

画像解析技術を用いた鉄道用予防保全策の検討

工藤 希* 水間 毅**

Study on the Preventive Maintenance Methods for Railway Through Image Processing with Sensors

by

Nozomi kudo* Takeshi Mizuma**

Abstract

While there is a need for a railway to provide services in a stable and sustainable manner as public transportation, a certain amount of costs are required regardless of its traffic volume. Therefore, railway businesses in rural areas, in particular, often face business difficulties. In order to reduce the maintenance costs, a study was carried out to find out on-board systems for monitoring the ground equipment. Such a system may enable us to see the process of aging, as well as identify a device, that needs maintenance, and may facilitate the well-planned implementation of the maintenance and the review of the maintenance cycle. Cameras and sensors installed on an operating train were used to build such a system as a prototype. In order to speed up the image processing, an analysis was carried out for images of this subject ground equipment only, based on the vehicle position information and position information of the subject equipment that have been acquired in advance. For the purposes of this paper, experiments were conducted for signals, automatic barriers and spring points. As a result, it was confirmed that using this image processing dealing with the images captured enabled us to understand conditions for each subject device. In the future, further efforts will be made to use this prototype to accumulate data for preventive maintenance.

*交通システム研究領域、**理事

1. はじめに

鉄道は公共交通機関として、安定的・持続的な輸送サービスを提供していかなければならない。日本における鉄道の機関分担率は 28%（平成 21 年度旅客輸送人キロ）であるが、地方鉄道においては、人口減少等により利用者数が減少している。しかしながら、国土交通省交通政策審議会陸上交通分科会鉄道部会において、地方鉄道の必要性が提言⁽¹⁾されているものの、安定的・持続的な輸送サービスを提供していくには、輸送量に関わらず一定の保守費用がかかるため、地方鉄道では厳しい経営状態が続いている。その要因としては、図 1 に示すように、鉄軌道業営業費のうち運賃収入に比例しない線路保存費や電路保存費等の、軌道や地上設備等のメンテナンスにかかる修繕費が、経費全体の半分以上を占めていることが挙げられる。

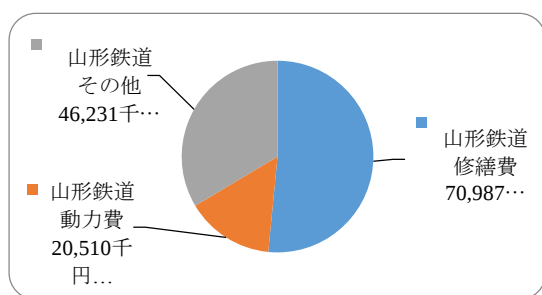


図 1 地方鉄道における営業費の割合（例：山形鉄道株式会社）（除人件費）⁽²⁾

そこで、この修繕費を低減するために、経年劣化等による障害を未然に防ぐ方法として、保守が必要な地上設備を、日々運行している営業列車を利用して監視する方法が考えられる。

保守が必要な地上設備のうち、軌道については、車両に加速度センサ等の安価な汎用センサを付加し、営業運転を行いながら軌道の状態診断を行うという研究⁽²⁾がある。しかし、信号機等の保安設備の状態診断についての検討はされていない。そのため、信号機、踏切遮断機、転てつ機等の既存の設備を対象として、それらの動作状態を常時モニタリングし、僅かな状態の変化を検出する手法について検討した。

この手法を用いることにより、保守が必要な装置を特定し、さらに、それらを長期的にモニタリングすることで、経年劣化の過程を把握することが可能となり、最適化された点検周期により効率的なメンテナンスが実現可能となることから、システムを構築して検証することとした。

システムの構築にあたっては、地方鉄道を対象としているため、安価で簡易な構成であることと、既存の設備に改造を加えずに作動することを前提とし、当研究所で取り組んできたGPSによる列車位置検知⁽¹⁾とカメラ画像による画像解析の汎用技術を組み合わせることとした。

本稿では、構築したシステムを営業列車に設置して実路線で試験を行い、本手法の有効性確認を行ったので報告する。

2. 画像処理技術を用いた予防保全システム

2. 1 対象とする設備

本研究で対象とする設備は以下の通りとした。

2. 1. 1 LED 式信号灯器

従来、信号灯器には白色電球が用いられてきた。この白色電球は信頼性を上げるためダブルフィラメントとする他、断芯検知機能を備えており、故障を容易に検出できた。一方、近年導入されつつある LED 式信号灯器は、白色電球に比べ長寿命という利点があるものの、輝度が時間とともに緩やかに経年劣化して低下する傾向がある。このような信号機の輝度の劣化は、視認性を悪化させるばかりか、ヒューマンエラーに繋がる可能性もある。しかし、経年劣化はこれまでの白色電球の故障とは異なり、灯器としての機能は果たしていることから検知が困難である。鉄道において信号機は、600m 手前から目視確認できる必要があるが、LED 灯では経年劣化が長期的に徐々に起こることから、視認性の低下が生じていることに運転士の目視だけでは気付きにくい。その結果、信号が前方 600m では目視できない状態になる可能性があることから対象設備とした。

2. 1. 2 踏切遮断機

踏切遮断機は鉄道設備の中でも故障の発生頻度が比較的高い装置の一つである。踏切遮断機は道路側を遮断する遮断かんの開閉をモータにより制御しているが、そのモータが経年劣化すると、列車通過後の遮断かん開動作が完了するまでの時間が徐々に長くなり、さらに劣化が進むと開動作が不能となることが想定される。その結果、道路障害の発生につながることから対象設備とした。

2. 1. 3 発条転てつ機

地方鉄道で多く使われている発条転てつ機は、運

行中に転換しているかどうかを運転士が確認するには、転てつ機標識を確認するほか、トングレールの状態を目視で確認するしかない。そこで、自列車が通過した後に、発条転てつ機が復位するまでの時間をモニタリングすることにより、ばねやダンパの経年劣化を検出することができる。また、復位したことを検出しておくことで、次の列車が安全に走行できると考える。

以上により、本研究では、LED式信号灯器、踏切遮断機、発条転てつ機を対象に検討を行い、

- ・信号機：経年劣化による輝度の低下
- ・踏切遮断機：経年劣化による遮断かん開動作にかかる時間の変化
- ・発条転てつ機：スプリングやダンパの劣化による戻り時間のずれ

を検出することを目指すこととした。

2. 2 システム構成

構築したシステム概要を図2に、システム構成を図3に示す。

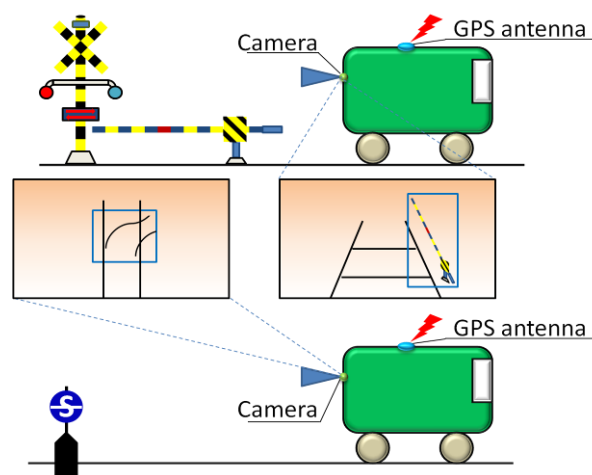


図2 システム概要（踏切・転てつ機の場合）



図3 システム構成

本システムは、列車にGPSとカメラを設置し、GPSにより列車の位置情報を取得、対象とする設備に接近するとカメラが撮影を開始し、撮影した画像

を解析するものである。しかし、撮影した全ての画像を解析すると、処理に多くの時間がかかる。そこで、GPSによる位置情報から、車両と対象となる地上設備の位置関係を算出し、図2の青い枠線のように、撮影画像から、地上設備が映し出されていると推測される範囲を抽出、その抽出された範囲画像のみ解析することで処理時間を短縮することとした。

2. 3 目標追跡手法

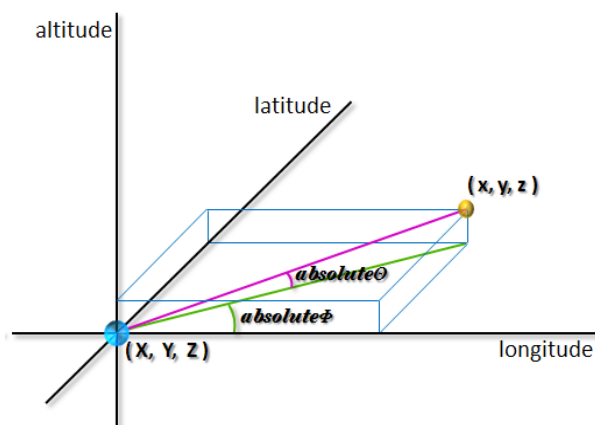


図4 対目標物角度算出

撮影画像から、対象とする地上設備を特定する手法について述べる。対象とする地上設備の目標物（踏切遮断機の場合は遮断かん）の位置は、列車に設置されたカメラと水平の位置にあるとは限らない。そのため、まず、列車に設置されたカメラの位置から、目標物が設置されている位置までの角度を算出する。列車に設置されたカメラの位置 (X, Y, Z) から目標物の位置 (x, y, z) までの角度をベクトルにより求める（図4）。求められた情報を、画像上に反映させることで、目標物の位置を特定する。

2. 4 画像処理技術

2.2節で抽出した範囲について、画像処理技術を用いて装置の状態を判別する。以下に、装置毎の判別方法を示す。

2. 4. 1 信号機

信号機は、灯火がだ円形の黒い枠で囲われた形状と、各色灯の点灯する位置が異なる特徴を有している。そのため、黒い枠部分を特定し、次に枠の中から点灯している位置を特定することとした。

しかし、信号機の黒い枠部分の特定には、GPSの誤差や車両の動揺、カメラの設置位置などの影響に

より、正確に特定できない可能性がある。そのため、黒い枠部分が画像解析対象枠内に収まるよう補正を行った。その結果を図5に示す。図中の破線がGPSにより特定した黒い枠部分の位置、実線が補正した位置である。

この方法により抽出した範囲を二値化し、図6のように信号機の黒い枠部分を特定する。その後、現示している部分（図6の灯火部の抜けている部分）の位置から現示されている色を特定する。

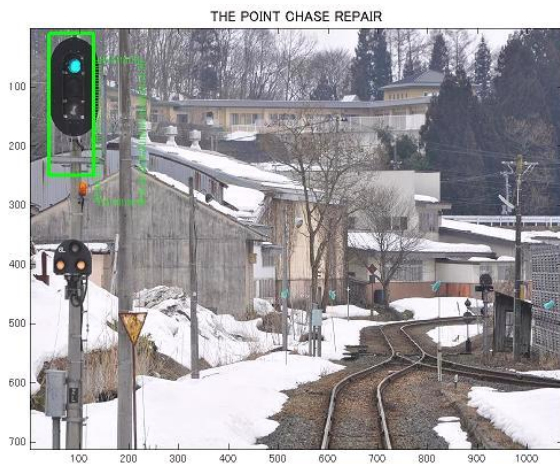


図5 画像処理による解析範囲の補正

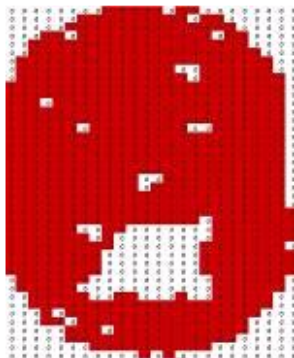


図6 信号機の判別

具体的な画像解析方法を示す。まず、特定された画像の画素毎の輝度（Y）をR（赤）G（緑）B（青）カラーモデルからCIE（国際照明学会）1931XYZ式に基づき（1）式を用いて算出し、Yが黒色に近い0～60か否かによりフィルタリングを行う。フィルタリングの後、グループ化して一定以上の大きさのグループとなった場合に、信号機の黒い枠として認識する。

$$Y(x, y) = 0.299 * R(x, y) + 0.587 * G(x, y) + 0.114 * B(x, y) \quad (1)$$

次に、認識した信号機の画像より各色灯現示を判定する。図7で示すように信号機の縦方向の中心を G_s 、信号機の各色灯部分の縦方向の中心を G_l 、各色灯の高さを H_l として（2）式から黄色灯の現示判定を行う。

$$\begin{aligned} & ((G_s > G_l) \cap (G_l + (H_l / 2) > G_s)) \\ & \cup ((G_s < G_l) \cap (G_l - (H_l / 2) < G_s)) = \text{黄} \end{aligned} \quad (2)$$

また、（2）式を満たしていない場合は、以下の（3）式または（4）式により、赤色灯または青色灯の判定を行う。

$$G_s > G_l = \text{赤} \quad (3)$$

$$G_l > G_s = \text{青} \quad (4)$$

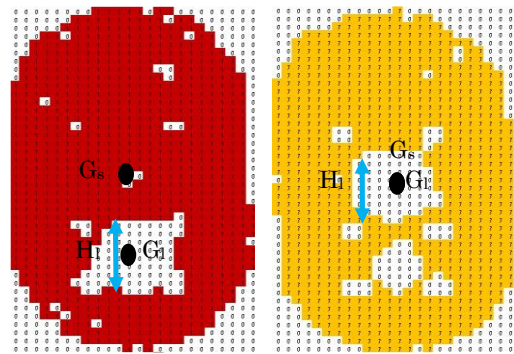


図7 画像の位置による判定

2. 4. 2 踏切遮断機

踏切遮断機の遮断かんの開動作を検知する手法を図8に示す。まず、信号機と同様に、二値化などの下処理を実施後、canny法によりエッジの検出を行う。次に、確率的ハフ変換によりエッジ画像から線分の抽出を行う。抽出した線分のうち、近傍の電柱などの建造物を除外するために、線分の長さや角度についてしきい値を設定し、そのしきい値より短い線分や、小さい角度の線分を除去した。この方法で抽出された線分を遮断かんの線分と認識し、その長さや角度から、遮断かんの開動作を判定する⁽⁵⁾。

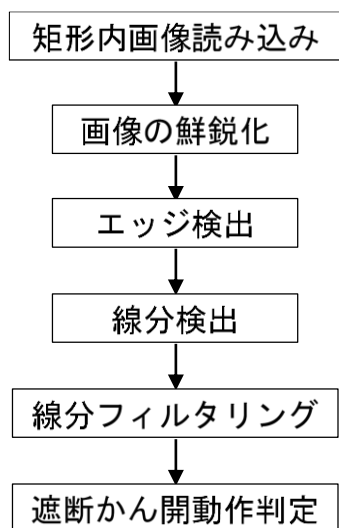


図 8 踏切遮断かの解析方法

2. 4. 3 発条転てつ機

発条転てつ機についても、遮断かの開動作検知と同様の処理を行い線分を検出する。検出した線分について、上下方向に連続した線分をレールと判定し、画像の上端まで探索する（図 9）。片側のレールの左側面と右側面の走査時、二つの線分の距離が変わらなければ同じレールを走査していると判断し、離れれば転てつ機周辺と判断する。2 本のレールのうち、転てつ機周辺と判断したレールが線路の右側か左側かによって、定位か反位かを判断する。

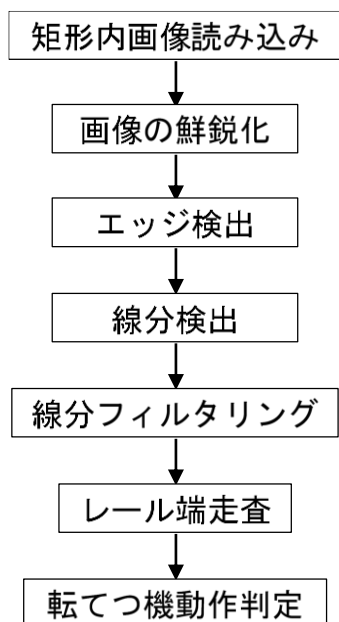


図 9 発条転てつ機の解析方法

3. 試験

3. 1 試験構成

以上の手法を組み込んだシステムを構築し、機能を検証するために、実路線で試験を行った。

まず、対象とする設備の位置情報をあらかじめ GPS 受信機で取得し、目標物の位置として登録する。その後、試験車両の屋根上に GPS 受信機、車両内にカメラとシステムを組み込んだパソコンを設置し、車両の位置検知と、対象とする設備の撮影を行いながら走行した。各機器の設置状況を図 10 に示す。

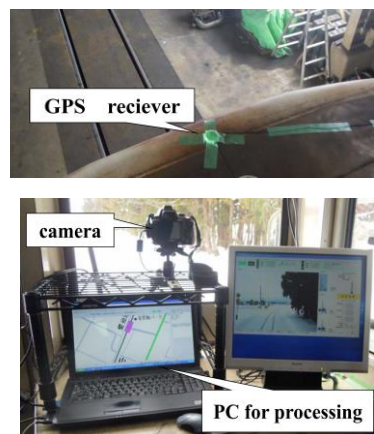


図 10 各機器設置の様子

3. 2 試験結果

試験結果を以下に示す。

3. 2. 1 信号機の判別

走行中、対象となる設備を検出する機能の確認を行った。図 11 に信号機を検出した一例を示す。図中の緑色線が GPS により特定した黒い枠部分の位置、黄色線が補正した位置である。このように、信号機の検出ならびに信号現示色の判別は、ほぼ正確に認識できることが確認された。



図 11 信号機検出の様子

また、試験を実施した線区では、LED 式信号灯器

は導入されていなかったため、輝度低下の確認はできなかったものの、実際の LED 式信号灯器の画像を用いて色相、彩度及び強度と、輝度の関係を確認したところ、図 12 に示す彩度の下限値に差がみられることが分かった。このため、彩度の下限値をデータとして蓄積することで、経年劣化による輝度の低下を検出できると考えられる。

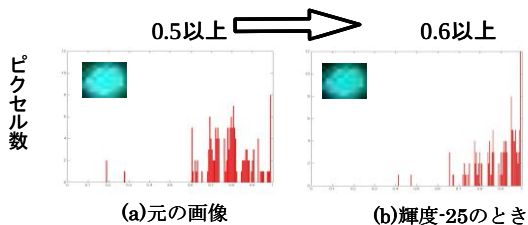


図 12 輝度と彩度の関係

たため、転換の様子は検出できなかったものの、転てつ機の転換状態を検出できることは確認された。図 14 にその例を示す。破線は左右レールを左上方向に走査した結果を、点線は左右レールを右上方向に走査した結果を示している。

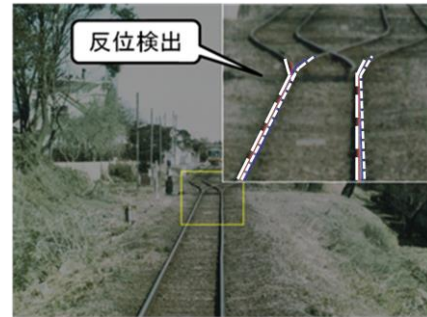


図 14 反位検出の様子

3. 2. 2 踏切遮断機の動作の判別

踏切遮断機については、図 13 に示すように、複数ある直線の中から遮断かんの棹部分の直線のみを認識し、その角度と長さの条件から遮断かんの開動作を認識できることが確認された。図中、画像内の直線が点線表示の場合は、遮断かんと認識してはいるものの、開ききっていないと認識している状態(図中左)を示し、直線が破線表示の場合は、遮断かんが開いたと認識している状態(図中右)を示している。

また、今回の試験では、遮断かんの開動作にかかる時間の計測まではできなかったものの、開動作は検知できているため、列車通過から開検知までの時間を計測することは容易であると考えられる。



図 13 開検知の様子

3. 2. 3 発条転てつ機転換検出手法の動作

発条転てつ機については、今回の試験では、画像が取得可能な距離を超えてから定位に戻る状況だっ

4. 課題と対策

構築したシステムについて、実路線で試験した結果、以下に示す課題が確認された。

(1)信号機の認識に関する課題

①今回試験を実施した線区においては、LED 式信号灯器は導入されていなかったため、輝度について確認することができなかった。そのため、LED 式信号灯器が導入されている線区での試験が必要と思われる。

(2)踏切遮断かんの認識に関する課題

①踏切通過後、すぐに曲線となるような場合には、画像を撮影することができないため、認識は不可能であった。このような場所に位置する踏切については、今までと同様の点検が必要と思われる。

②検出した直線のうち、遮断かん以外の直線を遮断かんとして認識してしまう場合が確認された。その原因としては、踏切ごとに背景が異なるため、今回の試験で設定したしきい値では、遮断かん以外の直線を除去しきれなかったことが考えられる。そのため、踏切ごとにしきい値を設定することが必要と思われる。

③開動作中の遮断かんを認識したものの、開検知まではいたらなかった場合が確認された。この原因としては、遮断かんと認識する条件として、垂直の直線は除去していたため、垂直まで開く遮断かんの認識ができなかったと考えられる。そのため、角度による線分の除去ではなく、上記②と同様、踏切ごとにしきい値を設定するか、垂直線の増減から遮断か

んを判断できるようにすることが必要と思われる。

(3) 転てつ機の認識に関する課題

① レールを認識する際に、画像を強調処理することでレールを認識しやすくしているが、直線として認識しづらい場合が見られた。この原因としては、レールの影に凹凸があり、直線とは判断できなかったと考えられる。そのため、レールを強調する方法について、再検討が必要と思われる。

② 今回の試験のように、列車通過後、転てつ機が定位に戻る動作が、カメラで撮影できる範囲を超えてしまっている線区の場合は、レールではなく、転てつ機標識を認識するような方法を再検討する必要があると思われる。

(4) 構築したシステムに関する課題

① GPS の精度

位置検出に使用している GPS について、GPS は一般的に衛星の位置によって横方向（左右方向）と縦方向（前後方向）に数 m の誤差が生じることが確認されている。その対策として、横方向の誤差は線路上へのマップマッチング補正を行うことによりある程度吸収することが可能であるが、縦方向の誤差を吸収することは難しい。そのため、縦方向の誤差を吸収できるような方法を検討する必要があると思われる。

② 天候への対応

画像解析技術を使用する際の一般的な課題として、降雨等の悪天候により検出できない場合があることが想定される。しかしながら、本研究の目的が予防保全であることから、長期間のモニタリングにより経年劣化が検出できればよく、1 回又は 1 日の検出ができない場合でも、経年劣化の傾向をつかむには支障がないと思われる。

③ 新規路線への対応

本システムは、画像解析の対象物を、地上設備の位置と車両の位置との相対位置で判断しているため、今後、新しい路線で試験を実施する場合には、対象とする地上設備の設置場所の位置情報や、線路からの距離等の情報を取得する必要がある。そのための手段として、現在は高精度 GPS や巻尺等を使用して実測しなければならないことから、走行している車両上から簡易に取得できる方法を検討する必要があると思われる。

5. 予防保全に向けて

GPS と画像処理技術を利用し、営業列車から各地地上設備の状態について、課題はあるものの、検出できることが確認された。今後、予防保全に向けての取組として、検出した地上設備の動作状況を長期的にモニタリングする方法、経年劣化による変化を検出する方法、経年劣化による変化を検出した場合に報知する方法についての検討が必要と考える。

6. おわりに

以上、画像解析を利用した省コストで実現可能な鉄道用予防保全システムを構築し、実路線での試験を行った結果、一定の効果を確認し、予防保全システムとしての可能性を示すことができた。

今後は、営業列車を利用した長期的なモニタリングによるデータ取得や、取得データの解析による経年劣化等の検出方法の検討を行い、障害を未然に防ぐことで地方鉄道における修繕費の低減に資する取組を行っていくことが重要であると考ええる。

参考文献

- (1) 国土交通省交通政策審議会陸上交通分科会鉄道部会、“環境新時代を切り拓く、鉄道の未来像－鉄道がつなぐ、エコフレンドリーな生活圏の創造に向けて－”、(2008)
- (2) 国土交通省鉄道局、“平成 20 年度鉄道統計年報”、株式会社電気鉄道研究会、(2010)
- (3) 森他、“小型レール状態診断装置の開発”、第 19 回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集、pp.197-200、(2012)
- (4) 水間他、“衛星を用いた列車制御・保安システムの開発”、交通安全環境研究所 研究所報告第 11 号、pp.13-22、(2008)
- (5) 本山他、“GPS と画像センサを利用した踏切遮断機の検出に関する検討”、電気学会交通・電気鉄道/リニアドライブ合同研究会資料、TER-11-023、LD-11-022、pp.5-8、July.2011