

列車前方映像を用いた踏切保安設備の
保全および施工の効率化

2016年 3月

長峯 望

列車前方映像を用いた踏切保安設備の
保全および施工の効率化

長峯 望

システム情報工学研究科

筑波大学

2016年 3月

目次

| | | |
|-------|-----------------------|----|
| 第1章 | 序論 | 1 |
| 1.1 | 研究の背景 | 1 |
| 1.2 | 踏切の種類 | 4 |
| 1.3 | 踏切制御と主な踏切保安設備 | 5 |
| 1.4 | 踏切における列車防護 | 6 |
| 1.5 | 特殊信号発光機 | 7 |
| 1.6 | 特殊信号発光機の見通しに対する問題と対策 | 9 |
| 1.7 | 踏切支障報知装置の増設による安全性の向上 | 10 |
| 1.8 | 無線を用いた列車制御システム | 11 |
| 1.9 | 鉄道における情報通信技術の活用 | 12 |
| 1.10 | 研究の目的 | 13 |
| 1.11 | 本論文の構成 | 14 |
| 第2章 | 列車前方監視のためのカメラ視野制御 | 16 |
| 2.1 | はじめに | 16 |
| 2.2 | 関連研究 | 19 |
| 2.3 | 本研究で用いる画像処理手法 | 21 |
| 2.3.1 | Cannyによるエッジ抽出 | 21 |
| 2.3.2 | Chamfer Matching | 24 |
| 2.4 | 線路空間モデルに基づくレール抽出技術 | 25 |
| 2.4.1 | 近傍領域のレール抽出アルゴリズム | 27 |
| 2.4.2 | 遠方領域のレール抽出アルゴリズム | 30 |
| 2.5 | 過去の推定値を考慮した消失点抽出 | 34 |
| 2.6 | 選択条件に制約を用いた近傍レール抽出 | 38 |
| 2.7 | 検証試験 | 42 |
| 2.7.1 | 消失点抽出の検証 | 42 |
| 2.7.2 | 選択条件に制約を用いたレール抽出の検証 | 44 |
| 2.7.3 | 考察 | 45 |
| 2.8 | 遠方の抽出レール形状の精度向上 | 46 |
| 2.8.1 | レール抽出 | 47 |
| 2.8.2 | 画面レールと実空間レール上の節点データ作成 | 48 |
| 2.8.3 | レール上の節点までの距離データ作成 | 49 |
| 2.8.4 | レール上の節点の整理 | 51 |
| 2.8.5 | レールセンタライン節点の設定 | 52 |
| 2.8.6 | レール曲率による節点の補正 | 53 |
| 2.8.7 | 左右レール幅によるレール節点の補正 | 56 |
| 2.8.8 | 検証試験 | 57 |
| 2.9 | まとめと今後の課題 | 59 |
| 2.9.1 | まとめ | 59 |

| | | |
|-------|----------------------------------|-----|
| 2.9.2 | 今後の課題 | 60 |
| 第3章 | 視認性を検査する手法 | 61 |
| 3.1 | はじめに | 61 |
| 3.2 | 特殊信号発光機の視認性確認について | 62 |
| 3.3 | 検査の現状と視認性確認のための基本構成 | 63 |
| 3.3.1 | 特殊信号発光機の検査の現状 | 63 |
| 3.3.2 | 要求仕様の整理 | 64 |
| 3.3.3 | 提案手法 | 65 |
| 3.3.4 | 車上検出方式 | 67 |
| 3.4 | 近赤外線 LED の選定 | 68 |
| 3.5 | 点滅パターンと画像認識アルゴリズム | 72 |
| 3.6 | カメラと近赤外線 LED の同期 | 76 |
| 3.7 | 近赤外線カメラの視野制御 | 77 |
| 3.7.1 | 視野制御の必要性 | 77 |
| 3.7.2 | レール抽出アルゴリズム | 79 |
| 3.7.3 | 視野制御方法と雲台の構成 | 81 |
| 3.8 | 隣接設置環境における検知性能確認試験 | 82 |
| 3.9 | 現車試験 | 86 |
| 3.10 | 季節および時間帯による検知性能評価 | 91 |
| 3.11 | 具体的制御方式と回路構成 | 93 |
| 3.12 | 経年劣化と検知性能について | 95 |
| 3.13 | 他設備への影響について | 99 |
| 3.14 | おわりに | 102 |
| 第4章 | 地上設備の視覚シミュレーション手法 | 103 |
| 4.1 | はじめに | 103 |
| 4.2 | 関連研究 | 104 |
| 4.3 | 機能構成 | 105 |
| 4.4 | 用いる座標系 | 106 |
| 4.4.1 | キロ程座標系 | 106 |
| 4.4.2 | 列車基準座標系 | 106 |
| 4.4.3 | 前方撮影画像基準座標系 | 107 |
| 4.5 | 前方撮影画像に対するキロ程算出 | 108 |
| 4.5.1 | 前方撮影画像の俯瞰化 | 108 |
| 4.5.2 | 画像フレーム-画素単位速度計測 | 111 |
| 4.5.3 | カルマンフィルタによる画像フレーム-画素単位速度の補正 | 114 |
| 4.5.4 | 画像フレーム-画素単位距離算出 | 116 |
| 4.5.5 | 設備位置とフレームの参照データ作成 | 117 |
| 4.6 | 前方撮影画像内のレール抽出と座標変換 | 118 |
| 4.6.1 | レール抽出 | 119 |
| 4.6.2 | 座標変換 | 120 |
| 4.6.3 | 前方撮影画像基準座標系から列車基準座標系への変換 F | 121 |
| 4.6.4 | 列車基準座標系から前方撮影画像基準座標系への変換 $F - 1$ | 122 |

| | | |
|-------|----------------------------------|-----|
| 4.6.5 | 画像フレーム-レール位置データ | 124 |
| 4.7 | 「地上設備位置の前方撮影画像座標系への変換」と「地上設備の表示」 | 128 |
| 4.8 | 具体的適用例 | 130 |
| 4.9 | シミュレーション手法の精度検証 | 131 |
| 4.10 | まとめ | 137 |
| 第5章 | 結論 | 138 |
| 5.1 | 本研究の要約 | 141 |
| 5.2 | 今後の課題と展望 | 143 |
| | 謝辞 | 150 |
| | 発表論文 | 151 |
| | 査読付き学術論文 | 151 |
| | 査読付き国際会議論文 | 151 |
| | 口頭発表 | 152 |
| | その他諸報告 | 153 |

目次

| | | |
|------|--------------------------------|----|
| 図 1 | 踏切道数と踏切事故件数 | 2 |
| 図 2 | 踏切道数の推移 | 2 |
| 図 3 | 踏切支障報知装置の設置数と事故件数 | 3 |
| 図 4 | 各種踏切道のイメージ | 4 |
| 図 5 | 踏切警報機の例 | 5 |
| 図 6 | 踏切支障報知装置（操作器）の例 | 6 |
| 図 7 | 特殊信号発光機（点滅形） | 7 |
| 図 8 | 特殊信号発光機の設置の例 | 8 |
| 図 9 | カメラ視野制御装置の構成 | 17 |
| 図 10 | カメラ視野制御システムによる広角カメラ映像と望遠カメラ映像 | 18 |
| 図 11 | レール抽出が困難な例 | 20 |
| 図 12 | 列車前方映像に Canny によるエッジ抽出を適用した例 | 23 |
| 図 13 | 距離変換画像の例 | 24 |
| 図 14 | Hough 変換によるレール抽出の例 | 25 |
| 図 15 | Sobel エッジによるレール抽出の例 | 26 |
| 図 16 | 近傍領域のレールパターンの例 | 27 |
| 図 17 | Chamfer 距離の例 | 28 |
| 図 18 | 近傍領域における登録したレールパターンのマッチングの例 | 28 |
| 図 19 | 遠方領域のレール抽出アルゴリズム | 32 |
| 図 20 | レール抽出の結果を含んだ各ビデオ映像からの画像 | 33 |
| 図 21 | クロソイド曲線の例 | 33 |
| 図 22 | レール抽出による消失点 | 34 |
| 図 23 | 消失点抽出結果の問題点 | 35 |
| 図 24 | レール抽出アルゴリズムの問題 | 38 |
| 図 25 | レールパターンデータ | 39 |
| 図 26 | レール中心線の近似 | 40 |
| 図 27 | 類似度行列による制約の設定 | 41 |
| 図 28 | 改良前と改良後の消失点座標 | 43 |
| 図 29 | レール抽出データ | 47 |
| 図 30 | 画面レール上の節点データ | 48 |
| 図 31 | 画面レールと実空間レール上の節点データ作成 | 48 |
| 図 32 | レール上の節点までの距離データ作成 | 50 |
| 図 33 | レール上の節点の整理 | 51 |
| 図 34 | レールセンタライン節点の設定 | 52 |
| 図 35 | レール曲率の算出 | 53 |
| 図 36 | 線路の曲率半径と曲率 $\Delta\theta$ との関係 | 54 |
| 図 37 | $Rc''i$ の求め方 | 55 |
| 図 38 | 実空間レール上の整列補正点群データ | 56 |
| 図 39 | 改良前の曲率 $\cos\Delta\theta$ | 57 |

| | | |
|------|-----------------------------------|-----|
| 図 40 | 改良後の曲率 $\cos\Delta\theta$ | 58 |
| 図 41 | 特殊信号発光機（点滅形）と特殊信号発光機（回転形） | 62 |
| 図 42 | 提案手法の概念図 | 66 |
| 図 43 | 比較試験の様子 | 68 |
| 図 44 | LED の波長と受光面積 | 69 |
| 図 45 | LED 種別・条件毎の近赤外線カメラ画像 | 69 |
| 図 46 | 相対放射強度 | 71 |
| 図 47 | 符号化の概念図 | 72 |
| 図 48 | 画像処理による復号の様子 | 75 |
| 図 49 | サンプリング間隔・シャッター速度と受光輝度の関係 | 76 |
| 図 50 | 曲線区間において視野が外れる様子 | 78 |
| 図 51 | レール抽出の結果 | 79 |
| 図 52 | レール抽出が失敗した例 | 80 |
| 図 53 | 視野制御雲台のキャリブレーション画面 | 81 |
| 図 54 | 測定環境 | 83 |
| 図 55 | 点滅パターンの例 | 83 |
| 図 56 | 約 750m 地点の画像処理結果の例 | 84 |
| 図 57 | 各発光機の受光データ | 85 |
| 図 58 | カメラの感度特性 | 87 |
| 図 59 | 試作した発光機の仮設の様子 | 87 |
| 図 60 | 車上装置 | 88 |
| 図 61 | システムが視認性を検知している様子 | 89 |
| 図 62 | キロ程と視認性結果 | 90 |
| 図 63 | 天候と視認性結果 | 91 |
| 図 64 | 日照率と特殊信号発光機から検知開始点までの距離の関係 | 92 |
| 図 65 | 現行品と開発品の比較 | 94 |
| 図 66 | 踏切器具箱内での結線を考慮した具体的回路構成 | 94 |
| 図 67 | 視認性試験の特殊信号発光機設置状況 | 97 |
| 図 68 | 視認性試験の近赤外線カメラ撮影画像 | 97 |
| 図 69 | プランクの放射式による波長と温度によるエネルギーの関係 | 98 |
| 図 70 | 近赤外線 LED スペクトル分布特性 | 99 |
| 図 71 | 大型支障物検知装置への影響評価試験風景 | 100 |
| 図 72 | 踏切障害物検知装置（3DLR 式）への影響評価試験風景 | 101 |
| 図 73 | 保守用車踏切制御装置への影響評価試験風景 | 101 |
| 図 74 | 列車基準座標系 | 107 |
| 図 75 | 画像の俯瞰化 | 110 |
| 図 76 | 速度計測方法の概要 | 111 |
| 図 77 | 距離データの作成 | 117 |
| 図 78 | 列車基準座標系と画面基準座標系の記号 | 120 |
| 図 79 | 画面レール上の節点データ | 124 |
| 図 80 | 画面レール上と実空間上の節点データ作成 | 124 |
| 図 81 | 距離データから節点の作成 | 125 |

| | | |
|------|--------------------------|-----|
| 図 82 | 立会いの様子 | 130 |
| 図 83 | 画像相関による速度算出結果（1 駅間分） | 131 |
| 図 84 | カルマンフィルタによる推定速度（1 駅間分） | 132 |
| 図 85 | 位置補正として登録した地上子 | 133 |
| 図 86 | 列車前方映像への特殊信号発光機の表示結果その 1 | 134 |
| 図 87 | 列車前方映像への特殊信号発光機の表示結果その 2 | 135 |
| 図 88 | 建築限界を表示した例 | 136 |

表目次

| | | |
|-----|-----------------------|----|
| 表 1 | レールパターンの状態遷移回数比 | 44 |
| 表 2 | XC-EI50 の仕様 | 86 |
| 表 3 | 使用制限による減衰到達年数 | 95 |
| 表 4 | 放射強度 100%時の検知率 | 96 |
| 表 5 | 放射強度 70%時の検知率 | 96 |
| 表 6 | 放射強度 50%時の検知率 | 96 |

第1章 序論

1.1 研究の背景

鉄道運転事故のうち、半数は踏切傷害事故が占めており、輸送障害などによって社会へあたる影響は大きなものとなっている。これらの踏切事故の撲滅を目指して鉄道関係者は種々の施策を講じている。根本的な解決策としては、踏切をなくすことであり、各鉄道事業者では、立体交差化や、統廃合により踏切数を減らすといった対策や、踏切障害物検知装置をはじめとした踏切保安装置の整備を推進することによって安全の確保に努め、事故削減を図ってきている。しかし、全国に約 33000 箇所ある踏切の全てを取り除くことは現実的には不可能である。

踏切の数に着目すると、2004 年の時点で東京都内には約 1200 箇所の踏切が存在する。これに対して他国と比較すると、ニューヨークでは 113 箇所、パリでは 14 箇所、ロンドンでは 19 箇所、ベルリンでは 12 箇所となっている[1]。面積当たりの踏切密度では、東京都は他国の数十倍踏切数が多い。したがって、他国と比較しても踏切の安全対策は重要なものであると言える。

図 1 に 1980 年～2012 年までの踏切道数と踏切事故件数の推移を、図 2 に踏切道全体数と第 1 種、第 3 種、第 4 種ごとの踏切道数の推移を示す*。立体交差化および統廃合による踏切道数の減少に伴い、踏切事故の件数は減少しては減少してはいるものの近年ではほぼ横ばいの傾向である。また、踏切事故の減少には、第 3 種、第 4 種の踏切道の第 1 種化が寄与していると考えられる。ここで、第 1 種は、「自動踏切遮断機を設置するかまたは踏切保安係を配置して、遮断機を閉じて道路を遮断するもの」を表し、第 3 種「踏切警報機を設置して列車等の接近を知らせるもの」を表し、第 4 種は「第 1 種から第 3 種以外の踏切」を表す。詳細は次節に述べる。

次に、2006 年度から 2012 年度までの踏切支障報知装置の数と踏切事故全体の数を図 3 に示す*。踏切支障報知装置のみによる効果とは言えないが、支障報知装置の設置率を高めることが事故件数減少に少なからず効果があることが伺える。

* 国土交通省が公開している統計・データ「鉄軌道輸送の安全にかかわる情報の公表について」(http://www.mlit.go.jp/tetudo/tetudo_tk8_000001.html)より著者が作成。

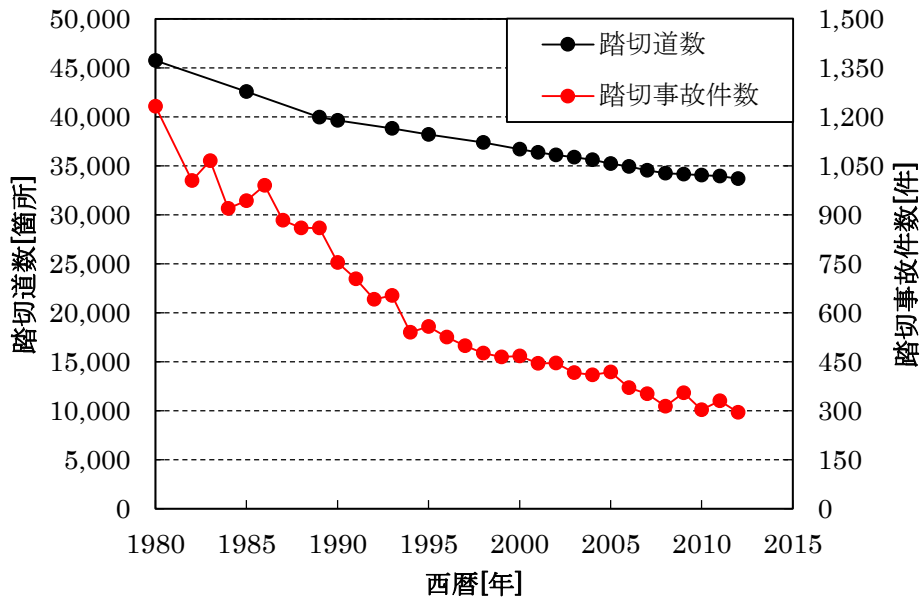


図 1 踏切道数と踏切事故件数

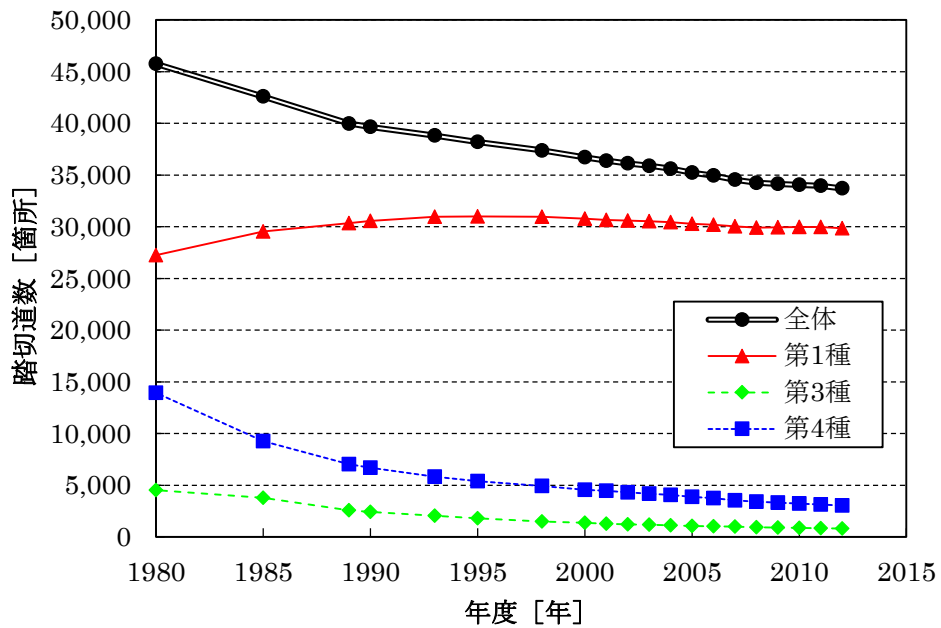


図 2 踏切道数の推移

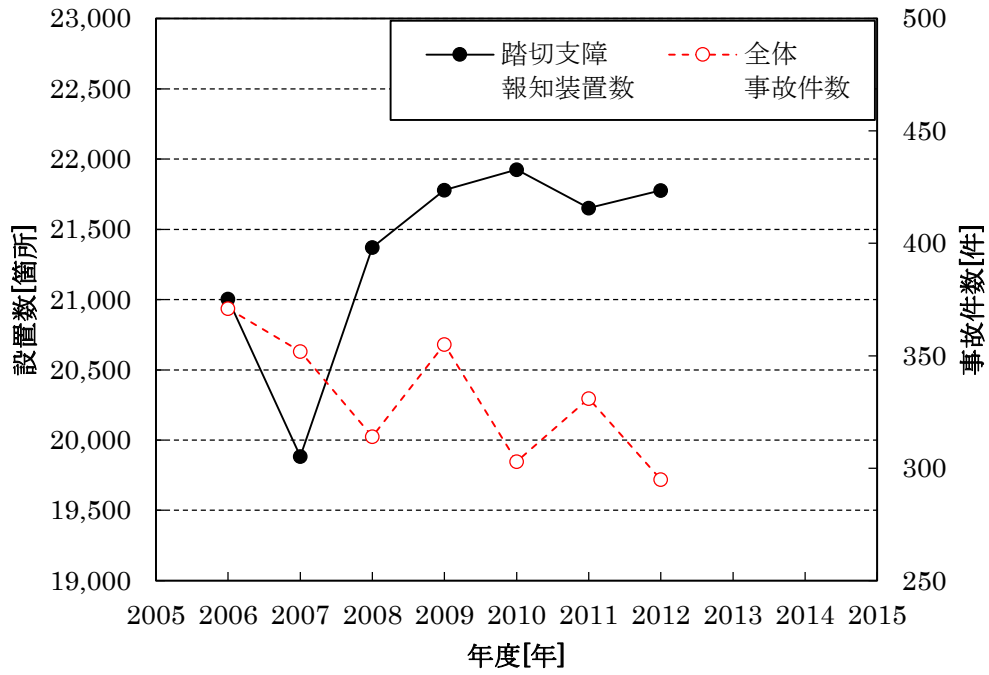


図 3 踏切支障報知装置の設置数と事故件数

1.2 踏切の種類

踏切道は、設備や遮断の仕方により次の4種に分類される[2]。

- 第1種： 自動踏切遮断機を設置するかまたは踏切保安係を配置して、遮断機を閉じて道路を遮断するもの。
- 第2種： 時間によって踏切を開閉する者を配置し、道路を遮断するもの。
- 第3種： 踏切警報機を設置して列車等の接近を知らせるもの。
- 第4種： 第1種から第3種以外の踏切。踏切警標や踏切注意柵等が設置されている場合が多いが、踏切保安装置は設けられていない。

それぞれの種別のイメージの一例を図4に示す。なお、第2種は現在、国内には存在しない。

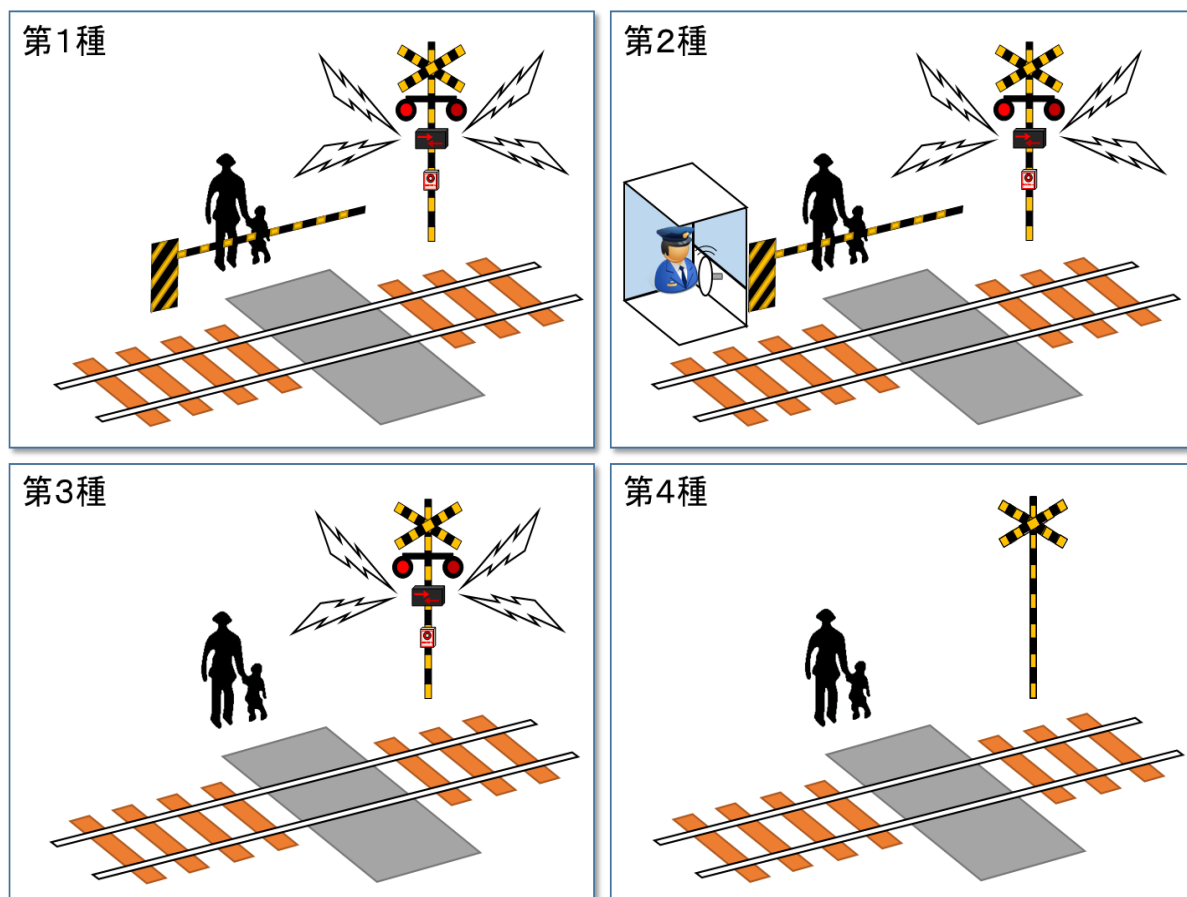


図4 各種踏切道のイメージ

1.3 踏切制御と主な踏切保安設備

踏切制御とおもな踏切保安設備について説明する。

踏切制御の主な流れとしては、列車検知装置により列車が踏切道に接近したことを検知し、踏切警報機の警報灯を点滅させ警報音が発せられる。しばらくすると踏切遮断機が降下を開始し、1組遮断の場合は5~8秒程度で遮断が完了する。その後、標準20秒程度で列車が踏切道に到達し、列車が踏切道を通過し終わったことを検知すると、警報灯、警報音の動作を停止させ、遮断機を上昇させる。

踏切遮断機とは、遮断桿と言われる竿により道路交通を遮断するものであり、遮断桿を1本で遮断する「直桿式」、上昇時に中間部で折れ曲がる「屈折式」、遮断桿を2本で遮断する「直桿2段式」などがある。また、ワイヤーを上昇させて道路交通と遮断する「昇開式」がある。

踏切警報機とは、踏切の存在を示す踏切警標、交互に点滅する2灯1組の踏切警報灯、踏切警報音を発するスピーカー、列車の進行方向を表示する列車進行方向指示器、必要により、踏切支障報知装置（操作器）、これらを取り付けるための警報機柱で構成される。基本的に踏切道に向かって左に設置される。また、省令の解釈基準では、踏切道から45m離れた地点で確認できることが原則となっている。踏切警報機の例を

図5に示す。

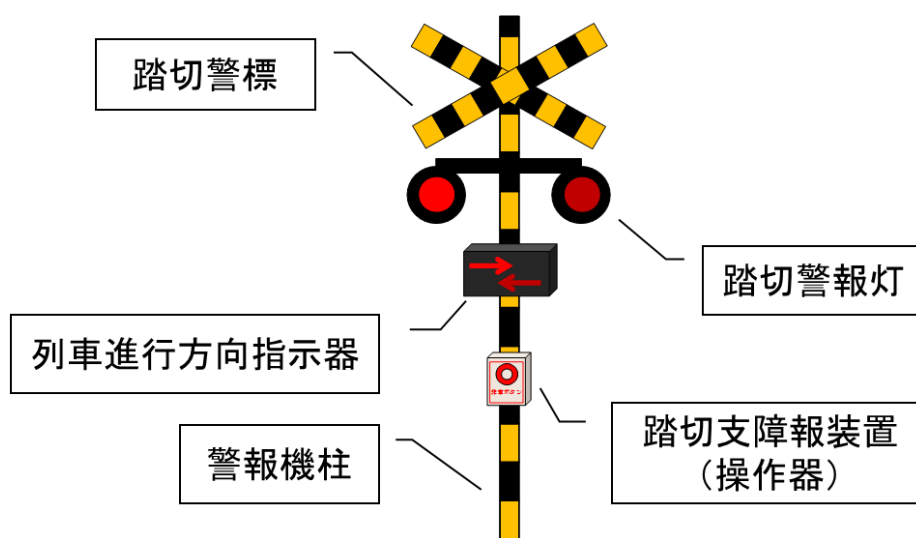


図5 踏切警報機の例

1.4 踏切における列車防護

自動車などが踏切に滞留したとき、何らかの手段でそれを検知し、列車に報知して衝突を回避する必要がある。自動車の滞留などの踏切支障を検知する手段として、通行人による操作器（押しボタン）の操作（図 6）と、踏切障害物検知装置による自動検知がある。これらは踏切支障報知装置として分類されている。この押しボタンについては、操作器や踏切非常ボタンと呼ばれることもある。踏切支障を検知した際には、柱に装備されている信号炎管の発炎信号や、また特殊信号発光機（回転形および点滅形）の発光信号により停止信号を現示し、踏切支障を運転士に知らせる。

JR においては、1990 年ごろまで、この現示装置として信号炎管といわれる発火装置を使用していたが、燃え尽きたときの再発火のために複数設置しなければならない、発火時の近隣火災の心配、火薬取締法規制対象で管理が必要などの種々の課題があった。そのため、こういった課題を解決するために、国鉄が民営化された直後、高輝度形赤色 LED が開発されたことに伴い、LED 形の特殊信号発光機（回転形および点滅形）が開発された[3]。

一部の鉄道事業者では、発報信号と称して防護無線により非常停止信号を送信する方式としているところもある。



図 6 踏切支障報知装置（操作器）の例

1.5 特殊信号発光機

特殊信号発光機は、踏切支障報知装置（操作器）、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、これらが動作した場合に発光信号を現示して列車を緊急に停止させるものである。正五角形に並んだ五つの赤色灯が2個ずつ左回りに点灯する回転形と、棒状に1分間に500回程度（8.3Hz）の点滅をする点滅形がある。これらは、一般に「特発」と略称されることがある。いずれの特殊信号発光機も800m以上の距離から視認できるように設備される。

この回転形と点滅形の特殊信号発光機は、鉄道事業者によって異なるが、現在は主に点滅形が多く使用されている。いずれも、LED形を使用し、発光体は赤色発光の高輝度用としている。また、列車進行方向に対して、各線から明瞭に確認できるように設置することとしている[4]。点滅形の特殊信号発光機を図7に示す。



図 7 特殊信号発光機（点滅形）

次に特殊信号発光機の設置について示す。駅中間の踏切における基本的な設置方については、踏切道から 50m 以内に本体の特殊信号発光機を設置することとしており、確認距離が 800m 確保できない場合には、中継の特殊信号発光機を設けるものとしている。設置の一例を図 8 に示す。

設置位置については、既設の電化柱や信号機柱に取り付ける場合や、自立した CP 柱 (Concrete Pole) を立てて設置する場合がある。設置高さについては、運転士の目線の高さとなるレールレベルから 2.5m 程度に設置されることが多い。

通常的信号機の確認距離が 600m であるのに対して、特殊信号発光機の確認距離は 800m である。これに対する考え方は諸説あるが、一例としては、列車の非常ブレーキ距離 600m に、確認のための余裕時分 5 秒間の走行距離 200m を加えたものである、とされている。

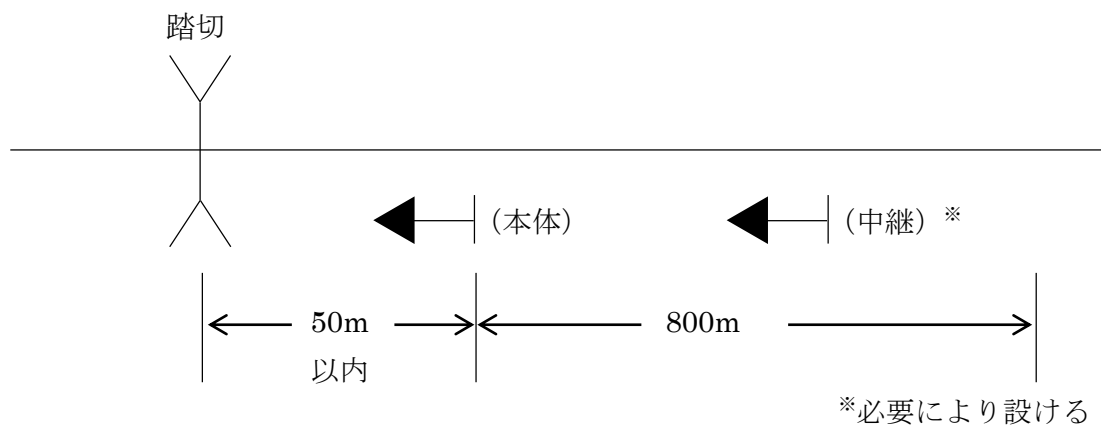


図 8 特殊信号発光機の設置の例

1.6 特殊信号発光機の見通しに対する問題と対策

特殊信号発光機の見通し距離の不備に対する踏切事故の一例を以下に挙げる。

2009年4月にJR東日本奥羽線高島駅～赤湯駅間を走行中の下り列車の運転士は橋梁を通過し、鍋田踏切に白いものを認め常用最大ブレーキをかけ、すぐに自動車と分かり非常ブレーキを操作したところ、特殊信号発光機が停止現示を現示していることに気付いたが、間に合わず、踏切道内の自動車と衝突し、約161m行き過ぎて停止した[5]。

これに対して運輸安全委員会は、事故調査報告書の中で、800mの見通し距離が確保されていなかったと結論づけ、再発防止として、800mの見通し距離が確実に確保されているかを確認すべきである、と指摘されている。事故調査報告書は、事故原因の究明、防止が目的であり、責任を問うためのものではない。

この事故を受けて、JR東日本では、国土交通省から安全・安定輸送に対して警告を受けたとしている。この対策として、以下の3つの対策を実施するとしている。特殊信号発光機については、踏切に設置している全特殊信号発光機の見通し距離の確認等を開始した。運転士に対する再指導等に関しては、改めて特殊信号発光機の取扱いに関する教育・訓練を実施した。踏切事故防止の社会への訴求に関しては、自動車のドライバー等に踏切事故防止を広く訴求するため、「春の全国交通安全運動」期間に合わせて、事故防止キャンペーン等を実施したと、2010年に安全報告書で報告している[6]。

これらの対策のうち、全特殊信号発光機の見通し距離の確認を実施することは、保守の人的・時間的なコストが大幅にかかることが問題となっている。

1.7 踏切支障報知装置の増設による安全性の向上

近年では、高齢者の踏切事故が社会的に取り沙汰され、学識経験者、鉄道事業者、道路管理者、警察庁、国土交通省からなる「高齢者等による踏切事故防止対策検討会」を設けられた。報告書では、これに対する一つの対策として、踏切支障報知装置の一部である非常押しボタンの増設が挙げられている[7]。

また、JR 東日本では踏切における安全のさらなる向上として、踏切支障報知装置を主要な線区を中心に、これまでの約 4 倍のスピードで整備し、年間約 100 箇所ずつ増設していくとしている[8]。

このように、踏切の安全性を高めるためには、踏切支障報知装置の設置率の向上が 1 つの方策である。踏切支障報知装置の増設には、特殊信号発光機の設置が伴う。特殊信号発光機の設置にあたっては、設備を保守する担当箇所と、運転の担当箇所の 2 つの系統の社員での共同立会いが必要である。また、現状では設置位置の決定については、図面ベースでの検討が主であり、非効率である。このような観点から、増設を促進するため、立会いや検討をする上での支援ツールが必要である。

1.8 無線を用いた列車制御システム

これら特殊信号発光機の問題を根本的に解決する方法としては、設備自体を無くすことである。一つの例としては、JR 東日本にて開発・実用化している ATACS (Advanced Train Administration and Communications System) がある[9]。ATACS は、1987 年から鉄道総研で開発を行ってきた CARAT (Computer And Radio Aided Train Control System) をベースに 1995 年以降、JR 東日本が実用化に向けて開発を行ってきたシステムであり、従来の地上設備主体の制御方式に変えて、情報技術をベースに地上・車上の制御分担を機能面から配置した安全・シンプルな列車制御システムとしたものである。

ATACS による踏切制御では、現行の軌道回路と踏切制御子による警報制御に代わって、車上制御装置が各踏切までの到達時間を算出し、到達時間が必要警報時間以下となった場合に、警報要求をし、警報をしていない場合は、踏切手前に列車を停止させる速度照査パターンを発生させることで踏切無しや断時の事故防止を考慮している[10]。この踏切制御の考え方については CARAT も同様である[11]。さらに踏切支障の場合には、現行では特殊信号発光機を運転士が目視することで防護しているが、ATACS ではパターン制御をすることで安全性向上を図っている。

このような無線による列車制御システムを導入することで、特殊信号発光機などの地上設備を削減することができる。しかしながら、線区全体でシステムを更新する必要があるため初期投資に莫大な費用がかかることから、全ての鉄道事業者に導入されることは難しいと考えられる。従って、全国に約 33000 箇所ある踏切とそれに対する特殊信号発光機は当面の間無くならず、これらの問題に対する何らかの対策が必要である。

また、小田急電鉄では、D-ATS-P (Digital Automatic Train Stop Pattern) という自動列車停止装置を導入しており、踏切使用時においては、軌道回路に踏切支障のレール情報を伝送し、列車を自動的に停車させることで安全性を高めている[12]。しかし、レールを用いて情報を伝送させるため、軌道回路の境界位置によっては必要以上に列車防護をしてしまう可能性がある。また、このシステムは運転士のバックアップとして動作しており、特殊信号発光機は従来どおり設置されている。

もう一つの対策として、無線を用いて特殊信号発光機の発報条件を車上に伝送する方法である。JR 西日本では、特殊信号発光機の動作を音声で運転士へ知らせる、特発動作通知支援装置の導入を目指している[13]。このような取り組みにより、踏切支障の情報である特殊信号発光機の発報条件を無線伝送することが可能であるが、現状では支援装置にとどまっており、特殊信号発光機の代替となるものではない。このように、無線によって代替することは将来的には可能であるが、研究開発に時間を要するため、即応的な対策が必要と言える。

1.9 鉄道における情報通信技術の活用

近年、技術開発が盛んに行われている ICT (Information and Communication Technology) や IoT (Internet of Things)などの先進的な技術を用いることで、革新的な解決を行うことに対する実現の可能性はある。実際に総務省による情報通信白書[14]においては「インターネットにつながるモノの数の推移は 10 年間で 5.1 倍になり、データ国内流通量は 2005 年から 2014 年の 9 年間で 9.3 倍に拡大している」とし、今後、IoT を通じて様々なデータの収集・分析により業務効率化が活発になるとしている。さらに情報処理推進機構(IPA)は IT 人材白書 2015[15]において IoT や機器間通信(M2M : Machine-to-Machine), ビッグデータを新たな成長分野として捉え、これらの分野の技術者について人材育成をすることで産業の垣根を越えたイノベーションを作り出す可能性を持つ、としている。

鉄道分野においても、これらの情報通信技術を適用する動きがあり、輸送計画, 列車運行, 旅客サービス, 設備の維持管理などさまざまな分野において検討が進められている[16]。設備メンテナンスにおいては、情報通信技術を用いて、これまでの過去のデータに基づく画一的なルールから成る TBM (Time Based Maintenance)から、リアルタイムデータに基づく予防保全である CBM (Condition Based Maintenance)に移行させようという取組みもある[17]。一方で、これらの情報通信技術を鉄道の安全を担保する制御システムや安定輸送のための輸送管理システムに適用する際には、サイバー攻撃を考慮する必要がある、このリスクを企業として見ると、大災害に匹敵するレベルと考えるべきであると言われている[18]。

したがって、本研究のターゲットである踏切保安設備は、インフラとしての設備であることや、現状で相当数の特殊信号発光機が設置されていること、または、安全を担保するための保安設備であることを考えると、セキュリティ面や、故障率・信頼性の観点から、最終的なバックアップとして人間の目視が重要な役割を果たすと考え、現行の特殊信号発光機ありきでの研究開発を行った。

1.10 研究の目的

これらの事情を踏まえて、本研究では特殊信号発光機が抱える視認性確認に関する 2 つの問題に対して列車前方映像と画像処理技術を用いて解決を図る。

1 つ目は、現在、定期検査にて見通せているか否かという意味での視認性の確認検査を実施しているが、特殊信号発光機は、異常時のみ発光する方式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。また、現状の検査では作業員の主観に依っているところがある。これに対して、視認性確認を車上から自動的に検査するシステムを提案する。これにより、定量的な検査が可能となり、さらに、設備の検査向上が図られ、設備不良による事故の削減を図る。

2 つ目としては、特殊信号発光機の設置工事においては、列車運転台からの見通しなどを配慮して設備を保守する担当の社員と、運転士とで共同立会いのもと設置位置を決定する必要がある。しかしながら、そのための現地調査に多くの労力を要している。これに対して、列車運転台からの前方映像を用いたシミュレーションによる設置支援手法を提案する。これにより踏切支障報知装置の施工・設置の迅速化に貢献し、踏切に対する踏切支障報知装置の設置率向上に寄与することで踏切事故の削減を図る。

1.11 本論文の構成

本論文は次の 5 章から構成される。

第 1 章 序論

緒論であり、本論文の研究背景と目的、および本論文で使用する踏切保安設備および特殊信号発光機の現状について述べる。

第 2 章 列車前方監視のためのカメラ視野制御

本論文での目的を遂行するためには、列車前方映像からレールの座標情報を抽出することおよび、望遠カメラを運転士の注視している方向へ制御する必要がある。そこでこれらに必要なレール抽出アルゴリズム、およびレール抽出とその消失点を用いたカメラ視野制御について述べる。これらの技術は、本研究を遂行する以外にも列車前方監視としても有用となる技術であることから、列車前方監視としての観点からも述べる。

第 3 章 視認性を検査する手法

1 つ目の課題である特殊信号発光機の見通しとしての視認性の確認検査を効率的に行う手法について述べる。異常時にのみ発光し停止信号を現示するタイプである特殊信号発光機に対して、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として、特殊信号発光機の視認性の確認検査用として近赤外線 LED を発光機に追加して、車上から自動的に視認性確認をする手法を提案した。提案した装置構成は、不可視光線である近赤外線 LED を特定の点滅パターン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であり、それらの技術について述べ、現車試験による提案システムの有効性、および耐用寿命と他設備への影響評価について示す。

第 4 章 地上設備の視覚シミュレーション手法

2 つ目の課題である支障報知装置の工事支援としての特殊信号発光機の設置位置を視覚的にシミュレーションする手法について述べる。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検討する必要があり、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。このような問題に対して、特殊信号発光機の設置位置における見通しを画面上でシミュレートすることにより、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手間を削減できるようになる。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。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設備の設置後の運転台から視覚的状況を確認することができれば有効であると考えられる。しかし、これを実現するためには、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。2 次元の列車前方映像から 3 次元の実空間を推定することは、2 次元から 3 次元への次元拡張であり、基本的には困難と考えられる。そこで我々は、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、列車前方映像を用いた地上設備の設置位置検討のための視覚シミュレーション手法について述べる。本章では、これらの問題を一般化し、地上設備の視覚シミュレーションとして説明し、具体的適用例の一つとして、特殊信号発光機の設置位置シミュレーションとして示す。

第 5 章 結論

本研究で得られた知見を総括し、今後の課題と展望について述べる。

第2章 列車前方監視のためのカメラ視野制御

2.1 はじめに

踏切事故やホーム転落事故に見られるように、鉄道における安全・安心の確保が急務となっている。安全な列車運行を確保するためには、線路内の障害物を事前に検知し、障害物との衝突や列車脱線を防ぐ必要がある。しかしながら障害物検知のような異常事象の検知については、未だに運転士の目視確認に依っているのが現状である。一方、自動車分野においてはセンサを用いることで、ドライバサポートにより安全性を向上させるシステムを低コストで実現する方式が開発されているが、鉄道に比べ長距離をセンシングする必要はない。

このような列車前方の安全を確保するという観点から、列車運転台からの障害物検知、信号認識、設備検査などの列車前方を監視する場合、車両の制動距離の関係からできるだけ離れた距離を撮像することが望ましい。しかしながら望遠レンズを用いて遠方を撮像すると、それに応じて視野角が狭くなってしまい、曲線や勾配区間において正しい方向を撮像することができなくなってしまう。そこで、画像認識を用いたカメラ視野制御を行うことで、望遠レンズを用いて遠方を撮像しつつ、目的の方向および対象物を捕捉する研究を行ってきた [19], [20], [21], [22], [23], [24]。

列車前方監視のためのカメラ視野制御装置の機器構成を図 9 に示す。カメラ視野制御装置の構成としては、列車の運転台に固定された広角型のカメラと、電気信号で旋回制御が可能な雲台を 2 台連結することで水平方向、垂直方向の 2 軸の旋回が可能な望遠型カメラからなる。広角型カメラによって前方のレールを抽出して形状をとらえ、レールの消失点 (FOE : Focus of Expansion) に近い約数百 m 遠方の位置を抽出し、望遠カメラをその位置へ向けるための雲台の角度を求め、雲台をフィードバック制御する。この制御により、望遠カメラは遠方のレール上を常に画像内にとらえ続けることができる。本装置の望遠カメラによって得られる遠方画像を用いることで、レール上の障害物を検知するシステムなどへの応用が可能になる。カメラ視野制御システムによる広角カメラの映像と、望遠カメラから得られる映像を図 10 に示す。



図 9 カメラ視野制御装置の構成

このようなカメラの視野を制御する方法として、走行する線路の曲率などをナレッジデータベースとして保持し、そのデータベースを基に制御することも考えられる。車両ごとに機材を艤装する方式ではナレッジデータベースは可能であるが、視野制御する機材を持ち込む方式の場合には、線区ごとにデータベースを変更する必要がある。さらに、現状では、車両は線区の曲率などのデータは保持していない。また、事業者にもよって変わってくるが、線区によっては、紙の図面ベースによる管理を行っているところもあり、データベース化は困難である。したがって、車載したシステムの閉じた系で動作するようなカメラ視野制御手法が必要となっている。

このカメラ視野制御手法において、レール抽出技術の検出精度が十分でないと、それに基づいて算出される消失点がご検出や未検出となり、その結果、消失点座標が時間的に不連続となる。カメラ視野制御装置は消失点の情報に基づくフィードバック信号により制御されるため、滑らかな視野制御が行えず、良好な望遠映像を得ることができていないという課題があった。そこで、消失点の推定に予測を用いること、およびレール抽出技術に改良を行うことで、実用に資したカメラ視野制御装置の開発を行った。基本となるレール抽出技術を 2.4 節で述べ、2.5 節、2.6 節、2.8 節にて、それに対する改良手法を述べる。また、2.4 節で述べるレールのエッジと輝度勾配によるレール抽出のみを用いたカメラ視野制御を「現システム」と呼ぶものとする。

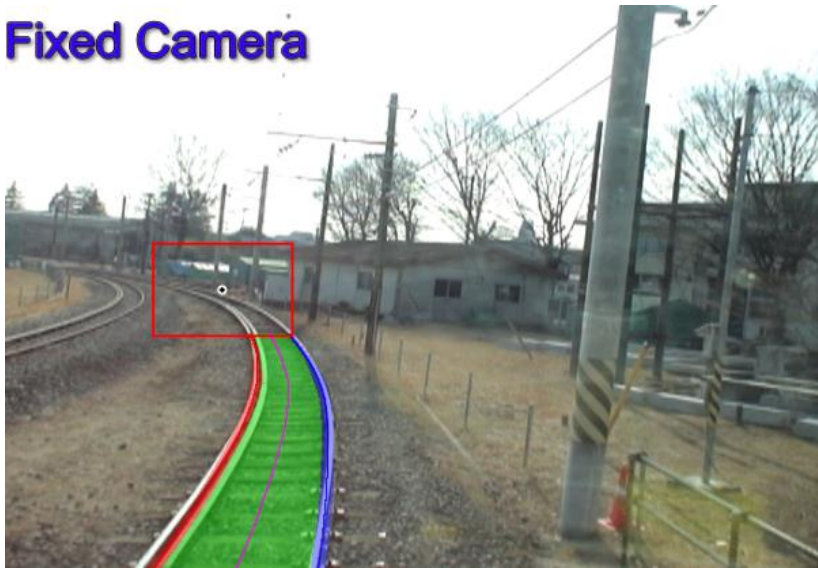


図 10 カメラ視野制御システムによる広角カメラ映像と望遠カメラ映像

2.2 関連研究

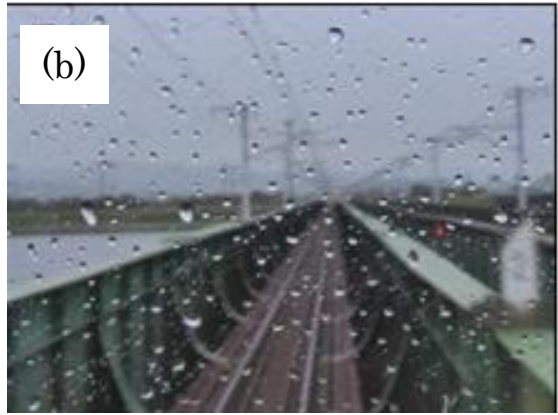
映像に基づくモニタリングシステムについては多くの研究がなされており、固定カメラ [25] や車上カメラ [26], [27] を用いた研究が数多く実施されている。しかしながら、走行している列車のカメラ映像からのレール抽出に関する研究は非常に少ない。Maire, Wohlfeil, Kaleli らは、レールに強い輝度勾配が存在し、列車の前方はほとんど直線と仮定しており、候補レール画素に対して直線当てはめをしている。また、Wohlfeil らは、抽出する領域をカメラから近傍領域にのみ限定しており、分岐については対応していない [28]。また、Maire らは、近傍領域において得られた結果に quadratic 関数を用いてレール形状にフィッティングすることで、遠方領域に拡張している [29]。Kaleli らは Dynamic Programming を用いて画素を分類することで遠方領域に拡張している [30]。

列車前方監視システムを、鉄道線路空間におけるコンピュータビジョンの問題として捉えた時、走行する 2 本のレールは線路空間モデルの基準となるので、レール検出は非常に重要な処理となる。ITS (高度道路交通システム) においては、画像処理技術の積極的な活用が進んでおり、中でも白線認識に関しては多くの手法が提案されている。レール抽出は高速道路における白線検出と共通した特徴が多くある。両者に共通することは、全天候であることと、カメラ映像内において滑らかかつ緩やかに曲率に変化する帯群であることである。レーン抽出におけるアプローチでは、画像中の特徴量抽出によって実現しているものが大半である [31], [32]。色や強度による特徴に基づく手法 [33] や、輝度勾配を用いる手法 [34], [35], [36], [37] が多く用いられている。その他としては、Arrospide, Felisa らは強度遷移に基づく手法を用いており [38], [39]、Chen らは Top-Hat フィルタを用いており [40]、McCall らは steerable フィルタを用いている [41]。また、Kim らはニューラルネットや SVM による分類器の出力を用いている [42]。このように、緩やかに曲率に変化する上下方向の線成分を抽出するという点では、鉄道におけるレール検出と類似するところがある。ただし白線認識における多くの手法は、特定の条件 (灰色の道路上にペイントされた明るい線) を仮定したモデルベースのアプローチであり、天候・日照条件、白線の劣化、遮断問題などに対して、未解決の課題が残されている。さらに鉄道では、レールが白線に比べて細いこと、錆などにより白く輝いていない場合があるため、白線抽出で用いられている様々な仮定が必ずしも鉄道環境で成立するわけではない。また、逆光・雨天・複雑な軌道、トンネルなど、天候・日照条件や環境変化に対して、検出の困難さが問題である。(図 11)



(a)

(a) 逆光



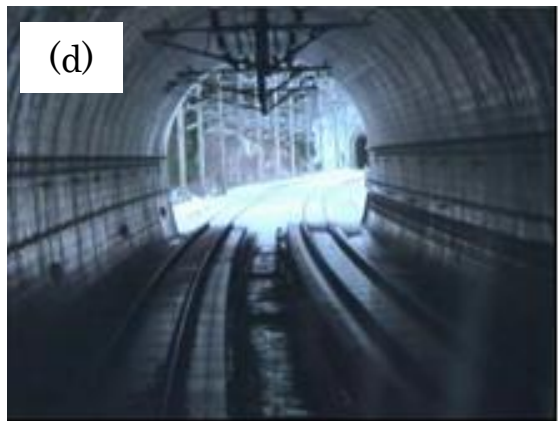
(b)

(b) 雨



(c)

(c) 分岐



(d)

(d) トンネル

図 11 レール抽出が困難な例

2.3 本研究で用いる画像処理手法

本研究では、列車前方を監視しているカメラからの入力画像に対して、レールを精度よく抽出することが必要である。列車前方映像は屋外であるため、映像は天候や時間帯によって輝度値が大幅に変化する。そのため、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鉄道環境下に対応できない。そこで輝度値ではなく、対象物の形状に着目する手法を用いることで対応した。画像処理技術として、主に、Canny によるエッジ抽出[43][44][45]と Chamfer 距離を用いたパターンマッチング[46][47]を用いた。以下にこれらの手法の詳細を述べる。

2.3.1 Canny によるエッジ抽出

Canny によるエッジ抽出は、Canny Edge Detector と呼ばれ、ノイズに強く、真のエッジ箇所を検出する手法として知られており、以下の 5 つのステップから成るエッジ抽出である。

Step 1. 入力画像を f とし、Gaussian フィルタを g としたときに、次式で示すように g で畳込むことで画像の平滑化 h を得る。

$$h(x, y) = f(x, y) * g(x, y) \quad (1)$$

$$g(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (2)$$

Step 2. Gaussian フィルタによって平滑化された画像に対して、 x 方向と y 方向に微分した画像 g_x , g_y を得る。

$$h_x(x, y) = f(x, y) * g_x(x, y) \quad (3)$$

$$h_y(x, y) = f(x, y) * g_y(x, y) \quad (4)$$

$$g_x(x, y) = \frac{-x}{\sqrt{2\pi}\sigma^3} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (5)$$

$$g_y(x, y) = \frac{-y}{\sqrt{2\pi}\sigma^3} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (6)$$

Step 3. 得られた微分画像に対して勾配方向 θ と勾配強度 I を求める。

$$I(x, y) = \sqrt{h_x(x, y)^2 + h_y(x, y)^2} \quad (7)$$

$$\theta(x, y) = \tan^{-1} \frac{h_y(x, y)}{h_x(x, y)} \quad (8)$$

Step 4. 細線化処理として、勾配強度 I が勾配方向 θ に対して極大である場合にエッジ候補とする処理を行う。Non-maximum Suppression 処理（非最大値抑制処理）と呼ばれる。これにより、極大でない画素値は0（黒）となる。

Step 5. Hysteresis Threshold 処理によりエッジ候補の取捨選択をしエッジ画像を作成する。閾値 H と L を設定し、Non-maximum Suppression 処理によって残った勾配強度 I に対して、 I が閾値 H を上回った画素はエッジとして残し、 I が閾値 L を下回ったものは排除し、 I が閾値 L 以上 H 以下の場合にはエッジに結合している画素のみをエッジとして採用する。 H を 200, L を 100, σ を 3 に設定し、Canny エッジを列車前方映像に適用したものを図 12 に示す。図 12(a)が元画像であり、図 12(b)が元画像に対して Canny によるエッジ抽出を適用した画像である。



(a) 列車前方画像



(b) Canny によるエッジ画像

図 12 列車前方映像に Canny によるエッジ抽出を適用した例

2.3.2 Chamfer Matching

Chamfer Matching とは，入力画像とテンプレート画像間のエッジの相関度に基づいてマッチングを行う手法であり，テンプレートマッチングの一手法である。相関を求める際には，距離変換画像を用いてエッジの相違度が小さくなる方向へ効率的に探索を行う。

距離変換画像とは，エッジ抽出された画像の各画素に対して，最近傍のエッジまでの距離をその画素値とした画像である。8 近傍距離によって二値化されたエッジ画像から距離変換画像に変換した例を図 13 に示す。図 13(a)がエッジ画像であり，図 13(b)が距離変換画像である。

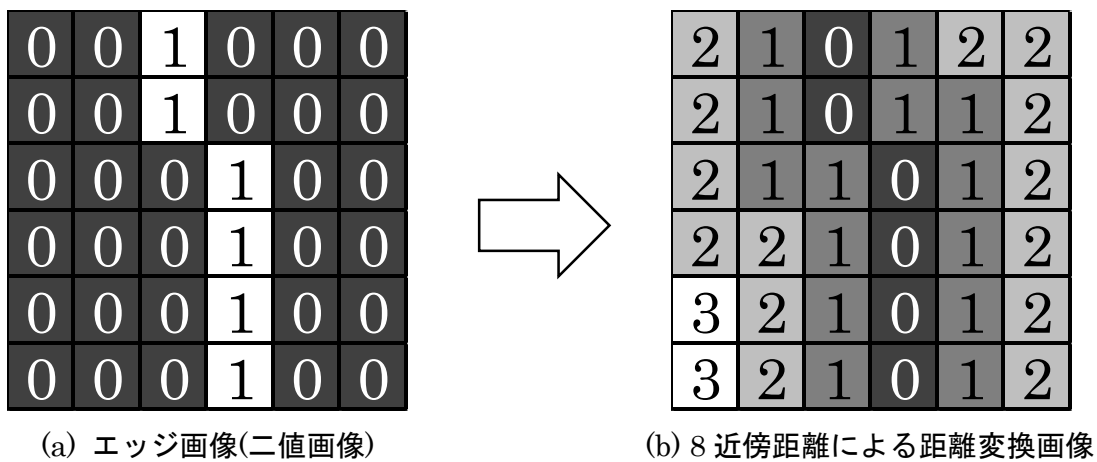


図 13 距離変換画像の例

一般的なテンプレートマッチングでは色相や輝度などを用いるのに対し，Chamfer Matching ではエッジ情報を用いるマッチングである。

Chamfer Matching の処理の流れは，入力画像に対して Canny によるエッジ抽出を行い，エッジ画像を生成する。次に，エッジ画像に対して距離変換画像を求める。この距離変換画像とテンプレート画像から生成したエッジ画像を以下に示す相関度に基づいてマッチングを行う。入力画像から求めた距離変換画像を $I(x, y)$ とし，テンプレート画像のエッジ画像を $T_{w,h}(i, j)$ とすると入力画像中の点 (u, v) における距離変換画像とテンプレートのエッジ画像との相違度 $D(u, v)$ は次式となる。

$$D(u, v) = \sum_{i=0}^w \sum_{j=0}^h [T_{w,h}(i, j)I(u + i, v + j)] \quad (9)$$

ここで， $T_{w,h}(i, j) = \{(i, j) | 0 \leq i \leq w, 0 \leq j \leq h\}$ であり，この相違度 $D(u, v)$ が最も小さくなる位置をテンプレートの位置として決定する。

2.4 線路空間モデルに基づくレール抽出技術

昼夜晴雨の天候の変化や、曲線・勾配区間など、様々な条件下でも安定したレール検出を実現するため、まずレールのエッジと輝度勾配に着目したレール抽出アルゴリズムを作成した。レールを列車運転台から 2~30m 程度までの近傍領域のレールとそれ以上の距離の遠方領域のレールに分けて処理を行う。近傍領域はあらかじめ用意した代表的なレールテンプレートとのマッチングにより、遠方領域は近傍領域で得られた情報をもとにレール形状パターンを動的に生成して、短い直線及び曲線セグメントを連結しながら、遠方までレールを追跡するアルゴリズムとした。カメラ近傍のレールは、天候の変化や環境光にあまり左右されず、比較的強いエッジが観測されるうえ、その曲率は緩くほとんど直線的である。また、カメラからの距離が遠くなるにつれて、その間隔は狭くなる。これらの知識をもとに、確実に捉えた近傍のレールから徐々に遠方に探索してゆくことで、環境変動に強い検出手法を開発した。また、本アルゴリズムは、車両速度やカメラ位置の情報を必要としないことも特徴である。

一般的な Hough 変換による直線抽出を用いてレール抽出を行う場合は、曲線部の抽出が困難である (図 14)。また輝度値に着目して、Sobel エッジによってレールを抽出した場合は、線路周辺の輝度値の高い物体がノイズとして抽出されてしまう (図 15)。そのため、次節で示すレール抽出アルゴリズムを開発した。

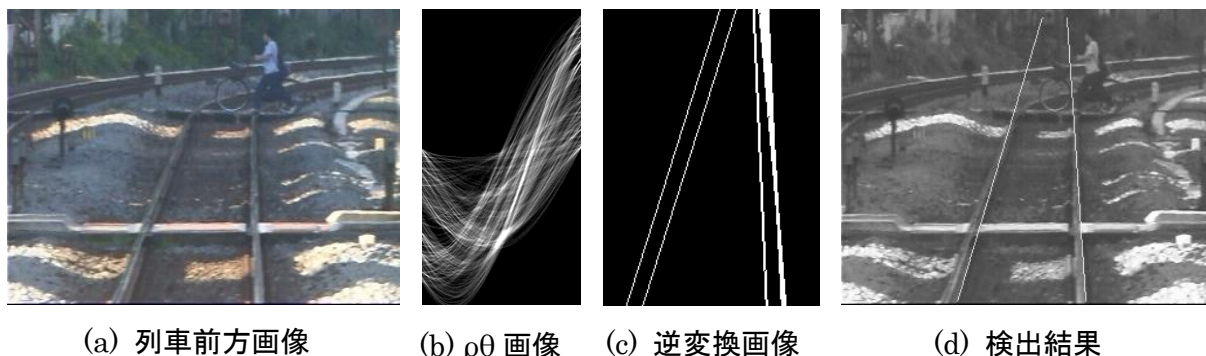


図 14 Hough 変換によるレール抽出の例



図 15 Sobel エッジによるレール抽出の例

2.4.1 近傍領域のレール抽出アルゴリズム

近傍領域のレール抽出として、

図 16 に示すような、数種類の典型的なレールパターンを予め登録する。レールパターンの総数については、実際に適用する線区の最大曲率を考慮して数十パターン程度入力することが望ましい。前処理として画像の平滑化を行い、引き続き Canny によるエッジ抽出を行い、画像下部の領域内で、Chamfer 距離を類似度の尺度として、登録パターンを探索する。Chamfer 距離とは重み付き距離とも言われ、Chamfer 距離による距離変換画像とは、エッジ画像の各画素から最近傍のエッジ点までの距離を画素値とした画像であり、図 17 で例えると図 17(a)がエッジ画像であり、これに対応する距離変換画像が図 17(b)となる。距離変換画像はエッジに近くなるほど低い値（黒く）となり、エッジから遠くなるほど高い値（白く）となる。2次元の座標軸方向と対角方向での距離の比を整数比、例えば 4:3 や 5:4 にして近傍距離で表現したものである（図 17）。ここで、図 17(c)を登録パターン画像とすると、距離変換画像図 17(b)とパターン画像の非零位置における値が図 17(d)となる。この対象となったピクセル数に対する値の合計値の割合を d （この例では $5/6$ ）とすると、 $\max(0, (M - d)/M)$ を類似度とする（ここで M はユーザー定義する Chamfer 距離の上限であり、我々は経験に基づき $M=1.5$ とした）。この距離は、探索範囲の座標と対応する 2次元マトリクスに 0~1 のスコア値として得られる。探索域をスライドさせながら、 p_0 から p_2 の 3つの登録パターンとのマッチングを行った様子を、図 18 に示す。このケースは、横方向に 209pixel の地点で、類似度（スコア値）が 0.7 と最も高かったパターン p_0 が選択された例である。

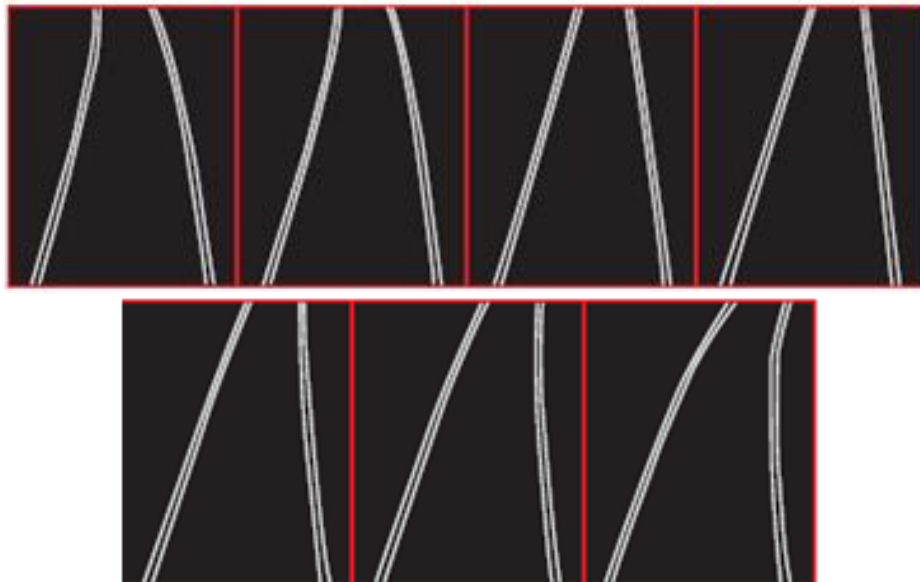


図 16 近傍領域のレールパターンの例

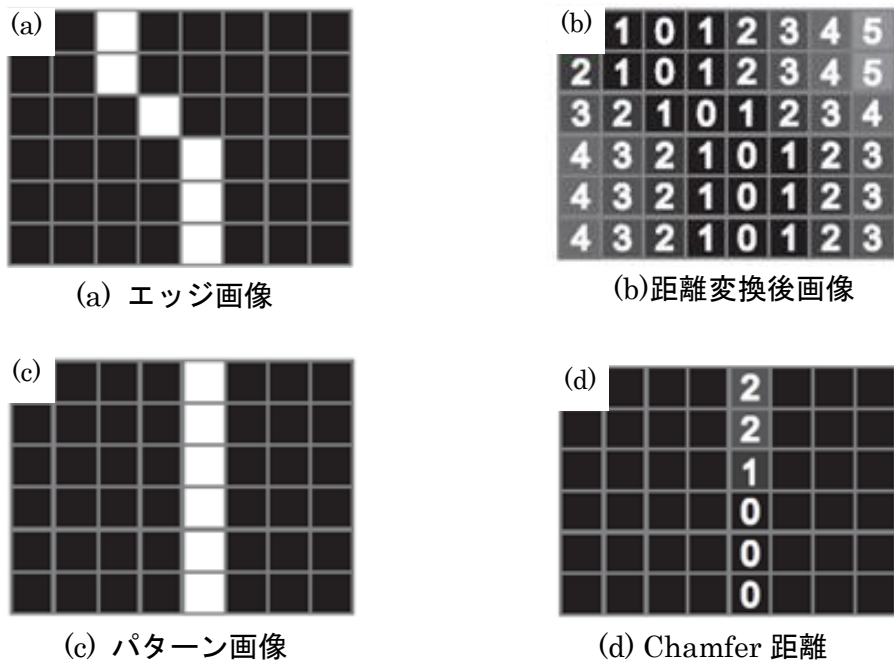


図 17 Chamfer 距離の例

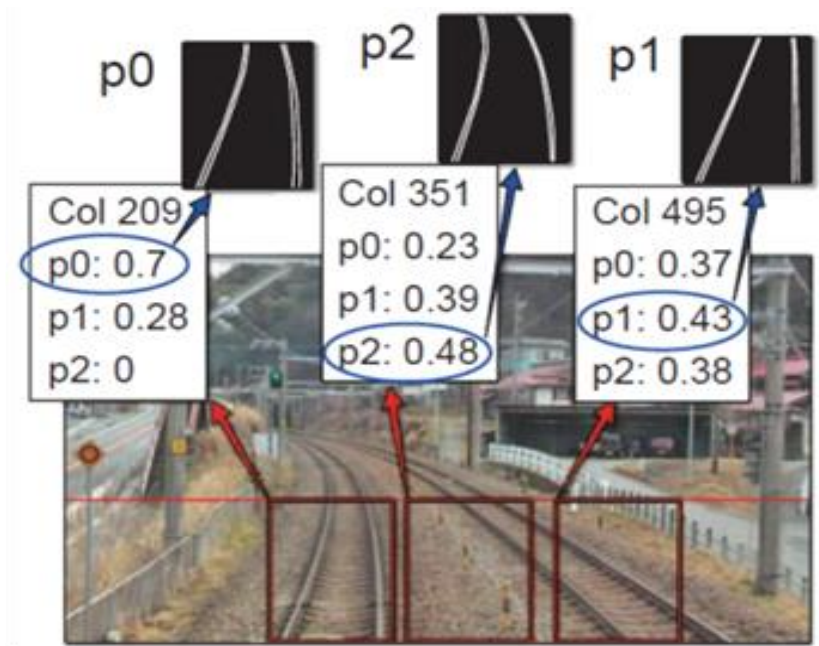


図 18 近傍領域における登録したレールパターンのマッチングの例

線路映像の特徴として、左右のレール間隔は一定であり、直線であったレールが急に曲がるなどの急激なレール形状の変化はない、つまりある画像フレームに対して、次フレームも前フレームのパターンに類似する可能性が高いことや、線路位置が劇的に動くことはない、

つまり近傍領域として検出された領域の1つ上の次領域では検出された領域終点の周辺を探索すればよく、レールの存在範囲が推定できるといった知識を利用することができる。

2.4.2 遠方領域のレール抽出アルゴリズム

画像中ほどの領域は、近傍領域で先に探索した登録パターンの左右レールの端を開始点として、直線や曲線といったレール形状のトレンドと輝度勾配、並びに線路幅を基にレール検出を継続する。最遠方の領域についても、前領域の最終位置を開始点として、輝度勾配と線路幅を基に探索を行う。このように前フレームで検出した座標位置と、マッチング結果を反映した情報を記憶し、次フレーム及び次領域のレール抽出に反映させることで、検出確度の向上を図っている。さらにレールの特徴として、時系列の隣接フレーム間でも、前フレームと次フレームでレール位置や曲率・勾配などのレール形状も急激に変わることはないといった知識も活用できる。

近傍から遠方領域に向けて行われるレール抽出処理を図 19 に示す。元画像 (図 19(a)) に対して、近傍領域処理で特定したレールテンプレート (図 19(b)) に対して、左右レールの終端部から、終端部の傾きを基準に直線として延長する (図 19(c))。列車運転台からの前方映像におけるレールの曲率の最大を考慮し、この終端部を中心に、直線の傾きに対して±約 20° の幅で、次候補のレール線分を左右それぞれ 10 本程度発生させる (図 19(d))。その中から前節と同様の類似度を用いて、最もレール画像との類似度の高い候補が選択される (図 19(e))。遠方に行くほど探索領域の分割サイズを小さくしながら、繰り返し次領域のレールを抽出してゆく (図 19(f))。

これらの手法により全天候下でレール抽出が可能となる。様々な環境下での列車前方映像に対して本手法を適用した結果を図 20 に示す。

また、道路の設計においては、一般的に直線部と円弧曲線部との緩和曲線部としてクロソイド曲線が使われていることが多い。その理由としては、直線区間からいきなり円弧区間となるカーブを運転する場合は円弧の始まりと終わりでハンドルを一気に切らなくてはいけなくなる。そのため、ハンドル操作の負担を減らすために、直線区間からクロソイド区間になり、その後、円弧区間としている。そうすることで、一定の角速度でハンドルを切り続け、円弧中はハンドルを切ったまま固定して走行することができる。クロソイド曲線は曲率半径を R 、クロソイド始点から曲線長を L としたとき、次式のように両者の積が一定となる曲線である。

$$RL = A^2 \quad (10)$$

このとき、 $l = L/A$ としたとき、クロソイド曲線の座標 (x, y) は以下で表さされる。

$$x(l) = \int_0^l \cos \frac{\theta^2}{2} d\theta \quad (11)$$

$$y(l) = \int_0^l \sin \frac{\theta^2}{2} d\theta \quad (12)$$

クロソイド曲線の例を図 21 に示す。

このような観点から鉄道の線路における緩和曲線の場合は設計の容易な 3 次放物線やサイン半波長曲線によって設計されることが多い。一部、クロソイド曲線を用いているケースもある。

このような緩和曲線を考慮すると、レール抽出に使用するパターンは、直線、緩和曲線、曲線を考慮してモデル化を行うべきであるが、列車前方映像において考えると、これらの曲線は斜め上方からの射影変換となり、計算が複雑になる。したがって、リアルタイム性および計算負荷の観点から、列車前方映像を上下方向に複数段に分割し、エリアごとに 2 次放物線によって近似している。この考え方は、シンプソン法と同様であり、実際にレール抽出アルゴリズムは精度よくレールを抽出できている。

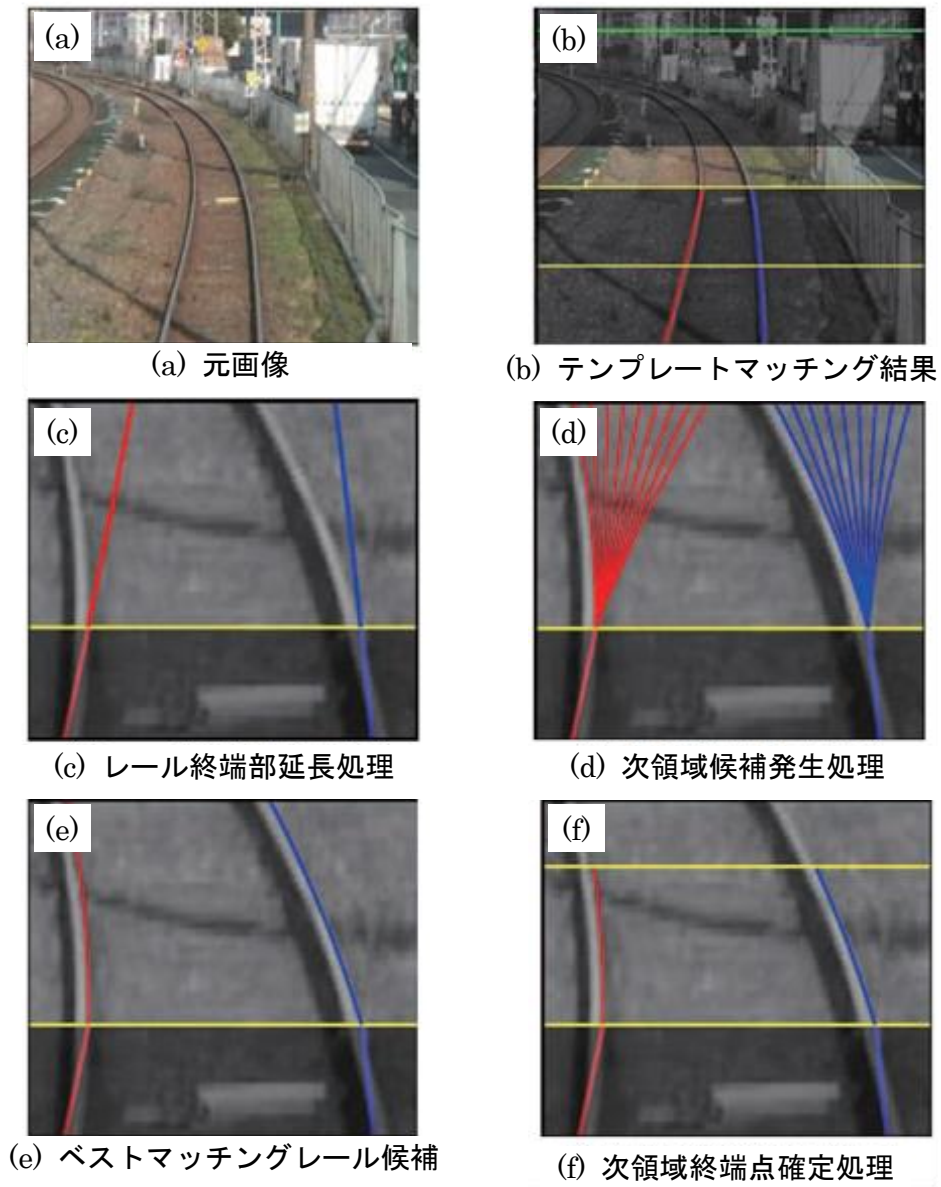


図 19 遠方領域のレール抽出アルゴリズム

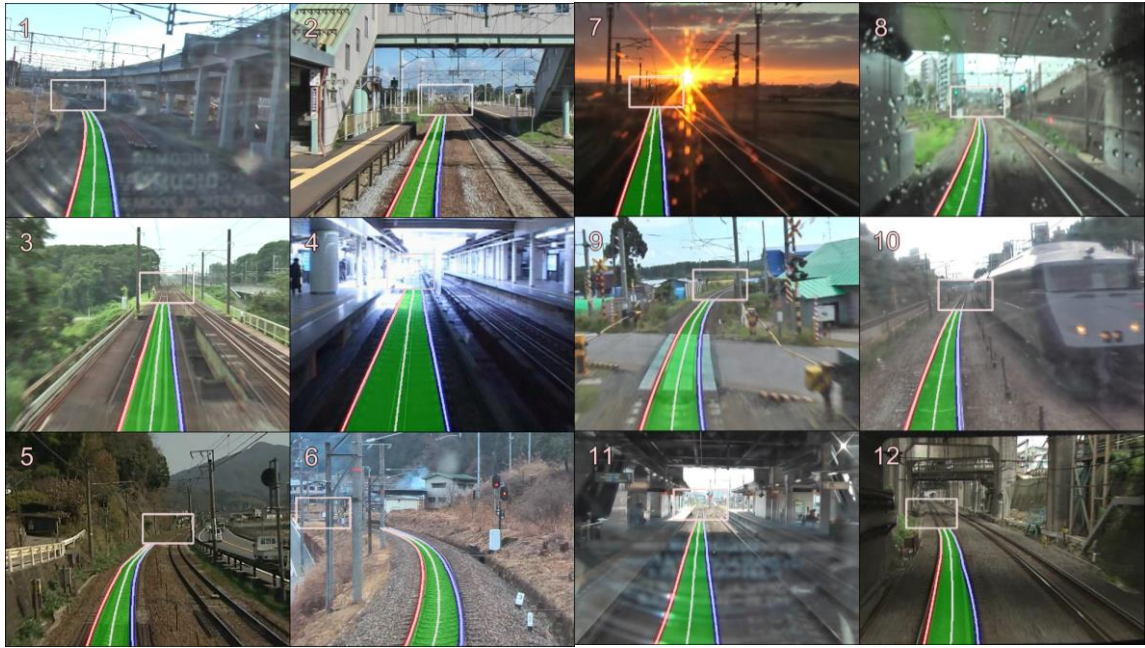


図 20 レール抽出の結果を含んだ各ビデオ映像からの画像

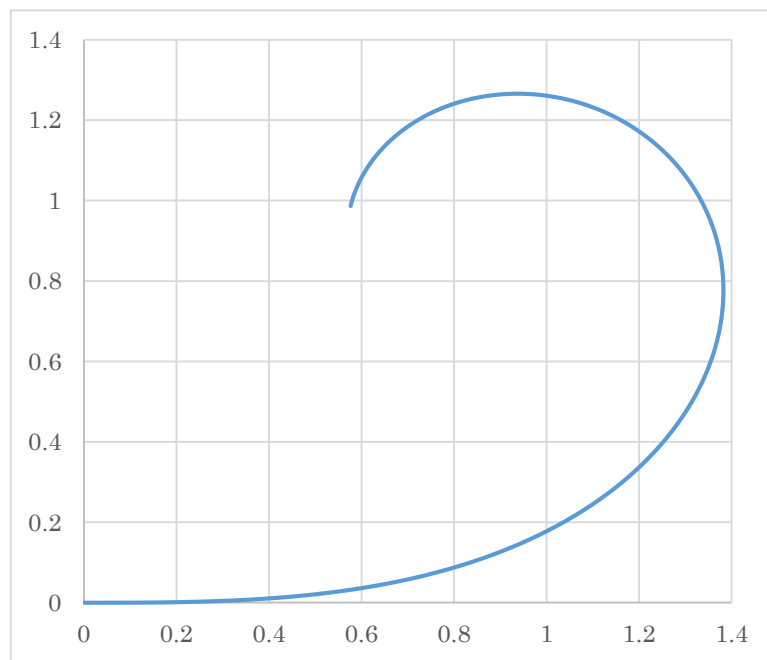


図 21 クロソイド曲線の例

2.5 過去の推定値を考慮した消失点抽出

前節で記した手法によって抽出されたレールに基づいて算出する消失点は検出結果が離散的となっており、それが原因で視野制御が滑らかに動作しない。この問題点を解決するために、動画像フレームごとの検出範囲に対し、消失点の時間的な連続性を考慮した制約条件を設けることで、消失点位置が連続的に変化するように推定を行う。前節で示したレール抽出アルゴリズムによって算出された消失点位置を図 22 に示す。列車が走行している間の消失点の位置は、曲線や勾配区間を通過する際に上下左右に変化するが、自動車と比較して、その変化は滑らかである。

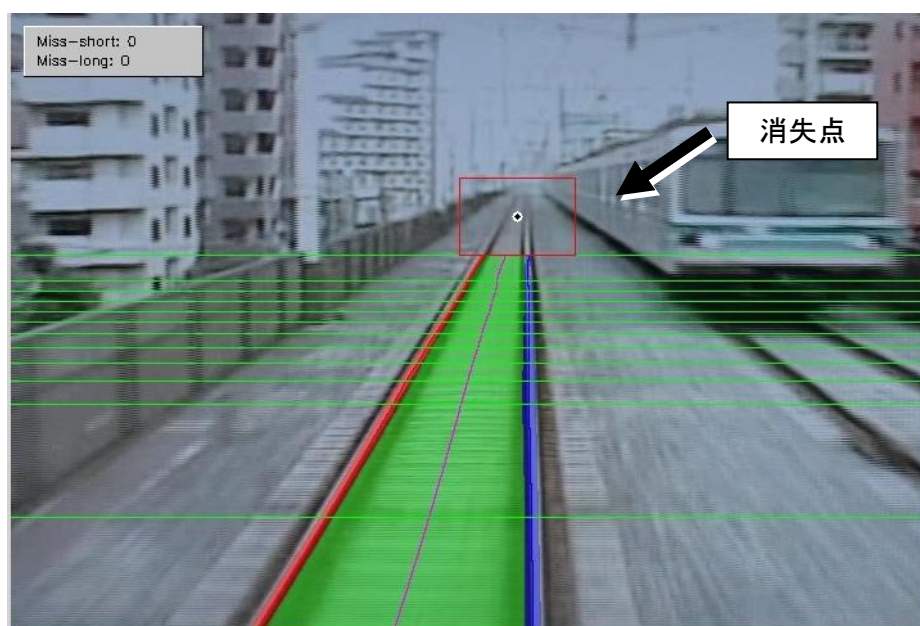


図 22 レール抽出による消失点

現状のシステムが抽出するレール消失点の位置の縦方向、もしくは横方向位置の時間的変化を模式的に図 23 に示す。望ましい動きと現状の不連続な動きを図示している。列車が走行している間の消失点の位置は、曲線や勾配区間を通過する際に上下左右に変化するが、自動車と比較して、その変化は滑らかである。図 23 ではその時の消失点位置の変化を望ましいカメラの動きとして点線で示し、望ましい動きに対する現状の消失点抽出位置を実線で示した。

実線は不連続に変化しているが、不連続性には 2 種類ある。1 つは、消失点の一時的な誤検出などにより、短時間に現実ではあり得ない位置に消失点が移動してしまうことによるものである。2 つめは、短時間における変化量は小さいものの、変化の向きが短時間で変化することによるものである。この 2 つの不連続性は変化の大きさと向きによるものである。

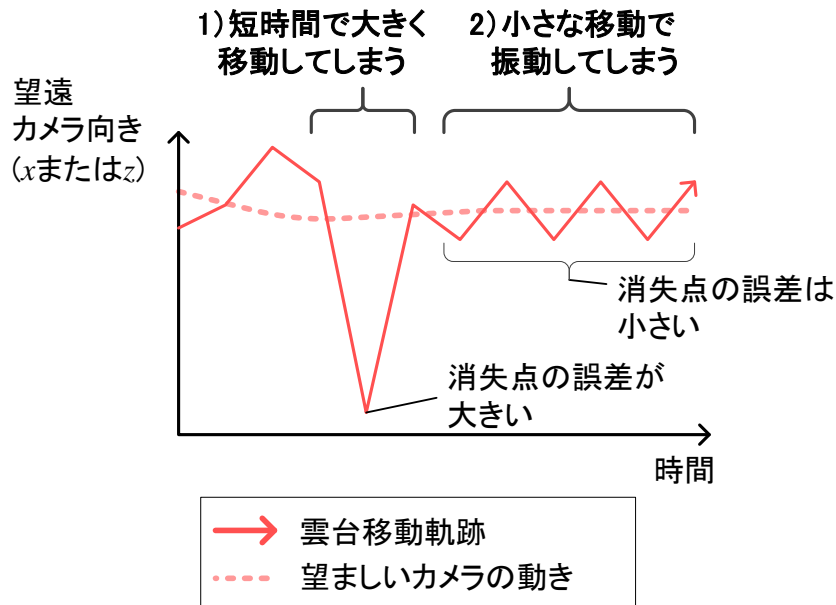


図 23 消失点抽出結果の問題点

それぞれの問題点を解決する方針は以下のように整理できる。

1 つ目の不連続性に関しては、正しい消失点の位置が短時間に大きく動くことはないという性質とそれに反する推計値との乖離によって生じているため、消失点位置の時間変化率に相当する一階微分の大きさに制約条件を設けることで改良できると考えられる。

2 つ目の不連続性に関しては、正しい消失点位置は変化の向きも短時間に大きく変化することがないという性質と、それに反する推計値との乖離によって生じていることから、消失点位置の時間的変化率の変化に相当する二階微分の値に制約条件を設けることで解決できると考えられる。

したがって、以下のように定式化する。

- $x(t)$: 時刻 t での広角画像上の正しい消失点位置
- $x(t)'$: 消失点位置の一階微分値
- $x(t)''$: 消失点位置の二階微分値
- $x_{sys}(t)$: 現システムによる消失点推計位置
- Δt : 制御を行う時間ステップ

とおく。 $x(t)$ は未知の値であるが、 $x(t)'$ と $x(t)''$ については、近似値としてほぼ正しい値が得られるとする。これらの値は、ある時間間隔 ΔT ($=\Delta t$ の定数倍の時間) について ΔT , $2\Delta T$ だけ前の時点での消失点位置から近似値が求められる。

現在の消失点位置 $x(t)$ を1ステップ前の時刻 $t - \Delta t$ の消失点位置、一階微分値、二階微分値を用いて表現する。この時、カーブや高低差などの状況に変化がない場合には2次までのテイラー展開を用い、テイラー展開の3次以降の項を ε_{3rd} とすると

$$x(t) = x(t - \Delta t) + \Delta t x'(t - \Delta t) + \frac{1}{2} \Delta t^2 x''(t - \Delta t) + \varepsilon_{3rd} \quad (13)$$

と表現できる。この式で表される消失点位置は、消失点が今までと同様の傾向で変化する場合の推計値として用いることができる。ただし、実際にはカーブから直線への変化といった状況の変化が含まれるため、一般化にはカーブなどの状況変化による項を加える必要がある。これを ε_{env} と表現すると、正しい消失点位置は

$$x(t) = x(t - \Delta t) + \Delta t x'(t - \Delta t) + \frac{1}{2} \Delta t^2 x''(t - \Delta t) + \varepsilon_{3rd} + \varepsilon_{env} \quad (14)$$

と表現できる。一方、現レール検出によって予測される消失点位置は、正しい消失点位置に予測誤差 ε_{sys} を含み

$$x(t) = x_{sys}(t) + \varepsilon_{sys} \quad (15)$$

と表現できる。また、2次までのテイラー展開による消失点推計位置を $x_{2nd}(t)$ とすると

$$x(t) = x_{2nd}(t) + \varepsilon_{3rd} + \varepsilon_{env} \quad (16)$$

と表現できる。

現システムは状況変化に対応した消失点位置を推計するが、誤差を含んでいるため前述したように予測した位置が不連続になってしまう。一方、2次までのテイラー展開で示される位置では状況変化を表現できないものの、連続性をおおむね保つことができる。2つの式は互いの誤差をおおむね補う関係にある。

この関係を活用し、2つの式に適切な重みづけをした位置を求めることで精度の高い消失点位置を予測できると考えられる。過去のデータによる外挿と観測値を重みづけ平均して推計値を求める考え方は、基本的な形式はカルマンフィルタと同様である。

3章で示したレール抽出アルゴリズムによる消失点位置と2次までのテイラー展開による位置の重みづけを $w:1-w$ とすると、推定位置 $x_{new}(t)$ は

$$x_{new}(t) = w(x_{sys}(t)) + (1-w)(x_{2nd}(t)) \quad (17)$$

$$0 \leq w \leq 1$$

として得ることができる。これにより、2.4節で示したレール抽出アルゴリズムで生じている2種類の不連続性を抑えつつ、状況の変化を取り込んだ消失点位置の推定を行うことができる。 w はカーブなどの状況変化が多い場合には大きな値とし、状況変化の小さい場合や現制御装置による推定誤差が大きい場合には小さな値を設定する。なお、この際に必要となる一階微分と二階微分の値はある時間間隔 ΔT を定めて

$$x(t)' \cong (1-u)x(t-\Delta t)' + u \frac{x_{sys}(t) - x_{sys}(t-\Delta T)}{\Delta T} \quad (18)$$

$$x(t)'' \cong (1-u)x(t-\Delta t)'' + u \frac{x_{sys}(t) - 2x_{sys}(t-\Delta T) + x_{sys}(t-2\Delta T)}{\Delta T^2} \quad (19)$$

によって近似値とする。一階微分と二階微分の値についても連続性を保つため、時刻 t で算出した値は重み u で更新することとした。 u が小さいと誤差の影響が大きくなるが、大きいと変化への対応が鈍くなる。 ΔT についても、小さすぎると誤差の影響が大きくなり連続性が低下するため、ある程度の大きさを設定する必要がある。ただし、大きすぎると算出される消失点位置の変化への対応が鈍くなり精度が低下する。推定精度とレールの変化状況を考慮して適切な値を設定する必要がある。

これによって、レール抽出が失敗した場合でも、消失点は過去の算出値を元に補間されるため、視野制御情報として使用する場合には概ね影響を及ぼさない。

2.6 選択条件に制約を用いた近傍ルール抽出

前節で示したルール抽出アルゴリズムは過去フレームの情報を用いておらず、フレーム毎に全探索を行っている。そのため、誤検出をした場合に、視野制御に大幅な動作ミスが生じてしまう。これに対して「ルールは急激に変化することはない」という制約条件を入れることで、過去フレームの抽出情報を用いて高速化を行う。

広角型カメラがとらえるルール画像の下部分、つまり距離の近い部分はあらかじめ作成し登録された複数のルール形状パターンから最も近いパターンを選択することでルール形状を推定している。ルール形状パターンはルールの曲率によって類似したパターンと右カーブと左カーブのように大きく異なるパターンがある。図 24 にルールパターンの例を 5 つ示す。図で隣あうパターン、例えば L2 と L1、S と R1 はカーブの曲率が近い。一方、L2 と R1 は曲率が大きく異なり、現実では瞬間的に L2 から R2 にルール形状が変化することは起こり得ない。3 章で示したルール抽出アルゴリズムでは、類似パターンを探す際に全てのパターンが並列に扱われ、各時間ステップで独立に選択されている。そのため、ノイズ等の影響により誤認識してしまい、パターン L2 から R2 へ瞬間的に変化するといったことが起こり得る。望ましい変化と望ましくない遷移を実線と破線で示す。また、2.4 節で示したルール抽出アルゴリズムで取り得る状態遷移は実線と破線の両方である。破線の状態遷移を無くし、パターン同士の類似性にもとづき、変化の連続性を保ちながらパターンの切り替えを行う必要がある。

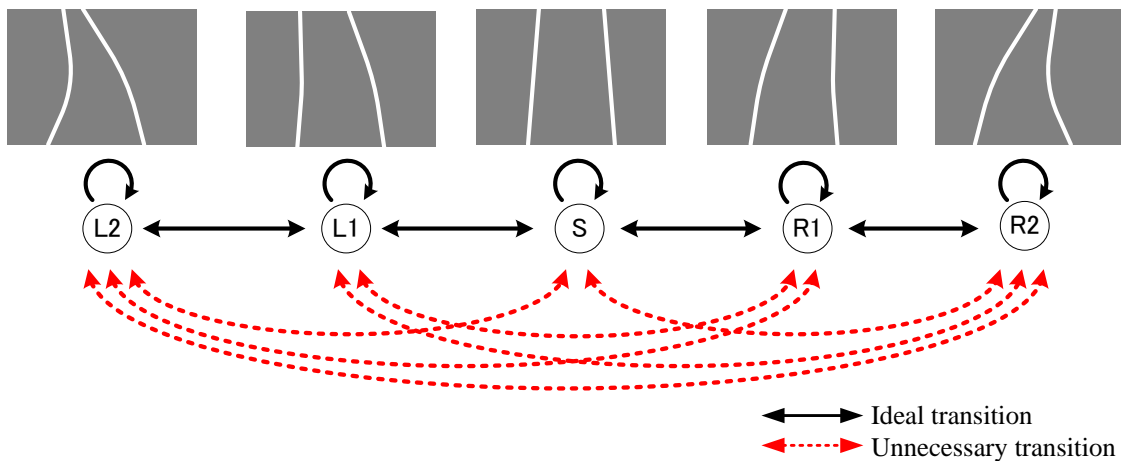


図 24 レール抽出アルゴリズムの問題

前節で示したルール抽出アルゴリズムでのルールパターンは、図 25 のように左右のルールの上端(x_{Ltop}, x_{Rtop})と下端($x_{Lbottom}, x_{Rbottom}$), 中央部(x_{Lmid}, x_{Rmid})の位置を表す 6 つの数値データによって表現されている。

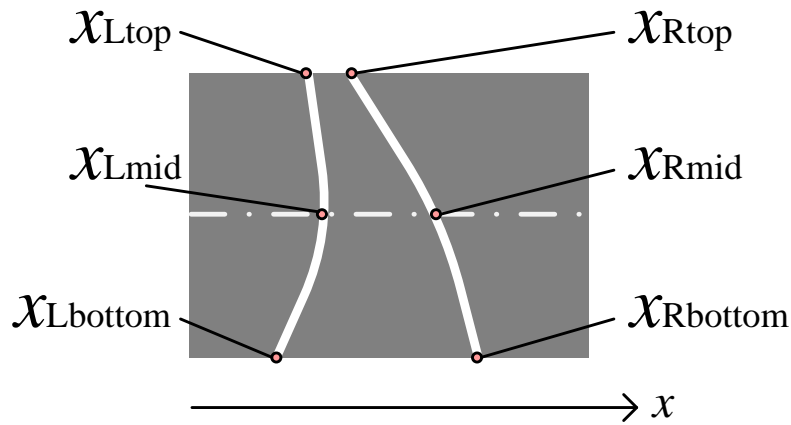


図 25 レールパターンデータ

これらのデータから各レールパターンの曲率を読み取って類似関係を算出し、現在のレールパターンから次に選択できるパターンの制約条件を設定することで、レールパターン変化の不連続性を以下のように解決する方法が考えられる。なお、この方法をとることによって各時点で対象となるレールパターンの選択肢が少なくなる。これにより処理速度の向上も期待され、あらかじめ用意しておくレールパターンの数に処理速度が影響を受けにくくなるという利点もある。

レールパターンの曲率を用いてレールパターンどうしの類似度を定義する方法について検討する。軌道中心線の上端、下端、中間位置はレールパターンデータの top, mid, bottom の左右の値を平均することで

$$x_{Ctop} = \frac{x_{Ltop} + x_{Rtop}}{2} \quad (20)$$

$$x_{Cmid} = \frac{x_{Lmid} + x_{Rmid}}{2} \quad (21)$$

$$x_{Cbottom} = \frac{x_{Lbottom} + x_{Rbottom}}{2} \quad (22)$$

と求められる。

データの数は3つであり、この点を2次方程式で近似する。垂直方向をy軸とするとき、下端のy = 0でのレールはほぼ垂直であることからx(0)' = 0である。この条件を考慮するとレール中心線は

$$x(y) = a + cy^2 \quad (23)$$

と表現できる。このときの c の値が画面上のレールのみかけ上の曲率を表す指標となる。この値を用いて類似度を定義することとする。 c の値が0の場合は直線であり、正の値は右カーブ、負の値は左カーブであり、値が大きいほどカーブが急であることを表す（図 26）。

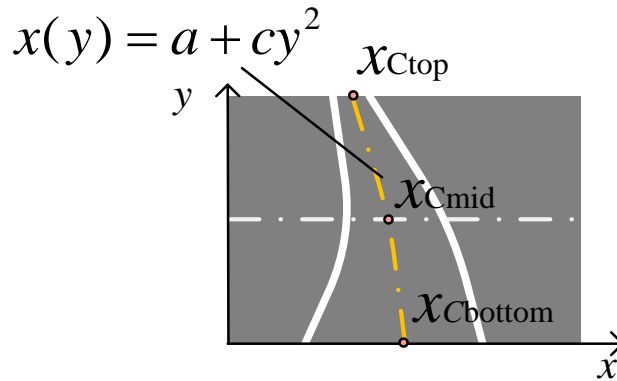


図 26 レール中心線の近似

また、曲率の指標となる c の値は、最小二乗法により

$$c = \frac{\sum x_i \Sigma y_i^2 - N \Sigma x_i y_i^2}{(\Sigma y_i^2)^2 - N \Sigma y_i^4} \quad (24)$$

と求められる。レールパターンのデータは y 方向の長さを 1 に基準化すると $(x_{Cbottom}, 0)$, $(x_{Cmid}, 0.5)$, $(x_{Ctop}, 1)$ と表すことができる。これを上の式に代入して

$$c = \frac{1.75x_{Ctop} - 0.5x_{Cmid} - 1.25x_{Cbottom}}{1.625} \quad (25)$$

が求められる。

レールパターン i, j について求めた類似度 c_i, c_j の値の差を類似度 $d_{i,j}$ として

$$d_{i,j} = |c_j - c_i| \quad (26)$$

と定義し、その値を成分とする類似度行列を作成する(図 27 上段)。

類似度を近い順に順序付けを行い(図 27 中段)、対象レールパターン自身以外の上位 M 位までを選択できるレールパターンとして制約条件を設ける(図 27 下段)。各レールパターンで次のレールパターンを選択する際には、ここで定めた選択可能なレールパターンからのみ選択することで、レールパターン選択時の連続性を保つことができる。

類似度行列

| | L2 | L1 | S | R1 | R2 |
|----|-----|-----|-----|-----|-----|
| L2 | 0.0 | 0.1 | 0.2 | 0.4 | 0.6 |
| L1 | 0.1 | 0.0 | 0.1 | 0.2 | 0.4 |
| S | 0.2 | 0.1 | 0.0 | 0.1 | 0.2 |
| R1 | 0.4 | 0.2 | 0.1 | 0.0 | 0.1 |
| R2 | 0.6 | 0.4 | 0.2 | 0.1 | 0.0 |

順位行列

| | L2 | L1 | S | R1 | R2 |
|----|----|----|---|----|----|
| L2 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| L1 | 1 | 0 | 1 | 2 | 3 |
| S | 2 | 1 | 0 | 1 | 2 |
| R1 | 3 | 2 | 1 | 0 | 1 |
| R2 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 |

選択行列

| | L2 | L1 | S | R1 | R2 |
|----|----|----|---|----|----|
| L2 | ○ | ○ | × | × | × |
| L1 | ○ | ○ | ○ | × | × |
| S | × | ○ | ○ | ○ | × |
| R1 | × | × | ○ | ○ | ○ |
| R2 | × | × | × | ○ | ○ |

図 27 類似度行列による制約の設定

選択可能なレールパターンの数 M については、選択肢が少ないとカーブなどの状況変化への対応が緩慢になりすぎるおそれがある。また、誤検出からの復帰にも時間がかかるおそれがある。逆に、選択肢が多すぎると現システムと同様に選択されるレールパターンに不連続性が生じてしまう。上記の点を考慮して適切な値への調整が必要である。類似度から選択可能なレールパターンを求める流れを図 27 に示す。

改良の結果を確認する指標としては、あるレールパターン i からレールパターン j が選択された回数 $n_{i,j}$ を用いる。この値から、類似したレールパターン間どうしの選択がどの程度増加したかを確認することで、不連続性がどの程度解消されたかを確認する。

2.7 検証試験

作成したプログラムに対して、複数の列車前方映像を対象にしたアルゴリズムの検証を実施した。映像については、カーブや周辺の条件に多様性が出るよう配慮して映像を選定し、60分の前方向映像を20シーン（合計約36000フレーム）に対して実施した。近傍領域のレール抽出アルゴリズムについては、我々が登録したレールパターン数は30程度であり、様々な線路の曲率の映像（60分の前方向映像×20場面）から実際に出現したレールパターンを用いて作成した。遠方領域のレール抽出アルゴリズムについては、レール抽出する領域の最上部は画面全体の下から2/3程度に設定し、その設定領域において、近傍領域が2/3であり、残り1/3が遠方領域として処理をした。また、指定した分割数になるようにし、最近傍と最遠方のサイズが2:1となるように計算しており、我々は経験的に分割数を10に設定した。近傍領域、遠方領域ともに、類似度が設定した値よりも低い場合は、1フレーム前で検出したレール情報を用いることとしている。

これらの試験においては、レール抽出が1秒分（30フレーム）以上未検知とならないこと、最終的に得られる消失点が実際の消失点位置に対して、画面幅の1/10以内に収まること、が満たされれば、視野制御において概ね運転士の視線方向を撮像することができるため、前方監視に要する十分な画質が得られると言える。

2.7.1 消失点抽出の検証

改良プログラムを実行する際のパラメータについては、差分を求める時間 ΔT を2、観測値の重み w を0.3、微分値の更新の重み u を0.1とした。差分を求める時間は、制御ステップ2つ分程度の比較的短い時間が振動をとらえるのに適当であった。観測値の重みは小さい方が振動を抑えられるが、小さすぎると推定値が移動しなくなってしまう場合があり、0.3程度が妥当な値であった。微分値の更新の重みはなるべく微分値が連続的に変化するように、更新の重みを小さくした。

現システムによる消失点位置を表示させた際の定性的な動作としては、消失点位置がほぼ定常的に振動し、推定誤差によって一時的に大きく移動してしまうといった現象が確認できたが、改良プログラムでは、定性的な動作の確認結果としては消失点位置の振動を抑えることができた。また、短時間に消失点が大きく移動することがなくなり、比較的滑らかに消失点が移動することが確認できた。消失点の位置の変動をグラフにしたものを図28に示す。

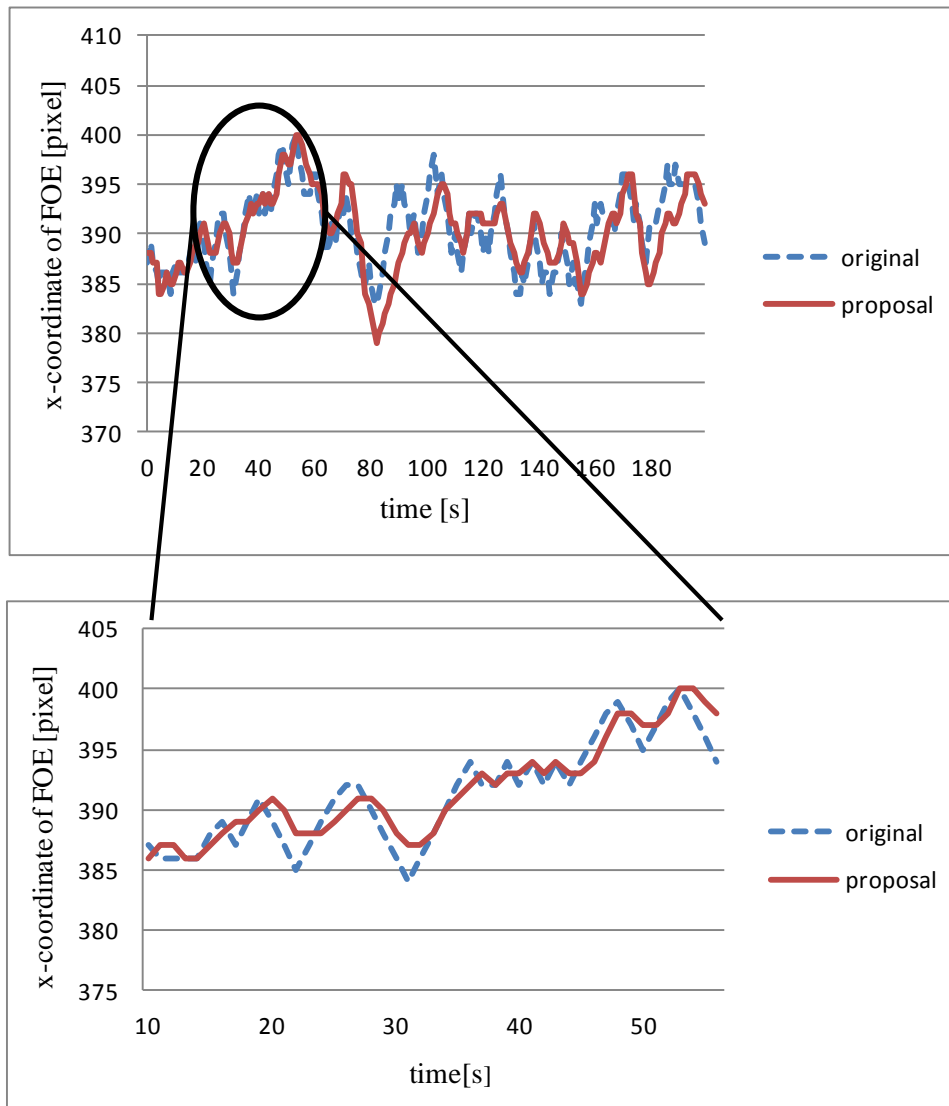


図 28 改良前と改良後の消失点座標

破線が現システムによる消失点の座標を，実線が過去の推定値を考慮した消失点の座標を表している。長時間にわたる変動をグラフにすると消失点位置が振動する様子が見づらくなってしまったため，一部取り出してグラフにしている。過去の推定値を考慮することにより，振動の振幅が少なくなり，変化が連続的になった様子が分かる。グラフから消失点の大きな変化と振動が小さく抑えられていることがわかる。

60 分の前方向映像×全 20 シーンにおいて，後述するルール抽出の未検知箇所以外では，全区間にわたり，消失点の急激な変化がなくなり，被制御カメラ映像中のブレが発生しないことを確認した。

2.7.2 選択条件に制約を用いたルール抽出の検証

図 24 で示したものと同等の 5 つのルールパターンを使用し、左右両方のカーブが出現する 60 分の映像(フレームレート 29.97fps, 全 1798 フレーム)×1 シーンに対してルール抽出を実施した結果を表 1 に示す。

表 1 ルールパターンの状態遷移回数比

(a) Result without constraints

| | L2 | L1 | S | R1 | R2 |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|
| L2 | 87.8% | 2.0% | 4.1% | 2.0% | 4.1% |
| L1 | 0.5% | 61.5% | 32.9% | 4.5% | 0.6% |
| S | 0.2% | 22.2% | 66.5% | 7.0% | 4.1% |
| R1 | 0.0% | 12.7% | 33.3% | 50.9% | 3.1% |
| R2 | 0.4% | 0.9% | 17.8% | 4.9% | 76.0% |

(b) Result with constraints

| | L2 | L1 | S | R1 | R2 |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|
| L2 | 87.8% | 12.2% | 0.0% | 0.0% | 0.0% |
| L1 | 0.9% | 65.4% | 33.7% | 0.0% | 0.0% |
| S | 0.0% | 22.3% | 69.2% | 8.5% | 0.0% |
| R1 | 0.0% | 0.0% | 37.3% | 53.9% | 8.8% |
| R2 | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 8.9% | 91.1% |



 Selectable
 Not selectable

表 1 (a)が選択条件に前回フレームにて選択されたルールパターンによる制約条件を持たない結果、表 1 (b)は制約条件を持たせた結果である。表は全 1798 フレームの状態遷移に対して、列から行のルールパターンへの遷移発生割合を示している。各値はある時刻 t において行で示したルールパターンが、時刻 $t+1$ において列で示したルールパターンを選択した割合を算出したものである。例えば、表 1 (b)の 1 行目では、L2 から L2 への遷移が 87.8%であり、L1 への遷移が 12.2%であることを示している。また、青いハッチングが選択可能な遷移を表しており、ハッチングが選択不可を表している。「制約条件なし」では、数%から十数%程度あった起こり得ない遷移が、制約条件を設けることで 0%となっている。したがって起こり得ない遷移が解消され、ルール抽出がより連続的な動きになったといえる。基本的に同パターンと最も類似したパターンのみ選択可能なので、対角線とその左右のみが選択され、類似したルールパターン間のみ選択されるようになった。

2.7.3 考察

60 分の前方映像×全 20 シーンにおいて、レールが 1 秒以上未検知となったのは、6 箇所あった。このうち 5 箇所はトンネルであり、列車の前照灯で照らしてはいるものの、レール抽出するのに十分な輝度が得られていないことから生じる問題である。もう 1 箇所は上り勾配区間であった。この原因として、登録してあるレールパターンが平地を想定しているため、上り勾配区間での見た目上のレールの傾き（ハの字の開き具合）に対応していなかったことが挙げられる。この対策としては、レールパターンの登録の際に勾配を加味することが考えられるが、選択条件に制約を持たせる行列の作成が困難であるため、類似度の計算に工夫が必要となる。

2.8 遠方の抽出レール形状の精度向上

列車前方映像において、遠方の対象物ほどスケールに対する解像度が低下する。そのため、パターンマッチングによるレール抽出手法は遠方レールの画像解像度が低いといった問題があり、精度良くレール抽出が行われていない。これにより、視野制御が正しく行えない場合が発生している。これに対して、線路の形状などの鉄道固有の制約条件を組み込むことで遠方レールの抽出精度の向上を図る。

精度向上させるためのアルゴリズムは以下 (A) ~ (C) の3つの手順で構成される。

- (A) 既存のレール抽出プログラムによって抽出されたレール形状を、列車を基準とした3次元空間上の座標系に変換する。
- (B) 3次元空間上に変換されたレール形状を、左右レールの間隔が軌間を満たしているか否か、レールの曲率は線区最小曲率を満たしているか否かといった制約条件のチェックによりレール形状を補正する。
- (C) 補正されたレール形状を画面上に逆変換し、画面上の補正されたレール形状を得る。
という手順で高精度化を行う。

ここで画面である2次元座標系から実空間である3次元座標系への変換を F とし、その逆変換を F^{-1} とする。

2.8.1 レール抽出

左右のレール位置を，下に示すように，抽出されているレールの画面高さ方向区間内の値 h に対する画面横方向の左レール位置 w_L ，右レール位置 w_R を表す関数 g_L ， g_R として

$$w_L = g_L(h) \quad (27)$$

$$w_R = g_R(h) \quad (28)$$

と表現する。抽出されたレールデータの概念を図 29 に示す。レール抽出については 2.4 節で述べたアルゴリズムを用いる。

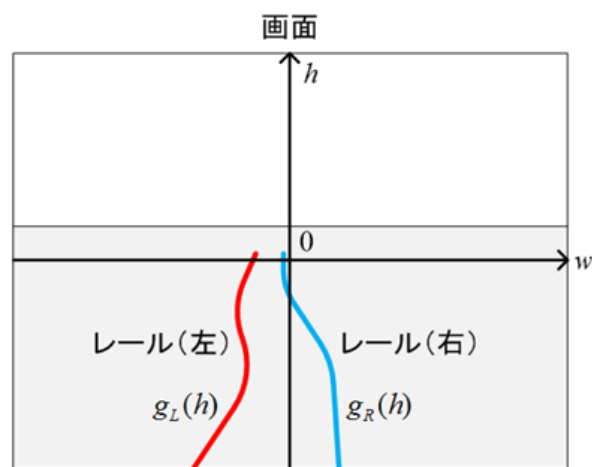


図 29 レール抽出データ

2.8.2 画面レールと実空間レール上の節点データ作成

画面上の左右レール上に画面下端から高さ方向について等間隔に $0, 1, \dots$ と番号をふった節点 $r_L[i], r_R[i]$ を設定する (図 30)。節点の数は任意に定められることとする。この点を F によって列車基準とした 3 次元座標系の位置へ変換する。このとき、 $r[i]$ は 2 次元空間のレール上の位置、 $R[i]$ は 3 次元空間のレール上の位置を表すこととする (図 31)。

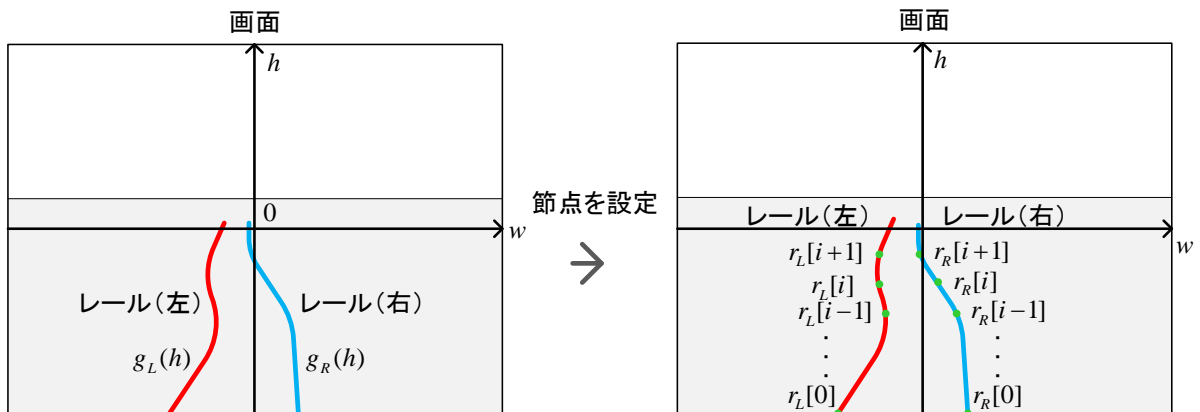


図 30 画面レール上の節点データ

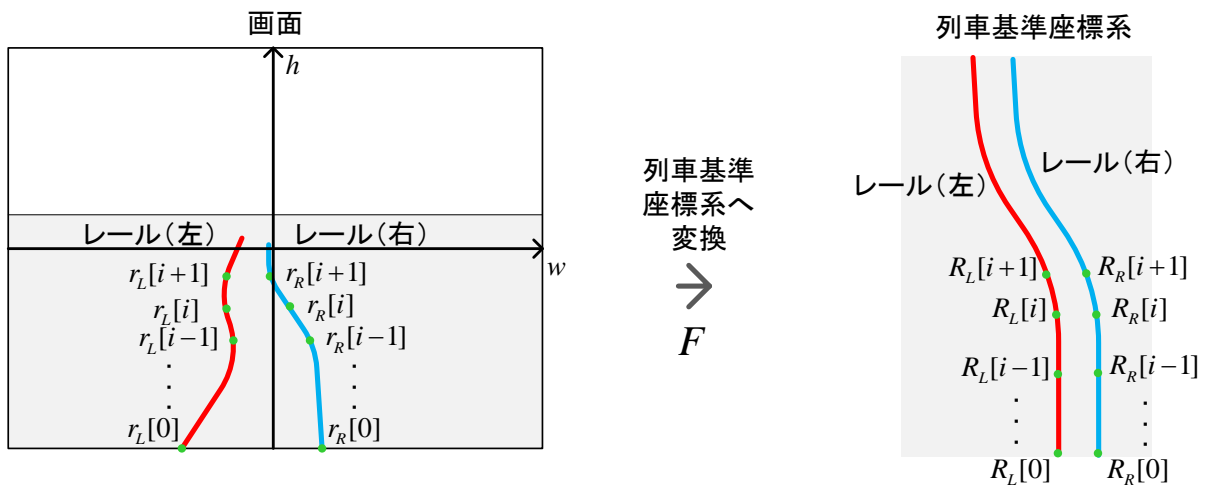


図 31 画面レールと実空間レール上の節点データ作成

2.8.3 レール上の節点までの距離データ作成

$R_L[i], R_R[i]$ の値を用いて、左右レールごとに、設定した点の間の距離を累積していくことで各節点までのレール沿いの距離を以下の式によって折れ線で近似して求める。

$$D_L[i] = D_L[i - 1] + |R_L[i]:R_L[i - 1]| \quad (29)$$

$$D_R[i] = D_R[i - 1] + |R_R[i]:R_R[i - 1]| \quad (30)$$

ここで、 $D_L[i], D_R[i]$ は節点*i*までのレール沿いの距離を表し、 $|R_R[i]:R_R[i - 1]|$ は節点間の直線距離を表している。また、初期点は $D_L(0) = 0, D_R(0) = 0$ とする。列車前面からレール上の節点までの距離の概念を図 32 に示す。

これにより、節点 0 からレール沿いで任意の距離*d*だけ前方に離れたレール位置を $R_L(d)R_R(d)$ とすると、その点は何番目と何番目の節点間にあるかを求めることができる。点が節点*i*と*i + 1*の間にあるとき、レール形状を折れ線で近似することにより、0 から 1 の値をとる α, β を用いて節点間の点として

$$R_L(d) = R_L[i] + \alpha \overrightarrow{R_L[i]R_L[i + 1]} \quad (31)$$

$$\alpha = (d - D_L[i]) / (D_L[i + 1] - D_L[i]) \quad (32)$$

$$R_R(d) = R_R[i] + \beta \overrightarrow{R_R[i]R_R[i + 1]} \quad (33)$$

$$\beta = (d - D_R[i]) / (D_R[i + 1] - D_R[i]) \quad (34)$$

と表現することができる。

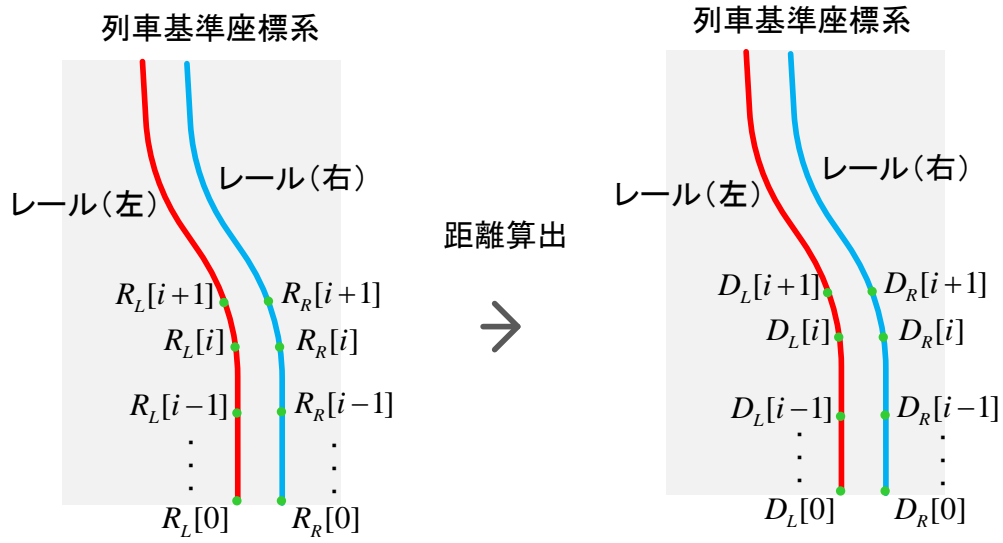


図 32 レール上の節点までの距離データ作成

2.8.4 レール上の節点の整理

これまでの処理では、画面を基準として等間隔にレール上の節点を設定したため 3 次元空間上においては、遠方に行くほど各節点の間隔が粗くなっていく。レール形状の補正処理を行いやすくするために、レール節点を 3 次元の実空間上で等間隔となるように以下の手順によって $R'_L[i]$, $R'_R[i]$ を設定する。

- ① $R'_L[i]$, $R'_R[i]$ の各節点に対応するレール沿いの距離 d を算出する。
- ② $D_L[j] < d \leq D_L[j + 1]$, $D_R[j] < d \leq D_R[j + 1]$ となる j をそれぞれ求め、前式の α , β を求める。
- ③ 得られる $R_L(d)$, $R_R(d)$ を $R'_L[i]$, $R'_R[i]$ とする。

節点数を m とするとき、新しく設定する節点の間隔は左右それぞれ

$$\frac{D_L[m-1]}{m-1}, \frac{D_R[m-1]}{m-1} \quad (35)$$

となる。3 次元実空間上での節点を整理する概念を図 33 に示す。

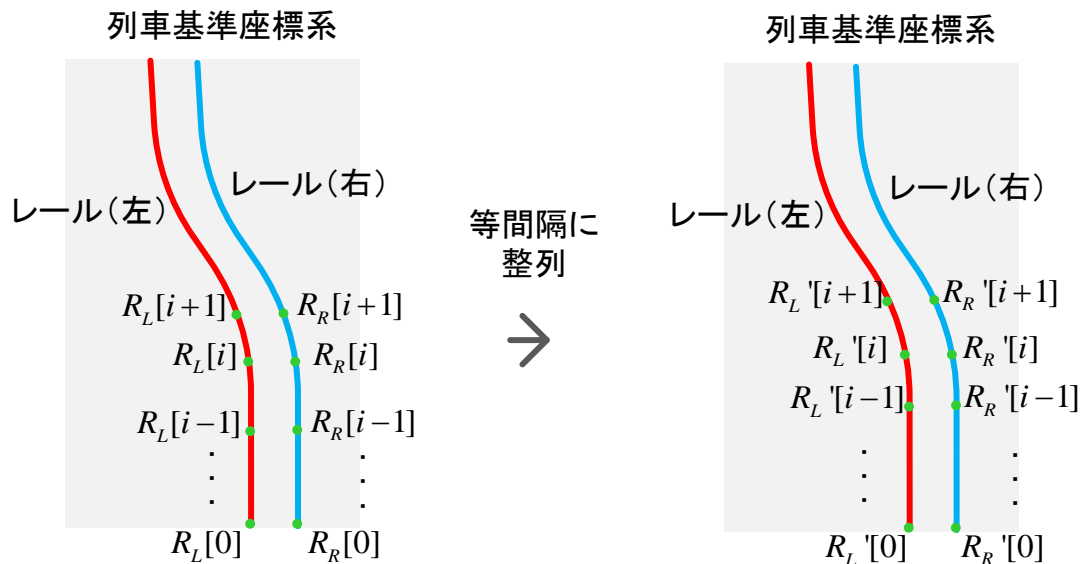


図 33 レール上の節点の整理

2.8.5 レールセンタライン節点の設定

左右のレール位置座標からレールのセンタライン上の節点を軌道中心線上の点として

$$R'_C[i] = \frac{R'_L[i] + R'_R[i]}{2} \quad (36)$$

によって求める (図 34)。

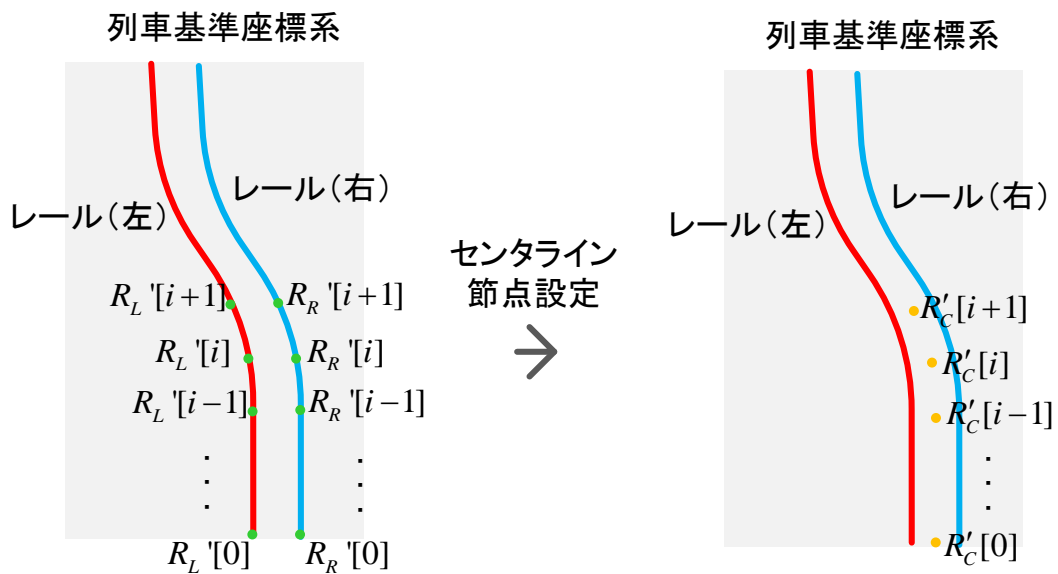


図 34 レールセンタライン節点の設定

2.8.6 レール曲率による節点の補正

i 番目と $i-1$ 番目のレール節点区間での列車基準座標系の前方に対するレールの向きを $\theta(i)$ 、対象節点でのレールの角度変化（曲率）を $\Delta\theta(i)$ とする。 i 番目と $i+1$ 番目のレール区間と $i-1$ 番目と i 番目のレール区間について、各区間のレールの向きを $\overrightarrow{R'_C[i]R'_C[i+1]}$ 、 $\overrightarrow{R'_C[i-1]R'_C[i]}$ と表現する。この2つのベクトルのなす角は内積を用いて

$$\cos\Delta\theta[i] = \frac{\overrightarrow{R'_C[i]R'_C[i+1]} \cdot \overrightarrow{R'_C[i-1]R'_C[i]}}{\left| \overrightarrow{R'_C[i]R'_C[i+1]} \right| \left| \overrightarrow{R'_C[i-1]R'_C[i]} \right|} \quad (37)$$

によって求められる（図 35）。

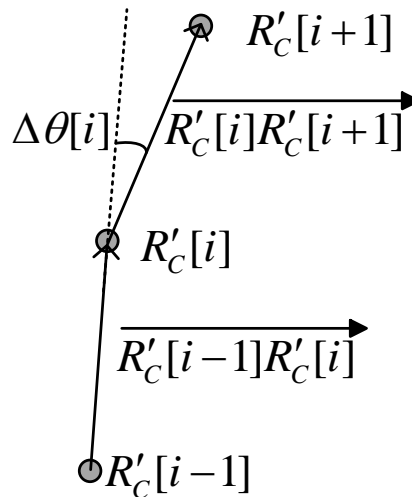


図 35 レール曲率の算出

この値について、線路の最大曲率の上限 $\Delta\theta_{max}$ を超える場合には以下のように補正を行う。

$$\Delta\theta[i] = \begin{cases} \Delta\theta[i] & \Delta\theta[i] < \Delta\theta_{max} \\ \Delta\theta_{max} & \Delta\theta[i] > \Delta\theta_{max} \end{cases} \quad (38)$$

このとき、線路の曲線半径と $\Delta\theta$ との関係は、図 36 に示すように

$$\sin\left(\frac{\Delta\theta[i]}{2}\right) = \frac{\left| \overrightarrow{R'_C[i-1]R'_C[i]} \right| / 2}{U} \quad (39)$$

$$\cos\Delta\theta[i] = 1 - 2 \sin^2\left(\frac{\Delta\theta[i]}{2}\right) = 1 - \frac{|R'_C[i-1]R'_C[i]|^2}{2U^2} \quad (40)$$

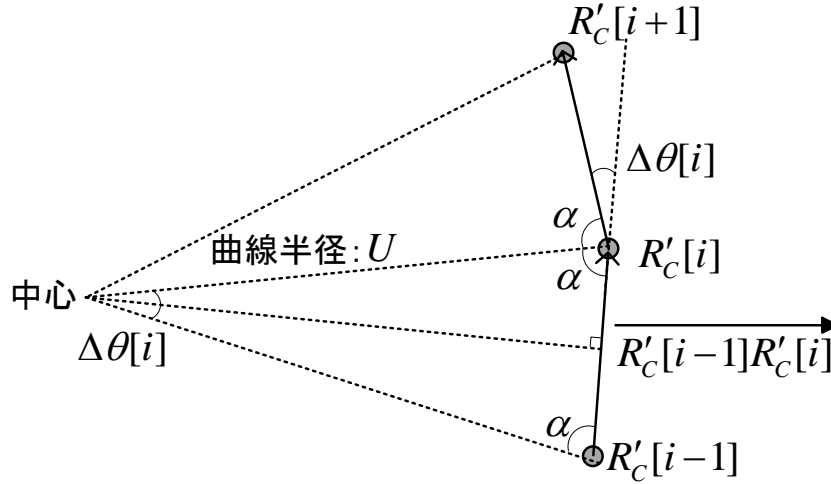


図 36 線路の曲率半径と曲率 $\Delta\theta$ との関係

と求めることができる。

これにより、補正を行った軌道中心線上における節点の位置は

$$\theta[i] = \theta[i-1] + \Delta\theta[i] \quad (41)$$

と与えられる。補正後の接点位置を $R''_C(i)$ とおき、

$$R''_C(0) = R'_C(0) \quad (42)$$

$$R''_C[i] = R''_C[i-1] + \begin{bmatrix} \cos\theta[i] & -\sin\theta[i] & 0 \\ \sin\theta[i] & \cos\theta[i] & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ |R'_C[i-1]R'_C[i]| \\ 0 \end{bmatrix} \quad (43)$$

によって接点を求める (図 37)。

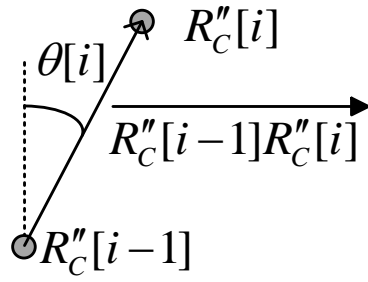


図 37 $R_C''[i]$ の求め方

さらに，前フレームとのレール形状の連続性を保つため，フレーム t でのセンタラインの節点位置 $\hat{R}_C(t, i)$ を

$$\hat{R}_C[t, i] = (1 - \omega)\hat{R}_C[t - 1, i] + \omega R_C''[i] \quad 0 < \omega \leq 1 \quad (44)$$

として，前フレームの位置に重みづけ更新することで線路形状が連続的に変化するようにした。

2.8.7 左右レール幅によるレール節点の補正

軌道中心線の位置に対応する左右のレール位置は、軌道中心線の位置 $\hat{R}_C[i]$ から、向き θ と直交する左右の向きに狭軌の軌間である 1067mm に 50N レールのレール幅である 65mm を足したものを左右半分ずつである $(1067 + 65) / 2$ [mm] に移動した位置 $\hat{R}_L[i], \hat{R}_R[i]$ として得られる (図 38)。

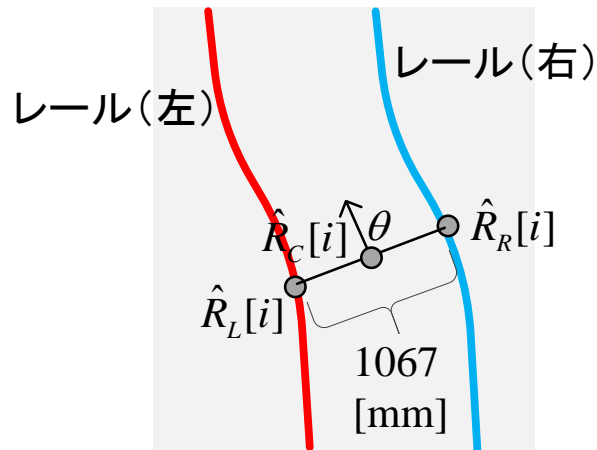


図 38 実空間レール上の整列補正点群データ

得られた左右レール節点を F^{-1} で画面上に逆変換することで、曲率の条件を満たした幅 1067mm の軌道が得られる。

2.8.8 検証試験

列車前方映像を対象にし、作成したアルゴリズムの検証を実施した。映像のフレームレート 29.97fps, 総フレーム数 1500 フレーム, 50 秒分の列車前方映像に対して, 制約条件として, 線路の曲線半径を 100m とし, 軌間は 1067mm とした。

各フレーム内の抽出したレールから求められた節点ごとの曲率の最大値を $\cos\Delta\theta$ で表現したものを図 40, 図 39 に示す。 $\cos\Delta\theta$ が 1 に近いほど曲率が小さく, 0 に近いほど大きいことを表している。図 40 は改良前のデータであり, 図 39 は改良後のデータである。

改良前では, 曲率の $\cos\Delta\theta$ が小さく, 曲線半径 100m を下回る値が出ているが, 改良後では曲線半径の制約によって曲率が極端に小さな値をとることが抑制されていることが分かる。

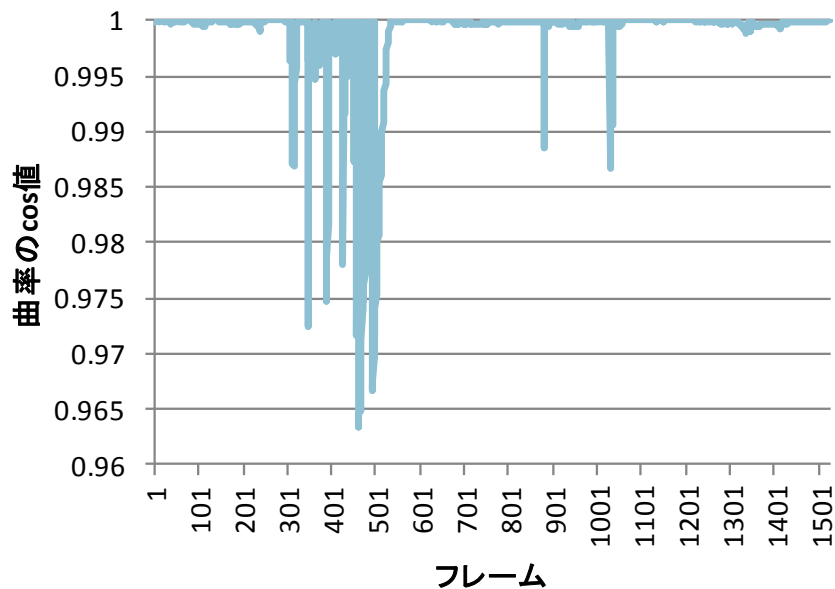
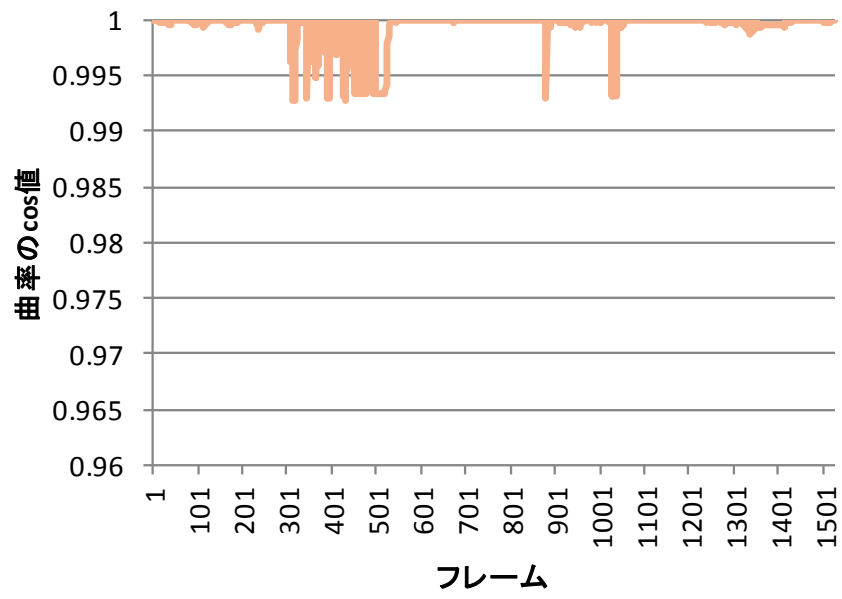


図 39 改良前の曲率 $\cos\Delta\theta$



2.9 まとめと今後の課題

2.9.1 まとめ

列車前方監視のためのカメラ視野制御装置について、パターンマッチングによる近傍領域レール抽出、領域分割マッチングによる遠方領域レール抽出、過去の推定値と現在の観測値を用いた消失点推定、レールパターンの類似度による抽出レールの連続化の機能を有することで実用に資した列車前方監視のためのカメラ視野制御手法を開発した。

過去の推定値と現在の観測値を用いた消失点推定を用いることで消失点を安定して取得できるようになり、視野制御雲台の動作が円滑となった。

また、レールパターンの類似度による抽出レールの連続化を行うことにより、映像上では起こり得ないレールの変化を排除することにより、近傍領域のレール探索における誤検出が極めて少なくなることで、レール抽出の精度が向上し、消失点の算出精度も向上した。

線路の曲率、軌間による制約条件を組み込むことで、現実にはあり得ない極端に曲率の大きな線形や、軌間が不均一な抽出することを排除し、遠方での抽出精度を向上させた。

通常のハンディカムを広角に設定した映像では、200m程度遠方の解像度が1画素あたり10cm程となる。この場合、障害物のサイズにもよるが、人(170cm×40cm)を対象とすると17×4pixelとなり画像上から障害物と判断することは非常に困難である。本手法を用いることで4倍程度の望遠で撮像できれば、68×16pixelの解像度で対象物を得ることができるため、画像上から障害物と判断することが可能となると考えられる。こういった望遠カメラにより得られた画像から障害物を検出する方法としては、一般的な手法としては、HOG(Histogram of Oriented Gradients)などの勾配ヒストグラムを用いて対象物(人や車)を機械学習させることによって検出する方法などがあるが、学習していない障害物を検出することは難しい。これに対して、複数の画像処理モジュールを用いて総合的に障害物を判定する手法がある。各画像処理モジュールには、レールの連続性を検定し途切れがあった場合は障害物と判定する手法や、軌道面の輝度に関する平均・分散値を計測しておき、この輝度と大きく異なる画素を障害物と判定する手法、物体のエッジとテクスチャから判定する手法、オプティカルフローの特異値を検出する手法などがあり、これらの手法により、学習されていない障害物に対してもある程度の検知精度を持つことができる。

2.9.2 今後の課題

今後の課題としては、上下勾配への対応、遠方レールの抽出精度向上と、得られた望遠画像からの障害物検知などへの適用が挙げられる。遠方のレールは画像の解像度が低下しているためレール抽出がより困難であるという問題がある。障害物検知については、我々が開発をしてきた検知アルゴリズムを本システムで得られた望遠画像に対して適用し、列車前方監視の実用化を目指す。

第3章 視認性を検査する手法

3.1 はじめに

列車の運転は、現示される信号の条件に基づきなされるものであり、地上信号方式の運行形態においては、信号現示（ここでは発光の色や明滅によって示される列車を運転するための条件を表す）が定められた距離から見通せることは極めて重要である。すなわち、信号現示の見通しが得られていない状況は列車運行の安全に甚大なる影響を及ぼすこととなる。このように、信号設備の見通しという意味での視認性を確保することは極めて重要であり、常置信号機については通常の列車運行のつど、運転士が目視により確認行為をおこなっている。一方で、常時滅灯形の信号機類についてその視認性を運転士が日常の運行中において確認することは困難である。そこで本章では、これらの鉄道信号のうち、異常時にのみ発光し停止信号を現示するタイプである特殊信号発光機に対して視認性を現状より簡易に確認するために、この特殊信号発光機の視認性の確認用として近赤外線 LED の発光機を追加して視認性確認をする手法を開発した。開発した装置構成としては、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である。本章では、これらの視認性確認手法と、アルゴリズム、検証試験の結果について述べる。

また、本章における「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せ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。また、輝度については、基準値以上の印加電圧があり、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・製造されており、検査にてこれらの値は管理・確認されている。

3.2 特殊信号発光機の視認性確認について

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（操作器）、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、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。800m以上の距離からの視認性確認は、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、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必要な視認距離を確認することが難しいという課題がある。

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が求められている。

なお、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、本章では、「点滅形」を対象としている。外観図を図 41 に示す。



図 41 特殊信号発光機（点滅形）と特殊信号発光機（回転形）

3.3 検査の現状と視認性確認のための基本構成

3.3.1 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 800m 離れた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が、その後の建物や設備の新設や移転、草木の成長などによる見通しの遮蔽、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、特殊信号発光機は、必要により視認性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、中継の特殊信号発光機の新設や、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性確認の検査では、踏切側、特殊信号発光機側と視認性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（操作器）を扱い、特殊信号発光機を実際に発光させ、それを視認性確認地点側の作業員が目視にて視認性を確認し、必要に応じて特殊信号発光機側の作業員が、特殊信号発光機の角度調整や草木の伐採などを行う。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。また踏切から 800m 以上ある任意の地点だけでの確認であり、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、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、作業効率が悪いことも問題として挙げられる。さらに、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性確認手法の開発が強く望まれている。

3.3.2 要求仕様の整理

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

- 現状の特殊信号発光機の支持柱に設置可能なもの（取付方法を変更しない）
- 現行ケーブル（1ペア）のまま構築可能であること
- 現状の特殊信号発光機の発光の機能を低下させないこと
- 測定時に、列車運行を支障しないこと（停止現示のような発光をしない）
- 現状の特殊信号発光機の拡散角度（半値角 $\pm 15^\circ$ ）に対応し、視認性確認できること
- 発光素子の経年劣化やアクリル板の汚れ・腐食に伴う視認性の低下は製品保証に依る

測定機側の要求事項

- 客観的な視認性の評価ができること
- 連続して視認性の確認ができること
- 複数の特殊信号発光機を区別して視認性の確認ができること
- 効率よく検査が可能であること
- 検査不合格時の状況把握が可能であること

これらを要求事項とし、次節に示す不可視光を用いた視認性確認手法を提案した。

3.3.3 提案手法

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、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人間が映像を見ることで容易に確認ができ、対応策の検討が容易になる。

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ことを考慮し、近赤外線 LED を選定した。現行の特殊信号発光機の拡散角度（半値角）は $\pm 15^\circ$ であるので、使用する LED の半値角は $\pm 12^\circ$ 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（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、特殊信号発光機ごとの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。概念図を図 2 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。提案手法の概念図を図 42 に示す。

前記したとおり、本手法によって近赤外線を受信したことと、人間が赤色の発光を見えるということは一対一に対応してはいない。ここでは、遮りなどがなく、見通せていることの検査を自動化することが目的である。人間が赤色を見るために十分な明るさを有しているか

については、製造しているメーカーが経年に対する明るさを保証しており、そのために必要な着電圧値などは、現場にて適切に管理されているものとして扱う。

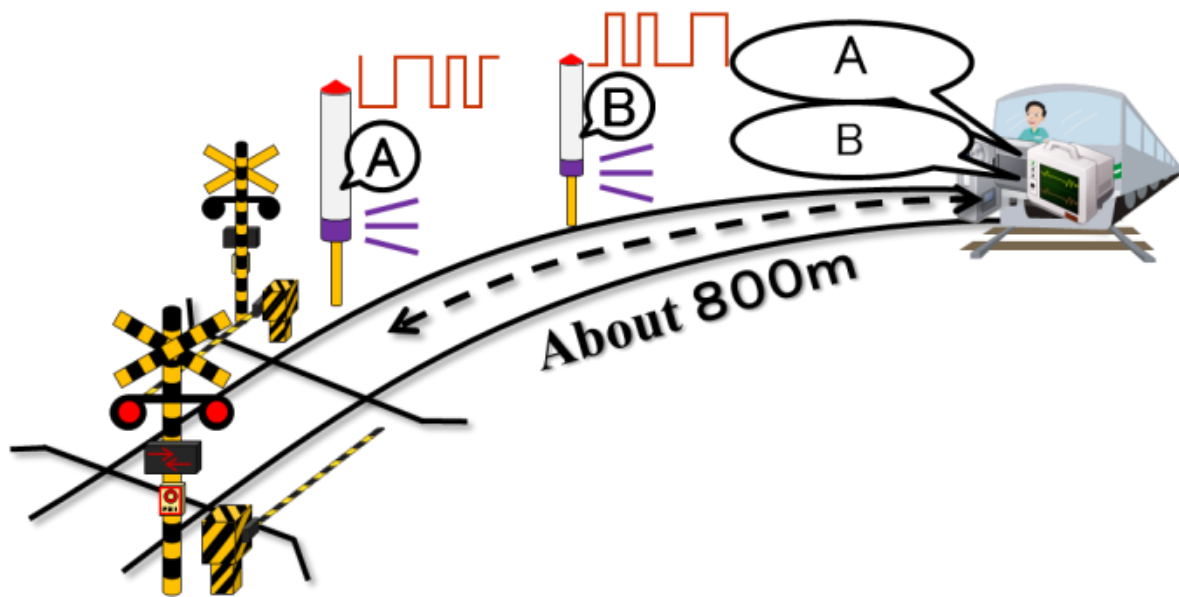


図 42 提案手法の概念図

3.3.4 車上検測方式

検測方式としては、地上検測と車上検測方式が考えられる。また、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。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。作業効率や視認性確認の連続性などの点を考慮し、営業車による車上検測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測方式の場合、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。

この手法の基本的な概念は可視光通信分野におけるイメージセンサ通信と同等である。可視光通信においては、伊藤ら[48], [49], [50]は、信号源の検出と通信のセンサを分けることで屋外 70m において 10Mbps の通信を可能としている。また、増田ら[51]は、高速度カメラを用いて 50m の距離から LED の交通信号機との通信を行っている。しかしながら、認識距離が遠方であること、できる限り広範囲を撮像すること、検査結果として映像ログを残すため高速度カメラを使用しないこと、複数の送信源（特殊信号発光機）を認識すること、といった観点から他のイメージセンサ通信とは異なる。

3.4 近赤外線 LED の選定

使用する近赤外線 LED として、入手のしやすさの観点から、ピーク波長 850nm と 940nm の近赤外線 LED について検討した。

これらの波長の車上検測方式への適用の可能性を確認するために、まず、近赤外線カメラの感度と車両用ガラスの赤外線透過率を実測定により評価した。この試験は近赤外線 LED と近赤外線カメラとの距離を 855m とし、ピーク波長が 850nm と 940nm の LED の発光、車両用ガラスの有無を条件として実施した。試験の様子を図 43 に、結果を図 44 に示す。また、近赤外線カメラで撮影した近赤外線部の画像を

図 45 に示す。これらの結果から、受光側のカメラ感度が、ピーク波長 940nm ではピーク波長 850nm の 2 分の 1 程度に低下すること、また、両方の波長において、車載用ガラスを透過させるとさらに光量が 2 分の 1 程度に低下することが分かった。

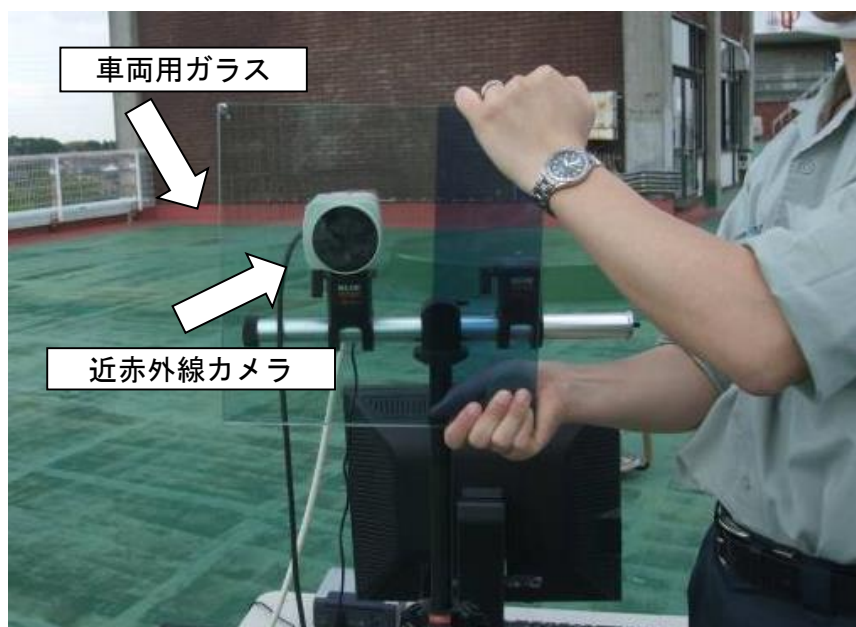


図 43 比較試験の様子

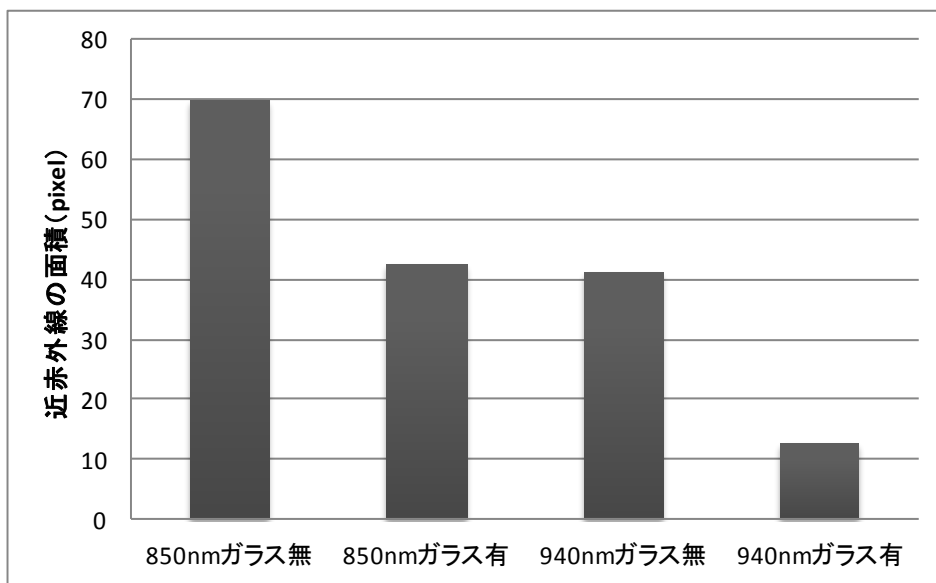


図 44 LED の波長と受光面積

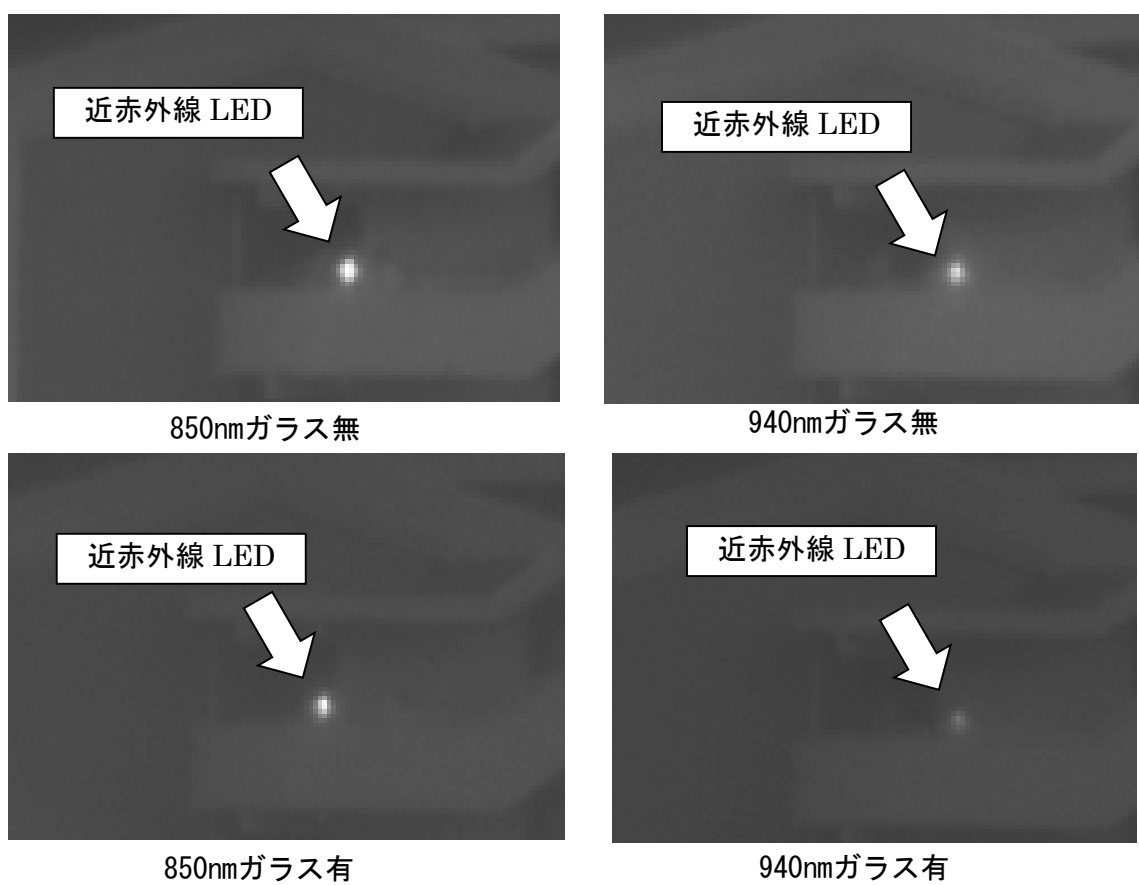


図 45 LED 種別・条件毎の近赤外線カメラ画像

ピーク波長 850nm の LED を用いた場合、暗所において肉眼で視認すると、人によっては薄らと赤色に発光していることを確認できることが明らかになった。一般に、人間が視認できる波長は 380nm～780nm 程度と言われており、それを超える波長は肉眼で見ても視認できないとされている。しかしながらピーク波長 850nm の LED は、850nm だけを発しているのではなく、ある程度の帯域幅を持ち、850nm を中心に可視光帯である 780nm 程度までの波長が含まれている。スペクトル分布特性が次式に示す一般ガウス関数に従うと仮定すると以下の式のようになる。ここで σ は半値全幅(Full Width at Half Maximum : FWHM)である。

$$f(x) = \exp\left\{-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (45)$$

$$\sigma = \frac{\text{FWHM}}{\sqrt{2\ln 2}} \quad (46)$$

そのため、ピーク波長 850nm で半値幅 45nm の LED では $\sigma \approx 19.1\text{nm}$ となり、ピーク波長 940nm で半値幅 50nm の LED では $\sigma \approx 21.2\text{nm}$ となる。したがって、それぞれの波長の相対放射強度は図 46 のようになる。ピーク波長 940nm の LED については人間が視認できる上限値とされている 780nm の波長においてはピーク波長の 4.2×10^{-14} 倍程度であり、ほぼ 0 とみなせる強度である。一方、ピーク波長 850nm の LED については 780nm の波長において、ピーク波長の強度の 0.1%程度が出力されている。すなわち、ピーク波長に対する放射強度が 230mW/Sr であるとすると、780nm においては 0.23mW/Sr 程度の放射強度があることが分かる。このことによりピーク波長が 850nm の LED を用いると肉眼で僅かに赤く発光しているように感じられる。しかしながらカメラ感度として、波長 940nm は 850nm の 1/2 程度である。これらの対策として、光吸収・赤外透過フィルタを用いて可視光をカットし、カメラゲインを最大に設定することで 940nm の波長を撮像しやすくした。また、太陽光に含まれる波長のうち、940nm の波長は大気中のオゾン層における H₂O などによって吸収され、地表に届くエネルギーが少ない波長として知られており [52]、環境ノイズへの耐性の点からも有利である。

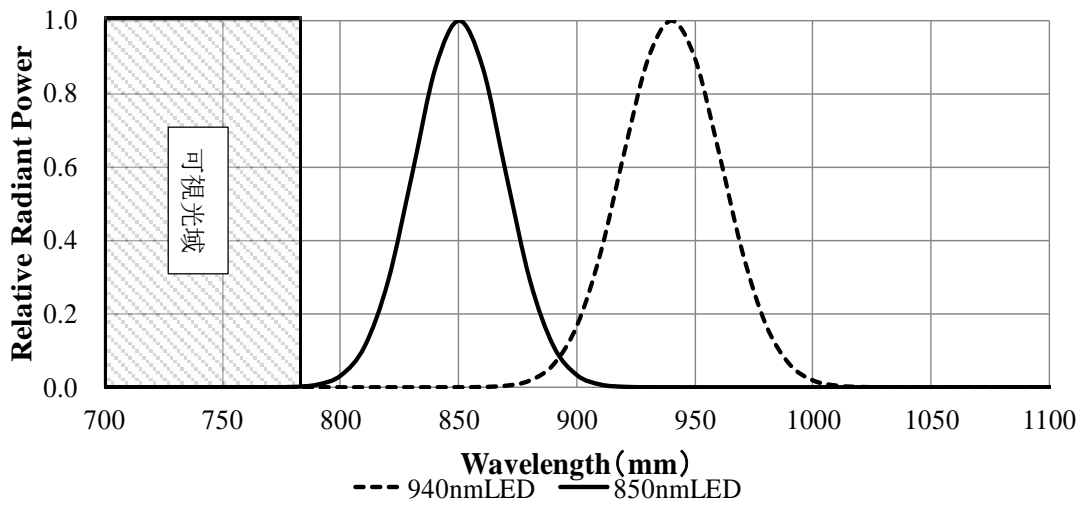


图 46 相对放射强度

3.5 点滅パターンと画像認識アルゴリズム

点滅を検知する方法として、絶対量を用いた判定は環境の変化に弱いことから、“点”から“滅”、“滅”から“点”への状態の変化に着目した NRZI による符号化が考えられる。一つ前のフレームと現在のフレームとの間に LED の点滅による状態変化が想定される時に“1”、変化はしていないと思われる状態の時は“0”とし、それぞれの画像に対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取り出す 2 値化処理を行い、結果が“0”の時は暗い領域を取り出す 2 値化処理を行うものであるが、この方式では 1 つの点滅の誤検知が 2 ビット誤りとして扱われてしまう問題がある。つまり、“10010”というパターンで点滅した場合、“1011”という情報と解釈するのが正しいが、2 番目がノイズなどで反転してしまい、“11010”というパターンで受光したとすると、“0111”という情報として認識されてしまい、2 ビット誤りとなってしまう。そこで、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せず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[53]を用いることとした。

マンチェスタ符号化方式とは、デジタルデータを安価に無線伝送するための変調方式として 10Base-T や Felica 無線通信などで広く用いられている。また、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、図 47 の最下段に示すように、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。この符号化データの{0,1}を{滅灯, 点灯}と割り当てることとする。

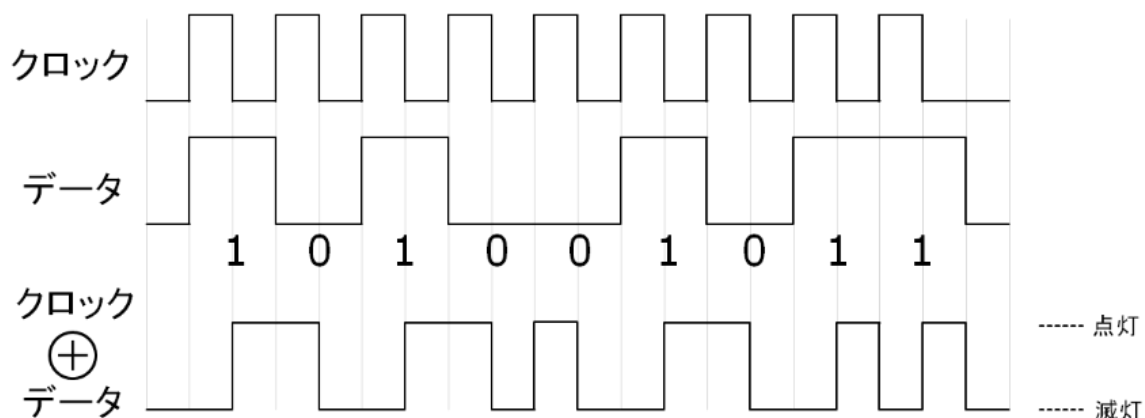


図 47 符号化の概念図

この符号化はデータに 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、送信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 フレーム目の画像の i 行 j 列目の画素値を $f_k(i, j)$ とすると、 k フレーム目から L フレーム分の平均画像を $\bar{f}_k(i, j)$ は

$$\bar{f}_k(i, j) = \frac{\sum_{n=1}^L f_{k+n-1}(i, j)}{L} \quad (47)$$

と表される。この平均画像 $\bar{f}_k(i, j)$ と k フレームから n フレーム目の画像 $f_{k+n-1}(i, j)$ との差分画像 $g_{k_n}(i, j)$ を

$$g_{k_n}(i, j) = f_{k+n-1}(i, j) - \bar{f}_k(i, j) \quad (48)$$

と表すと $g_{k_n}(i, j)$ を符号パターン σ に合わせて符号が 1 の際には th_{high} による閾値処理、また符号が 0 の際には th_{low} による閾値処理を用いることで二値化処理をした。二値化した二値画像 $G_{k_n}(i, j)$ は

$$G_{k_n}(i, j) = \begin{cases} 1 & \text{if } g_{k_n}(i, j) \times \sigma_n \geq th_{high} \\ 0 & \text{if } g_{k_n}(i, j) \times \sigma_n < th_{low} \end{cases} \quad (49)$$

$$\sigma = [\sigma_1 \sigma_2 \cdots \sigma_L] \text{ for } \sigma_i = \{-1, 1\}$$

となる。すると、符号パターンのみを取り出した判定画像 $H_k(i, j)$ は

$$H_k(i, j) = \prod_{n=1}^L G_{k_n}(i, j) \quad (50)$$

となる。最終的に判定画像 $H_k(i, j)$ に 1 が含まれている画素が存在するか否かを判定する必要がある。

$$\rho_k = \sum_{j=1}^{imageheight} \sum_{i=1}^{imagewidth} H_k(i, j) \quad (51)$$

$\rho_k \geq 1$ ならば視認性確認を良とし、 $\rho_k = 0$ ならば、視認性確認を否とすることによって、 k フレーム目における視認性確認の有無を行うものである。ここで、 $image_{height}$ は画像の縦画素数、 $image_{width}$ は画像の横画素数を表す。

この判定方法は、検査時間（符号パターン長）によっては検出すべきでないノイズを検出してしまふ事象（False Positive）が発生するおそれがあるが、3.9節で示す符号パターン長においては、検査時間が約1秒未満であることから映像中の動きは近赤外線LEDによる明滅以外はほとんど発生せず、良好に検出ができることを確認している。

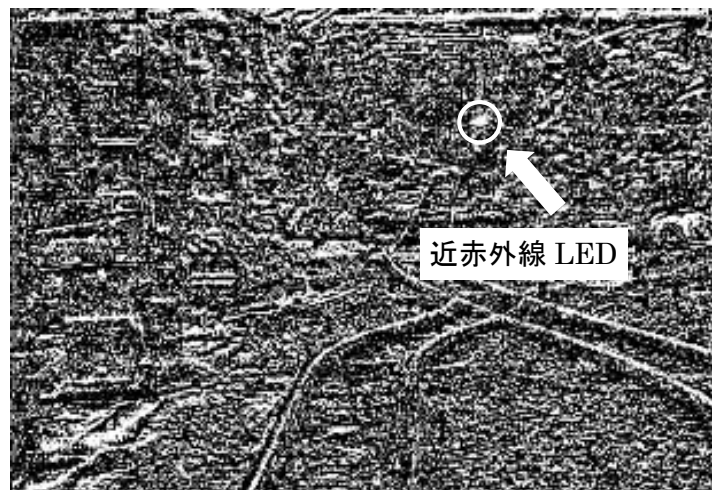
画像処理による復号の様子について、受信データの一部を図48(a)に、受信データから求めた平均値を図48(b)に、受信データと平均値の差分により求めたデジタルデータを図48(c)に示す。丸で囲んだ箇所に近赤外線LEDによる発光機が設置されている。



(a) 受信データ



(b) 平均画像



(c) 差分二値画像

図 48 画像処理による復号の様子

3.6 カメラと近赤外線 LED の同期

発光機とカメラが非同期の場合、カメラのサンプリングタイミングのずれや点滅の立上りや立下りの影響で、点滅パターンがうまく取れない場合がある。例えば、点滅の周期とカメラのサンプリング周期が同じ場合、図 49 上段のように点滅のタイミングとカメラのサンプリングタイミングが合わないと、カメラが受光するデータは図 49 の中段のように輝度にムラができてしまう。そこで、カメラ側のサンプリング周波数を発光機の点滅の周期の2倍以上としてカメラに取り込むことで発光機とカメラの非同期性に対応する方法もあるが、この方法では検査に要する時間が2倍かかり、その分の車両の動揺などの影響が画像処理結果に出やすい。そこで図 49 の下段に示すように、点滅の周期とカメラのサンプリング周波数が同じでも、シャッター速度を250分の1秒や500分の1秒に上げることにし、試験の結果、輝度ムラがなく適切に点滅を取得できることを確認した。

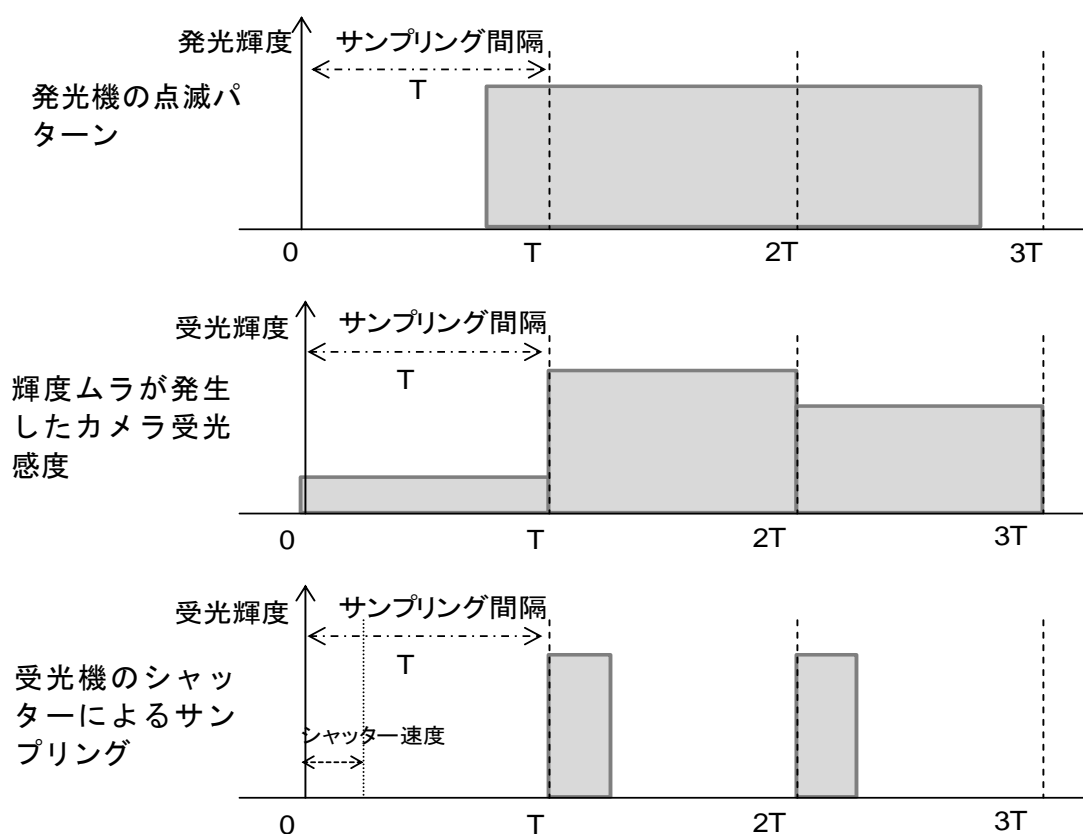


図 49 サンプリング間隔・シャッター速度と受光輝度の関係

3.7 近赤外線カメラの視野制御

3.7.1 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 、映像素子幅を w 、とすると、 $\theta = 2\tan^{-1}(w/2f)$ となり、4°程度となり、画角は狭角となる。このような望遠カメラで前方を見た場合の撮影範囲は図 50 (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 50 (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、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。そこで第2章で述べた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。

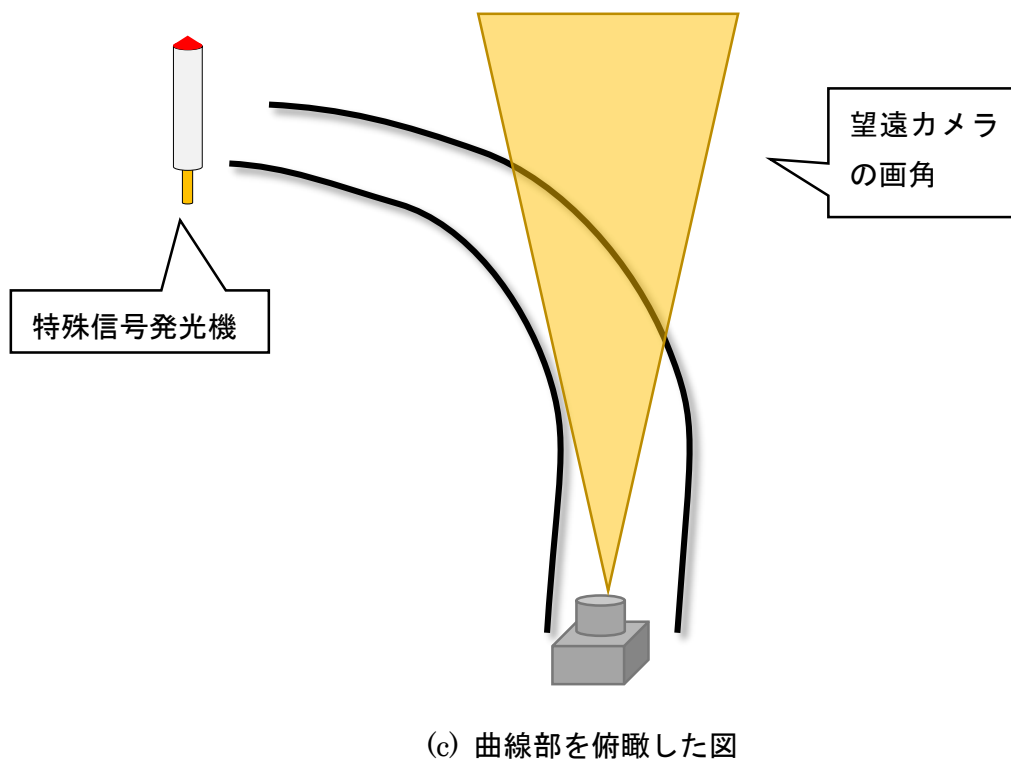
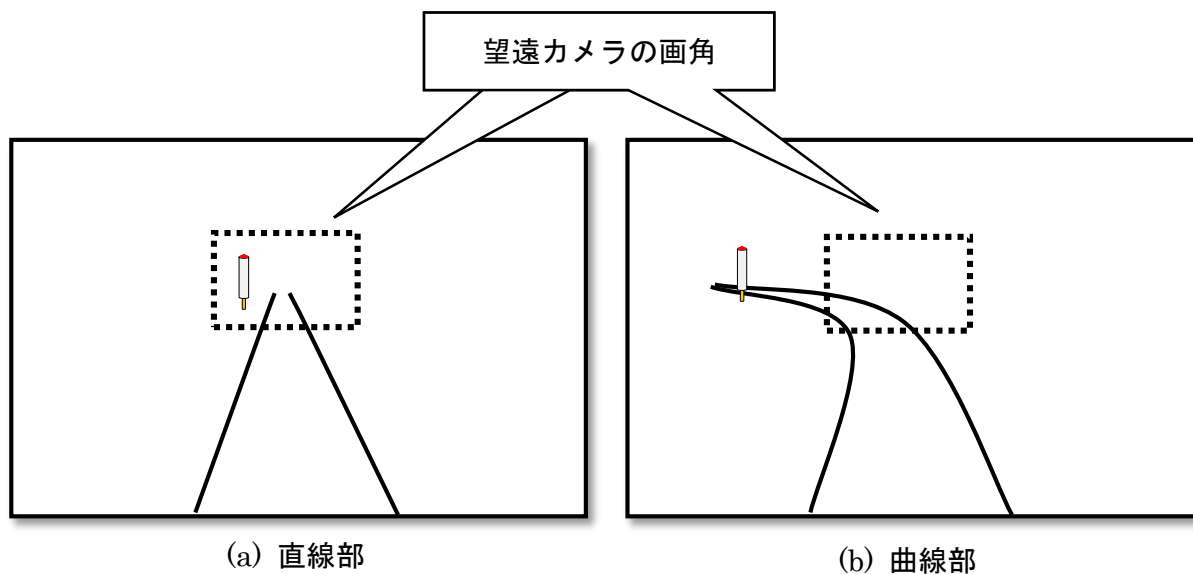


図 50 曲線区間において視野が外れる様子

3.7.2 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第2章で示したアルゴリズムを用いた。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51に示す。図51(a)は雨天の雨粒によるノイズ、図51(b)は逆光によるハレーションであるが、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。しかしながら、分岐器を通過する際に、アルゴリズムがうまくレールを抽出できない事象が1秒程度発生する場合があった(図52)。実際の検査時に、レール抽出が失敗することで、検査データが取得できないといった事象が発生した場合は、当該の特殊信号発光機の視認性確認の検査を従来どおりの人間による目視で代替する。線区全体の検査の効率化が図れるため、一部の例外的なエラーは許容するものとする。



図 51 レール抽出の結果

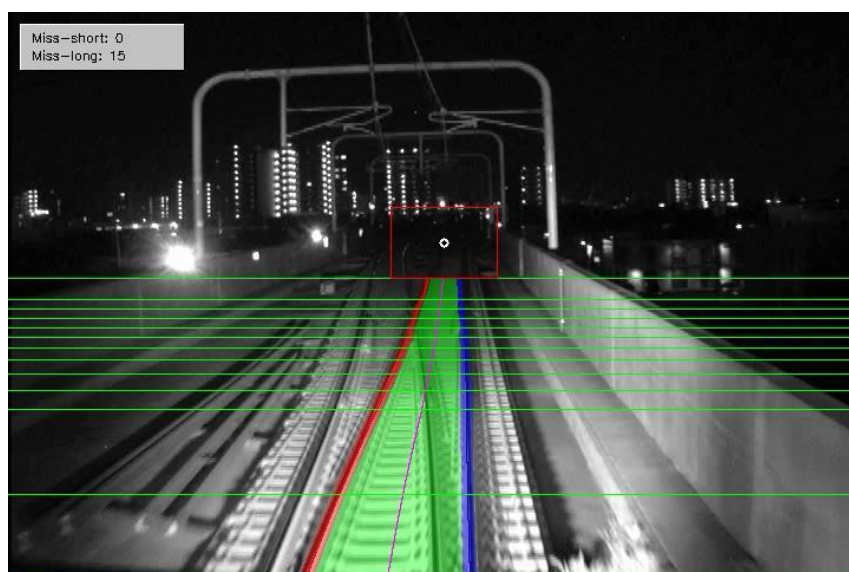


図 52 レール抽出が失敗した例

3.7.3 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検出して、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望遠の近赤外線カメラによる近赤外線画像の1点を対応づける座標を教師座標としてGUIにより登録するキャリブレーションプログラムを開発した。図53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。太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ことを確認している。

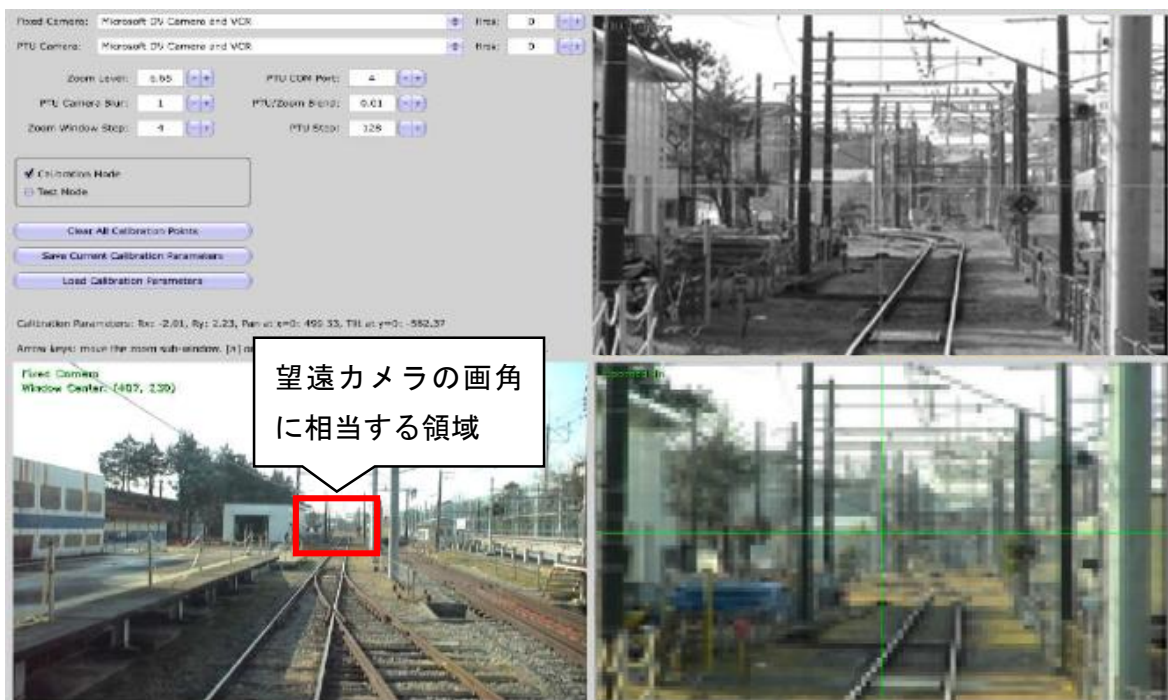


図 53 視野制御雲台のキャリブレーション画面

3.8 隣接設置環境における検知性能確認試験

踏切本体の特殊信号発光機と他踏切の中継の特殊信号発光機が隣接地点に設置されているようなシチュエーション，すなわち1つの画面に複数の特殊信号発光機が撮像される場面についても各々の特殊信号発光機を識別できることが必要であるため，隣接特殊信号発光機の画像処理による識別性能の評価を実施した。測定環境としては，図 54 (B)に示すように同一ヶ所に 5 機の特殊信号発光機を設置し，個々の特殊信号発光機を線路横断方向に対して離隔を 10cm から 1m 程度まで変化させ等間隔に並べ，1200m 以上離れた距離から，車両速度を時速 80km で走行させ検知性能の評価を実施した。特殊信号発光機までの距離の算出には，視認性検査用の望遠カメラと同期をとった広角カメラを用意し(図 54 (C))，広角カメラに映る距離プレート (図 54 (A)) によって算出した。距離プレート間における距離については走行速度が一定であるため，線形補間により求めた。発光パターンについては，8 bit の情報をマンチェスタ符号化したものに“1100”のスタートビットを付加した 20bit を使用した。使用した点滅パターンの例を図 55 に示す。

750m 地点付近において画像処理が点滅パターンを検知している様子を図 10 に示す。各特殊信号発光機の離隔を 10cm として測定した結果を図 56 に示す。隣接している各特殊信号発光機はそれぞれ A～E までの 5 つのパターンで点滅させ，

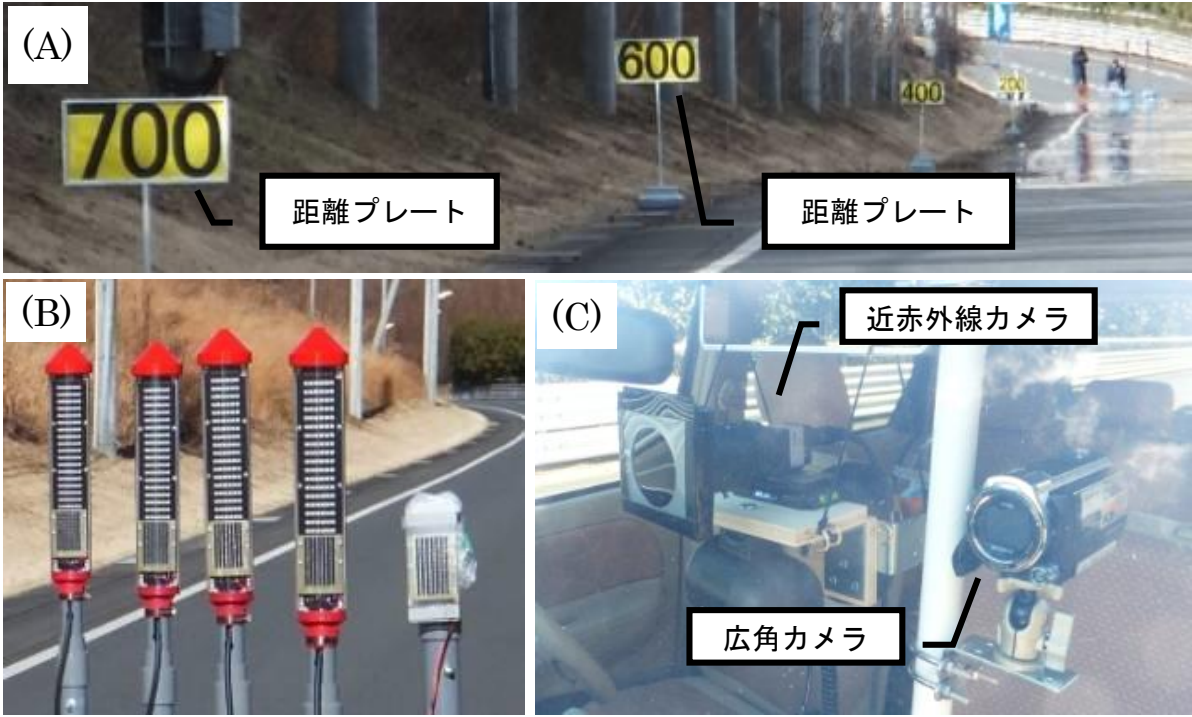
図 57 の(a)～(e)はそれぞれのパターンの認識結果を表している。横軸が設置した特殊信号発光機までの距離，縦軸が画像中の検知しはじめた座標を基準とした水平ピクセル座標を表し，各地点でのプロットが画像処理で点滅パターンを認識したものを表している。この結果から特殊信号発光機同士の離隔が 10cm 程度しかなくても特殊信号発光機のパターンを各々区別して識別できることが分かった。

図 57 (a)の 280mm 付近，

図 57 (c)の 600m 付近，

図 57 (e)の 350m，590m 付近にて，未検知区間が発生したが，これはカメラのサンプリングレートである 29.97Hz と点滅パターンの周期 29.94Hz(33.4msec 間隔)によるズレによりおよそ 30 秒ごとに 1 秒間程度，カメラの露光時間内に波形の立ち上がりが入ってしまうためである。これについては，点滅パターンの周期を半分にし，奇数フレームと偶数フレームに分けて検査を行い，どちらかのフレームが認識した場合に合格とすることで対策が可能である。

これらの試験により，800m 以上の距離から連続した視認性確認ができることが確認できた。また，特殊信号発光機が同一の電化柱に設置されているなどといった隣接設置の場合においても視認性確認が行えることが分かった。



(a) 設設設置した距離プレート (b) 5機の特特殊信号発光機を等間隔に設置している様子 (c) 測定機

図 54 測定環境

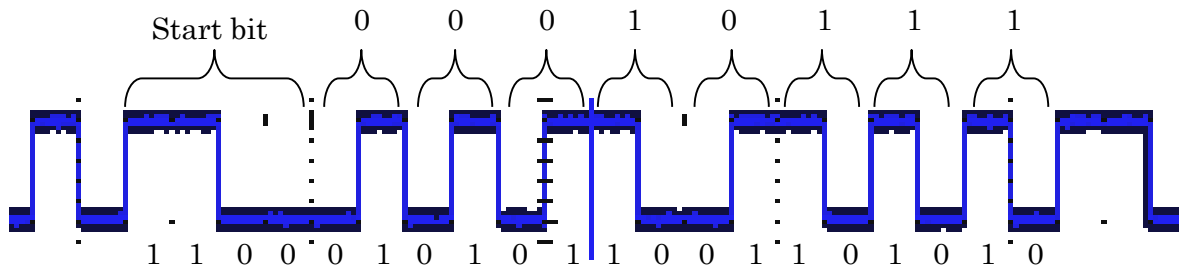
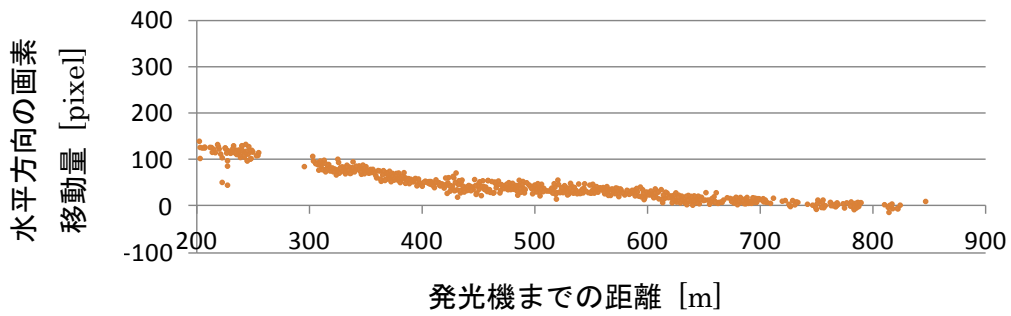


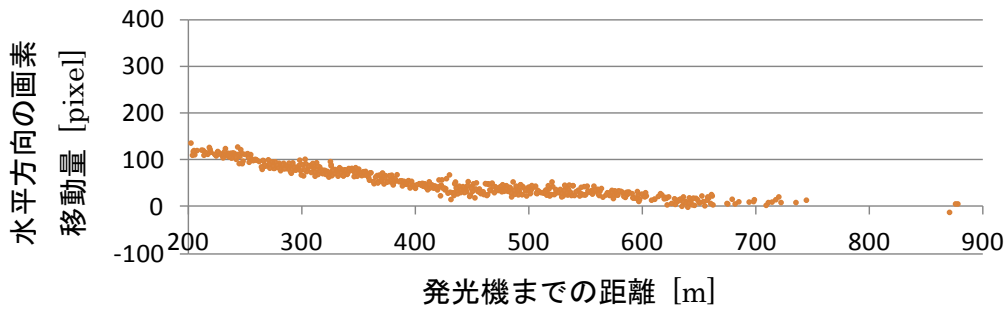
図 55 点滅パターンの例



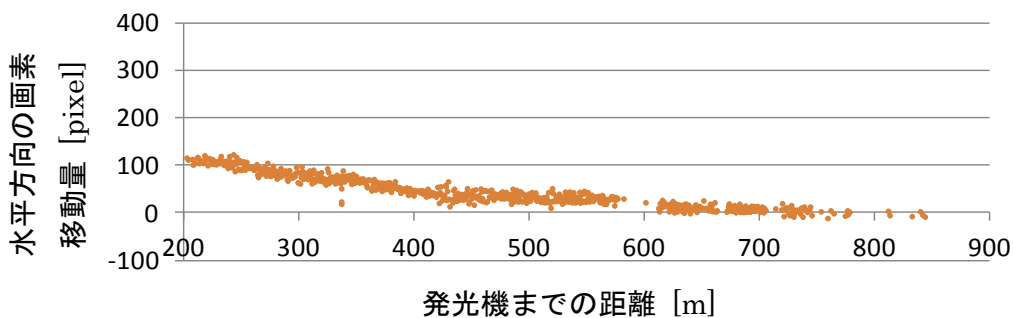
図 56 約 750m 地点の画像処理結果の例



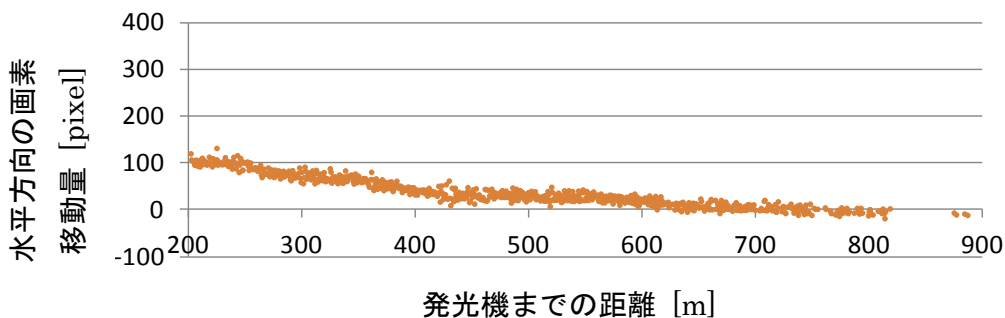
(a) パターン A



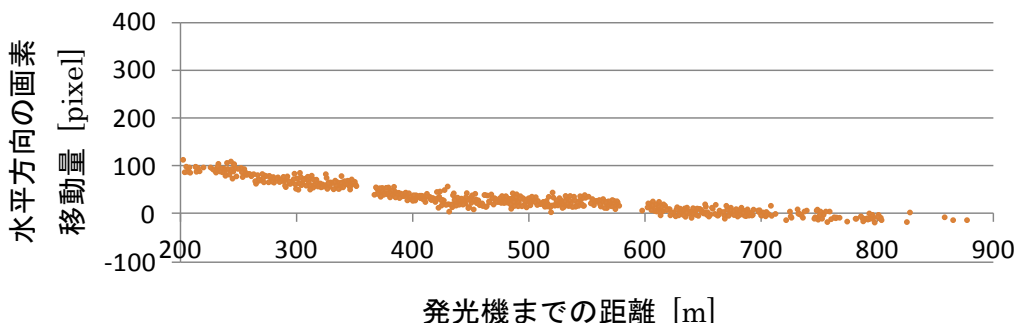
(b) パターン B



(c) パターン C



(d) パターン D



(e) パターン E

図 57 各発光機の受光データ

3.9 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。作成した試験用特殊信号発光機(以下、試験機)、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。車上装置については、近赤外線カメラとして NTSC 方式であり LED のピーク波長 940nm に比較的高い感度を有する SONY 製 XC-EI50 を用い、レンズについては、可視光と赤外光での波長の違いによるピントの位置が異なるフォーカスシフトに対応するため、広帯域マルチコートコーティングによる対策を施した近赤外線光対応の興和光学製 LMVZ990-IR を用い焦点距離を 45mm 程度に設定し、光吸収・赤外透過フィルタについては富士フィルム製 IR-92 を 2 枚取り付け、カメラゲインは最大に設定した。また、視野制御雲台としては、小型・軽量パンチルトシステムである FLIR MCS 社の PTU-D46-70 を用いた。試験機の近赤外線 LED については、ピーク波長 940nm、放射強度 130mW/Sr である VISHAY 製 TSAL5100 を 80 素子用い、電流値は 100mA 流した。振動の抑制については撮影画像に対して、画像相関(Squared Difference)を用いてオフセットすることで抑制した。試験機の発光制御方法については、GPS にて正確な時刻を保持し、タイマースケジュールに基づいて走行試験毎にのみ発光するように制御した。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、下り列車に対する向きに設置し、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。各々の試験機の仮設状況を図 59 に、車上の試験機の設置状態を図 60(a)に、システム画面を図 60 (b)に示す。XC-EI50 の仕様を表 2、分光感度特性を図 58 に示す[54]。分光感度特性が示すように、一般的なカメラに比べ、検討したカメラは近赤外光領域における感度の向上が期待できる。

表 2 XC-EI50 の仕様

| カメラ名称 | XC-IE50 |
|---------|---------------------------|
| 映像素子 | 1/2型 IT方式CCD |
| セルサイズ | 8.4 μ m × 9.8 μ m |
| 解像度 | 768(H) × 494(V) |
| 実効素子サイズ | 6.45mm × 4.84mm |
| レンズマウント | Cマウント |
| フレームレート | 30fps/60field/s 切替 |
| カメラタップ数 | 1 |

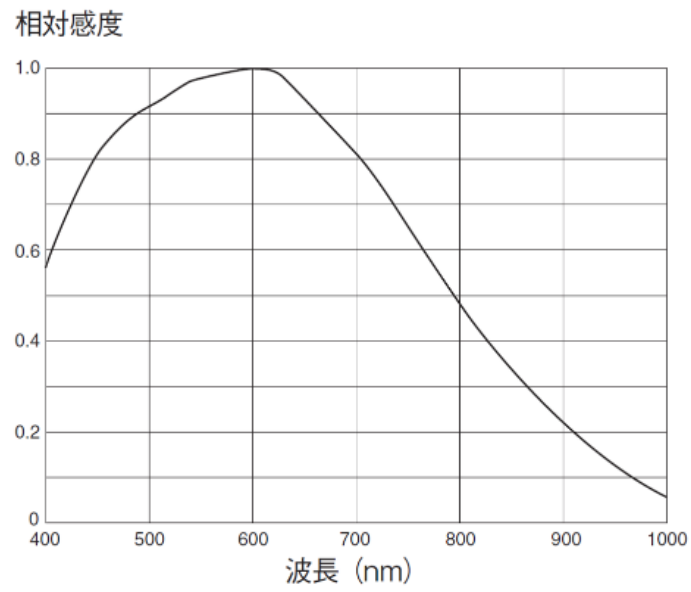


図 58 カメラの感度特性



図 59 試作した発光機の仮設の様子



(a) 車上測定機の外観



(b) 車上測定機のシステム画面

図 60 車上装置

それぞれの試験機の認識結果についてまとめたものを図 62 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、踏切 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、画面補足を外れることが発生した。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、本物の特殊信号発光機と違い 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てしまい、終始見えない状態であった。それぞれの試験機を画像処理にて認識した様子を図 61 に示す。

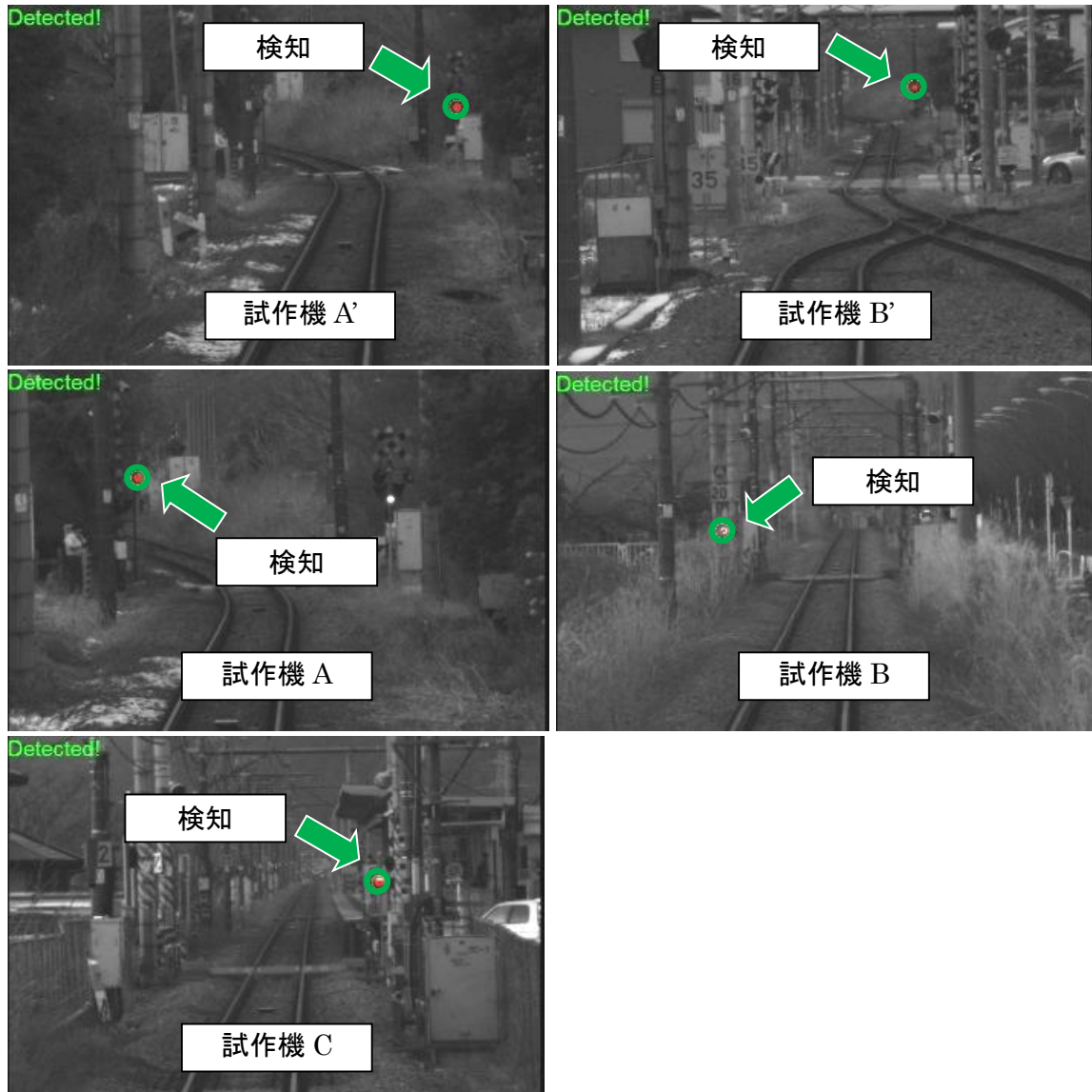


図 61 システムが視認性を検知している様子

全体を通して、視野制御装置については、車両振動による映像ブレに対しても正確に点滅パターンを認識することができ、また、緩やかな曲線においてはスムーズな視野制御が行え、目的の動作は果たしていると言える。しかしながら、分岐器通過や急曲線(R=300 以下)においては視野制御が十分に動作できていないため、今後、カメラ解像度の変更などのハードウェアの改良と、視野制御装置のアルゴリズム調整・改良などのソフトウェアの改良を施し、高精度化が必要である。

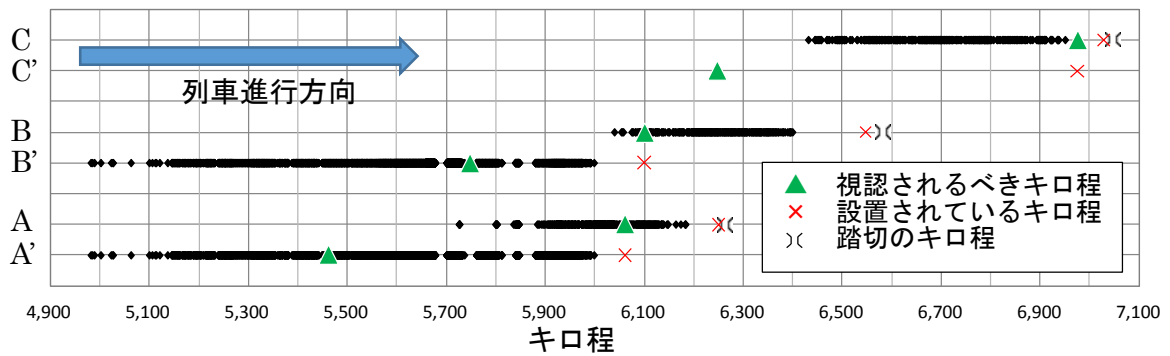


図 62 キロ程と視認性結果

近赤外線発光機については、近赤外線カメラに光吸収・赤外透過フィルタを取り付け、カメラゲインを最大に設定することにより 940nm の波長においても十分な検知能力が出せること、また、肉眼においては赤く見えることがないことを確認した。

発光制御方法（検測スイッチ）については、GPS による時間取得を用いたタイマ制御を実装し、時刻に基づいて正しく動作することが確認できた。しかし、GPS による時間の補正が正確すぎたため、同一箇所に設置されている特殊信号発光機の発光タイミングが完全に重なった。そのため、本来であれば発光タイミングの違いから隣接した特殊信号発光機を区別できるが、今回の試験では同一パターンと認識された。今後は、電源オン時に点滅パターンの開始タイミングを内部保持し、タイマをドライブトリガとして用いることで対応する。前章での検知漏れの微小時間が発生する問題について、サンプリングを点滅の 2 倍とする方式を用いることで検知漏れを抑止できていることが確認できた。

3.10 季節および時間帯による検知性能評価

季節および時間帯による検知性能の変化について評価を実施した。天候の違いに対する特殊信号発光機の認識結果の一例を図 63 に示す。横軸がキロ程，縦軸が天候（2015 年 3 月某日：日照率 100%）であり，上段が晴天，下段が曇り時（2015 年 9 月某日：日照率 25%）による測定を表している。ここで，日照率とは，気象庁データによる日照時間（分）に対する試験時間の割合を示し，日照時間とは直達日射量が 0.12kW/m² 以上を言う。また，×のシンボルが特殊信号発光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（特殊信号発光機から 800m 手前）を示す，ID を受信でき，視認確認を可とした地点をプロットしている。図 63 のプロットに漏れがなく，かつ，十分な視認距離を有しており，測定日や季節などの天候の異なる複数のデータにおいても認識に大きな違いが発生しないことを確認した。

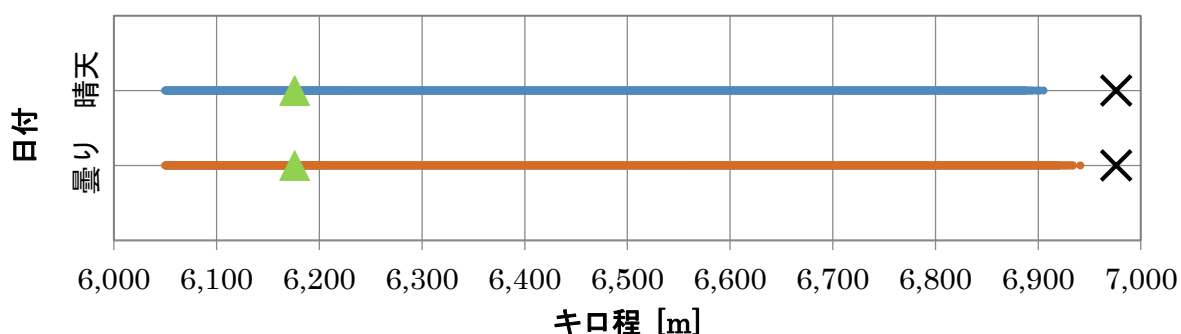


図 63 天候と視認性結果

更に同箇所の特号信号発光機における，17 回の異なる日時における日照率別の認識開始位置を図 64 に示す。平均は 949m の位置より認識しており，最遠方が 944m，最近傍が 955m より認識しており，標準偏差は 2.54m であった。日照率が異なっても本システムの測定誤差は±5m の範囲であり，精度良く認識している。また，日照率と検知開始位置の相関を求めると相関係数は 0.173 であった。一般に，相関係数 0.2 以下は相関がないとされている。したがって，本システムは季節・時間帯等の違いによる日照率の変化が視認性確認の性能に影響せず，特殊信号発光機を安定して検査可能であると言える。また，17 回のそれぞれの試番においても，視認性システムによる視認性確認が連続的に行われ，抜けなどの問題がないことを確認した。

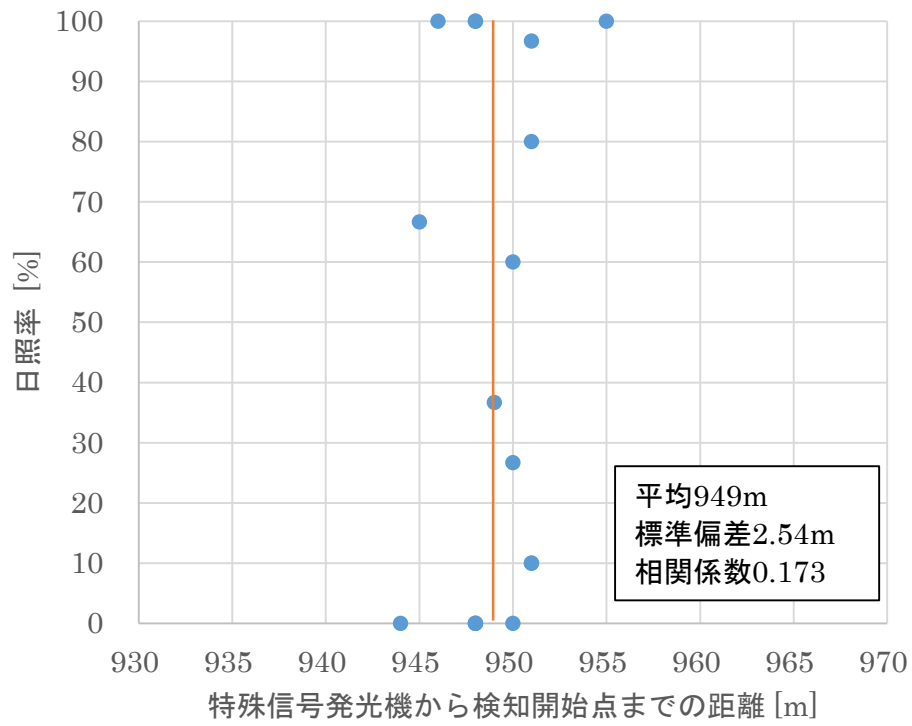


図 64 日照率と特殊信号発光機から検知開始点までの距離の関係

3.11 具体的制御方式と回路構成

制御方式については、発光機は赤色・近赤外線 LED を両方実装、カメラに複数の発光機が映る場合でも個別に認識、制御器－発光機間は従来通り 1 ペアのケーブルで接続すること、の 3 つをシステムの要求事項として整理した。

検討した制御方法を実現するため、近赤外線による点滅パターン発光が可能な近赤外線用制御器、発光機、および踏切器具箱内での結線を考慮した具体的な回路構成を検討した。制御器は、従来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。現行の特殊信号発光機と近赤外線 LED を追加した開発品の特殊信号発光機の外観を図 65 に示す。近赤外線 LED は発光機下部に集積させ、赤色発光部の面積は変更せずに全体として 70mm 程度長くした。草木などで上部のみが隠れて下部だけ視認できるといった問題が生じてしまうため、近赤外線 LED を発光機全体にまんべんなく実装した。

制御器および発光機の構成を概念的に示したものを図 66 に示す。近赤外線用制御器内に実装される切替リレー（切替 R）によって、従来の特殊信号発光機制御器（1F・C 形）の赤色用 LED と近赤外線用 LED の発光制御の切替えを行っている。また、視認性確認の検査中に、支障報知装置（操作器）や障害物検知装置により発報された際に、赤色の発光ができるように、入力条件となる検測 R に対して、支障報知装置（操作器）が扱われたときに落下するリレー（PBPR）の条件と、障害物検知装置が踏切内の障害物を検知した際に落下するリレー（EUPR）の条件を直列に挿入している。検測 R は、通常時落下しており、検査条件が有効となった際、扛上する。支障報知装置（操作器）や障害物検知装置による発報があると、PBPR または、EUPR が落下し検測 R が落下し、切替 R により特殊信号発光機制御器側の回路が構成される。また、検査時に切り替わりのタイミングで、特殊信号発光機制御器の断線検知機能がしないようにバイパス回路を備えている。

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、切替リ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。

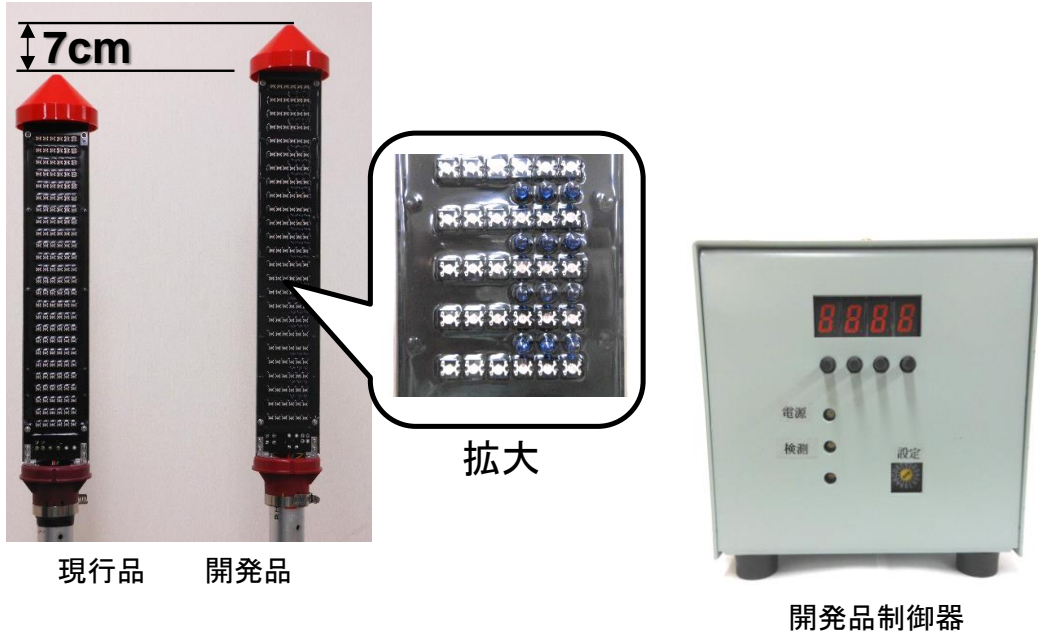


図 65 現行品と開発品の比較

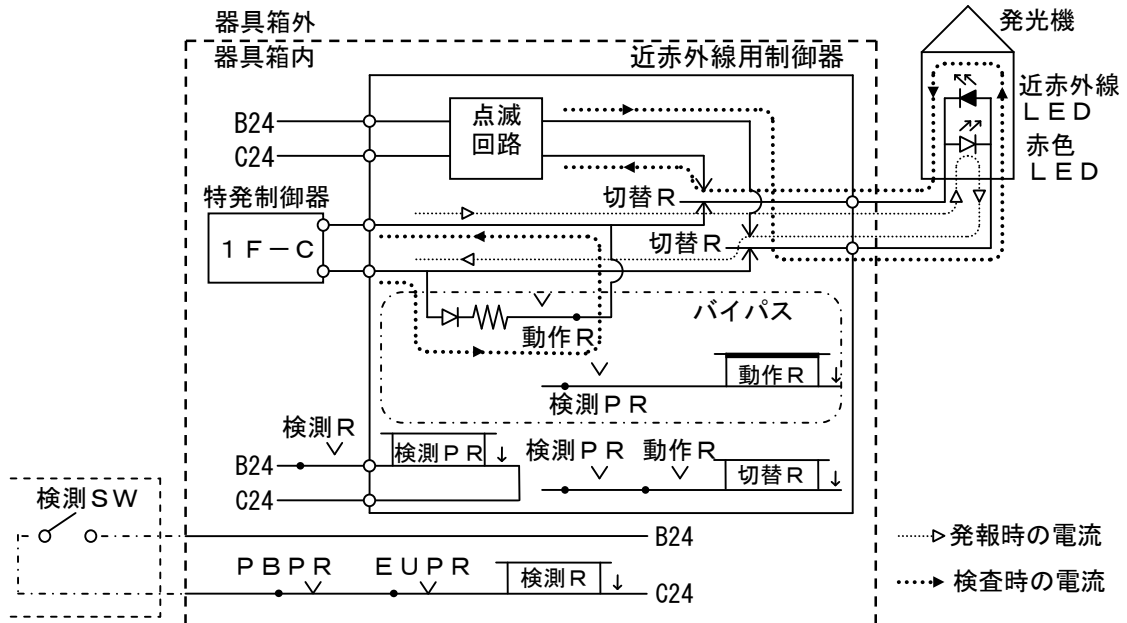


図 66 踏切器具箱内での結線を考慮した具体的回路構成

3.12 経年劣化と検知性能について

経年劣化と検知性能について評価を実施した。日本の工業規格である JIS C 8105-3 においては、点灯初期に対して全光束が 70%まで低下するまでの時間を寿命と定めている[55]。そこで、耐用年数については、定格電流における発光強度が初期値から 70%に下がるまでの時間を耐用年数の指標とすることとした。

開発した特殊信号発光機に使用している近赤外線 LED の放射強度が 70%まで減衰する時間は、メーカーが公開している 25℃環境下、定格電流 DC100mA 通電時、1000h で 10%放射強度が減衰するデータを元に、マンチェスタ符号方式による点滅制御を考慮すると 6,000h となる。そのため、検査のために近赤外線 LED を常時点灯させていると、250 日程度で寿命になってしまう。そこで、実際の列車添乗による視認性確認の検査を想定して、表 3 に示すように、時限装置（タイマー回路）を用い、検査を予定している月、一週間に点灯させる曜日（例えば平日など）、一日に点灯させる時間帯などを制限することで概ね 10 年から 15 年の耐用年数が期待されることがわかった。したがって、通常使用下においては、現行の特殊信号発光機と同等の耐用年数を確保していると言える。

表 3 使用制限による減衰到達年数

| 使用時間数/1 日(時間) | 使用日数/1 週間(日) | 使用月数/1 年(ヵ月) | 耐用年数 (年) |
|---------------|--------------|--------------|----------|
| 6 | 5 | 6 | 7.67 |
| 6 | 5 | 4 | 11.51 |
| 6 | 5 | 3 | 15.34 |
| 6 | 4 | 6 | 9.59 |
| 6 | 4 | 4 | 14.38 |
| 6 | 4 | 3 | 19.18 |
| 6 | 3 | 6 | 12.79 |
| 6 | 3 | 4 | 19.18 |
| 6 | 3 | 3 | 25.57 |

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い、70%の劣化を再現した開発した特殊信号発光機を 4 本製作し、本システムを使用した視認性確認の試験を実施した。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、正対を 0° としたときに開発した特殊信号発光機を 10° まで回転させても検知率は正対と同等に 100%全て受信でき、800m での視認性確認が十分にできることを確認した。したがって、耐用年数に到達するまでの放射強度の減衰では、性能評価に影響することはない。また、回転角度を 16° にした場合は、検知することがほぼ不可能となる。特殊信号発光機の赤色 LED

の拡散角度の半値角は 15° であるため、同等の角度性能であると言える。それぞれ 100%、70%および50%の放射強度における視認性確認の試験結果を表 4、表 5および表 6に示す。また、視認性確認の試験における開発した特殊信号発光機の設置状態を図 67に、800m 遠方から近赤外線カメラを用いて特殊信号発光機が発する近赤外線を撮影した画像を図 68 に示す。

表 4 放射強度 100%時の検知率

| 回転角度 | 発光機① | 発光機② | 発光機③ | 発光機④ |
|------|------|------|------|------|
| 6° | 100% | 100% | 100% | 100% |
| 8° | 100% | 100% | 100% | 100% |
| 10° | 100% | 100% | 100% | 100% |
| 12° | 100% | 100% | 100% | 100% |
| 14° | 64% | 100% | 79% | 100% |
| 16° | 0% | 28% | 1% | 87% |

表 5 放射強度 70%時の検知率

| 回転角度 | 発光機① | 発光機② | 発光機③ | 発光機④ |
|------|------|------|------|------|
| 6° | 100% | 100% | 100% | 100% |
| 8° | 100% | 100% | 100% | 100% |
| 10° | 100% | 100% | 100% | 100% |
| 12° | 100% | 87% | 100% | 100% |
| 14° | 30% | 84% | 87% | 100% |
| 16° | 0% | 0% | 0% | 0% |

表 6 放射強度 50%時の検知率

| 回転角度 | 発光機① | 発光機② | 発光機③ | 発光機④ |
|------|------|------|------|------|
| 6° | 100% | 100% | 100% | 100% |
| 8° | 100% | 100% | 100% | 100% |
| 10° | 90% | 100% | 100% | 100% |
| 12° | 47% | 63% | 73% | 100% |
| 14° | 1% | 88% | 56% | 100% |
| 16° | 0% | 0% | 0% | 24% |



図 67 視認性試験の特殊信号発光機設置状況



図 68 視認性試験の近赤外線カメラ撮影画像

これにより発光機に用いている LED の経年が従来機の 10 年から 15 年を満たすことが確認できた。装置構成として、車上装置は作業員が随時持ち込む、制御装置は踏切の近傍に設置されている踏切器具箱内に収容される、発光機については本体が踏切道から 50m 程度、中継器については見通しにもよるが数 100m 離れる箇所を設置されることとなる。従って、経年による交換について、現地へ赴く手間等を考慮すると、発光機、制御器、車上装置の順で経年が長いことが望ましい。

制御器については、製作する際の IC およびコンデンサの選定での期待寿命が最小の部品に合わせる事となる。車上装置については、汎用 PC を用いていることから、経年は汎用 PC

に合わせる事となる。車上装置の信頼性については、作業員が添乗する際にチェックリストを用いて動作確認するなどの人間系による確認が必要となる。

また、異常気象などの気温に対する色温度について考察する。波長と温度については、プランクの放射式によると次式で与えられる。

$$E(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1} \quad (52)$$

ここで、 λ は波長、 T は温度、プランク定数を $h = 6.63 \times 10^{-34} [Js]$ とし、ボルツマン定数を $\kappa = 1.38 \times 10^{-23} [J/K]$ 、光速度を $c = 3.00 \times 10^8 [m/s]$ としたとき $c_1 = 2\pi \cdot h \cdot c^2 = 3.75 \times 10^{-16} [Wm^2]$ 、 $c_2 = h \cdot c / \kappa = 1.44 \times 10^{-2} [mK]$ で与えられる。

このときに波長を $0.0\mu m$ から $2.0\mu m$ まで温度を $5000K$ までをプロットした図を図 69 に示す。

極端気象などにより外気温が異常に高い場合になったとしても、目的となる $940nm$ の波長帯での発するエネルギーはわずかであり、検知性能に影響は及ぼさないとと言える。

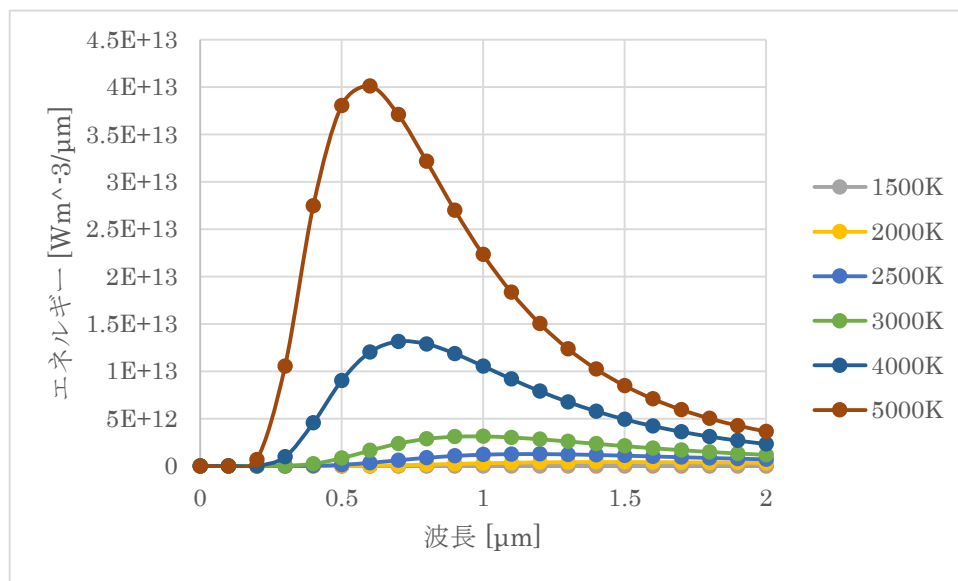


図 69 プランクの放射式による波長と温度によるエネルギーの関係

3.13 他設備への影響について

近赤外線は他の鉄道沿線の周辺設備にも使用されている。本システムの導入によって、これらの設備が誤動作することがあってはならない。そこで、他の近赤外線の波長帯を用いている周辺設備への影響評価を実施した。特に重要であると判断した対象設備は、踏切の障害物を検知し、危険を運転手に知らせることを目的とした踏切障害物検知装置と、保守用車の踏切通過時にリモコンで踏切を制御する保守用車用踏切制御装置である。踏切障害物検知装置は障害物の検知に近赤外線を使用しており、保守用車用踏切制御装置はリモコンと受光部との通信に近赤外線を使用している。踏切障害物検知装置にはいくつかの種類があり、代表的な機種は踏切障害物検知装置（レーザー式）が 904nm、踏切障害物検知装置（3DLR 式）が 0.9 μ m、大型支障物検知装置が 904nm である。また、保守用車用踏切制御装置の波長は 850nm を使用している。本システムで使用する近赤外線 LED のデータシート[56]に記載される 30mA 通電時の放射強度のスペクトル分布特性を図 70 に示す。

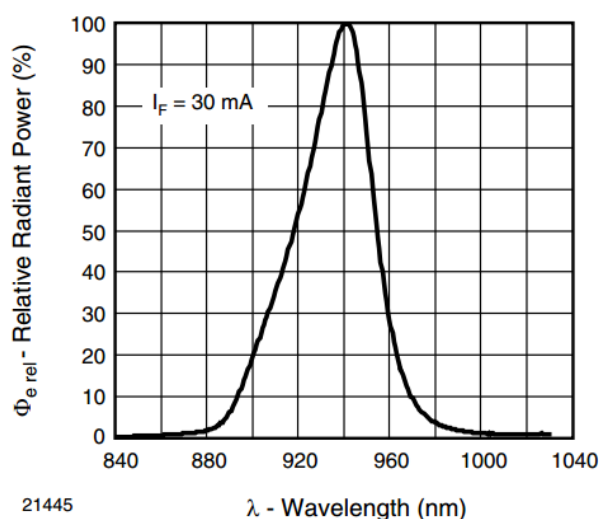


図 70 近赤外線 LED スペクトル分布特性

完全には一致しないが、スペクトル分布特性が一般ガウス関数に従うと仮定し、データシートからピーク波長 λ_p を 940nm、半値全幅 FWHM を 30nm として、スペクトル分布特性を求めると、940nm のピーク波長を 100% とした際に、相対値で 850nm では 0.0004%、0.9 μ m では 8.5%、904nm では 15.2% のエネルギーを含む。

$$f(x) = \exp\left\{-\frac{(FWHM - \lambda_p)^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (53)$$

$$\sigma = \frac{FWHM}{2\sqrt{2\ln 2}} \quad (54)$$

したがって、エネルギーとしては微量であるが、対象設備が影響を受ける可能性があることから、開発した特殊信号発光機の近赤外線発光が他設備に対して、不正に動作しないこと、および動作を妨害しないことを、実際の開発品を用いて、現行の周辺設備に近接させ、影響を与えるか否かの評価を実施した。その結果、実際の建植設置においては、不正に動作しないこと、これらの設備の通常動作を妨害しないことを確認した。

試験の一例を以下に示す。

図 71 は大型支障物検知装置の受光部に、図 72 は踏切障害物検知装置（3DLR 式）のセンサ部に近赤外線を照射している。障害物が無い状態で特殊信号発光機が不正に発報しないこと、障害物を検知時、特殊信号発光機の赤色発光が不正に復帰しないことを確認した。図 73 は保守用車用踏切制御装置の試験を示し、不正に踏切が鳴動開始せず、また、近赤外線を照射中にリモコン操作が可能であることを確認した。

これらより、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。



図 71 大型支障物検知装置への影響評価試験風景

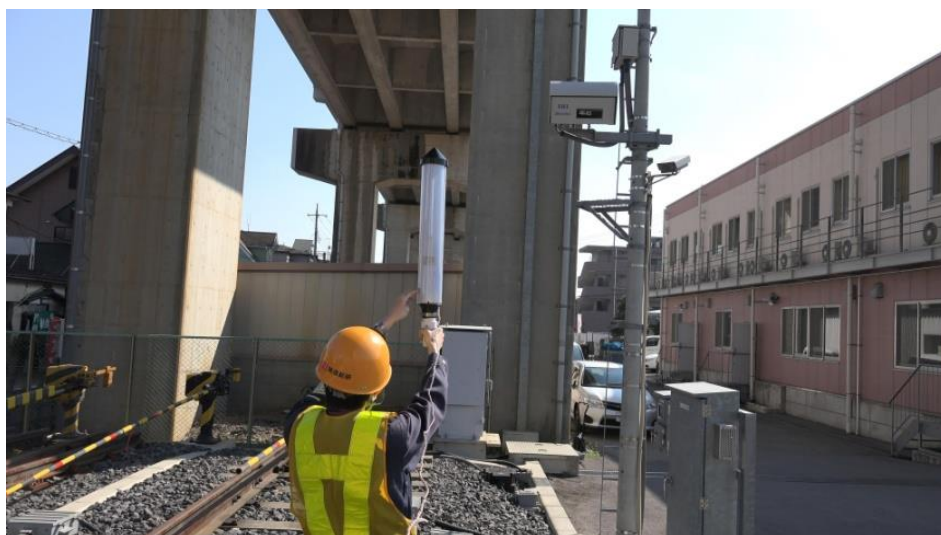


図 72 踏切障害物検知装置（3DLR 式）への影響評価試験風景



図 73 保守用車踏切制御装置への影響評価試験風景

3.14 おわりに

特殊信号発光機の視認性確認手法として、不可視光線である近赤外線 LED による発光機の点滅を、列車からイメージセンサ通信を用いて画像認識することで、列車運行を支障せずにかつ効率的に検査が行える手法の開発を行い、現車試験にて 800m 以上手前から各々の特殊信号発光機を区別して視認性確認することが可能であることを示した。

提案手法を実現するため、制御器は、従来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、近赤外線による点滅パターン発光が可能な近赤外線用制御器、発光機、および踏切器具箱内での結線を考慮した具体的な回路構成を検討した。耐用年数の考え方を整理し、耐用年数が経過した際にも検知性能が満足することを評価した。また、線路周辺に存在する他設備への影響評価を実施し、本システムが他設備に対して影響を及ぼさないことを示した。

今後は、カメラ解像度の変更と視野制御アルゴリズムの改良を施し高精度化を図り、天候や日照量の変化などのさまざまな環境変化に対する視認性確認の検知性能を把握し、長期モニタランを実施することで実用化を目指す。

第4章 地上設備の視覚シミュレーション手法

4.1 はじめに

鉄道において、沿線に設置する設備の設置工事については、信号機のように列車運転台からの見通しなどを配慮して設置位置を検討しなければならない設備がある。そのような設備の設置工事においても、現状では図面をもとに大まかな建植箇所のキロ程・(軌道中心からの) 離れ・(レールレベルからの) 高さなどを決定し、想定設置状態を実地で確認していることから、現地調査に多くの労力を要している。このような問題は、信号機にとどまらず様々な地上設備が抱えている。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設備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有効であると考えられる。しかし、これを実現するためには、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。2次元の列車前方映像から3次元の実空間を推定することは、2次元から3次元への次元拡張であり、これまで困難とされてきた。そこで我々は、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、列車前方映像を用いた地上設備の設置位置検討のための視覚シミュレーション手法を開発した。本章では、これらのシミュレーション手法の具体的計算方法とその精度検証および具体的適用例について述べる。

4.2 関連研究

運転台からの映像をシミュレートする技術としては、自動車分野で多くの研究がなされている。例えば、小川ら[57], [58]は、パソコン・模擬運転台などの可搬型の機器を用いて簡易ドライビングシミュレータを構築し、交通安全対策の検討に対する応用可能性を検討し、信号切り替わり時の運転行動の分析などで効果を挙げている。これらのシミュレータは自動車の交通安全対策という観点では有効であるものの、映像がコンピュータグラフィックスによって作成されたものであり実際の走行映像を用いたものではない。そのため、本目的のように実際の映像を写し出したものに対してシミュレートすることができない。鉄道分野においても、綱島ら[59]が、ヒューマンファクタを評価するための列車運転シミュレータを開発している。このシミュレータは被験者が操作する運転台のハンドル操作を受けて、車両特性に基づいた運動計算や音響の生成、計器盤画像の生成を行うものであり、プロジェクタスクリーンを通して実際の運転に近い環境を再現している。これにより列車運転中の脳機能計測を実施している。しかしながら列車運転シミュレータもコンピュータグラフィックスにより運転風景を再現しているため、ドライビングシミュレータと同様に実際の映像を写し出したものに対してシミュレートすることができない。

また、2次元画像から3次元の実空間を推定する手法としては、ステレオカメラによる方式と、単眼カメラによる方式がある。ステレオカメラによる方式として、茄子川ら[60]が自動車において前方の障害物検知として実現しており、障害物までの距離を算出しているが、2台のカメラが正確に校正されている必要があり、さらに時間的に同期して撮影する必要がある。また、単眼のカメラで3次元空間を推定する手法としては、**Structure-from-Motion(SfM)**と呼ばれる手法があり、校正用チャートを使わずに撮影した複数毎の画像から物体の3次元形状の復元を可能としている。Agarwalら[61]はSfMを用いて数百万枚の画像から有名観光スポットを復元することに成功している。しかしながらSfMは、復元する対象物に対して、他角度からの複数画像が必要となるため、列車前方に取り付けたカメラで実現することは難しい。また、どちらの手法においても、設備の設置位置が再現するためには、座標の基準となるレールを認識する必要があるため、そのままの適用は困難である。

4.3 機能構成

本シミュレーション手法は、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、計画している地上設備の設置位置などを入力データとし、前方撮影画像に地上設備を表示した画像を出力する。

シミュレーション手法は、「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」、「地上設備位置のキロ程座標系から前方撮影画像座標系への変換」、「地上設備の表示」のデータ処理によって構成される。各処理の概要を以下に示す。

- 「前方撮影画像に対するキロ程算出」では、前方画像の各フレームに対して、当該線区でのキロ程を走行しているフレームかを対応づける。(4.5 節)
- 「前方撮影画像内のレール抽出と座標変換」では、前方撮影画像に写っているレール位置を参照して地上設備の設置位置を定める。ここで、前方撮影画像に写っているレール位置の抽出処理はコンピュータの計算負荷が高いことから、前方撮影画像を表示するたびにレール位置を抽出せずに、あらかじめ全ての前方撮影画像に対してレール位置を抽出しておいたデータを用いる方が効率的である。また、前方撮影画像を基準としたレール位置から列車を基準とした位置へと変換しておく方が、地上設備の設置位置の計算が容易となる。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。(4.6 節)
- 「地上設備位置のキロ程座標系から前方撮影画像座標系への変換」では、前方画像とそのキロ程、レール位置、地上設備位置のデータから、現在の前方撮影画像から見ることで地上設備の位置を求める。(4.7 節)

「地上設備の表示」では、前方撮影画像上に表示する位置へ適切な大きさで地上設備の画像を表示する。(4.7 節)

本シミュレーション手法では、各前方撮影画像（映像フレーム）の対する位置情報も画像から求めることとする。ほとんどの列車は速度発電機（車輪の回転数に応じた電圧またはパルスを発生させる装置で、車軸とともに回転する歯車の山と谷による磁路の変化でパルスを発生させる原理の物が多く、パルス電流をカウントすることにより、進んだ位置や単位時間当たりの速度が求められる。[62]) を搭載しており、速度発電機からのパルス電流を取得することで正確な位置情報が得られるが、そのためには、車両に対して事前にパルス情報を出力する工事が必要となり、データ取得の担当者が突発的に添乗することができない。そのため、本シミュレーションでは、できる限り閉じた系でシステムを構成することを目的とし、ビデオカメラ等による列車前方映像のみによって構築した。

4.4 用いる座標系

地上設備の位置をキロ程座標系と列車基準座標系，前方撮影画像基準座標系の3種類の方法で表現する。

4.4.1 キロ程座標系

線区の始点(0k000m)のレール中心を原点として

(キロ程, 軌道中心からの離れ, 高さ) (55)

によって位置を表現する。軌道中心からの離れは対象とする列車の進行方向によって切り替え，右方向を正とする。地図上の点と対応づけができる点で絶対座標系に近い表現方法である。

4.4.2 列車基準座標系

列車前面の軌道中心，レール面高さを原点として，右方向の距離を x ，列車前面からの距離を y ，高さを z としたときに (x, y, z) によって位置を表現する (図 74)。

4.4.3 前方撮影画像基準座標系

列車前方を撮影した前方撮影画像の中央を原点として横方向の位置を w ，縦方向の位置を h としたとき (w, h) によって位置を表現する。

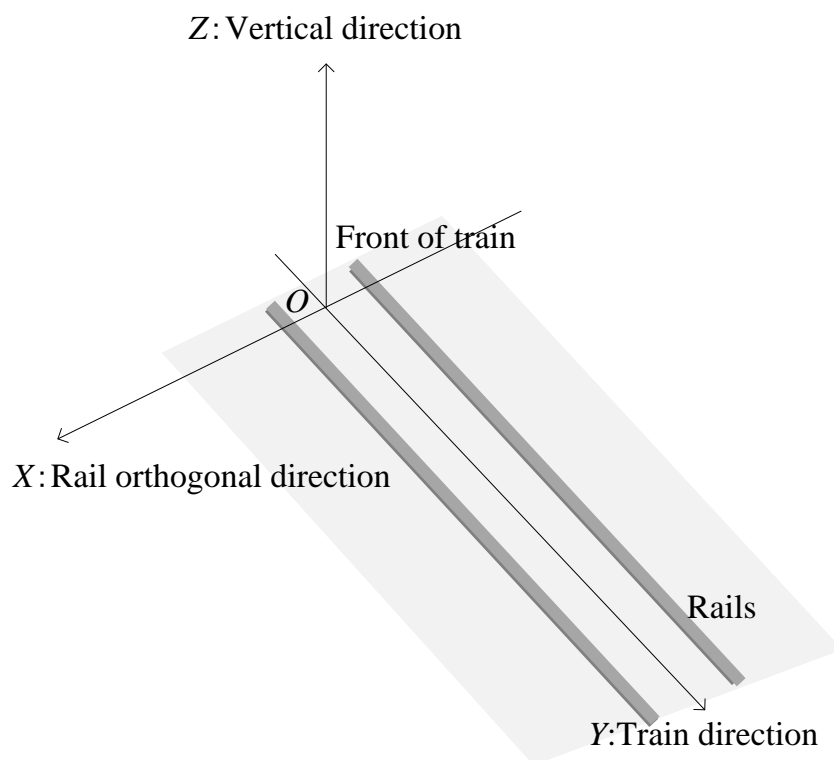


図 74 列車基準座標系

4.5 前方撮影画像に対するキロ程算出

前方撮影画像に対するキロ程の算出には、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映像の俯瞰化、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、設備位置とフレームの参照データ作成、画像フレーム-キロ程データ作成 5つのサブプロセスに分けることができる。

4.5.1 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を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補正し、その画像に対して速度を計測する。

画像の俯瞰化手法は、左右レールの近い位置と遠い位置の4点を指定し、その後の変換を自動化する方法である。カメラの向きについては、X軸まわりの回転（俯角）のみを想定する。また、ここでは列車基準の座標系を平行移動し、カメラ焦点位置を原点とする座標系を用いる。

まず、画像基準の座標系とカメラ基準の座標系の関係について整理しておく。カメラの向きを単位ベクトルで表すと仮想画面上の点 (w_i, h_i) は列車基準座標系では

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_x & -\sin\theta_x \\ 0 & \sin\theta_x & \cos\theta_x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_i \\ f \\ h_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_i \\ f \cos\theta_x - h_i \sin\theta_x \\ f \sin\theta_x + h_i \cos\theta_x \end{bmatrix} \quad (56)$$

と表すことができる。原点からこの点に向かうベクトルの延長線上に実際の位置 (x_i, y_i, z_i) があるので、未知数 α を用いて

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} = \alpha \begin{bmatrix} w_i \\ f \cos\theta_x - h_i \sin\theta_x \\ f \sin\theta_x + h_i \cos\theta_x \end{bmatrix} \quad (57)$$

と表現できる。カメラのレール面に対する高さが H なので、 $z_i = -H$ となる。これより未知数 α は

$$\alpha = -\frac{H}{f \sin \theta_x + h_i \cos \theta_x} \quad (58)$$

として与えられる。これを用いて

$$x_i = -\frac{H w_i}{f \sin \theta_x + h_i \cos \theta_x} \quad (59)$$

$$y_i = -\frac{H(f \cos \theta_x - h_i \sin \theta_x)}{f \sin \theta_x + h_i \cos \theta_x} \quad (60)$$

が得られる。

ここで、レール方向に対して同じ距離にある左右のレール上の点を2組設定し、左レール上部を $L_t : (x_L, y_t, -H)$ 、右レール上部を $R_t : (x_R, y_t, -H)$ 、左レール下部を $L_b : (x_L, y_b, -H)$ 、右レール下部を $R_b : (x_R, y_b, -H)$ とおく。これに対応する点のカメラ基準座標系での位置と画面上の位置を同様に、 $L_t : (w_{Lt}, h_t)$ 、 $R_t : (w_{Rt}, h_t)$ 、 $L_b : (w_{Lb}, h_b)$ 、 $R_b : (w_{Rb}, h_b)$ とおく。レール方向の点の距離は

$$y_t - y_b = H \left(\frac{f \cos \theta_x - h_b \sin \theta_x}{f \sin \theta_x + h_b \cos \theta_x} - \frac{f \cos \theta_x - h_t \sin \theta_x}{f \sin \theta_x + h_t \cos \theta_x} \right) \quad (61)$$

となる。また、軌間を g とすると以下で表すことができる。なお JR 在来線の場合では $g = 1,067\text{mm}$ となる。したがって、

$$x_R - x_L = \frac{H}{f \sin \theta_x + h_t \cos \theta_x} (w_{Lt} - w_{Rt}) = g \quad (62)$$

$$x_R - x_L = \frac{H}{f \sin \theta_x + h_b \cos \theta_x} (w_{Lb} - w_{Rb}) = g \quad (63)$$

である。これより

$$\cos \theta_x = \frac{(w_{Lt} - w_{Rt} - w_{Lb} + w_{Rb})H}{(h_t - h_b)g} \quad (64)$$

が得られる。これを用いると焦点距離が

$$f = \frac{(w_{Lt} - w_{Rt})H}{g \sin\theta_x} - \frac{h_t \cos\theta_x}{\sin\theta_x} \quad (65)$$

として求められる。これを左右レールの距離を軌間 g の式に代入することで $y_t - y_b$ が求められる。正規化された4点の x 方向の長さ $と$ y 方向の長さの比は $(y_t - y_b)/g$ である。よって、画面上の4点を

$$(w_{Lt}, h_t) \rightarrow \left(w_{Lb}, h_b + \frac{h_t - h_b}{g} (w_{Rb} - w_{Lb}) \right) \quad (66)$$

$$(w_{Rt}, h_t) \rightarrow \left(w_{Rb}, h_b + \frac{h_t - h_b}{g} (w_{Rb} - w_{Lb}) \right) \quad (67)$$

$$(w_{Lb}, h_b) \rightarrow (w_{Lb}, h_b) \quad (68)$$

$$(w_{Rb}, h_b) \rightarrow (w_{Rb}, h_b) \quad (69)$$

へ変換する射影変換行列を求めることで、画像の俯瞰化が実現できる (図 75)。

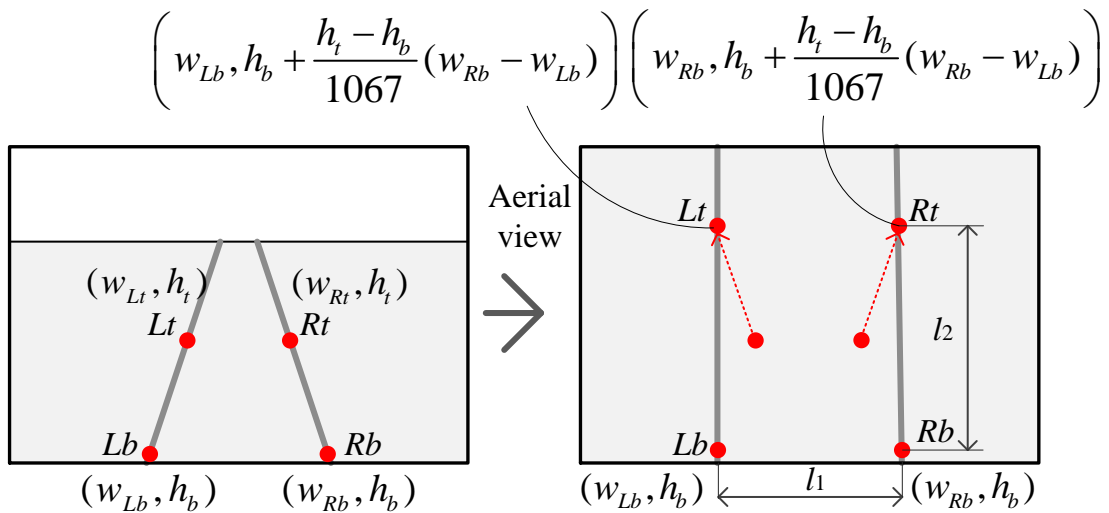


図 75 画像の俯瞰化

4.5.2 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、画面内の対象物の移動量で画素単位の色度を計測する方法について以下に述べる。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として速度を求める。速度計測の際には計測誤差が生じることを考慮し、外れ値の除去や速度変化の連続性を保つ処理を行う。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する。さらに、他の領域の計測結果と比較して計測誤差を大きく含んでいるとみなせる値を除外し、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(図 76)。

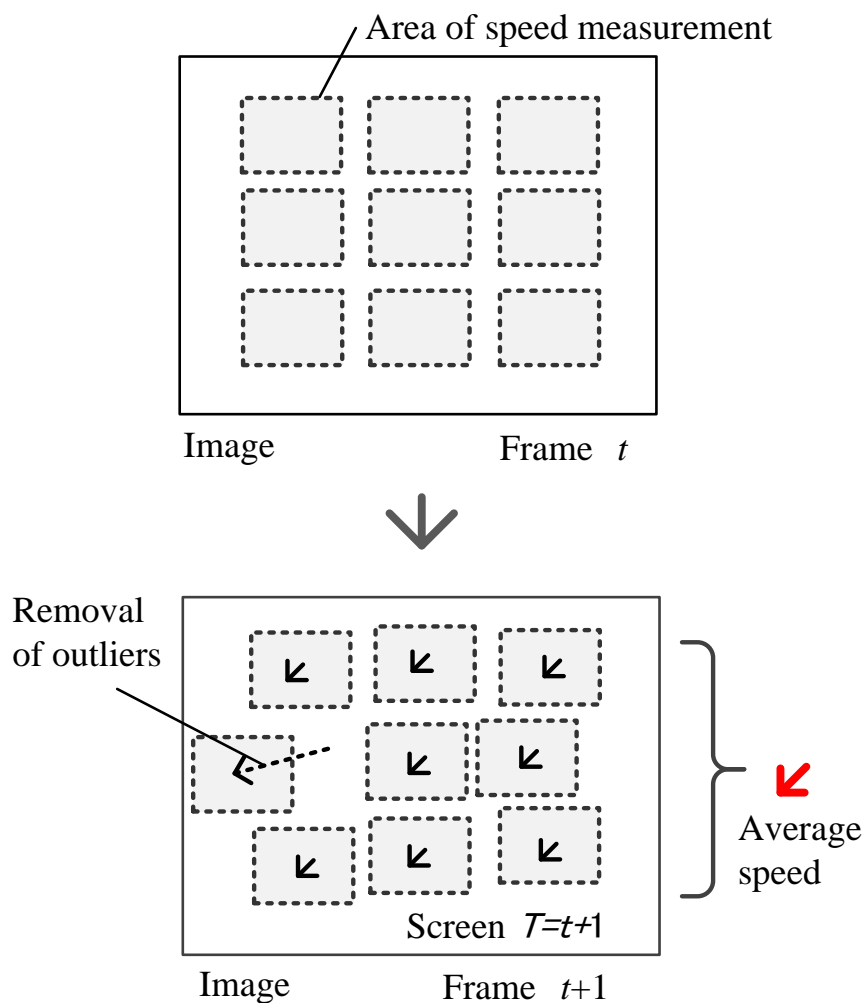


図 76 速度計測方法の概要

フレーム $t-1$ から t での各領域 $i = 1:m$ での画像の移動量を $d_i(t)$ と表記する。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。この値が最も小さくなる領域との距離

$$d(t) = \sqrt{d_w^2 + d_h^2} \quad (70)$$

を移動量とした。

この値について、列車の進行方向や最大速度から設定されるしきい値 th_{\min}, th_{\max} を超える値は誤差値として除外し、条件を満たす移動量の集合を C とする。

$$C = \{d_i(t) | th_{\min} < d_i(t) < th_{\max}\} \quad (71)$$

全ての領域での画像の移動量の平均と標準偏差を $av(t)$ 、 $dev(t)$ とし、各移動量の値を

$$\hat{d}_i(t) = \frac{(d_i(t) - av(t))}{dev(t)} \quad (72)$$

によって標準化し、この値の絶対値がしきい値 th よりも大きい場合は外れ値とみなし、条件を満たす移動量の集合を C' とする。

$$C' = \{d_i(t) | |\hat{d}_i(t)| < th\} \quad (73)$$

外れ値を除外した領域の移動量の平均値 $av'(t)$ は

$$av'(t) = \frac{1}{|C'|} \sum_{i \in C'} d_i(t) \quad (74)$$

となり、これをフレーム t での1フレームあたりの時間に対する移動量として速度 $v(t)$ とする。さらに、前フレームまでの移動量を積み上げして

$$v(t) = (1 - \omega)v(t-1) + \omega av'(t) \quad 0 < \omega \leq 1 \quad (75)$$

と更新することで、計測誤差による極端な速度変化が起きないようにした。なお、得られた各領域の移動量が全て外れ値と判定された場合には、前フレームでの移動量を現フレームでの移動量として採用することとした。

得られた速度は、撮影された動画のフレームレートによって単位時間が異なる。また、移動量の単位は画素である。得られた速度の単位は[*pixels / frames*]となる。

ここで得られた速度については、画像相関に基づいて行われているものであり、画像相関でのマッチングがうまく行かないことによる測定誤差が多く出てしまう。そこで、得られた速

度に対して，列車の特性を考慮したカルマンフィルタを適用することで，速度データの精度向上を図った。

4.5.3 カルマンフィルタによる画像フレーム-画素単位速度の補正

画像相関を用いた計測では、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、ミスマッチング発生し、正しく速度が計測できない状況が発生する。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。カルマンフィルタには以下の状態方程式を用いた。 \mathbf{F} は状態遷移行列、 \mathbf{G} は状態雑音行列、 \mathbf{X}_t は状態変数、 \mathbf{w}_t は状態雑音である。

$$\mathbf{X}_{t+1} = \mathbf{F} \mathbf{X}_t + \mathbf{G} \mathbf{w}_t \quad (76)$$

ここで推定パラメータは、キロ程方向に対する位置、速度、加速度とする。したがって状態方程式は以下のように表される。

$$\begin{bmatrix} x_{t+1} \\ \dot{x}_{t+1} \\ \ddot{x}_{t+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & dt & \frac{dt^2}{2} \\ 0 & 1 & dt \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_t \\ \dot{x}_t \\ \ddot{x}_t \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{dt^3}{6} \\ \frac{dt^2}{2} \\ dt \end{bmatrix} [\mathbf{w}_t] \quad (77)$$

また、観測方程式は以下のように、 \mathbf{z}_t は観測変数、 \mathbf{H} は観測行列、 \mathbf{v}_t は観測雑音とした。

$$\mathbf{z}_t = \mathbf{H} \mathbf{X}_t + \mathbf{v}_t \quad (78)$$

ここで、実際に観測できるのは画像フレーム-画素単位速度のみであるため、式は以下のようになる。

$$[\mathbf{z}_t] = [0 \quad 1 \quad 0] \begin{bmatrix} x_t \\ \dot{x}_t \\ \ddot{x}_t \end{bmatrix} + [\mathbf{v}_t] \quad (79)$$

上記のシステムにカルマンフィルタを適用すると、最終的に状態ベクトル \mathbf{X}_t の最小分散推定値を求める以下のアルゴリズムが得られる。

フィルタ方程式：

$$\hat{\mathbf{X}}_{t|t} = \hat{\mathbf{X}}_{t|t-1} + \mathbf{K}_t (\mathbf{z}_t - \mathbf{H} \hat{\mathbf{X}}_{t|t-1}) \quad (80)$$

$$\mathbf{P}_{t|t} = \mathbf{P}_{t|t-1} - \mathbf{K}_t \mathbf{H} \mathbf{P}_{t|t-1} \quad (81)$$

ここで、カルマンゲインは以下となる。

$$\mathbf{K}_t = \mathbf{P}_{t|t-1} \mathbf{H}^T (\mathbf{R} + \mathbf{H} \mathbf{P}_{t|t-1} \mathbf{H}^T)^{-1} \quad (82)$$

予測方程式：

$$\hat{\mathbf{X}}_{t|t-1} = \mathbf{F} \hat{\mathbf{X}}_{t-1|t-1} \quad (83)$$

$$\mathbf{P}_{t|t-1} = \mathbf{F} \mathbf{P}_{t-1|t-1} \mathbf{F}^T + \mathbf{G} \mathbf{Q} \mathbf{G}^T \quad (84)$$

ここで随時予測される推定パラメータのうち、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 \mathbf{z}_t 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。

4.5.4 画像フレーム-画素単位距離算出

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。動画開始時の距離を L とするとき、フレーム t での距離は速度を累積値にオフセット L を足すことで求められる。

4.5.5 設備位置とフレームの参照データ作成

前方画像フレームとキロ程との対応づけを行うために、あらかじめキロ程がわかっている設備（例えばATS地上子や踏切等）とフレームの関係を参照データとして作成する。

〈5・5〉 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。参照データの得られている区間ごとに、画素単位の距離と参照データから得られる実際の距離の比率によって距離を変換する。参照データの得られている区間について、はじめの画像フレームと後の画像フレームを $t, t+k$ とするとき、設備のキロ程を $D(t), D(t+k)$ と表記する。得られているフレーム $t, t+k$ での画素単位の距離が $d(t), d(t+k)$ であるとき、 $t, t+k$ 間における任意の点 $t+i$ の実距離（キロ程）は以下となる。

$$D(t+i) = D(t) + (D(t+k) - D(t))(d(t+i) - d(t)) / (d(t+k) - d(t)) \quad (85)$$

「参照データ」と「画像フレーム - 画素単位距離データ」を用いて「画像フレーム - キロ程データ」を作成する概念図を図 77 に示す。

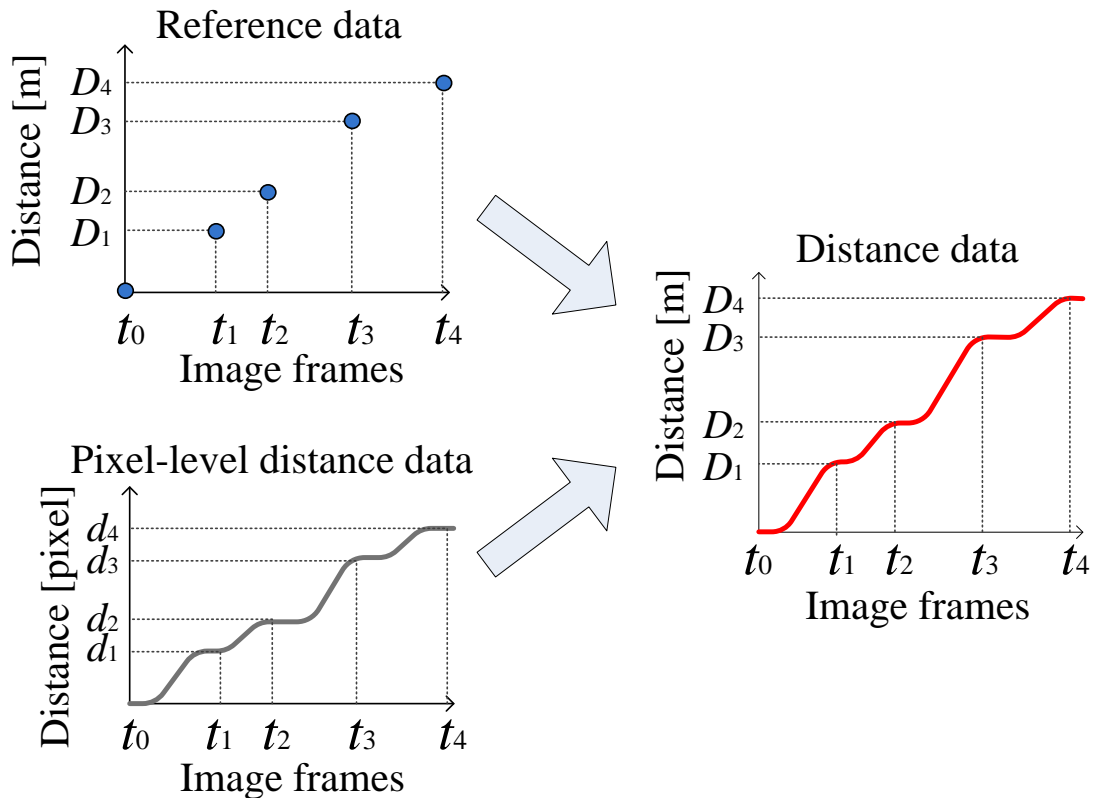


図 77 距離データの作成

4.6 前方撮影画像内のレール抽出と座標変換

前方撮影画像から抽出した画像基準座標系のレール位置を列車基準座標系へ変換する。この前方撮影画像内のレール抽出と座標変換処理はレール抽出，座標変換，センターライン抽出，補正，画像フレーム-レール位置データから成る。まず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抽出し，この位置を画像規準系から列車基準系の実空間上の座標に変換して保存する。なお，センターラインを抽出した際に，レールの曲率についての制約条件からレール形状の補正も行い，表示される設備位置の精度向上も行う。

4.6.1 レール抽出

レールの抽出には 2 章で説明したレール抽出アルゴリズムを適用した。左右のレール位置は、下に示すように、抽出されている画面高さ方向区間内の値 h に対する画面横方向の左レール位置 w_L 、右レール位置 w_R を表す関数 $g_L(h) = w_L$ および $g_R(h) = w_R$ として表現する。

4.6.2 座標変換

画面基準の座標系によるレール位置を列車基準の座標系に変換するために、抽出されたレール上に複数の点（節点）を定め、それらの点を列車基準の座標系に変換し、センターラインの位置を求めることとした。

列車基準座標系と前方撮影画像基準座標系はカメラパラメータを用いることによって変換が可能である。各座標を以下のように定め、変換方法を図 78 および以下に示す。

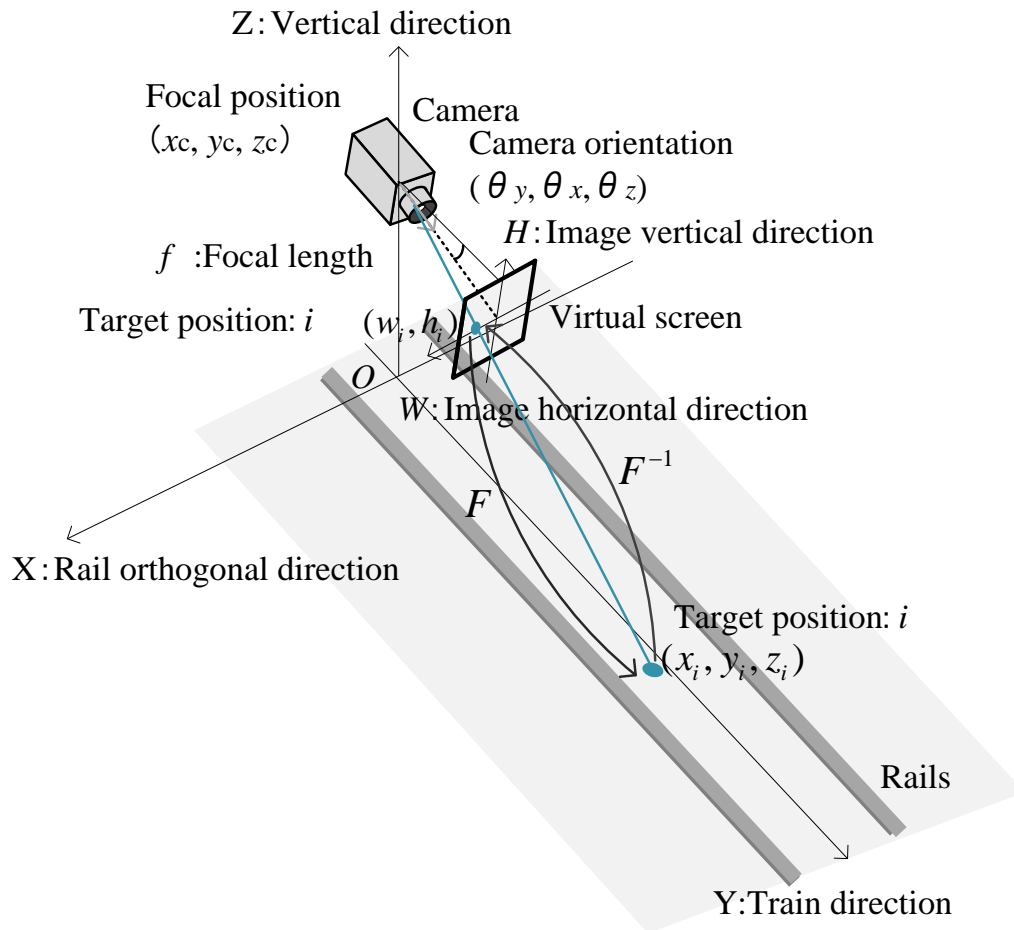


図 78 列車基準座標系と画面基準座標系の記号

列車基準座標系については、対象物 i の位置 (x_i, y_i, z_i) 、カメラ向き $(\theta_x, \theta_y, \theta_z)$ 、カメラ位置 (x_c, y_c, z_c) とする。ここで、 X 軸まわりの俯角を θ_x 、 Y 軸まわりのローリング角を θ_y 、 Z 軸まわりのヨーイング角を θ_z と表す。また、前方撮影画像基準座標系については、対象物の位置 (w_i, h_i) 、カメラ焦点距離 f 、撮像素子サイズ $size_w \times size_h$ 、前方撮影画像の画素数 $pic_w \times pic_h$ とする。

4.6.3 前方撮影画像基準座標系から列車基準座標系への変換 F

前方撮影画像基準座標系の位置は2次元データであり，列車基準座標系の位置は3次元データであるため変換には次元が1つ少ないが，本手法では軌道中心線の3次元があればよいので，前方撮影画像基準座標系から列車基準座標系への変換を行う処理はレール位置を変換する場合のみとなる。従って，対象とする位置の列車基準座標系の高さは0として与えることができる。これによって列車基準座標系の位置は $(x_i, y_i, 0)$ となるので変換が可能となる。したがって，前方撮影画像基準座標系での位置 (w_i, h_i) と列車基準座標系のレール上の位置 $(x_i, y_i, 0)$ との関係は

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} + \alpha \mathbf{R} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_i \\ f \\ h_i \end{bmatrix} \quad (86)$$

と表される。ここで， \mathbf{R} はカメラ向きを表し，

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos\theta_z & -\sin\theta_z & 0 \\ \sin\theta_z & \cos\theta_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_x & -\sin\theta_x \\ 0 & \sin\theta_x & \cos\theta_x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta_y & 0 & -\sin\theta_y \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta_y & 0 & \cos\theta_y \end{bmatrix} \quad (87)$$

である。これを展開すると α は次のように求めることができる。 α を代入することで， x_i, y_i を求めることができる。

$$\alpha = \frac{-z_c}{(\sin\theta_y \cos\theta_x)w_i + (\sin\theta_x)f + (\cos\theta_x \cos\theta_y)h_i} \quad (88)$$

$$\begin{aligned} x_i = x_c + \alpha \{ & (\sin\theta_x \sin\theta_y \sin\theta_z + \cos\theta_y \cos\theta_z)w_i \\ & + (-\cos\theta_x \sin\theta_z)f \\ & + (-\sin\theta_y \cos\theta_z + \sin\theta_x \sin\theta_z \cos\theta_y) \} \end{aligned} \quad (89)$$

$$\begin{aligned} y_i = y_c + \alpha \{ & (\sin\theta_z \cos\theta_y - \sin\theta_x \sin\theta_y \cos\theta_z)w_i + (\cos\theta_x \cos\theta_z)f \\ & + (-\sin\theta_y \sin\theta_z - \sin\theta_x \cos\theta_y \cos\theta_z) \} \end{aligned} \quad (90)$$

4.6.4 列車基準座標系から前方撮影画像基準座標系への変換 F^{-1}

列車基準座標系による 3 次元空間上の対象位置 i を (x_i, y_i, z_i) と表記する。カメラ位置、カメラ向き、焦点距離はそれぞれ、 $(x_c, y_c, z_c), (\theta_x, \theta_y, \theta_z), f$ である。イメージセンサと同じ大きさの仮想画面を想定し、 (x_i, y_i, z_i) で示される位置に対応する前方撮影画像基準座標系での位置を (w_i, h_i) とするとき、この点の関係は

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} + \alpha R \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_i \\ f \\ h_i \end{bmatrix} \quad (91)$$

と表せる。ここで (w_i, h_i) について解くと

$$\begin{bmatrix} w_i \\ f \\ h_i \end{bmatrix} = \frac{1}{\alpha} R^{-1} \begin{bmatrix} x_i - x_c \\ y_i - y_c \\ z_i - z_c \end{bmatrix} \quad (92)$$

となる。 f について式を展開することで未知数 α を求めることができる。

$$\begin{aligned} \alpha = \frac{1}{f} \{ & (-\sin\theta_z \cos\theta_y - \sin\theta_x \sin\theta_y \cos\theta_z)(x_i \\ & - x_c)(\cos\theta_x \cos\theta_z)(y_i - y_c) \\ & + (-\sin\theta_y \sin\theta_z + \sin\theta_x \cos\theta_y \cos\theta_z)(z_i - z_c) \} \end{aligned} \quad (93)$$

この α を (7) 式の 1 行目、3 行目に代入して (w_i, h_i) を求めることができる。

$$\begin{aligned} w_i = \frac{1}{\alpha} \{ & (-\sin\theta_x \sin\theta_y \sin\theta_z + \cos\theta_y \cos\theta_z)(x_i - x_c) \\ & + (\cos\theta_x \sin\theta_z)(y_i - y_c) \\ & + (\sin\theta_y \cos\theta_z + \sin\theta_x \sin\theta_z \cos\theta_y)(z_i - z_c) \} \end{aligned} \quad (94)$$

$$\begin{aligned} h_i = \frac{1}{\alpha} \{ & (\sin\theta_y \cos\theta_x)(x_i - x_c) + (-\sin\theta_x)(y_i - y_c) \\ & + (\cos\theta_x \cos\theta_y)(z_i - z_c) \} \end{aligned} \quad (95)$$

なお、 (w_i, h_i) は仮想画面の CCD 上の位置を表す値である。前方撮影画像の中心を基準とした画像の画素単位での位置 (pw_i, ph_i) を求めるには、CCD のサイズ $size_w, size_h$ と画素数 pic_w, pic_h を用いて

$$\begin{bmatrix} pw_i \\ ph_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{w_i}{size_w} pic_w \\ \frac{h_i}{size_h} pic_h \end{bmatrix} \quad (96)$$

として求められる。これにより前方撮影画像基準座標系と列車基準座標系の相互変換が可能となる。

この関数は、カメラ位置、角度（俯角、ロール角、ヨーイング角）、カメラ焦点距離、カメラの撮像素子サイズ、から前述した方法によって表現することができる。なお、前方のレール高低差は無視できるほどに小さいと仮定している。

4.6.5 画像フレーム-レール位置データ

画面レールとレール位置を以下の(a)~(e)の手順で求める。

(a) 画面レール上と実空間レール上の節点データ作成

画面上の左右レール上に画面下端から高さ方向について均等に 0, 1, と番号を付した節点 $r_L(i)$, $r_R(i)$ を設定する。節点の数は任意に定められることとする。この点を F によって列車基準座標系の位置へ変換する。このとき、 r は画像基準座標系における位置、 R は列車基準座標系における位置を表す (図 79, 図 80)。

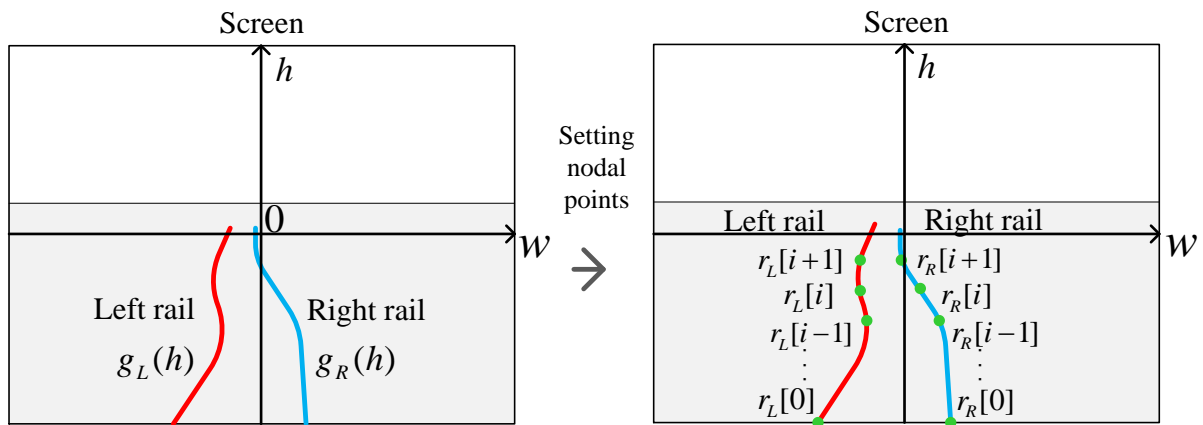


図 79 画面レール上の節点データ

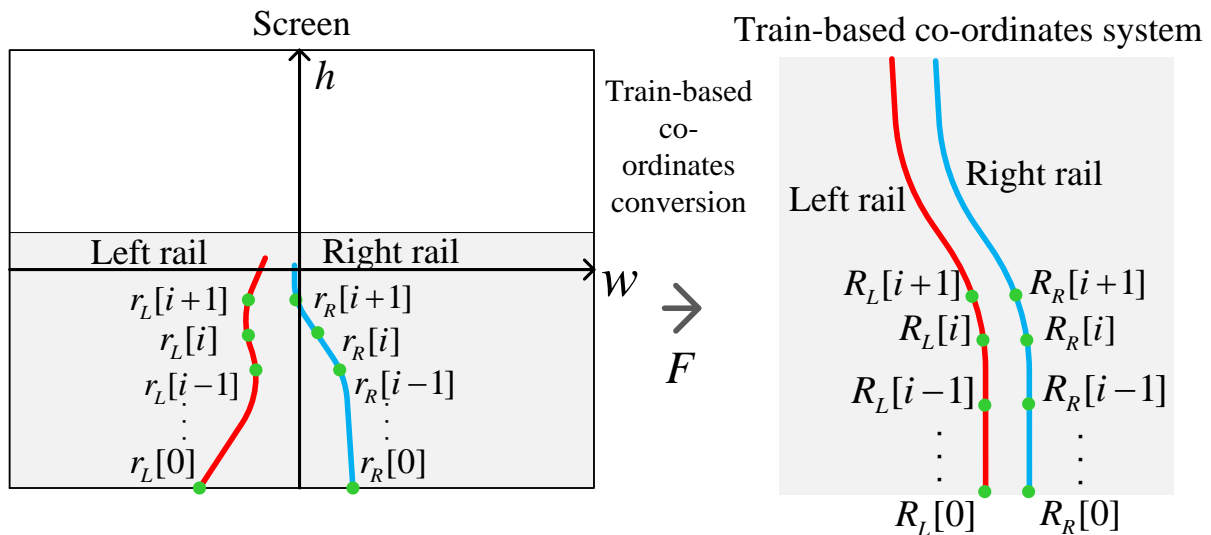


図 80 画面レール上と実空間上の節点データ作成

(b) レール上の節点までのレール上距離データ作成

左右レールごとに、設定した点の間の距離を累積していくことで各節点 i までのレール沿いの距離 $d_L(i)$, $d_R(i)$ を

$$d_L(i) = d_L(i-1) + d_{euc}(R_L(i), R_L(i-1)) \quad (97)$$

$$d_R(i) = d_R(i-1) + d_{euc}(R_R(i), R_R(i-1)) \quad (98)$$

と表す。

ここで $d_{euc}(a, b)$ は a, b 間のユークリッド距離を表す。これによって折れ線で近似して求める (図 81)。

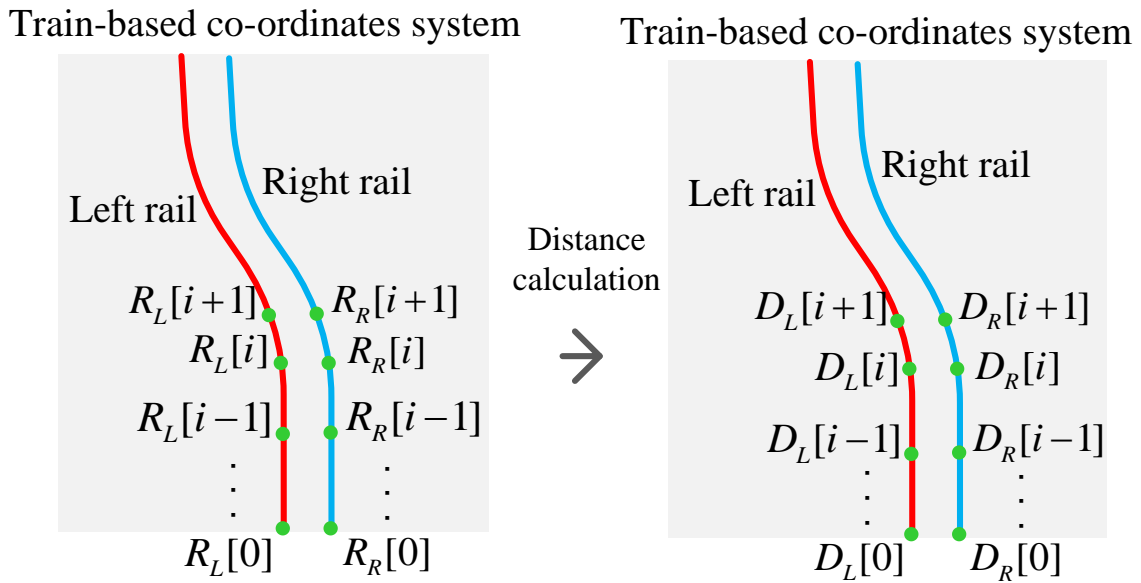


図 81 距離データから節点の作成

これにより、節点 0 からレール沿いにある任意の距離 l だけ前方に離れたレール位置を $R_L(l)R_R(l)$ とすると、その点は何番目と何番目の節点間にあるかを知ることができる。点が節点 i と $i+1$ の間にあるとき、レール形状を折れ線で近似することにより

$$R_L(l) = R_L(i) + \frac{l - d_L(i)}{d_L(i+1) - d_L(i)} \overrightarrow{R_L(i)R_L(i+1)} \quad (99)$$

$$R_R(l) = R_R(i) + \frac{l - d_R(i)}{d_R(i+1) - d_R(i)} \overrightarrow{R_R(i)R_R(i+1)} \quad (100)$$

と表現することができる。

(c) レール上の節点の整列

レール形状の補正処理を行いやすくするために、レール節点を列車基準座標系上で等間隔となるような $R'_L(i)$, $R'_R(i)$ を以下の手順で求める。

- ① 各節点に対応するレール沿いの距離 l を算出
- ② $d_L(j) < l \leq d_L(j+1)$, $d_R(j) < l \leq d_R(j+1)$ となる j をそれぞれ求める。
- ③ 得られる $R_L(l)$, $R_R(l)$ を $R'_L(i)$, $R'_R(i)$ とする。
- ④ 節点数を m とすると、新しく設定する節点の間隔は左右それぞれ $d_L(m-1)/m-1$, $d_R(m-1)/m-1$ となる。

(d) レールセンターライン節点の設定

左右のレール位置座標からレールのセンターライン上の節点を $R'_L(i)$, $R'_R(i)$ の midpoint とし $R'_C(i)$ とする。

(e) レール曲率による節点の補正

θ_i を i 番目と $i-1$ 番目のレール区間での列車基準座標系の前方に対するレールの向き, $\Delta\theta_i$ を対象節点でのレールの角度変化(曲率)とする。 $i+1$ 番目と i 番目のレール区間と i 番目と $i-1$ 番目のレール区間について、各区間のレールの向きを $\overrightarrow{R'_C(i)R'_C(i+1)}$, $\overrightarrow{R'_C(i-1)R'_C(i)}$ と表現する。この2つのベクトルのなす角は内積を用いて

$$\cos \Delta\theta_i = \frac{\overrightarrow{R'_C(i)R'_C(i+1)} \cdot \overrightarrow{R'_C(i-1)R'_C(i)}}{\left| \overrightarrow{R'_C(i)R'_C(i+1)} \right| \left| \overrightarrow{R'_C(i-1)R'_C(i)} \right|} \quad (101)$$

によって求められる。

この値について、レールの最大曲率の上限 $\Delta\theta_{\max}$ を超える場合には次のように補正を行う。

$$\Delta\theta_i = \begin{cases} \Delta\theta_i & \Delta\theta_i < \Delta\theta_{\max} \\ \Delta\theta_{\max} & \Delta\theta_i > \Delta\theta_{\max} \end{cases} \quad (102)$$

これにより、補正を行ったセンターライン節点の位置は $\theta_i = \theta_{i-1} + \Delta\theta_i$ と与えられる。補正後の接点位置を $R''_C(i)$ とおき、

$$R''_C(i) = R''_C(i-1) + \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \overrightarrow{R'_C(i-1)R'_C(i)} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (103)$$

によって接点を求める。さらに，前フレームとのレール形状の連続性を保つため，フレーム t でのセンターラインの節点位置 $\hat{R}_C(t, i)$ を

$$\hat{R}_C(t, i) = (1 - \omega)\hat{R}_C(t - 1, i) + \omega R_C''(i) \quad 0 < \omega \leq 1 \quad (104)$$

として前フレームの位置に重みづけ更新することで与えることとした。

4.7 「地上設備位置の前方撮影画像座標系への変換」と「地上設備の表示」

前節までのデータ処理で求められているのは地上設備の位置のみであり，その位置に画面の見かけ上どの程度の大きさで地上設備を表示するかを求める必要がある。表示する地上設備の画像データについて，「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 h_s 」があらかじめ与えられていることとする。また，地上設備位置の基準点は画像の中心を表すこととする。

対象とする地上設備位置の列車基準座標系での位置を (x_s, y_s, z_s) とする。これを用いると，カメラ位置 (x_c, y_c, z_c) から地上設備までの水平距離は

$$\sqrt{(x_s - x_c)^2 + (y_s - y_c)^2} \quad (105)$$

と求められる。この時，カメラから地上設備までの距離の上限値を定めておき，その値を超える場合には遠すぎて確認できないとみなし表示しないこととする。

ここで，カメラに関するデータ，焦点距離 f ，CCD サイズ $size_w \times size_h$ ，画像の画素数 $pic_w \times pic_h$ を用いると，カメラの CCD 上に映る地上設備の高さは

$$\frac{f}{\sqrt{(x_s - x_c)^2 + (y_s - y_c)^2}} h_s \quad (106)$$

となり，画面上の地上設備の画像上の位置 (W, H) は

$$H = \left\lceil \frac{f}{\sqrt{(x_s - x_c)^2 + (y_s - y_c)^2}} h_s \frac{1}{size_h} pic_h \right\rceil \quad (107)$$

$$W = \left\lceil \frac{f}{\sqrt{(x_s - x_c)^2 + (y_s - y_c)^2}} h_s \frac{1}{size_w} pic_w \right\rceil \quad (108)$$

となる。ここで， $[x]$ は天井関数であり x 以上の最小の整数を表す。さらに，画素数の下限値を設け，しきい値内の距離であれば表示する画素数が 1 を下回らないようにした。信号を画像上に表示するにはもともとのサイズ pic_h を上記の画素数になるよう適宜拡大・縮小して表示すればよい。

これによって、前方画像に対し、前章で求められた位置を中心として前節で求めた大きさの範囲へ拡大・縮小した地上設備画像の画素値を置き換えることで、地上設備画像を表示する。

4.8 具体的適用例

特殊信号発光機は踏切等の手前に設置され、踏切において異常がある場合に赤色に明滅発光し、運転士へ停止信号を現示するための装置である。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検討する必要があり、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(図 82)、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。このような問題に対して、特殊信号発光機の設置位置における見通しを画面上でシミュレートすることにより、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手間を削減できるようになる。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。



図 82 立会いの様子

4.9 シミュレーション手法の精度検証

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。検証のために、画像フレーム-キロ程データ、画像フレーム-レールセンタライン位置データ、信号位置を表示した前方画像などの処理作業結果はファイルに出力し、表示精度などの確認を行った。検証用データとして、JR 在来線での映像データが、走行距離 11km 分、総撮影時間 20 分、総フレーム数 35,519 フレーム、画像サイズ 720×480 画素のデータを用いた。地上設備画像としては、特殊信号発光機の画像を使用し、画像サイズ 31×214 画素、画像の実際の高さ：1500mm としたものをを用いた。軌間パラメータ g については 1067mm とした。画像相関を行うブロックのサイズは 50×100 画素サイズのブロックをレール横断横行に 6 ブロック設定し、画像相関を計算した。速度補正のためのカルマンフィルタにおける加速度・減速度の閾値については、ともに 4km/h/s に設定した。ここでカルマンフィルタを適用するデータは、画像フレーム-画素単位速度であるが、1 画素あたりのサイズから実速度に変換して適用している。画像相関による速度算出結果を図 83 に、画像相関による速度算出結果に対してカルマンフィルタを適用した結果を図 84 に示す。画像相関による速度算出ではブロックのミスマッチングが多数発生しており、外れ値を採用してしまっている箇所や、速度が 0km/h と算出されている箇所が見受けられる。これに対してカルマンフィルタを適用した速度については、そのような異常値が補正されており、概ね滑らかな速度データが得られていることが分かる。

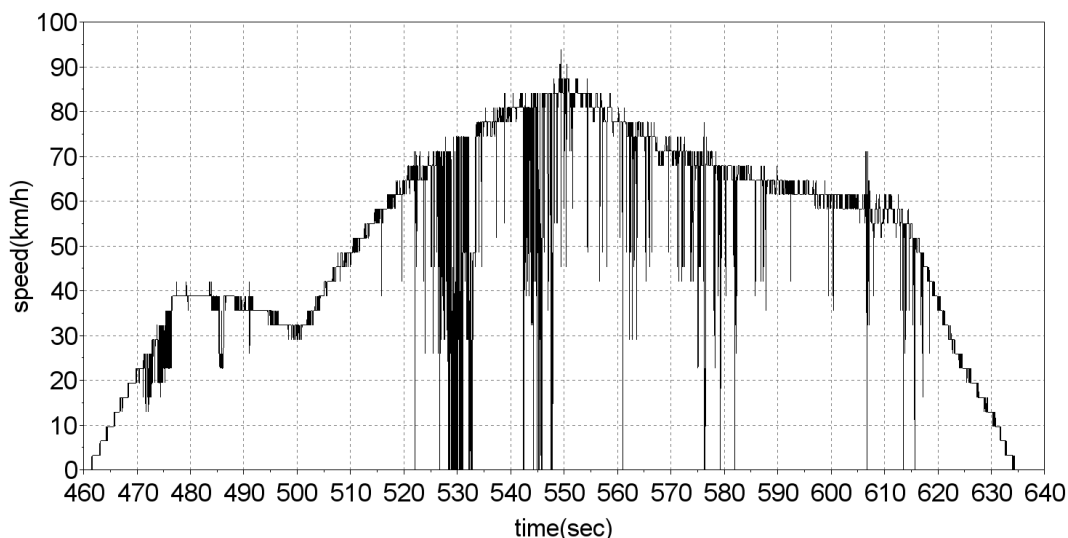


図 83 画像相関による速度算出結果（1 駅間分）

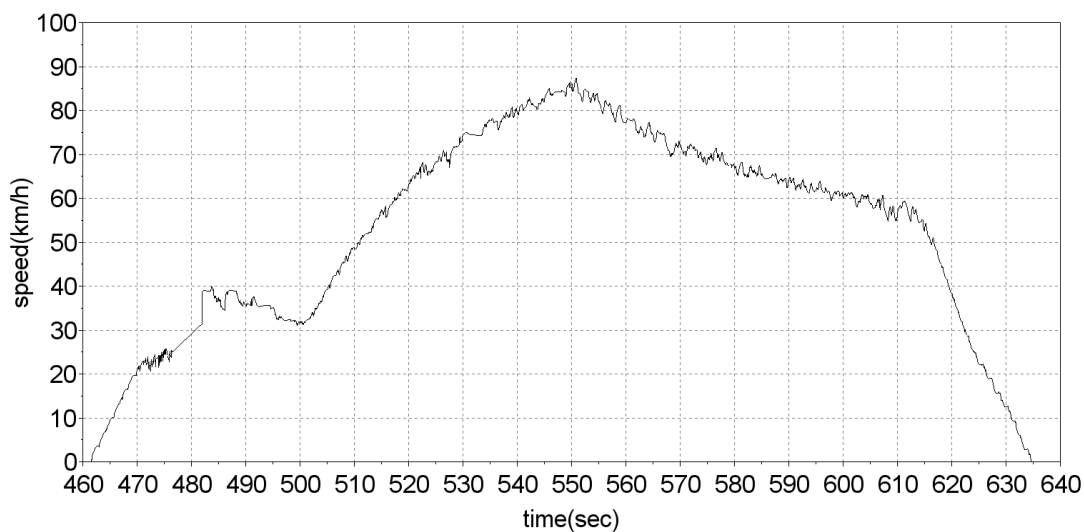


図 84 カルマンフィルタによる推定速度（1 駅間分）

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（図 85）を用いた。総数 98 個の ATS-P 地上子を参照データとして登録し、キロ程を求めた。求めたキロ程に対して、踏切を対象として精度検証を実施した。33 箇所の踏切に対して、踏切台帳に記載されているキロ程とシステム算出したキロ程の差分を求めた。ここで踏切のキロ程は、踏切道の真ん中として扱った。結果、誤差平均値 2.28m，標準偏差 1.5m，中央値 2m，最頻値 2m，最小値 0m，最大値 5m であった。さらに t 検定を用いて信頼区間の推定を行った。信頼度 99%で求めたところ、誤差が 1.56m～2.99m の間の値となった。したがって、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が出ていることが確認できた。



図 85 位置補正として登録した地上子

離れ・高さ方向に対する検証として、3本の設置位置が既知の特殊信号発光機に対して、同一のキロ程、離れ、高さを設定値として入力し、シミュレートさせることで、精度の検証を実施した。シミュレートされた特殊信号発光機と、画面に映る実物の特殊信号発光機との画素のずれを評価として用いた。特殊信号発光機が直近で映るキロ程において、離れ方向に最大20画素、高さ方向に最大50画素程度ずれが発生した。また、特殊信号発光機が100m程度遠方で映るキロ程においては、離れ方向に最大3画素、高さ方向に最大15画素のずれが発生した。これはどちらの距離においても、特殊信号発光機の幅1本分および、高さ1/2本分である。この原因としては、3次元の実空間から2次元の列車前方映像へ変換する際に用いているカメラパラメータの算出精度が十分でないことが考えられる。

前方映像への特殊信号発光機の表示として、表示する特殊信号発光機の位置の限界を300m、同時表示する特殊信号発光機の最大数を1として、離れ2m、高さ2.5mに設定し、各フレームでの特殊信号発光機の位置を表示した画像を出力したデータを図86および図87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と、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。



図 86 列車前方映像への特殊信号発光機の表示結果その 1



図 87 列車前方映像への特殊信号発光機の表示結果その 2

さらに特殊信号発光機の同一のキロ程に建築限界（鉄道車両を安全に走行するため、車両にいかなるものも触れないよう、施設のいかなる部分も侵すことがゆるされないものとして、軌道上に確保された空間の境界線[63]）を表示させた例を図 88 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。

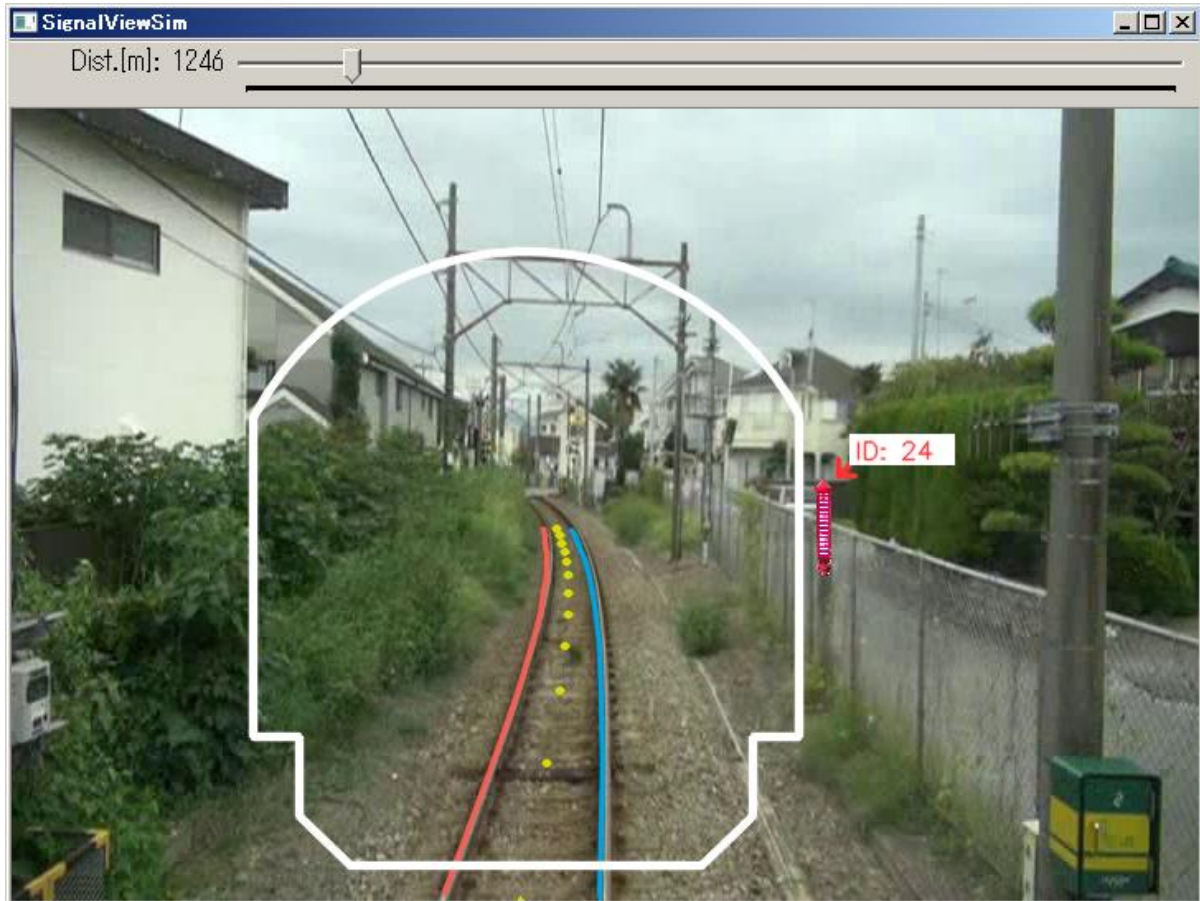


図 88 建築限界を表示した例

表示される特殊信号発光機の位置については、遠方のレール抽出精度が高くないために、遠方に表示される特殊信号発光機の位置が不正確になる場合がみられた。レール検出精度の向上によってさらに正確な位置へ特殊信号発光機を表示することが必要である。

4.10 まとめ

ビデオカメラ等で撮影した列車前方映像を用いた地上設備の設置位置検討するためのシミュレーション手法を開発した。具体的には、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次元の列車前方映像から3次元の実空間を推定する方法を提案し、列車前方映像を用いた地上設備の設置位置検討のための視覚シミュレーションを行うものである。その具体的な応用例として、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。また、手法の効果および精度検証を行い、使用用途によっては実用に十分な機能が実現できていることを確認した。

天候の違いや、昼と夜などの見え方の違いをシミュレーションしたい場合には、入力となる列車前方映像を差し替えることで対応が可能である。現状では、晴天および曇り時の昼間の映像でのみの検証であるため、夜間等におけるキロ程算出の精度検証などを実施する必要がある。

開発したシミュレーション手法によるキロ程についての精度については確認を行い、離れ・高さ方向に対しては3本の例について検証した。今後、離れ・高さ方向に対する十分な精度検証を行うことで、シミュレータの有効性を示していくとともに、地上設備の自動認識による参照データ作成の効率化、遠方のレール検出精度の向上を行っていき、様々な設備への対応を可能にしていく予定である。

第5章 結論

本論文は、踏切事故の削減を目的とし、事故の統計的な観点や、実際に起きた事故事例、または、各団体による事故対策方針などを総合的に勘案し、踏切保安設備の1つである特殊信号発光機の抱える問題の解決を図ることで、保全および施工の効率化をし、踏切事故削減を目指したものである。

近年、技術開発が盛んに行われている ICT (Information and Communication Technology) や IoT (Internet of Things) などの先進的な技術を用いることで、革新的な解決を行うことに対する実現の可能性はある。実際に総務省による情報通信白書においては「インターネットにつながるモノの数の推移は10年間で5.1倍になり、データ国内流通量は2005年から2014年の9年間で9.3倍に拡大している」とし、今後、IoTを通じて様々なデータの収集・分析により業務効率化が活発になるとしている。さらに情報処理推進機構(IPA)はIT人材白書2015においてIoTや機器間通信(M2M: Machine-to-Machine)、ビッグデータを新たな成長分野として捉え、これらの分野の技術者について人材育成をすることで産業の垣根を越えたイノベーションを作り出す可能性を持つ、としている。

鉄道分野においても、これらの情報通信技術を適用する動きがあり、輸送計画、列車運行、旅客サービス、設備の維持管理などさまざまな分野において検討が進められている。設備メンテナンスにおいては、情報通信技術を用いて、これまでの過去のデータに基づく画一的なルールから成る TBM (Time Based Maintenance) から、リアルタイムデータに基づく予防保全である CBM (Condition Based Maintenance) に移行させようという取組みもある。一方で、これらの情報通信技術を鉄道の安全を担保する制御システムや安定輸送のための輸送管理システムに適用する際には、サイバー攻撃を考慮する必要がある、このリスクを企業として見ると、大災害に匹敵するレベルと考えるべきであると言われている。

したがって、本研究のターゲットである踏切保安設備は、インフラとしての設備であることや、現状で相当数の特殊信号発光機が設置されていること、または、安全を担保するための保安設備であることを考えると、セキュリティ面や、故障率・信頼性の観点から、最終的なバックアップとして人間の目視が重要な役割を果たすと考え、現行の特殊信号発光機ありきでの研究開発を行った。

特殊信号発光機はその保全および施工において視認性に問題を抱えている。この問題を解決するために、本研究では、列車前方映像からのレール抽出技術およびカメラ視野制御手法、特殊信号発光機に対する視認性を検査する手法、および、設置位置検討のための視覚シミュレーション手法が必要であると考えた。

保全における視認性については、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。800m以上の距離からの視認性確認は、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、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必要な視認

距離を確認することが難しいという課題がある。また、現状の特殊信号発光機の視認性確認の検査では、踏切側、特殊信号発光機側と視認性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（操作器）を扱い、特殊信号発光機を実際に発光させ、それを視認性確認地点側の作業員が目視にて視認性を確認し、必要に応じて特殊信号発光機側の作業員が、特殊信号発光機の角度調整や草木の伐採などを行う。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。また踏切から 800m 以上ある任意の地点だけでの確認であり、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、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、作業効率が悪いことも問題として挙げられる。さらに、特殊信号発光機の設置総数も相当数にのぼる。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できる高精度・高効率な手法として、不可視光線である近赤外線 LED による発光機の点滅を、列車からイメージセンサ通信を用いて画像認識することで、列車運行を支障せずにかつ効率的に検査が行える手法の開発を行い、現車試験にて 800m 以上手前から各々の特殊信号発光機を区別して視認性確認することが可能であることを示した。

施工における視認性については、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検討する必要があるが、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。このような問題に対して、特殊信号発光機の設置位置における見通しを列車運転台からの画像映像上でシミュレートすることにより、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手間を削減できるようにした。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。

本研究の成果によって、設置されている特殊信号発光機に対しては、設備不良によって見通しが取れていないという事象が撲滅できること、各特殊信号発光機を通過するまでの連続視認性の確認がされることから、安全性がさらに向上し、見通し不良という意味での視認性不良による事故を無くすことができるようになったと考える。現行で踏切毎に夜間に実施していた視認性確認の検査を、列車に添乗し測定することで 1 回の走行で線区全体の特殊信号発光機に対する視認性確認の検査を行うことができるようになった。これによって、安全面・コスト面において大幅な向上が期待できると考える。また、特殊信号発光機の新設・移設にあたっては、設置位置の検討が PC を用いて机上で行うことが可能となり、現場に赴くことが最小限となり、迅速に検討・設計できるようになるため、踏切支障報知装置のさらなる普

及によって、踏切事故の削減が見込まれる。また、現場に赴くことが減るため、作業員の安全性に寄与すると考える。

したがって、本研究は、鉄道と道路が平面交差によって交わる唯一の空間である踏切において、事故削減に貢献する重要な研究成果であると考ええる。

各章に対する本研究で実施した内容、および今後の課題と展望を次節に示す。

5.1 本研究の要約

各章に対する実施した内容を以下に示す。

第2章 列車前方監視のためのカメラ視野制御

列車前方監視のためのレール抽出およびカメラ視野制御装置について、パターンマッチングによる近傍領域レール抽出、領域分割マッチングによる遠方領域レール抽出、過去の推定値と現在の観測値を用いた消失点推定、レールパターンの類似度による抽出レールの連続化の機能を有することで実用に資した列車前方監視のためのレール抽出およびカメラ視野制御手法を開発した。

過去の推定値と現在の観測値を用いた消失点推定を用いることで消失点を安定して取得できるようになり、視野制御雲台の動作が円滑となった。また、レールパターンの類似度による抽出レールの連続化を行うことによって、映像上では起こり得ないレールの変化を排除することにより、近傍領域のレール探索における誤検出が極めて少なくなることで、レール抽出の精度が向上し、消失点の算出精度も向上した。線路の曲率、軌間による制約条件を組み込むことで、現実にはあり得ない極端に曲率の大きな線形や、軌間が不均一な抽出することを排除し、遠方での抽出精度を向上させた。

第3章 視認性を検査する手法

特殊信号発光機の視認性確認手法として、不可視光線である近赤外線 LED による発光機の点滅を、列車からイメージセンサ通信を用いて画像認識することで、列車運行を支障せずにかつ効率的に検査が行える手法の開発を行い、現車試験にて 800m 以上手前から各々の特殊信号発光機を区別して視認性確認することが可能であることを示した。

提案手法を実現するため、制御器は、従来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、近赤外線による点滅パターン発光が可能な近赤外線用制御器、発光機、および踏切器具箱内での結線を考慮した具体的な回路構成を検討した。耐用年数の考え方を整理し、耐用年数が経過した際にも検知性能が満足することを評価した。また、線路周辺に存在する他設備への影響評価を実施し、本システムが他設備に対して影響を及ぼさないことを示した。

第4章 地上設備の視覚シミュレーション手法

ビデオカメラ等で撮影した列車前方映像を用いた地上設備の設置位置検討するためのシミュレーション手法を開発した。具体的には、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次元の列車前方映像から3次元の実空間を推定する方法を提案し、列車前方映像を用いた地上設備の設置位置検討のための視覚シミュレーションを行うものである。その具体的な応用例として、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、列車前方面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。また、手法の効果および精度検証を行い、使用用途によっては実用に十分な機能が実現できていることを確認した。

5.2 今後の課題と展望

各章に対する今後の課題と展望を以下に示す。

第2章 列車前方監視のためのカメラ視野制御

今後の課題としては、上下勾配への対応、遠方レールの抽出精度向上が挙げられ、将来の展望としては、得られた望遠画像からの障害物検知などへの適用が挙げられる。遠方のレールは画像の解像度が低下しているためレール抽出がより困難であるという問題がある。障害物検知については、検知アルゴリズムを本システムで得られた望遠画像に対して適用し、列車前方監視の実用化を目指す。

例えば、通常のハンディカムを広角に設定した映像では、200m 程度遠方の解像度が1画素あたり10cm程となる。この場合、障害物のサイズにもよるが、人(170cm×40cm)を対象とすると17×4pixelとなり画像上から障害物と判断することは非常に困難である。本手法を用いることで望遠のカメラによる前方映像が撮影でき、4倍程度の解像度の画像が得られれば、68×16pixelの解像度で対象物を得ることができる。これはすなわち、画像上から障害物と判断するのに十分な解像度であるといえる。こういった望遠カメラにより得られた画像から障害物を検出する方法としては、一般的な手法としては、HOG(Histogram of Oriented Gradients)[64]などの勾配ヒストグラムなどの画像特徴量を用いて対象物(人や車)をSVM(Support Vector Machine)などによって機械学習させることによって検出する方法などがある。一方で、学習していない障害物を検出することは難しい。これに対しては、複数の画像処理モジュールを用いて総合的に障害物を判定する手法や正常状態を学習させて異常を検出する手法がある。各画像処理モジュールには、レールの連続性を検定し途切れがあった場合は障害物と判定する手法や、軌道面の輝度に関する平均・分散値を計測しておき、この輝度と大きく異なる画素を障害物と判定する手法、物体のエッジとテクスチャから判定する手法、オプティカルフローの特異値を検出する手法などがあり、これらの手法により、学習されていない障害物に対してもある程度の検知精度を持つことができる。

このように、車上から運転士が行っている目視による確認に対するすべての業務を自動化することが期待できる。

第3章 視認性を検査する手法

今後の課題としては、カメラ解像度の変更と視野制御アルゴリズムの改良を施し高精度化を図ることで、検査データの取得ミスをなくす。また、天候や日照量の変化などのさまざまな環境変化に対する視認性確認の検知性能を把握し、長期モニタランを実施することで実用化を目指すことが、挙げられる。

将来の展望としては、この技術は、特殊信号発光機の視認性を確認するために、特殊信号発光機から「特殊信号発光機であること」を示すデータを車上に送信し、車上側でそのデー

タを受信するものである。この技術を応用することで、LEDで現示を示している様々な信号機類から列車に対してデータを送信できることを示している。例えば、現場機器の電圧・電流値など、現地に行かなくては取得できなかった検査のためのデータを列車によって取得することも可能となる。また、先行列車の位置や車両情報、もしくは混雑状況などを相互にデータ授受できればサービスにも適用が可能となる。このように、地上～車上間でのデータ送受信によって保守から運行まで幅広い用途での適用が期待できる。

第4章 地上設備の視覚シミュレーション手法

今後の課題としては、離れ・高さ方向に対する十分な精度検証を行うことで、シミュレーション手法の有効性を示していくこと、地上設備の自動認識による参照データ作成の効率化、遠方のレール検出精度の向上を行っていくことでシミュレーション手法全体の精度を向上させることである。

将来の展望としては、特殊信号発光機以外の様々な設備への対応をしていくことである。本シミュレーションは、レールを基準として、キロ程・線路からの離れ、レールレベルからの高さを用いて管理している設備に対しては全て対応できる。

このように実映像に対して、オーバーレイしてシミュレーションする方法は鉄道分野においては、これまでに存在しない。運転士を養成するための運転シミュレータなどでは主にCG(Computer Graphics)を用いて運転操作に合わせて前方映像を切り替えて表示している。このような運転シミュレータに対して、本シミュレーション技術を用いることで、より現実に沿った運転指導が可能となると考えられる。また、基となるCGデータを作成する労力を削減することも可能となる。

参考文献

- [1] 東京都都市整備局：「踏切対策基本方針」，東京都，（2004）
- [2] 中村英夫ら：「鉄道信号・保安システムがわかる本」，オーム社（2013）
- [3] 日本鉄道電気技術協会：「鉄道信号なるほど事典」，日本鉄道電気技術協会（2014）
- [4] 信号工事の現場必携分科会編：「信号工事の現場必携 [設備編]」，社団法人 日本鉄道電気技術協会（2012）
- [5] 運輸安全委員会：「鉄道事故調査報告書 東日本旅客鉄道株式会社 奥羽線高島駅～赤湯駅間 踏切傷害事故」，（2010）
- [6] 東日本旅客鉄道株式会社：「安全報告書 2010」，（2010）
- [7] 高齢者等による踏切事故防止対策検討会：「高齢者等の踏切事故防止対策について」，国土交通省，（2015）
- [8] JR 東日本プレスリリース「踏切事故対策の取組みについて」，東日本旅客鉄道株式会社（2014年2月）
- [9] 馬場裕一，平塚敦，佐々木英二，山本修，宮本昌和：「無線を用いた列車制御システム」，日立評論，Vol.94，No.06（2012）
- [10] 馬場裕一，立石幸也，森健司，青柳繁晴，武子淳，齋藤信哉，鈴木康明，渡邊貴志：「無線による列車制御システム（ATACS）」JR EAST Technical Review，No.5，pp31-38（2003）
- [11] 平尾裕司，西堀典幸，南博幸，長谷川豊：「次世代運転制御システム CARAT における踏切制御」鉄道総研報告，Vol.7，No.5（1993）
- [12] 中村健作：「JR，民鉄の踏切制御（8）」，鉄道と電気技術，Vol.26，No.6（2015）
- [13] JR 西日本ニュースリリース：「山陽線八人山踏切での踏切障害事故を契機とした対策の実施について」，西日本旅客鉄道株式会社，（2015年12月17日）
- [14] 総務省：「平成 27 年度版 情報通信白書」（2015）
- [15] 独立行政法人情報処理推進機構：「IT 人材白書 2015」（2015）
- [16] 土屋隆司：「鉄道における情報通信技術の活用とシミュレーション技術」，鉄道総研報告，Vol.27，No.2，pp.1-4（2013）
- [17] 横山淳：「ICT を活用した鉄道設備メンテナンスの革新 ―スマートメンテナンスのプラットフォーム―」，鉄道と電気技術，Vol.26，No.2，pp.7-13（2015）

- [18] 井上健：「情報・通信技術（ICT）の利活用」, JREA, Vol.56, No.9, pp.37984-37985 (2013)
- [19] 鵜飼正人, 那須ボクダン友幸, 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, pp.29-34 (2012)
- [20] 長峯望, 鵜飼正人：「特殊信号発光機の視認確認手法の車上への適用」, 鉄道総研報告, Vol.26, No.7, pp.23-28 (2012)
- [21] B. T. Nassu and M. Ukai, “Rail extraction for driver support in railways,” in IEEE Intelligent Vehicles Symposium, pp. 83–88, (2011)
- [22] 那須ボクダン友幸, 鵜飼正人：「列車前方映像を用いた鉄道用前方監視のための線路検出」, 平成 22 年電気学会産業応用部門大会講演論文集, No.3-9 pp.159-162 (2010)
- [23] 鵜飼正人, 那須ボクダン友幸, 長峯望：「列車前方監視のための画像処理技術の研究—線路空間知識を利用したレール検出—」, 平成 22 年電気学会産業応用部門大会講演論文集, No.4-228 pp.381-382 (2010)
- [24] B. T. Nassu and M. Ukai, “A Vision-Based Approach for Rail Extraction and its Application in a Camera Pan–Tilt Control System,” IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, (Vol.13, No. 4), pp. 1763–1771, (2012)
- [25] Y. Sheikh, K. Shafique, Y. Zhai, and M. Shah, “Visual monitoring of railroad grade crossing,” in Proceedings of the SPIE Symposium on Defense and Security, (2004)
- [26] S. Mockel, F. Scherer, and P. F. Schuster, “Multi-sensor obstacle detection on railway tracks,” in Proceedings of the 2003 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 2003, pp. 42-46.
- [27] M. Ruder, N. Mohler, and F. Ahmed, “An obstacle detection system for automated trains,” in IEEE Intell. Vehicles Symp., 2003, pp. 180-185.
- [28] J. Wohlfeil, “Vision based rail track and switch recognition for selflocalization of trains in a rail network,” in IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Germany, 2011, pp. 1023-1028.
- [29] F. Maire, “Vision Based Anti-collision System for Rail Track Maintenance Vehicles,” in 2007 IEEE Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance, USA, 2007, pp. 170-175.
- [30] F. Kaleli and Y. S. Akgul, “Vision-based railroad track extraction using dynamic programming,” in Proceedings of the 2009 IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, 2009.
- [31] V. Kastrinaki, M. Zervakis, and K. Kalaitzakis, “A survey of video processing techniques for traffic applications,” Image and Vision Computing, vol. 21, no. 4, pp. 359-381, 2003.

- [32] T. Veit, J.-P. Tarel, P. Nicolle, and P. Charbonnier, "Evaluation of road marking feature extraction," in Proceedings of the 2008 IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, 2008, pp. 174-181.
- [33] M. Beauvais, C. Kreucher, and S. Lakshmanan, "Building world models for mobile platforms using heterogeneous sensors fusion and temporal analysis," in Proceedings of the 1997 IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, 1997, pp. 230-235.
- [34] R. Risack, P. Klausmann, W. Kruger, and W. Enkelmann, "Robust lane recognition embedded in a real-time driver assistance system," in 1998 IEEE International Conference on Intelligent Vehicles, 1998, pp. 35-40.
- [35] T. Liu, N. Zheng, H. Cheng, and Z. Xing, "A novel approach of road recognition based on deformable template and genetic algorithm," in Proceedings of the 2003 IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, 2003, pp. 1251-1256.
- [36] Y. Wang, E. K. Teoh, and D. Shen, "Lane detection and tracking using b-snake," *Image Vision and Computing*, vol. 22, no. 4, pp. 269-280, 2004.
- [37] W. Liu, H. Zhang, B. Duan, H. Yuan, and H. Zhao, "Vision-based realtime lane marking detection and tracking," in Proceedings of the 2010 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 2010.
- [38] J. Arrospe, L. Salgado, and M. Nieto, "Vehicle detection and tracking using homography-based plane rectification and particle filtering," in Proceedings of the 2010 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 2010.
- [39] M. Felisa and P. Zani, "Robust monocular lane detection in urban environments," in 2010 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 2010.
- [40] L. Chen, Q. Li, Q. Mao, and Q. Zou, "Block-constraint line scanning method for lane detection," in IEEE Intelligent Vehicles Symp., 2010.
- [41] J. C. McCall and M. M. Trivedi, "Video-based lane estimation and tracking for driver assistance: Survey, system, and evaluation," *IEEE Trans. on Intell. Transportation Systems*, vol. 7, no. 1, pp. 20-37, 2006.
- [42] Z. W. Kim, "Robust lane detection and tracking in challenging scenarios," *IEEE Trans. Intell. Transport. Syst.*, vol. 9, no. 1, pp. 16-26, 2008.
- [43] John Canny, "A Computational Approach to Edge Detection," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. PAMI-8, No.6, November 1986.
- [44] John Canny, "Finding Edges and Lines in Images", MIT AILab Tech Report TR-720,(1983)

- [45] D.M. Gavrilă, “Multi-feature Hierarchical Template Matching Using Distance Transforms”, IEEE International Conference on Pattern Recognition, pp. 439-444, 1998.
- [46] H. Barrow, J. Tenenbaum, R. Bolles and H. Wolf, “Parametric correspondence and chamfer matching: Two new techniques for image matching”, In Int’l Joint Conf. of Artif. Intel., pp. 659–663, 1977.
- [47] D. M. Gavrilă, “A Bayesian, exemplar-based approach to hierarchical shape matching,” IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 29, No. 8, pp.1408-1421, 2007
- [48] Itoh, et. Al. : “A CMOS Image Sensor for 10Mb/s 70m Range LED-Based Spatial Optical Communication”, Dig. Tech, Papers, IEEE Int. Solid-State Circuits Conf., pp.402-403, 2010.
- [49] 伊藤,M.S.Z.Sarker, 他 : 「車車間・路車間光通信システムへの CMOS イメージセンサ技術の応用と光受信画素回路の特性評価」, 映情学技報, Vol.33, No.18, IST2009-16, pp.33-36, Mar.2009
- [50] 伊藤,高井,M.S.Z.Sarker,濱井,安富,安藤,川人 : 「屋外 70m / 伝送速度 10Mbps を有する空間光通信用 CMOS イメージセンサ」, 映情学技報, Vol.34, No.16, pp.21-24, Mar.2010
- [51] 増田, 山里, 岡田, 片山 : 「LED 信号機と車載カメラを用いた可視光空間通信における階層的符号化方式」, 信学論(A), Vol.J90-A, No.9, pp.696-704, Sep.2007
- [52] 浜川圭弘 : 「太陽光発電入門」, オーム社, 1981
- [53] 小野瀬一志ら, : 「わかりやすい LAN の基礎」, オーム社, 1995
- [54] SONY 「ISP 総合カタログ 2014」, , (2014)
- [55] JIS C 8105-3 照明器具 第 3 部 : 性能要求事項通則, 2011
- [56] TSAL6100 Datasheet : Vishay Semiconductors, Document Number: 81009, Vishay 社, <http://www.vishay.com/docs/81009/tsal6100.pdf>, (2015 年 12 月 26 日アクセス)
- [57] 小川圭一, 土井和広, 久坂直樹 : 「交通安全対策の検討に対する簡易ドライビングシミュレータの応用可能性」, 交通科学 Vol.37 No.1 pp.46-54(2006)
- [58] 小川圭一, 土井和広, 久坂直樹, 久恒智朗 : 「信号切り替わり時の運転行動の分析に対する簡易ドライビングシミュレータの応用」, 土木計画学研究・論文集 Vol.26 No.5 pp. 865-872 (2009)
- [59] 網島均, 小島崇, 塩沢友規, 高田宗樹 : 「人間-機械評価用列車運転シミュレータの開発と脳機能計測への適用」, 日本信頼性学会誌 : 信頼性, Vol. 26 No. 7, pp.617-626. (2004)

- [60] 茄子川慈苑, 青木孝文, 新浩治, 南里卓也:「車載ステレオカメラを用いた障害物の検知と測距に関する検討」, 第8回情報科学技術フォーラム, H-055, p227-228 (2009)
- [61] Sameer Agarwal, Yasutaka Furukawa, Noah Snavely, Brian Curless, Steven M. Seitz, Richard Szeliski: Building Rome in a Day. Communications of ACM, Vol.54, No.14, pp.105-112. (2011)
- [62] 中村英夫:「列車制御 ー安全・高密度運転を支える技術ー」, オーム社, (2011)
- [63] 財団法人鉄道総合技術研究所:「第2版 鉄道技術用語辞典」, 丸善, (2006)
- [64] N. Dalal and B. Triggs: "Histograms of Oriented Gradients for Human Detection", Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pp.886-893 (2005)

謝辞

本研究を遂行するにあたり、多数の方々よりご指導とご協力を賜りました。ここに記して感謝の意を表します。

まず、本研究の遂行に際し、終始ご指導いただき、学位論文としてまとめる機会を与えて頂きました指導教員の筑波大学システム情報工学研究科 蔡東生准教授に厚く御礼申し上げます。蔡准教授には、研究遂行に際し、懇切丁寧に、そして、適時的確なご助言をいただけたことで研究を進めることができました。改めて心より御礼申し上げます。

また、主査を担当していただきました北川高嗣教授、副査を担当していただきました工藤博幸教授、徳永隆治教授、坪内孝司教授、コール・ジェームズ・B 准教授には、大変お世話になりました。論文を執筆にあたり有意義なご助言を頂きましたこと深く感謝申し上げます。

公益財団法人鉄道総合技術研究所の理事長をはじめ関係各位におかれましては、在職中の社会人博士課程への入学を許可していただき、感謝申し上げます。特に、信号・情報技術研究部・平栗滋人部長、信号システム研究室・新井英樹室長には、業務上の多くのご配慮を頂きました。ここに感謝申し上げます。

本研究を進めるにあたって、信号・情報技術研究部・鶴飼正人主管研究員には、画像処理のイロハから実環境での問題と解決方法について、様々なご指導を頂きました。心より御礼申し上げます。また、信号システム研究室の杉本経嗣副主任研究員（現（株）三工社）、會田学研究員、中曽根隆太研究員におきましては、試作装置の作成から検証・システム評価試験など全体を通して、ご協力、ご尽力いただきました。厚く御礼申し上げます。

本研究を遂行するにあたっては、上記で述べた方々以外にも大変多くの方のご協力によって成り立っております。特に JR 東日本、（株）三工社の関係者の方々におきましては、試作機の作成、現車によるシステム評価などにご協力を頂きました。厚く御礼申し上げます。

最後になりましたが、本研究の遂行を温かく見守ってくれた両親と、支えてくれた家族に感謝します。特に、妻の美紀には、育児、家事をほったらかしにすることとなってしまう、申し訳ない思いとともに、大変感謝しております。長男の大河（7歳）、次男の樹（1歳）には、日々、気力と活力をもらいました。

将来、この2人の息子の手本となれるよう、学術的成果と実用的成果で社会貢献をする研究者を目指して、今後とも精進していく所存です。

発表論文

査読付き学術論文

1. 長峯望, 鵜飼正人, 「列車前方映像を用いた地上設備の設置位置検討のための視覚シミュレーション手法」, 電気学会論文誌 D, Vol.136, No.2, 2016, pp.134-144
2. 長峯望, 鵜飼正人, 「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 D, Vol.134, No.11, 2014, pp.969-977
3. 長峯望, 鵜飼正人, 「列車前方監視のためのカメラ視野制御」, 電気学会論文誌 D, Vol.134, No.10, 2014, pp.921-929
4. 長峯望, 鵜飼正人, 「列車前方映像からの臨時信号機の認識」, 精密工学会誌, Vol.75, No.2, 2009, pp.267-272

査読付き国際会議論文

1. Nozomi Nagamine, Masato Ukai, “Simulation of an installation position of wayside signals using video sequences from the train cab”, Computers in Railways XIV Special Contributions p97-109 (2014)
2. Nozomi Nagamine, Masato Ukai, “Application of Image Processing to Maintenance of Signalling Facilities”, Computers in Railways XIII, p73-84 (2012)
3. Masato Ukai, Nozomi Nagamine, Bogdan Tomoyuki Nassu, “A High-performance Inspection System of Tunnel Wall Deformation Using Continuous Scan Image”, WCRR, G19P, (2011)
4. Masato UKAI; Bogdan Tomoyuki NASSU; Nozomi NAGAMINE; Masato Watanabe; Takayuki Inaba, “Detection of Obstacle on Railway Track by Fusing Super-Resolution

Radar and Image Sensor”, WCRR, H7 (2011)

口頭発表

1. 長峯望, 會田学, 中曽根隆太, 鵜飼正人, 「特殊信号発光機の視認性確認システムの開発」, 第 52 回鉄道サイバネ・シンポジウム論文集, 2015
2. 丹羽順一, 紫尾豪氏, 中曽根隆太, 長峯望, 鵜飼正人, 「車載型前方監視装置の技術的実現可能性の検討」, 電気学会 ITS/交通・電気鉄道合同研究会, 2015
3. 長峯望, 鵜飼正人, 中曽根隆太, 「列車前方監視のためのカメラ視野制御手法の高精度化」, 電気学会 交通・電気鉄道(TER)研究会, 2015
4. 鵜飼正人, 長峯望, 「鉄道設備検査・保守での画像技術の活用」, ViEW2014 ビジョン技術の実利用ワークショップ, 2014
5. 長峯望, 鵜飼正人, 「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(TER)研究会, 2014
6. 長峯望, 鵜飼正人, 「特殊信号発光機の設置位置シミュレーション手法」, 電気学会リニアドライブ研究会資料 Vol. LD-14 No.64-68.70-72, 2014, pp.35-40
7. 長峯望, 鵜飼正人, 杉本経嗣, 「イメージセンサ通信を用いた特殊信号発光機の視認確認手法」, 鉄道技術連合シンポジウム講演論文集(CD-ROM), Vol.20, ROMBUNNO.S7-3-3, 2013
8. 鵜飼正人, 長峯望, 「列車前方の安全を見張る」, RRR Vol.70, No.11, 2013, pp.26-29
9. 鵜飼正人, 長峯望, 「画像認識による信号設備の車上監視」, JREA 一般社団法人日本鉄道技術協会 Vol.56, No.8, 2013, pp.37918-37921
10. 長峯望, 鵜飼正人, 「列車前方監視のためのカメラ視野制御装置の開発」, 平成 25 年 電気学会 電子・情報・システム部門大会, 2013

11. 長峯望, 鵜飼正人, 「近赤外線 LED と画像認識を用いた鉄道信号設備の視認性検査手法」, 電子情報通信学会技術研究報告. IE, 画像工学 112(291), 2012, pp.29-34
12. 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, pp.31-35
13. 長峯望, 鵜飼正人 重田英貴, 「臨時信号機認識のための画像処理手法の開発」, 鉄道技術連合シンポジウム講演論文集 Vol.14, 2007, pp.413-416
14. 長峯望, 鵜飼正人, 「車上型画像処理による信号認識システムの開発」, 鉄道サイバネ・シンポジウム論文集(CD-ROM) Vol.44, ROMBUNNO.808, 2007

その他諸報告

1. 長峯望, 會田学, 中曽根隆太鵜飼正人, 「特殊信号発光機の視認性確認システムと設置支援手法」, 鉄道総研報告, Vol.30, No.1, 2016, pp.17-22
2. 長峯望, 鵜飼正人, 杉本経嗣, ほか, 「特殊信号発光機の視認性確認手法の開発」, 鉄道と電気技術(Railway & electrical engineering), Vol.25, No.3, 2014, pp.29-33
3. Nozomi Nagamine, Masato Ukai, “Visibility Check Method for Railway Signals by Cab-mounted Camera” , Quarterly Report of RTRI, Vol.54, No.2, 2013, pp.85-90
4. 長峯望, 鵜飼正人, 「特殊信号発光機の視認確認手法の車上への適用」, 鉄道総研報告, Vol.26, No.7, 2012, pp.23-28
5. Nozomi Nagamine, Masato Ukai, “Detection of Slow-Speed-Notifying Signals Using Image Recognition from the Driver’s Cabin”, Quarterly Report of RTRI, Vol.50, No.3, 2009, pp.162-167
6. 長峯望, 鵜飼正人, 「車上型画像処理による徐行予告信号機の認識」, 鉄道と電気技術 (Railway & electrical engineering), Vol.20, No.2, 2009, pp.9-13

7. 長峯望, 鵜飼正人, 「列車前方映像を用いた徐行予告信号機の認識手法」, 鉄道総研報告, Vol.23, No.1, 2009, pp.33-38