画像解析による架線検測システム

渡部 勇介* 庭川 誠 田林 精二 渡邊 秀夫(株式会社 明電舎) 木下 信夫 井形 亮 相良 忠昭(九州旅客鉄道株式会社)

Computer Vision Measurement System of Contact Wire

Yusuke Watabe^{*}, Makoto Niwakawa, Seiji Tabayashi, Hideo Watanabe (MEIDENSHA CORPORATION) Nobuo Kinoshita, Ryo Igata, Tadaaki Sagara (Kyusyu Railway Company)

The contact wire supplies electricity to the train. And, it is important to keep good condition of the contact wire for the railroad operation. We have developed a contact wire measurement system. The system analyzes the image around the pantograph and it measures multi types of factors of the contact wire.

キーワード:鉄道設備,保全,架線,画像解析,摩耗検測

(railway equipment, conservation, contact wire, image processing, wearing)

1. はじめに

電気鉄道を安全に運用するためには、車両への電気を供 給する架線の健全性を保つことが重要である。架線の健全 性を計る指標としては、車両走行中の架線高さの変動幅、 硬点、架線の枕木方向の偏位幅、架線自身の残存直径など、 また、パンタグラフに対しては、支障物検知、舟体・ホー ンの形状監視など様々な検測項目がある。これらの検測項 目の物理量を計測し、総合的に架線の状態を判断する。

従来から架線の状態を計測する方法として,手検測によ る方法と専用車両による検測方法の2種類がある。

手計測による検測方法は、作業員がノギスなど各種測定 器を使用して直接架線の状態を計測する方法である。この 方法は架線の静的な状態を正確に測定することができる。 しかしながら、測定が点であるため、短期間で多くの箇所 を計測することが難しいうえに、トロリ線の高さ、偏位、 硬点といった動的な状態を計測することができない。

一方の専用車両による検測方法は、計測機器を検測専用 車両に搭載し車両を走行させながら架線の動的な状態を計 測する方法である。検測専用車両には、検測用パンタグラ フや、レーザ光照射を利用した測定器などの専用センサを 搭載しているため、精度の高い計測ができる反面、レーザ 発光装置のほかにミラー制御装置・高周波電源などの機器 を設置する必要がある。よって、車両の屋根上や車内に広 い設置空間が必要となるうえに、導入コストと維持コスト が大きくなる。

我々は,産業用ロボット用の視覚位置決め装置(1)や土木用

の地形形状計測システム⁽²⁾で開発して来た画像解析技術を 鉄道設備保全へ応用し,架線状態を検査する架線検測シス テムを開発した⁽³⁾⁽⁴⁾。このシステムは車両屋根上に設置した CCDカメラ・ラインセンサにより車両走行中の集電装置 周辺を連続撮影し,その撮影画像を解析することによって 架線状態を総合的に検査することができる。また,車上装 置が軽量コンパクトな構成であるため,営業車両もしくは 軌陸車等の作業車両へも搭載が可能である。本報告では, 我々が開発した架線検測システムのシステム構成や架線状 態の計測方法,九州新幹線営業車両に搭載し既設区間(新 八代~鹿児島中央間)を走行した結果について紹介する。

2. システム構成

架線検測システムの全体構成を図1に示す。架線検測シ ステムは、車上装置と地上装置で構成される。車上装置は 車両の屋根上に搭載する CCD カメラおよびラインセンサ カメラ、投光器、車載 PC などから構成し、車両走行中に撮 像する画像データと、ATC 装置などから取得する速度・距 離情報を PC に保存する。2 台の CCD カメラがパンタグラ フ周辺を撮影し、ラインセンサがパンタグラフの上下動を 撮影する。さらに別のラインセンサがトロリ線の摺動面(ト ロリ線とパンタグラフが接触して摺れることにより摩耗す るトロリ線の下部)を撮影する。これらのカメラにより撮 影した画像はATC 装置などの信号検測装置によって同時に 取得した区間・距離情報と共に車上の記録装置に一旦保存 する。上記の車上装置は、無線遠隔装置を導入し計測の自 動化(無人化)を実現している。架線状態を検査する区間

S2-2-1

を走行した後,車上の記録装置に保存した画像を地上装置 ヘダウンロードする。地上装置では,画像データを解析し て検測処理を行い,信号検測装置より取得した区間・距離 情報に対応付けた架線状態の各種データの出力と管理を行 う。

我々の開発した架線検測システムのシステム構成は車上 装置が小型で軽量な機器から構成されている。このため車 上装置全体の構成が小規模に抑えられ,新たに摩耗用のカ メラを増設しても屋根上の大きな改造がなく搭載できた。 また新幹線の屋根上の形状が枕木方向に狭いためカメラの 搭載を車両中心から左右に分離をして設置をおこなった。 これによりトロリ線の偏移幅に対応する摩耗測定が実現で きた。九州新幹線U1編成の1号機に引き続き新たなU8 編成に搭載をしたが、いずれも営業車を利用し、更に計測 の無人化により導入コストおよび維持コストを小さく抑え ることができる。

本装置は、高圧ケーブルの近傍に設置される事から以前か らセクション通過時のノイズ対策等を実施してきたがカメ ラ、照明等の増設にあたり信号ケーブル、電源ケーブル類 の配線、引き込み口の見直しによりノイズ対策を行った。



図1 架線検測装置の模式図 Fig. 1. System configuration.

3. 検測項目

電気車両を安全に運行するためには、架線の位置が車両に 対して規定の範囲にあり、架線は走行方向に滑らかに接続 され、架線及びパンタグラフに支障する障害物が存在せず、 また、架線自身の残存直径が十分あることが求められる。 そこで架線状態を計測するための検測項目は従来の電気軌 道総合試験車の検測項目に準じて(1)トロリ線偏位、(2)ト ロリ線高さ、(3)トロリ線硬点、(4)トロリ線残存直径計測 (摩耗計測)、(5)パンタグラフ周辺の支障物検知(6)パンタ グラフ舟板・ホーンの形状監視,(7)集電状態監視がある。 このうち形状監視と集電状態監視については,これらの異 常が発見された場合に,人為的な判断により画像と区間・ 距離情報を対応付けて記録する。それ以外の項目について は画像データを解析することにより自動的に計測を実施す る。

4. 画像解析による架線状態の計測方法

 $\langle 4 \cdot 1 \rangle$ 架線偏位の計測 架線偏位の計測にはパンタ グラフとトロリ線の接触点を用いる。接触点の位置計測は, CCDカメラ2 台から撮影した画像を使用したステレオ計測 法を用いる。ステレオ計測法の模式図を図2に示す。まず, 左右のカメラで同一のパンタグラフとその周辺部の画像を 取得し, 左右カメラ画像中のパンタグラフをパタンマッチ ングにより検出する。次に、検出したパンタグラフに対し 垂直な線分を検測対象であるトロリ線の候補として複数抽 出し、これらの中からパンタグラフの同一地点で交わる線 分の組をステレオ対応点探索の手法を用いて求め、トロリ 線として決定する。このトロリ線とパンタグラフとの交点 の左右画像中の座標から,三角測量法により接触点の三次 元位置(X,Y,Z)を計算する。これらのプロセスにより画像 中の写る複数のトロリ線やちょう架線などの中からパンタ グラフに接触するトロリ線だけを検出し、その接触点位置、 つまり架線偏位を計測することができる。



図2 ステレオ計測の模式図 Fig. 2. Coordinate system of stereo ranging.

〈4・2〉 架線高さの計測 架線高さについては、架線 硬点の計測も関係するため、架線の偏位計測よりも高い空 間分解能が要求される。そこで、CCDカメラよりも1ライ ンの解像度が大幅に高いラインセンサカメラ (以下、ライ ンセンサ)を使用、パンタグラフを撮影し、架線とパンタ グラフが接触していることを前提に、パンタグラフの上端 部を計測することで架線高さを計測する。ラインセンサは 撮像素子を一列に配置したカメラであり、素子が並んでい る方向については通常のCCDカメラよりも数倍以上の分解 能を持つ。また、使用される画素数がCCDカメラよりも格 段に少ないため、高速な撮影が可能である。このラインセ ンサを用いてパンタグラフを上下方向に切るように撮影す ると、パンタグラフの動作に合わせた時空間画像を得るこ とができる。高さを計測するためのラインセンサと、後述 する架線摩耗測定用ラインセンサを営業車両に搭載した写 真を図3に示す。パンタグラフ高さは時空間画像からパン タグラフを画像解析により抽出し、ラインセンサとパンタ グラフの相対位置関係を基に、画像上のパンタグラフの位 置から実空間位置を計算し、トロリ線高さとして出力する。



図3 屋根上カメラ設置図 Fig. 3. Camera installation.

〈4・3〉 架線硬点の計測 架線硬点は、パンタグラフに かかる加速度が一定値以上の位置として求められる。そこ で、前述のラインセンサの時空間画像を基に計算したトロ リ線高さの時系列データに対して2階微分を計算し、パン タグラフにかかる加速度を求め、これを重力加速度で除し て硬点を求める。これが一定値以上の場合に硬点と判断す る。

〈4・4〉 架線残存直径の計測(摩耗計測) 本装置で摩 耗測定が可能なトロリ線は断面が溝つきの円形となってい るものであり、パンタグラフの通過に伴って摩耗が進行す ると円形の底部分の摺動面が平面となっていく。この摺動 面に対して屋根上に設置した白色照明をトロリ線に照射す ると, 摺動面は摩耗し平坦な形状なので強く光が反射する。 それに対し, 摩耗していない側面は曲線形状であるため反 射光は弱い。さらに、トロリ線は主に銅で製造されており、 長時間風雨に晒されているため表面はさびている。しかし, 摺動面は毎日の列車運行により金属の光沢が維持されてい る。これらの特長から、光を照射したトロリ線を下部から 撮影すると摺動面だけが白く反射したように写る。この点 を利用し、摺動面とそれ以外を区別することができる。こ の摺動面の幅を計測することで架線の残存直径を計算する ことができる。残存直径の計測についても高い空間分解能 が必要とされるため,架線高さの計測と同じくラインセン サにより撮影した時空間画像を用いる。

ラインセンサを,車両の屋根上に鉛直上向きに,枕木方

向にラインセンサの撮像素子が並ぶように設置する。こう してトロリ線の摺動面を含めた架線周辺の時空間画像を撮 影する。この時空間画像から、トロリ線の摺動面とその他 の背景部分を切り分けるように輝度閾値を設定し、その輝 度閾値を用いて時空間画像に対して二値化処理を行う。屋 外の画像は周囲環境に大きく依存するため、画像毎に環境 に依存し難い適正な値を計算し、輝度閾値を動的に変化さ せ設定している。この二値化処理により二値化した時空間 画像上ではトロリ線の摺動面が白、背景部分が黒となる。 次に、ノイズ除去などの処理を行った後、トロリ線の摺動 面の輪郭に当たるエッジ点を検出し、そのエッジ点から画 像上のトロリ線の摺動面幅を計算する。

トロリ線残存直径の測定原理を図 4 に示す。トロリ線の 摺動面幅N[pix] レールからトロリ線までの高さH[mm],レ ールからラインセンサのセンサ面までの高さHs[mm],レン ズ焦点距離F[mm],ラインセンサのセンサ幅をSwidth[mm], 使用しているラインセンサの画素数をSpix [pix]とすると、ト ロリ線の摺動面の実空間上での幅P[mm]は式(1)により 算出できる。また、トロリ線直径をd[mm]としたとき、ト ロリ線残存直径R[mm]は式(2)により算出することがで きる。

$$P = \frac{H - (H_s + F)}{F} \cdot \frac{S_{width}}{S_{pix}} \cdot N \tag{1}$$

$$R = d/2 + \sqrt{(d/2)^2 - (P/2)^2}$$
(2)



図 4 残存直径の測定原理 Fig. 4. Measurement of the residual diameter.

5. 検測結果

〈5・1〉 データ出力 検測処理の結果は区間・距離情報 により整理され、数値による一覧表示とグラフ表示で出力 される(図 5)。グラフ表示の横軸はキロ程になっており、 検測データと計測地点を容易に照合することが可能であ る。同様に、何らかの以上を検知した場合にも異常発生箇 所の特定が容易である。また、本装置では検測結果の出力 データから画像データの頭出しができるようにしており、 これにより不良箇所については発生箇所の静止画や前後の 動画を即座に再生することができるため,異常発生時の架 線の状態を目視でも確認することが可能である。

また、トロリ線残存直径測定には、測定したデータと過 去に測定したデータを同時に表示させ比較できる機能があ る。これにより、年間摩耗率の算出や摩耗傾向の把握など に活用できる。

〈5・2〉 摩耗検測結果 本装置で計測できる様々な検測 項目の中,本報告では主に摩耗検測の結果について述べる。 本装置の検測精度の確認や各種試験のために,2010年10 月に実走行による検証試験を行った結果を図6に示す。従 来,九州新幹線におけるトロリ線残存直径の保全手法とし ては,各エリアで代表となるドラムを決め,そのドラムの 支持点箇所を手検測にて測定している。実測値は2010年5 月の保全巡回検査時に手検測によって測定したトロリ線残 存直径とそのドラムの年間摩耗率を元に算出したものであ る。また,高速検測での測定値は電柱間隔毎の最小値を取 っているためデータとして単純に比較できるものではない が,実際のトロリ線摩耗傾向をよく捕らえている事がわか った。

6. 九州CSトロリ線の対応と今後

九州新幹線の既設区間(新八代~鹿児島中央間)では, トロリ線にミゾ付銅覆鋼トロリ線(以下 CS トロリ線)が使 用されている。CS トロリ線は摩耗が進行するに従い、内部 の鋼芯が露出してくるという特徴がある。この現象は駅周 辺によく見られ、駅間の本線では摩耗進行の度合いが低く 鋼芯露出はほとんど見られない。鋼芯とそれを被覆する鋼 部では摩耗状態が異なるため、光の反射量が異なる。よっ て, 鋼芯が露出することにより安定した画像を得ることが 困難となり摺動面を正しく解析できなくなるという事象が 発生した。そこで、我々は照明の照度を上げ、カメラから 見た鋼芯と銅の反射輝度をほぼ一定とし同一面とみなすこ とで解決することができた。しかし、照度を上げすぎると 金属光沢による飽和現象が起こってしまう恐れがある。そ のため、適切な照度設定については、今後運用していく中 で経年変化に対する設定値のメンテナンスを行うことが必 要である。

7. まとめ

電気鉄道を安全に運用するためには、車両へ電気を供給 する架線の健全性を保つことが重要である。我々は、九州 新幹線の営業車両上に設置したカメラで、走行中のパンタ グラフ周辺の画像を取得し、画像処理により動的な架線の 状態を検測する装置を開発・実運用し、検測精度の向上及 び検測業務の省力化を実現した。本報告では、架線検測シ ステムのシステム構成や架線状態の計測方法などについて 紹介した。



- 文 献
- (1) 恩田,庭川,藤原,清家:「モデルベーストマッチング法を用いた鋳 造部品の視覚位置決め」、電学論D, Vol.119, No.1 pp.14-20 (1999)
- (2)藤原,恩田,五十嵐,庭川,組田,小田,越山:「ステレオ画像を使用する地形形状計測システム」,電学論C, Vol.122-C, No.6 pp.950 -956 (2002)
- (3)藤原,庭川,木下:「画像処理による九州新幹線の架線状態の計測」, 平成19年電気学会電子・情報・システム部門大会, pp.47-48 (2007)
- (4) 渡部,庭川,田林,渡邊,佐藤,菅井:「画像処理を用いたトロリ線 摩耗検測装置」,平成18年電気学会産業応用部門大会,pp.III191-III192 (2006)