

列車前方映像を用いた徐行予告信号機の認識手法

長 峯 望* 鵜 飼 正人*

Detection of Slow-Speed-Notifying Signal from Front View of Train

Nozomi NAGAMINE Masato UKAI

A slow-speed-notifying signal is a quite important component of railway signal system that is related with the train's safety. However, because detection of the slow-speed-notifying signal is depending on only the driver's eyes, and further a backup system such as ATS is not installed, the security of the train's safety is not complete. Therefore, in order to solve this problem, we have been developing a system based on image processing method, which uses pattern-matching algorithm. This system is able to detect slow-speed-notifying signals automatically from image sequences of front view of train, and gives an alarm to the drivers to assist them. In this paper, we describe the details of these fundamental algorithms and the results of prototype program's benchmark tests.

キーワード：徐行予告信号機，臨時信号機，列車前方映像，パターンマッチング，画像認識

1. はじめに

自動車分野におけるITSでは、予防安全、衝突安全に対し、画像処理を用いた実用化システムが多数報告されている。例えば、車両に接近する移動体の検知¹⁾や、車両周辺障害物検知²⁾、ステレオ視による前方障害物監視³⁾、白線検知⁴⁾、ドライブレコーダ画像からの先行車追跡⁵⁾など、視界補助から運転支援、さらには運転手の状態検知にわたり、様々な応用が進んでいる⁶⁾。一方、鉄道分野においては、常置信号機に対する防護に関しては自動列車停止装置(ATS)などの保安設備があるが、臨時信号機やその他の安全監視に対しては、基本的に運転士の目視確認に依存しており、特にシステム的な防護はされていないのが現状である。すなわち、運転士が徐行予告信号機や、徐行信号機に代表される臨時信号機を見落とす等のヒューマンエラーの発生が懸念される。

こういった問題を解決するために、我々は、臨時信号機確認に対する運転士へのバックアップとして、車載カメラと画像処理による臨時信号機の自動認識システムの開発を行っている。このシステムは列車運転台にカメラを取付け、運転士の目線に相当する列車前方映像をビデオ映像として計算機に取込む。取り込まれた映像からパターンマッチング等の画像処理を用いることで、目標物である臨時信号機を検出するというものである。

本稿ではこれらシステムの基本アルゴリズムと検証結果を中心に述べる。

2. 臨時信号機の認識について

2.1 現状の課題

臨時信号機とは、徐行予告信号機、徐行信号機、徐行解除信号機の総称であり、それぞれ図1(a)～(c)に示す。これらの臨時信号機は図2に示すように線路脇に建植され、運転士に前方区間の運転方法を指示するものである。また、徐行予告信号機は先行の徐行区間を予告するもので徐行区間の手前に設置され、徐行信号機と徐行解除信号機は徐行区間の始端と終端に設置される。このような臨時信号機は名称の通り、工事等で一時的に列車の速度を徐行に制限する必要がある箇所に臨時に設置されるものであり、外見上は標識のようであるが、正式な信号機として位置づけられている。

通常運行時においては、徐行信号機が設置されている徐行区間は「事前の示達」により運転士にあらかじめ通達されることになっている。ところが、長距離運行をする列車は、それぞれの地域で発生した輸送障害により、突発的な災害や臨時の工事、さらには事前の示達と異なるルートを走行することがあり、当該徐行区間を見落として走行することが懸念される。点呼時以降に発生した運行情報を運転士に伝達するために、自動車などで普及しているGPSを用いたナビゲーション技術を用いる手法が提案されているが、常に最新の示達情報(データベース)が必要であり、管理が煩雑となってしまう。

2.2 画像処理による徐行予告信号機の認識

前記のような課題に対して、車載カメラと画像処理によって徐行予告信号機の認識を行うことで、列車の位置

* 信号通信技術研究部(信号)

特集：信号通信技術

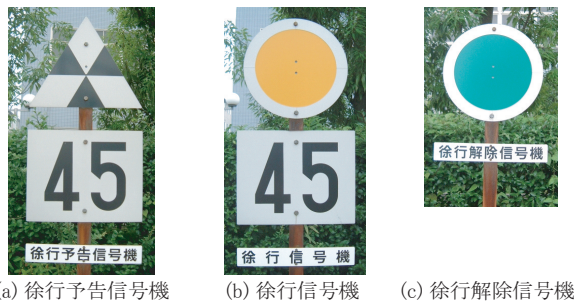


図1 臨時信号機



図2 線路脇に建植された徐行予告信号機

情報を用いずに運転士に対して車上のみで臨時信号機への対応支援が可能となる。これにより、列車の運転時刻や走行ルートなどに変更が発生しても、当初の目的である運転士への臨時信号機への注意喚起を行うことができる。

画像処理によって徐行予告信号機を認識しようとする場合には徐行区間までに確実に減速することが必要になる。これについては、徐行予告信号機の設置位置について、徐行信号機の現示位置から外方に数百m(例えば500m)以上を隔てた地点として、徐行予告信号を現示するものとされており、徐行予告信号機から徐行信号機までの距離は速度を徐行に落とす十分な距離が確保されている。

したがって、徐行予告信号機をその手前までに確実に検知できれば、運転士に対して注意喚起の警告を出し、運転士の制動操作により、徐行区間開始までに徐行速度まで減速することは可能であり、有効な運転支援システムを構築できる。

2.3 システムに要求される性能

画像処理を用いた徐行予告信号機を認識する本システムには以下のような性能が要求される。

- ・リアルタイム性 (車上でリアルタイムに処理する)
- ・信頼性 (誤検知, 検知漏れを少なくする)
- ・ロバスト性 (全天候に対応する)
- ・コンパクト性 (装置をコンパクトにする)
- ・通知機能 (検知結果を運転士に通知する)

例えばリアルタイム性に関して処理速度を見積ると、列車の最高速度を130km/hとした場合、1秒間に進む距

離は約36.1mとなる。画像処理の速度を秒間10コマとすると、進行方向の処理間隔ピッチは約10分の1の3.6mとなる。これは対象の信号機を撮り逃がさずに行える十分妥当な間隔であると考えられるので、目標処理速度を100msec以内とし、これらを要求仕様として、画像処理アルゴリズムの開発を行った。

3. 画像処理アルゴリズム

3.1 形状ベースパターンマッチング

列車前方を監視しているカメラからの入力画像から目的の対象物である徐行予告信号機を検出するために、物体の輪郭情報に着目した形状ベースパターンマッチングを適用した。一般的なパターンマッチングとは、あらかじめモデルとなる画像を参照画像としてメモリ空間に登録しておき、カメラからの入力画像を探索画像として、探索画像の中に参照画像と合致する領域があるかどうかを調べる画像処理手法である。パターンマッチングにおいて、参照画像と探索画像が合致しているとは、「探索画像中のある一部分において参照画像と同一の輝度値パターンがある程度の割合で存在している」ことを意味する。このように輝度情報に基づく本手法は、工場のラインのように照明条件が一定の環境の場合には有効であるが、屋外のように天候や時間帯で照明条件(照度)が変化する場合や、外乱(ノイズ)が多い環境では期待される結果が得られないことが多い。例えば図3(a)のような参照画像があった場合、赤線を探索画像とすると、図3(b)では正しく一致しているが、照明変化や外乱ノイズがある環境では図3(c)に示すように、画像中に正しい領域があるにもかかわらず間違った領域に誤検知する場合や、図3(d)のように暗い環境で照度が足りないために正しい領域であっても輝度値が一致せずに未検知となる場合がある。

このように、画像の輝度情報に基づいて探索を行う濃淡ベースのパターンマッチングでは、昼夜荒天を問わない、全天候での利用が想定される鉄道環境下では、輝度

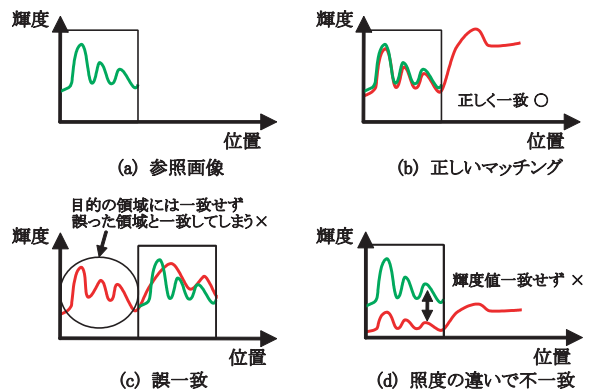


図3 濃淡ベースパターンマッチングの例

変化やコントラストの変化に対応できない。

鉄道環境において画像処理を適用するには、目的の物体が一部隠れている場合（オクルージョン）や、変形や傾きなどによる物体自体の見え方の変化や、雨等の外乱ノイズによる場合（クラッター）、さらには照明変化が非線形であっても目的の物体が検出されなければならない。

そこで、輝度値ではなく対象物の形状に着目することで、これらの問題の解決を図った。一般に、物体のエッジ（輪郭情報）は照明変化の影響を受けにくいことは古くから知られているため、物体の輪郭情報を取得し、輪郭情報に対してマッチングを行う形状ベースパターンマッチングを適用した。

本システムで用いる形状ベースパターンマッチングはカメラからの入力画像である探索画像、および参照画像に対して、Cannyの提案によるエッジ抽出手法⁷⁾を施し、そのエッジ情報を用いて次の(1)式に示すStegerによる正規化内積絶対和⁸⁾（以下、ASNDP: Absolute Sum of Normalized Dot Products）を用いてマッチングスコア（類似度）を計算することで図4に示す比較処理を行い探索画像の中から一致する領域の検出を行う。処理の概念を図4に示す。

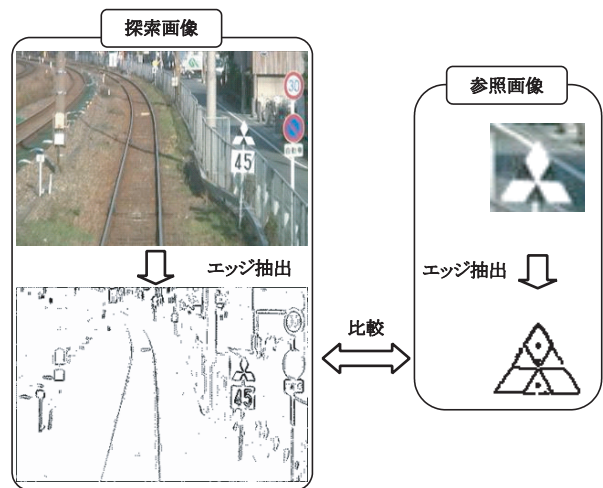


図4 形状ベースパターンマッチングの概念

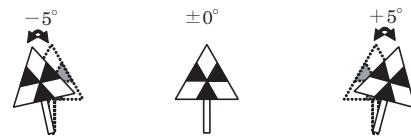


図5 回転に対するパラメータ

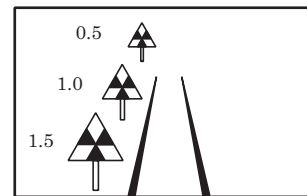


図6 拡大縮小に対するパラメータ

$$s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\langle d'_i, e_{q+p'} \rangle}{\|d'_i\| \cdot \|e_{q+p'}\|} \quad (1)$$

$$p' = Ap$$

$$d'_i = (A^{-1})^T d_i$$

$$A_i = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix}$$

d : 参照画像の輪郭の各点における方向ベクトル

e : 探索画像の輪郭の各点における方向ベクトル

p : 参照画像の輪郭の各点を表す点の集合

q : 画像の特定の点

A : 画像の回転や拡大縮小のための行列

さらに、列車の進行に伴い、ターゲットである徐行予告信号機の見かけ上の大きさが変化する上、車両動揺に伴う画像ブレ、カントによる傾き、信号機の設置向きや傾きのばらつき等、が画像上の見えの変化要因となる。そこでASNDPを計算する際に参照画像の存在位置や角度、スケールの変化を考慮し、回転に対しては±5度（図5）、縮尺変化に対しては、画面中央に映る大きさを標準参照画像とし、比率が0.5～1.5を観測範囲とした（図6）。

3.2 検知精度向上手法

本システムにおける基本的なアプローチには形状ベースパターンマッチングを用いるが、検知精度や処理速度の向上のために、下記に示す手法を適用した。

3.2.1 環境変化に適応する参照画像作成

全天候、昼夜問わず走行する鉄道環境においては、参照画像の登録に工夫が必要である。本システムの徐行予告信号機の場合は、濃淡がはっきりとした白と黒で構成されているため、日中の日差しが強い明るい環境においては図7(a)のように徐行予告信号機の白領域部と周辺との輝度差がなくなり、エッジが検出されなくなる恐れがある。また、夜間のように周囲の環境が暗い場合は、図7(b)のように、徐行予告信号機の黒領域部と周辺との境界がはっきりせず、同様にマッチング精度が悪くなる。このような状況下でのエッジ検出処理結果は、境界線が取得できないために図8(a), (b)のようになる。したがって、そのまま図8(c)のような徐行予告信号機全体のエッジを登録してしまうと、欠損部分のエッジがASNDPのスコアに影響を与え、高い値を得ることが出来ない。そこで、様々なシーンに対応できるように、これらのエッジの共通部分を取り、図8(d)のようなエッジを参照画像とした。このようにすることで天候や時間帯などの環境の変化に対しても頑強に検知ができるようになった。ただしその反面、登録パターンがシンプルとなったため、幾分過剰検知となるといった問題が発生す

特集：信号通信技術

るが、これに対する対策は、後節に示す時間軸上の連続性を考慮することで対応することとした。

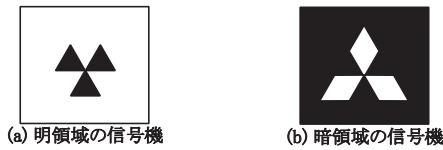


図7 環境変化における信号機の見え

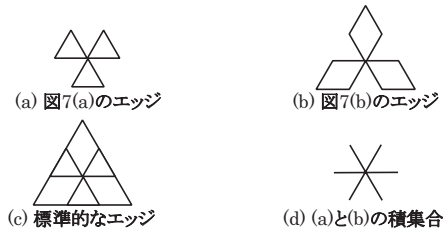


図8 参照画像のエッジ

3.2.2 環境変化に適応する探索画像からの輪郭抽出

実際の列車は、昼間の明るい環境や、曇りの薄暗い環境、夜間の暗闇等、さまざまな環境を走行する。そのため、徐行予告信号機のエッジを抽出する際に、一定の閾値を適用すると不都合が生じる。なぜなら、入力画像の明るさによって最適なエッジ抽出の閾値が異なるからである。実際の晴天の映像と夕方西日の映像の、各々の輝度値のヒストグラムを図9、図10に示す。それぞれの線路周辺領域を詳細に観察すると、晴天では映像全体が鮮やかでくっきりしており、コントラストが高いことが分かる。一方、夕方西日ではコントラストが悪く映像が見づらくなっている。これは西日による空の明るさに合わせてカメラの自動利得制御（AGC：Auto Gain Control）が働いているためである。晴天時のヒストグラムは単峰性であり、画面中の空領域と線路周辺領域の輝度分布の差異は比較的小さい。これに対して、夕方西日のヒストグラムは双峰性を示しており、空領域の輝度分布と線路周辺領域の輝度分布が分かれていることが分かる。このため、線路周辺領域の輝度分布の分散値が低くなり、コントラストが悪くなる。最悪の場合、図12のようにコントラストがはっきりでないため、目的のエッジが取れないことがある。

これらの条件に適応してパターンマッチングの際にエッジを取得しなければならない。そこで、シーンごとの輝度ヒストグラムを用いて、画像を補正することで、最適なエッジを得る。ヒストグラムが単峰性の場合には分布係数 $N(\mu, \sigma)$ の正規分布を、双峰性を有している場合には、低い峰を近似する分布係数 $N(\mu, \sigma)$ の正規分布を求め、求めた分布係数を元に図11の赤線で示すような入力輝度を横軸に、出力輝度を右縦軸とするLUT (Look Up Table) を作成し、これに従い映像を補正した。補正前後の映像を図12、図13に示す。LUTとは画像のコントラストや明るさを改善するための処理などに用いられる入出力テーブルであり、入力輝度に対してテーブルにより割り当てられた輝

度を出力することで、画像のコントラストや明るさを変更する。これを用いることで、逆光のように得られる映像のコントラストが低い環境でも、認識ができるようになった。

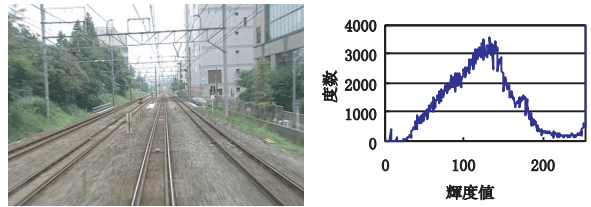


図9 明るいシーンとその輝度ヒストグラム



図10 暗いシーンとその輝度ヒストグラム

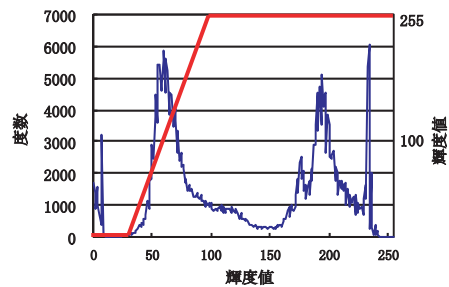


図11 LUT

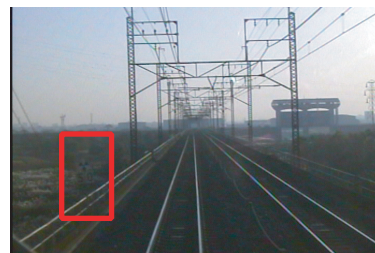


図12 LUTによる補正前



図13 LUTによる補正後

3.2.3 多重解像度法による高速化

マッチングのための、探索画像と参照画像との類似度計算の負荷は高いので、一般的に多くの処理時間を要する。そのため、リアルタイム性が要求される本システムでは、徐行予告信号機は画像を縮小しても形状はそれほ

ど変化しないことに着目し、多重解像度法を適用した。

多重解像度法とは、入力画像を低い解像度から高い解像度まで数段階の解像度で表現（ピラミッド階層表現）し、各階層で検出されるエッジの対応関係を利用して効率的に問題を解く方法である（図14）。幅M、高さNの入力画像中の(x, y)座標における輝度値cを式(2)に示される関数fで表すと、一段上の解像度画像は式(3)で表され、n段上の解像度画像は式(4)で表される。解像度が低くなるほどデータ量が少なくなるので、低い解像度で探索を行いおおよその位置を求め、その位置を次の解像度での探索の初期値とすることで、計算時間の削減が図られる。解像度画像の階層が一段違うと画像の面積が1/4になるので、計算量は1/16になる。本システムでは階層の段数を4段としたので、計算量は最大で4096分の1に削減される。これにより処理速度の高速化を実現した。

$$f^0(x,y) = \begin{cases} c_{00} & 0 \leq x < 1 & 0 \leq y < 1 \\ c_{01} & 0 \leq x < 1 & 1 \leq y < 2 \\ \vdots & & \\ c_{M-1,N-1} & M-1 \leq x < M & N-1 \leq y < N \end{cases} \quad (2)$$

$$f^1(x,y) = \begin{cases} c_{00}^{(1)} (= (c_{00} + c_{01} + c_{10} + c_{11})/4) & 0 \leq x < 2 & 0 \leq y < 2 \\ c_{01}^{(1)} (= (c_{02} + c_{03} + c_{12} + c_{13})/4) & 0 \leq x < 2 & 2 \leq y < 4 \\ \vdots & & \\ c_{M-1,N-1}^{(1)} & M-1 \leq x < M & N-1 \leq y < N \end{cases} \quad (3)$$

$$f^n(x,y) = c_{00}^{(n)} (= \frac{c_{00}^{(n-1)} + c_{01}^{(n-1)} + c_{10}^{(n-1)} + c_{11}^{(n-1)}}{4}) \quad (4)$$

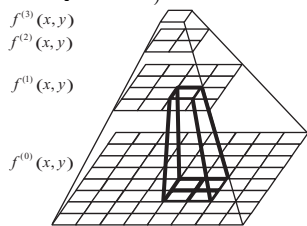


図14 多重解像度法のイメージ

3.2.4 探索領域絞込みによる高速化

さらに、計算量を削減するために、探索領域の絞込みを行った。本システムで使用する列車前方映像では必ず自走行レールが画面中に映っているため、このような線路空間固有の知識を利用して探索領域の絞込みを行った。局所的な平均画像を閾値画像として用いる動的閾値法により自分の走行するレールを検出した上で、「信号機は建築限界の外側に建てられている」という知識を利用して、検出したレールを基準に信号機の建植範囲を推定し、探索領域の絞り込みを行った。さらに、軌間が1,067mmであるという知識を利用し、前方距離に応じて観察される参照画像の大きさを動的に推定することで、スケールに関して探索時間の短縮を図った。これらの手法を適用することにより、探索領域を約3分の1に、探索スケール数を約半分に絞り込むことで、処理の高速化を実現した。探索領域絞込み結果を図15に示す。赤線と青線が検出したレールであり、緑線で囲んだ領域が絞り込まれた探索領域である。

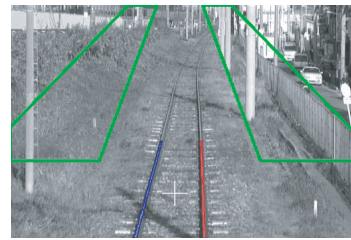


図15 レール抽出による探索領域の絞込み

3.2.5 状態遷移に着目した検知確度の向上

誤検知に対応するために、時系列での検知状態の遷移に着目し、検知確度の向上を目指した。最初に検知した1フレームを信号機「候補」検出とし、検知位置を記憶する。引き続き連続3フレーム検知した場合を「注意」とし状態を遷移させる。さらに連続5フレーム検知した場合を信号機の「確定」な検出と判断し状態を遷移させ、画面上に徐行予告信号機を緑、黄、赤の順番で囲み表示させた。この状態遷移に基づき「確定」の状態に遷移した場合にのみ検出とすることで、信頼性及び確度の向上を図った。この状態遷移を図16示す。

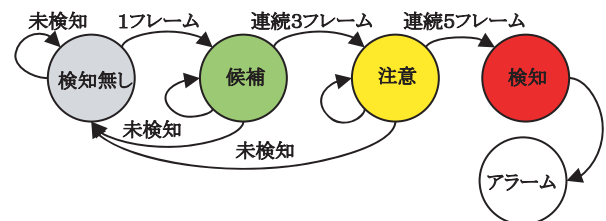


図16 検知の状態遷移

4. 検証試験と結果

開発した徐行予告信号機の認識アルゴリズムを検証するために、鉄道総研構内のループ線やJR営業線を使用して、晴天昼～夕方、雨天夕方について、延べ308シーンについて、システムの検証試験を行った。システムが徐行予告信号機を検出した際の例を図17に、当該試番における検知結果として、マッチングスコアの推移を図18に示す。この試番では、3本徐行予告信号機を建植している。横軸は走行開始からの経過時間であり、破線で丸く囲んだ部分が徐行予告信号機を検出した箇所である。検出時のマッチングスコアはおおよそ0.7から0.9を示しており、徐行予告信号機が画面に映っていないシーンではマッチングスコアは0.5付近で推移していることが分かった。その他の試番の映像においても大体このような傾向が見られたことから、マッチングスコアの閾値を0.7と決定した。

検証試験の結果として、308シーン中299シーンで正常に徐行予告を検知し、降雪や降雨の激しい状況下の9シーンで未検知、誤検知は0シーンであり、検知率は97.08%であった。

特集：信号通信技術



図 17 走行試験の結果（ループ線）

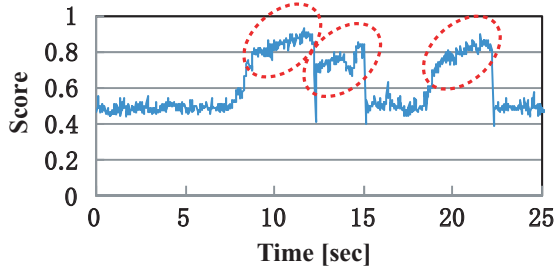


図 18 走行試験のマッチングスコア

5. 速度制限板の読取り

検出された徐行予告信号機は、座標位置と共に見かけ上の大きさ（スケール）が求められ、さらに速度制限板と徐行予告信号機の位置関係は既知であるので、徐行予告信号機の大きさに応じた速度制限板のサイズ及び位置が相対的に求められる（図19）。求められた領域に対してOCRによる文字認識技術を用い、数字の読取りを行った。描画されている文字の書体が規定されており、数字2桁という単純なパターンであるため、徐行予告信号機を通過する10数シーンでの検証試験においては全て正しく読取ることができた。速度読み取りの一例を図20に示す。

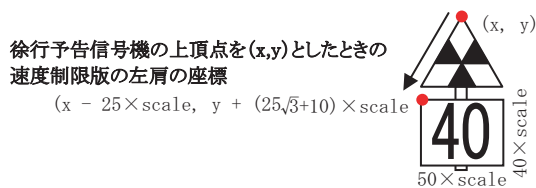


図 19 文字読取のための相対位置

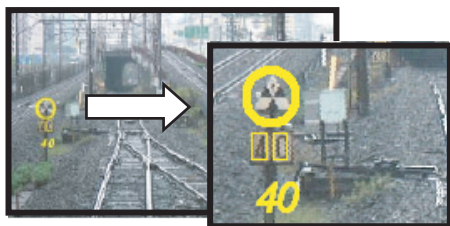


図 20 文字読取の結果

6. おわりに

列車前方映像から画像処理を用いて徐行予告信号機を

認識することで、運転士をバックアップする方法を提案した。このための画像処理アルゴリズムを設計し、実映像による検証を通じて、通常的环境下においては適用が可能である見通しを得た。今後、降雪のシーンを含む、夜間・雨天・降雪・濃霧等の劣悪な環境下での検知性能の評価と、これに対応するためのアルゴリズムの改良を進め、長期的なシステムの性能評価を行う予定である。

今回は徐行予告信号機を対象として研究開発を行ったが、このような画像処理を用いた前方監視技術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、様々な信号標識等に適用が可能である。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、特殊信号に対する警告、障害物の認識など、様々な運転支援への適用の可能性が考えられる。

文献

- 1) G. O. Wei, W. Brauer, G. Hirzinger, "Intensity-and Gradient-Based Stereo Matching Using Hierarchical Gaussian Basis Functions", IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 20, pp. 1143-1160, 1998.
- 2) M. Szarvas, A. Yoshizawa, M. Yamamoto, J. Ogata, "Pedestrian detection with convolutional neural network", In Proceedings IEEE Intelligent Vehicle Symposium, Las Vegas, USA (IV2005)
- 3) R. Labayrade, D. Aubert, J.P. Tarel, "Real Time Obstacle Detection on Non Flat Road Geometry through V-Disparity Representation", IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Versailles, June 2002.
- 4) 中山啓満, 窪田進 等:「逆投影画像上での候補追跡処理による白線検出」, 電子情報通信学会研究報告, Vol. 101, No. 302, pp. 15-22, PRMU2001-87, (2001)
- 5) 榎田修一, 林豊洋 等:「パーティクルフィルタによるドライブレコーダ中の先行車追跡」, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 107, No. 57, pp. 35-40, PRMU, 2007.
- 6) 松村彰二, 門司竜彦 等:「画像認識技術の自動車応用」, ビジョン技術の実利用ワークショップ (ViEW2007), E-1K, pp. 205-208, (2007,12)
- 7) J. Canny, "A Computational Approach to Edge Detection," IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 8, No. 6, pp. 679-714, 1986.
- 8) Carsten Steger, "Similarity Measures for Occlusion, Clutter, and Illumination Invariant Object Recognition"; Proceedings of the 23rd DAGM-Symposium on Pattern Recognition, Lecture Notes In Computer Science, Vol.2191, pp. 148-154, 2001.