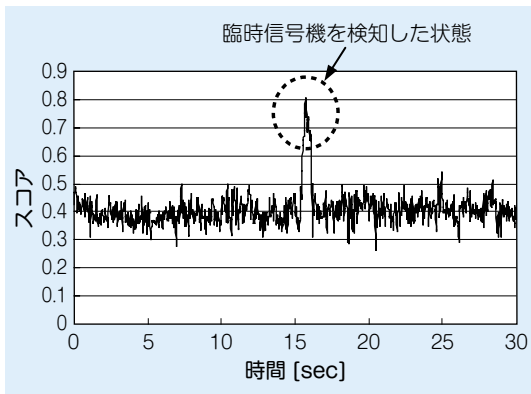


図5 パターンマッチングスコアの推移

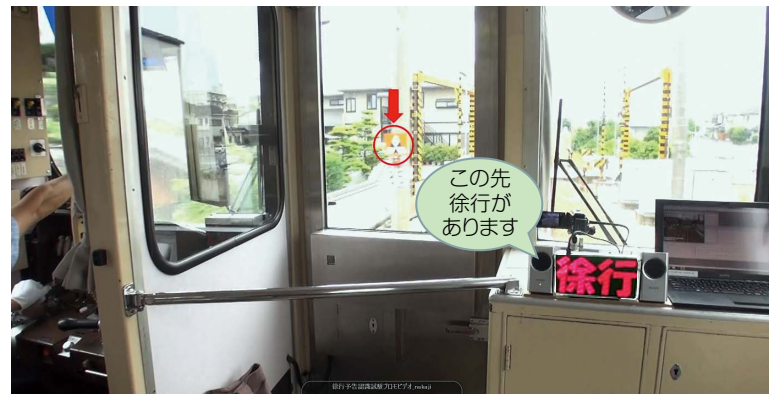


図6 プロトタイプ装置による実車(速度100km/h)での認識例

減速できない恐れがあります。徐行区間の十分手前に設置される図1 (b)の徐行予告信号機であれば、直近で検知したとしても確実に減速できますので、本研究では徐行予告信号機を認識対象としました。

徐行予告信号機の外周及び白黒模様の境界の輪郭を参照画像として登録し、入力画像中から参照画像を高速に探索するパターンマッチング手法を適用しました。物体の輝度ではなく、輪郭とその法線方向の輝度値の変化率に着目して探索するので、周囲の光に変化がある中でも安定した検出が行えます。

列車の進行に伴い信号機の大きさが見かけ上変化するうえ、傾いたりすることがあるので、定形のマッチングでは十分な性能が得られません。そこで、大きさ (Scale) については元画像の0.7～1.3倍を、回転 (Angle) に対しては垂直に対し $\pm 5^\circ$ の変化を許容して探索することで、複数の画像を登録することなく、見かけの変化に対応できる

ようにしました (図2)。

パターンマッチングにおける類似度計算は処理時間が非常にかかるので、多重解像度法による処理の高速化を検討しました。元画像に対して圧縮率を変えた画像を複数用意し (ピラミッド)、最も圧縮率の高い階層画像をピラミッドの最上レベルと定義します。また、参照画像も各階層毎に用意します。高いピラミッドレベルから探索し、候補が見つかったらその近傍のみ下のピラミッド画像へと渡していきます。ピラミッド画像を用いると、領域の絞り込みが行われるので、原画像に対して直接マッチングを実行するよりも探索速度が速くなります。また、信号機の建植位置に関する知識から、抽出したレールを基準に左右に設定した領域に探索範囲を限定しました (図3)。さらに軌間の知識を利用すると、前方の距離に応じて観察される参照画像の大きさが推定できるので、Scaleも限定されます。最終的に探索領域は約1/3

に、Scaleは約1/2にまで絞り込まれました。また、標識の下に付けられている制限速度板についても、OCRによる数字の読み取りが可能です (図4)。参照画像とのマッチング結果はスコアで評価し、図5に示すように0.73以上の得点で“検知”と判定しました。

ライブカメラ映像から記録映像まで、さまざまなシーンで認識試験を行った結果、308シーン中、強い西日や吹雪など9シーンについては未検知となりましたが、過剰に検知する誤検知は0でした。認識率は97.8%で、極端な環境条件でなければ、ほぼ正常に認識できることを示しました。最後にプロトタイプ装置を実車に搭載して、本線走行試験も実施しました。図6に示すように、認識結果は音声と電光表示板で運転士にアラーム表示しました。最も厳しい環境となった、雨天の夜間で速度100km/hという条件でも、正しく認識できることを確認しました。

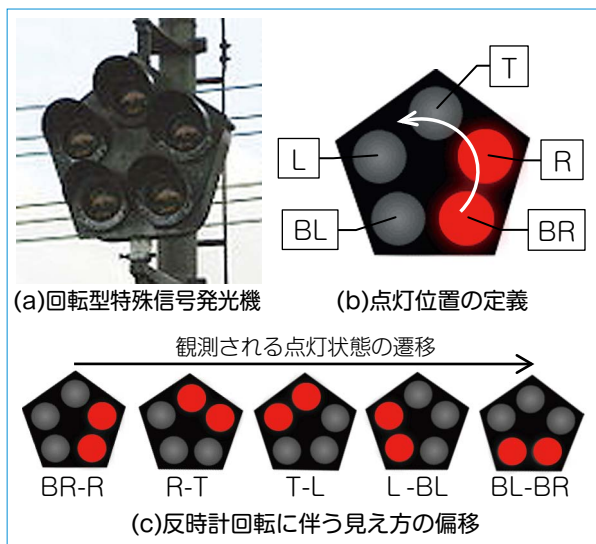


図7 特発の点灯パターンの遷移と状態定義

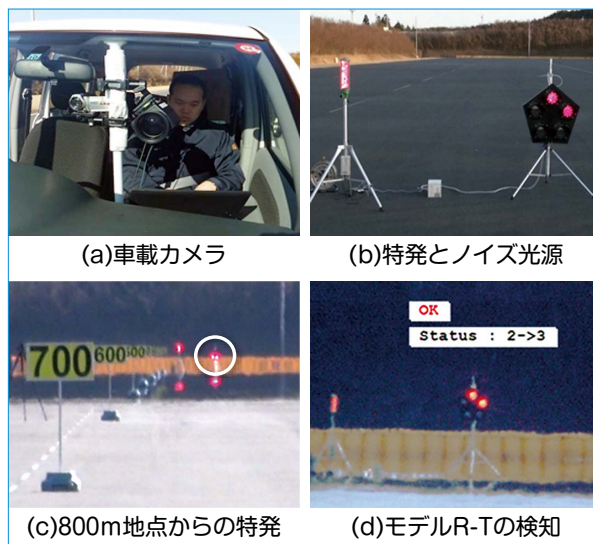


図8 フィールド試験結果

回転型特殊信号発光機の動作認識

回転型特殊信号発光機（以後、特発と呼ぶ。）は5灯の赤色灯を備え、緊急事態発生の際に2灯ずつ反時計回りに1回転約1秒で循環点灯するものです（図7）。運転士の前方確認を支援するため、濃淡と形状に着目したパターンマッチング手法を用いた画像認識アルゴリズムを開発しました。

特発は特徴的な形をしているので、その枠の検出を試みましたが、画像中のサイズが小さすぎて困難でした。そこで、赤灯位置に着目した5つのペアBR-R、R-T、T-L、L-BL、BL-BRを参照画像として登録しました。最初に、画像中の赤い部分（色相 $H \geq 140$ 以上）を候補領域として抽出します。この候補領域に対して、前述した多重解像度法によりマッチングを実行しました。また、BR-Rの次にR-Tが、R-Tの次にT-Lといったように、反時計回りの遷移が観測された場合は、スコアに加点しました。

実際の線路で昼間特発を動作させることは難しいので、テストコースを利用して検証試験を行いました。800mの距離からノイズ光源と併せて特発を動作させ、車載カメラで最高速度130km/hまでの映像を記録し、オフラインで解析を行いました。その結果、動的な条件では0～400mは75%以上、400m～600mは50%～75%程度の検

知率で、600m～800mは撮影画像条件によって認識できることがわかりました（図8）。静的な条件では、800mで80%以上の認識率が得られました。画像解像度 1920×1080 の処理時間は88ms、 2448×2050 の場合は130msとなり、実用的な時間で認識できる見込みを得ました。

点滅型特殊信号発光機の視認確認

特発の視認性（見通し）が確保されているかを確認するには赤灯を光らせる必要がありますが、異常時のみ点灯する信号機を、運転時間帯に光らせるのは実際困難です。一方、夜間の場合膨大な数の特発を手で検査する効率の問題、0～800mの間の連続的な視認の確認が困難であるなどの課題があります。そこで、運転時間帯でも列車運行に支障を与えず、かつ、定量的に確認する仕組みについて検討しました。

発光機側で肉眼では見えない近赤外線（940nmLED）を光らせ、それを車上で認識する方法を提案しました。最終的に波長940nmLEDを採用し、一般的な特発の拡散角度 $\pm 15^\circ$ より若干狭い拡散角度のLEDを選定しました。同一基板上に実装した視野の狭い光が見えるということは、 $\pm 15^\circ$ の角度範囲内にあるという理屈です。改良型特発のイメージを図9に示します。

940nmLEDを特定のパターンと周波数で点滅させ、これを近赤外線対応レンズ装着の近赤外線カメラで撮影し、映像を記録します。近赤外線カメラは、防振機能を備えたPan-Tilt雲台に搭載します。広角カメラ映像を処理して抽出したレールから求めた線路消失点を、ほぼ画面中央に捉えるように雲台装置を制御します（図10）。

まず隣接するフレームにおいて、点滅の位相変化に応じた2値化処理を行います。100fps程度的高速カメラで撮影すると、隣り合うフレームは10msの時間差しかありません。このため、たとえ移動車両から撮影したとしても、二つの画像はほぼ同じ画像になります。上記2値化処理画像同士の論理積により、常灯信号機や踏切警報灯などの外乱が除かれ、ターゲット領域のみが抽出されます。数種類の異なるパターンと周波数で発光する試験用特発を用いた検証試験により、周辺ノイズの影響を抑えて特発を認識できることを確認しました（図11）。

線路内障害物検出

線路内障害物を画像から認識するためには、レールの認識が不可欠です。カメラ近傍、つまり車両に近いレールは、天候の変化や周囲の光にあまり左右されず、比較的確実に観測されるうえ、そ

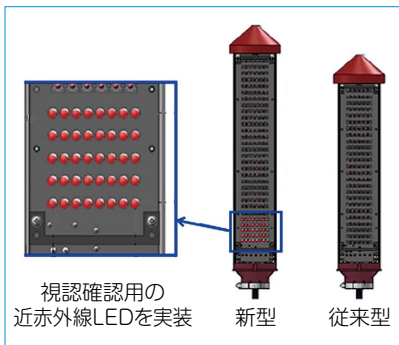


図9 視認確認用LEDを付加した発光装置



図10 車上装置の外観



図11 視認確認用LEDの認識結果

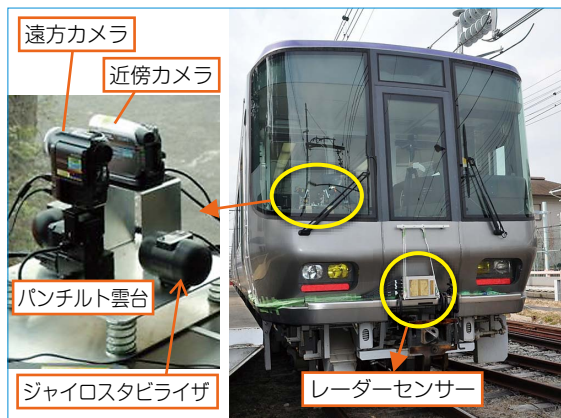


図12 センサー群を搭載した試験車



図13 障害物検知結果の画面表示例

の曲率は緩くほとんど直線的といえます。カメラからの距離が遠くなるにつれて2本のレール間隔は狭くなります。これらの知識をもとに、車両の近傍は予め用意した代表的なレールパターンに当てはめ、遠方は近距離で得られた情報から線形パターンを動的に生成し、短い直線や曲線の形状を情報処理しながら、遠方までレールを検出する手法を開発しました。本手法を実際の線路映像に適用した結果、雨天や逆光などの複雑な環境下でも、極端に視界が取れない状況を除いて、良好にレールを検出できることを確認しました。

標準的な画像処理手法の組み合わせだけで障害物を完全に検知することは困難です。そこで、それぞれ特徴的な処理を行う6つのサブモジュール（レールの連続性、特徴点抽出&追跡、背景輝度の平均値&分散、物体のエッジ&テクスチャー解析、オプティカルフロー特異値検出、赤外線映像解析）を用意し、各モジュールを並列的に動作させ、総合判定モジュールで最終的な障害物の

判定を行うようにしました。総合判定モジュールでは、画面を小領域に分割し、小領域毎に障害物判定結果を求めます。実験結果から、モジュールの種類に関わらず2つ以上のモジュールが障害物と判定した場所は、かなりの確度で障害物が確認できました。

画像センサーとレーダーセンサーの融合²⁾による検知性能向上についても検討し、所内試験線を用いて性能検証を行いました(図12)。横方向の分解能が高い画像センサーと、縦方向の分解能が高いレーダーセンサーの特長を活かして、両センサーの出力結果を重ね合わせることで、検知位置精度の向上が期待できます(図13)。また、ホーム転落のように、レーダーセンサーの検知の信頼性が高いと考えられる場合は、レーダーセンサーの出力データを重視することで、融合による検知性能の向上が期待できます。

おわりに

画像認識は“列車の走行安全を監視す

る電子の目”として、将来の自動運転システムや安全監視システムの要素技術として重要な機能を発揮するものと考えています。本稿では、車上型監視の例として信号機の認識を中心に紹介しましたが、画像認識を用いた前方監視は、検知対象の多様性と、状況や環境に応じた設定の可変性を有しているため、例えば色灯信号機に対する速度パターン作成や、分岐の制限速度の制御、停止位置目標に対する制御、さらには地上設備の位置データベースを車載カメラ映像から作成するなど、信号設備監視にとどまらず、運転支援やメンテナンス分野への展開も期待されます。[RRR]

文献

- 1) 鶴飼正人, ボグダン友幸那須, 長峯望: 光学画像センサによる列車前方の監視手法, 鉄道総研報告, Vol.26, No.7, pp29-34, 2012
- 2) 稲葉敬之, 鶴飼正人: 超分解能レーダと光学画像センサを融合した鉄道安全監視技術, 交通新聞特集, 2012年9月27日