

電車線非接触測定装置の 在来線車載試験による性能検証

松村 周* 根津 一嘉* 薄 広歩*
川畑 匠朗** 渡部 勇介**

Measurement Accuracy Verification of OCL Contactless Measurement Device
by On-board Test Run in Conventional Line

Itaru MATSUMURA Kazuyoshi NEZU Hiromu SUSUKI
Takuro KAWABATA Yusuke WATABE

To realize sophistication of maintenance and maintenance cost reduction of Overhead Contact Line (OCL), it has been desired to frequently measure three-dimensional structure of the OCL from the vehicle of train. Therefore, we have developed a contactless OCL measurement device to be installed in commercial vehicles. The developed device realizes wire position measurement of OCL by combining a line scan camera and a laser scanner, and can also measure catenary fitting position of OCL using machine learning. This paper reports the results of on-board tests of this device on conventional lines and its verification of the measurement accuracy.

キーワード：架空電車線，ステレオ計測，画像処理，レーザースキャナ，非接触測定，電車線金具，機械学習

1. はじめに

架空電車線は屋外に長距離にわたって敷設されており、走行する車両にエネルギーを供給するための設備として重要度が高く、鉄道の安全安定輸送を維持するため、そのメンテナンスに多くの労力が必要とされている。このメンテナンス作業は、検査や測定（検測）を行い設備の状態把握を行う作業と、その結果を受けて設備の修繕や取替を行う作業に大別される。作業負荷軽減のため、これまでも架線検測車の導入¹⁾や、設備工事の機械化²⁾など様々な取り組みが行われてきた。しかし、昨今の国内における労働人口減少を背景に、さらなる省力化が求められている。

これまでの電車線の検測は、架線検測車による測定を除けば徒歩巡回や列車巡視による係員の目視検査や、架線測定器（ゲージ棒）などによる手測定を中心に、係員の目視と経験に頼ってきた。これに対して筆者らは、従来の電車線の検測を、図1に示す新しい電車線保守体系に置き換えることで、電車線設備の保全の高度化による安全性向上および省力化による保守コスト低減が達成できると考えた。これは、高頻度な検測と画像収集を前提にした電車線設備の3次元構造測定、画像処理による設備の状態把握、およびシミュレーションによる動的状態推定、統計処理による設備状態の分析の4つを組み合わせ、電車

線の診断と予測を行い、この結果に基づいた設備の修繕を行うものである。この新しい電車線検測の実現のため、筆者らは電車線設備の3次元構造測定と画像処理による設備の状態把握を中心に研究に取り組んできた^{3) 4) 5)}。

ところで、現行の架線検測車によるトロリ線高さの連続測定は、パンタグラフがトロリ線を押し上げた動的状態で測定を行っており、その測定量は速度やパンタグラフ形式などの走行条件に依存する。しかし、パンタグラフの影響を受けない静的な電車線の3次元構造を測定することができれば、複数回の測定データの統計的比較から、変化の傾向を捉えることや、架線-パンタグラフの動的シミュレーションのモデルとして測定データを活用することが可能である。動的シミュレーションを用いることで、パンタグラフの接触力変動の推定や、トロリ線の押し上がり量の予測が可能となる。このような架線構造の統計的な比較や精緻な動的シミュレーションの実現のためには、トロリ線のみならずちょう架線の静的位置の連続測定を行うとともに、電車線金具の位置を把握することが必要となる。

また、高頻度な電車線3次元構造測定と画像収集を実現するためには、営業車に搭載可能な小型の測定装置を実現する必要がある。現時点で営業車に搭載可能な測定装置としては、画像処理を用いた架線検測装置⁶⁾やレーザーおよび赤外LEDを用いた架線状態監視装置⁷⁾があるが、いずれも測定対象がトロリ線に限られるとともに、動的状態の測定を行うものである。また、ステレオ計測

* 電力技術研究部 集電管理研究室

** 株式会社明電舎

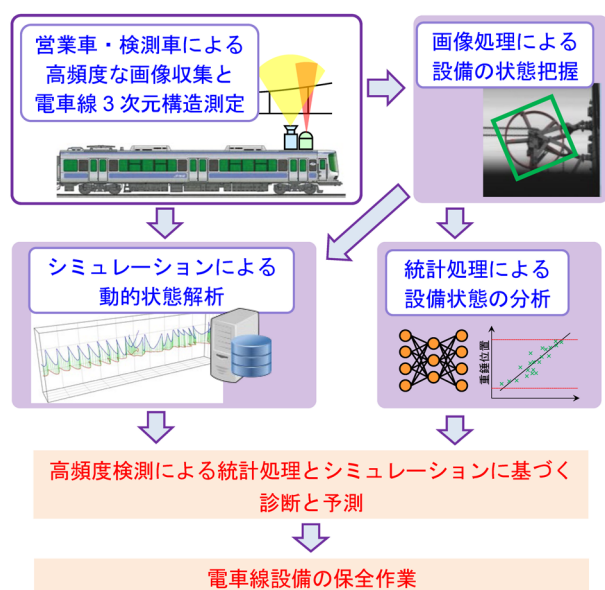


図1 新しい電車線保守体系

によるトロリ線の静的位置の非接触測定手法も提案されている⁸⁾が、これも測定対象がトロリ線に限定されている。

本論文では、営業車や架線検測車における電車線の静的3次元構造測定と電車線設備の画像収集を目的として開発した、電車線非接触測定装置の在来線での車載試験による性能検証結果を示す。

2. 車載用電車線非接触測定装置の試作

2.1 電車線非接触測定装置の基本構成

鉄道車両に装置を搭載し、トロリ線やちょう架線の3次元位置計測を行うには、レーザースキャナやステレオカメラなどによる非接触計測の適用が必須である。しかし、レーザースキャナは測定周波数が低く、在来線の営業速度で走行した場合、現行の架線検測車のトロリ線高さ、偏位測定と比較して走行方向の測定ピッチが10倍以上広がる。一方で、ステレオカメラによる計測では測定対象とする電車線の線条を撮影した画像の中から自動で識別する必要があるが、オーバーラップやわたり線など線条が複雑に入り組んだ区間では自動識別が困難である。この課題を解決するため、本電車線非接触測定装置は、ラインカメラとレーザースキャナを併用するハイブリッドセンシング手法を採用した。

ここで、電車線の高さ、偏位の変動やトロリ線とちょう架線との間の距離を考慮すると、ラインカメラの被写界深度の確保が課題となった。この対策として、撮像範囲を電車線の高さによって分割し、合焦範囲が異なる複数組のカメラを搭載する手法も考えられるが、搭載スペースが限られる営業用車両の屋根上への本装置の搭載を前提とすると、カメラ台数の削減と、装置の小型化が

必要である。また、コネクタやドロップなどの上下に長い電車線金具の下部と上部が、合焦範囲の異なる別々のカメラの画像として撮像され、1枚の画像として扱うことができないと、金具の位置検出や設備の状態把握に困難をともなう。そこで、被写界深度が深い魚眼レンズを用いることで、カメラ台数を必要最小限の2台に抑えた構成を実現した。

ハイブリッドセンシング手法については、鉄道総研の所内において基本的な原理確認を行い、車両屋根上を想定したトロコ台車を4km/h程度の低速で移動させながらトロリ線静高さを測定した際の精度は1mm以内であることを確認している³⁾。

2.2 電車線非接触測定装置の試作

営業線において性能検証試験を行うにあたり、130km/h走行に対応するハードウェア構成の装置を試作した。図2に在来線車両の屋根上に搭載した電車線非接触測定装置の外観を示す。電車線設備の画像収集を考慮すると、ハンガやコネクタなどの架線金具は極力側方から撮像することが望ましい。そこでラインカメラから電車線を見上げる際の仰角がなるべく小さくなるよう、ラインカメラを外側に配置した。また、そのさらに外側にLEDによる照明装置を4台配置した。屋根上搭載部分の重量は、ケーブルを含めて約64kgである。なお、装置は防水としているが、雨天時はレンズカバー表面に付着した水滴により光が屈折してしまうため、正確な測定ができない。

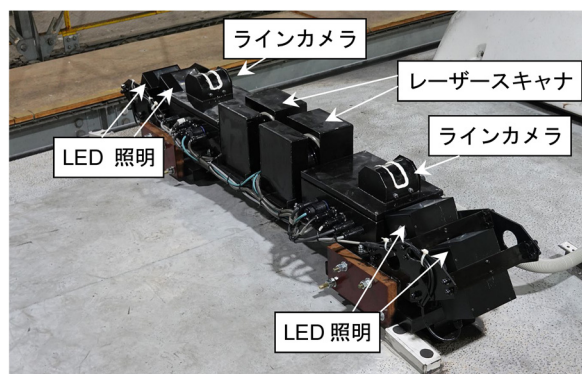


図2 電車線非接触測定装置の外観

2.3 データの解析処理

画像処理において、線条の誤認識によるステレオ計測精度の低下を抑制することと、車両動揺による線条3次元位置の測定誤差を低減することが重要であると考えられた。そこで、電車線非接触測定装置では、線条の誤認識への対策として、あらかじめ引留区間ごとの電車線の各線条の線種をデータベースとして保持しておき、レーザースキャナの測定データから線条の種別を自動識別し、データベースを参照して合致する太さの線条のみを

抽出する処理を行うことで、線条の認識精度を高めた。

また、電車線非接触測定装置は車両屋根上に搭載されるため、車両動揺の影響を受ける。これについては、現行の架線検測車などで用いられる、まくらばねの変位を直接測定する動揺補正装置を用いることが望ましい。しかし、後述の車載試験時は車両への測定器仮設の都合上、車内にジャイロを設置して車体のロール角を計測し、このデータを用いて動揺補正処理を行う簡易な手法を採用した。

3. 在来線車載試験

3.1 車載試験の概要

車載試験の概要を表1に示す。在来線の片道約200kmの区間を1日1往復ずつ2日間走行し、データを収録した。最高速度は130km/hである。電車線非接触測定装置は1両目の先頭部に搭載した。パンタグラフは装置を搭載した1両目と3両目、5両目、7両目に搭載されているが、パンタグラフによるトロリ線の押し上がりを防ぐため、1両目のパンタグラフを下げた状態で走行試験を行った。

3.2 電車線の画像収集

図3に走行試験で収録した画像の例を示す。魚眼レンズに起因するゆがみは見られるが、き電線や自動張力調整装置、電化柱など、広範囲の設備を撮像できることを確認した。

走行試験では、適切な照明強度とダイナミックレンジを検討するため、1日目と2日目で照明条件を変更し、

1日目は照明を4台使用、2日目は照明を2台使用した。また、トンネルや夜間の撮影では画像が暗くなったためカメラのゲインを日中よりも高く設定している。これより、開発した電車線非接触測定装置の構成で、日中や夜間、トンネル区間等の撮影条件によらず画像の取得および測定が一応可能であるが、鮮明な画像取得と測定精度向上のためには照明条件やカメラのゲインを走行区間の条件に合わせて適切に切り換える必要があることが判明した。これは周囲の明るさに応じた自動ゲイン調整機能の追加や、トンネルの入口・出口のキロ程を登録したデータベースの活用、あるいはレーザー変位計でトンネル壁面を検出するなどしてトンネルを検知し、ゲイン調整を自動化するなどの手法により対応可能である。

4. 電車線静構造測定の精度検証

電車線非接触測定装置による電車線静構造の測定精度を、絶対精度と繰り返し測定精度の面から検証した。絶対精度については、トロリ線の高さ・偏位およびちょう架線の高さについて、繰り返し測定精度についてはトロリ線の高さ・偏位について、それぞれ検証の対象とした。

4.1 測定装置の誤差補正

2台のラインカメラにより取得した画像と、レーザースキャナで測定したデータを組み合わせ、ステレオ計測により電車線の線条の静構造を求めた。なお、本論文では、電車線非接触測定装置により測定した線条の位置を、静構造として扱う。

表1 在来線車載試験の概要

試験実施時期	10月中旬の連続2日間、10:00頃～21:00頃
天候	2日とも晴れ
走行区間	片道約200km、1日あたり1往復
走行速度	最高130km/h
電車線条件	主にヘビーシンプル架線・き電ちょう架式シンプル架線・コンパウンド架線、き電ちょう架式コンパウンド架線
列車編成 (○数字は号車番号)	

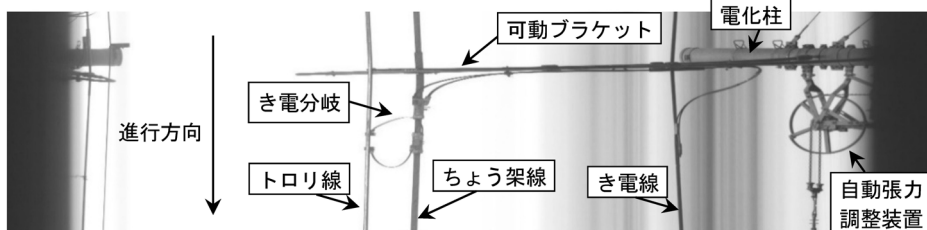


図3 電車線非接触測定装置で収録した画像の例

まず、走行試験のため車両に搭載した電車線非接触測定装置の絶対誤差の補正を行った。電車線非接触測定装置を車両へ搭載した状態での3次元位置測定の正確な校正は、車両を跨ぐような大型のジグが必要になるため困難である。そこで、今回は架線測定器により測定した1点のトロリ線高さを基準として、この値が電車線非接触測定装置による当該箇所のトロリ線静高さの測定結果と一致するよう、レール面を基準とした測定装置の設置高さの値を補正した。

4.2 絶対精度の検証

前節に示した誤差補正を行った上で、ステレオ計測により電車線の静構造を改めて求めた。図4にコンパウンド架線区間のオーバーラップ付近における電車線静高さの測定結果を示す。別途実施した軌陸車上からのトロリ線静高さ・偏位測定結果を真値として比較した。なお、距離軸については、車輪の空転滑走などによりずれが発生したため、画像内の支持点の位置を基準に手動で位置合わせを行った。

電車線非接触測定装置で測定したトロリ線静高さとして、軌陸車上で測定したトロリ線静高さを比較すると、径間中央付近での誤差が大きく、最大で54mmである一方、支持点箇所での誤差は最大で26mmであった。測定時の気温は、非接触測定の際は21℃、軌陸車上での測定の際は5℃であり、走行試験時と軌陸車測定時の気温の違いにより、走行試験時はサグ傾向であったものが軌陸車測定時には Hog 傾向となっていたため、径間中央付近の誤差が大きく、支持点箇所の誤差が小さい傾向が表れたと考えられる。

次に、レーザー距離計を用いて測定を行ったちょう架線静高さを真値として、電車線非接触測定装置のちょう架線静高さの測定精度を検証した。比較結果を図5に示す。レーザー距離計によるちょう架線静高さ測定の際の気温は11℃であった。ちょう架線静高さはオーバーラップ径間およびその起点方の径間で各ハンガ点位置における高さを比較し、誤差の最大値は42mmであった。

また、偏位については、曲線区間で誤差が大きく最大

で46mm、直線区間では最大で38mmとなった。今回の測定では、2.3節に述べたように、車両の床にジャイロを設置し、車体のロール角を用いて簡易的な振動補正処理を行った。ここで、ジャイロにより測定される車体のロール角は、水平面を基準とした車体の傾きである。しかし、電車線位置の測定はレール面を基準とするため、ジャイロにより測定した車体のロール角を動揺補正に用いると、水平面とレール面とのずれ、すなわち曲線区間におけるカントの影響を受ける。この影響を低減するため、低周波の車体のロール角変動はカントによるものと見なし、ロール角の時間波形を0.3Hz～3Hzのバンドパスフィルタに通してから振動補正処理を行った。しかしこの処理ではカントの影響を完全に除去できないため、誤差要因となる。

ただし、現行の架線検測車に採用されている車体動揺補正手法を用いれば、静高さの誤差要因である車体上下動やカントの影響を考慮し、正確に車体の動揺を補正可能となる。この手法を用いることで、トロリ線の静高さ・偏位測定の精度は10mm以内まで向上できる見込みである。

4.3 繰り返し測定精度の検証

2日間にわたり走行したデータのうち、1日目、2日目それぞれのデータを比較した。これには、走行区間のうち比較的トロリ線の高さ変動が大きかった区間を選んだ。なお、距離軸については、車輪の空転滑走などによりわずかにずれが発生したため、前節と同様に手動で位置合わせを行った。ここでは、同一区間を2回測定し、その差の絶対値を繰り返し誤差、この平均値+3σの値を繰り返し精度と呼ぶ。

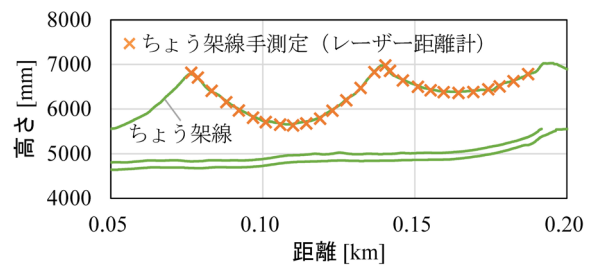


図5 ちょう架線静高さ手測定との比較

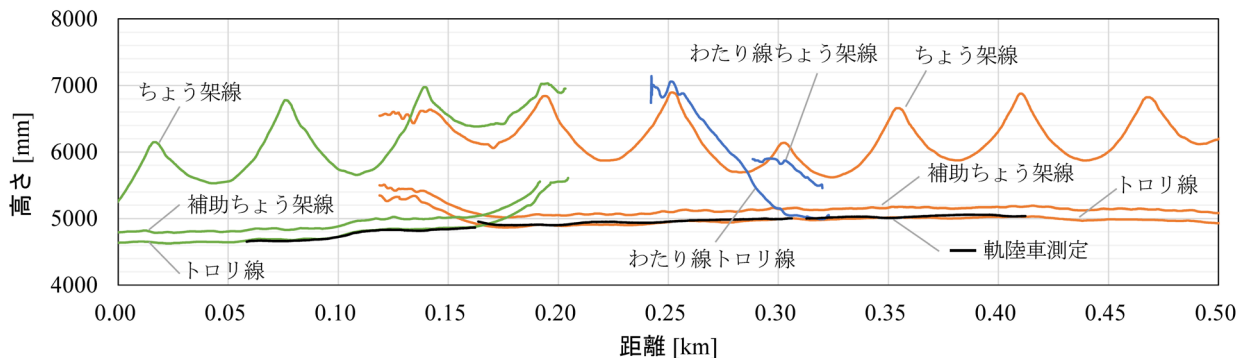


図4 電車線静高さの測定結果

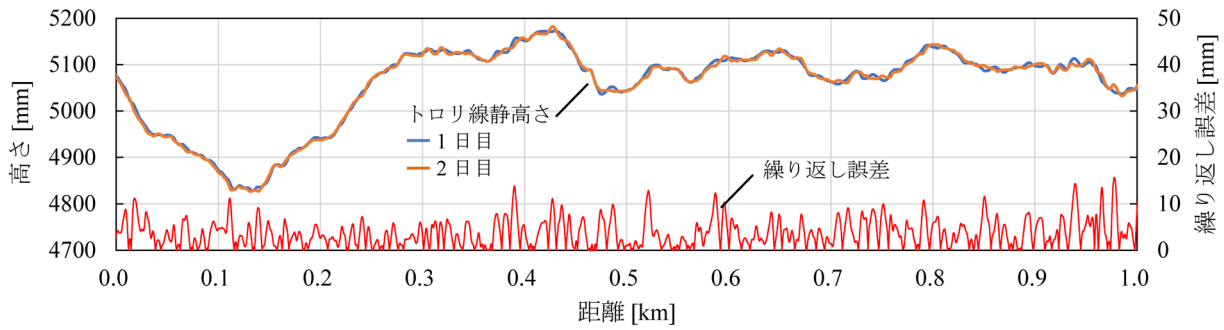


図6 電車線静高さの繰り返し誤差

1日目および2日目の非接触測定で得られたトロリ線静高さとその差を図6に示す。一部に10mmを超える差が見られ、その最大値は15mm、繰り返し精度の値は12mmとなった。

また、トロリ線偏位の繰り返し誤差は30mmを超える区間が一部に見られたが、画像から線條を抽出する際の誤認識により線條位置の測定誤差が大きくなったことが原因であった。照明の最適化およびフィルタ処理の改良により、偏位測定の繰り返し測定精度はさらに向上できる見込みである。

4.4 電車線金具検出精度の検証

電車線非接触測定装置で得られた電車線画像から電車線金具の位置を検出するには、テンプレートマッチング手法や機械学習による物体検出が適用可能である。テンプレートマッチングは、検出対象とする電車線金具のテンプレート画像を用意し、画像内からテンプレートと一致する領域を抽出するものである。一方、機械学習では、電車線金具画像を機械学習アルゴリズムに学習させ、統計的な特徴を自動抽出し、この特徴をもとに物体の検出を行う。

機械学習による電車線金具検出では、大量の学習用データを用意することが必須であるとともに、テンプレ

ートマッチングと比較して、学習および検出に多くの計算リソースが必要となる。しかし、機械学習では、様々な環境で撮影された画像を学習させることで、そこから共通する電車線金具の特徴量を自動抽出することができる。このため、ある特定の環境で撮影されたテンプレート画像と比較するテンプレートマッチング手法と比較して、周囲環境の変化に対して頑健な検出が期待できる。そこで、今回は機械学習による金具検出手法を適用した。

機械学習により画像認識を行うには、大きく分けて「クラス識別」と、クラス識別と位置特定を合わせて行う「物体検出」の2つの方法が考えられる。電車線非接触測定装置にて取得する画像は、ラインカメラによる連続的な画像を一定の距離ごとに分割した画像であるため、1枚の画像に複数種類の電車線金具が映る場合がある。このため、その画像が何を撮影した画像であるかを特定するクラス識別のみでは複数の金具の抽出ができない。一方で、物体検出であれば、一枚の画像に複数の電車線金具が映った場合でも、それぞれの金具について画像内の位置特定とクラス識別を合わせて行うことが可能である。そこで、電車線金具の検出には機械学習により物体検出を行う手法を採用した。

機械学習による物体検出アルゴリズムは、Faster

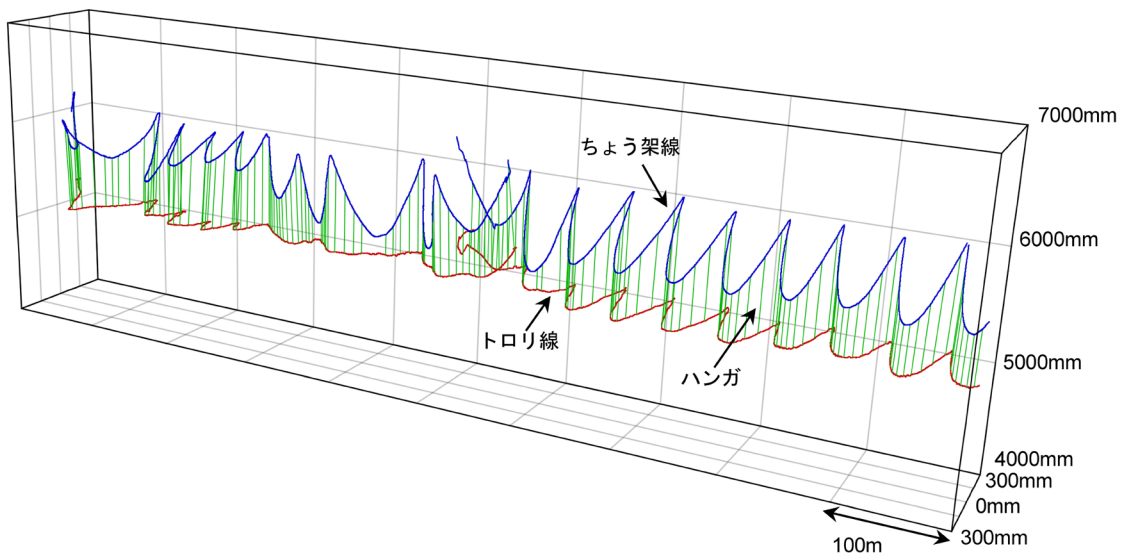


図7 電車線3次元構造の測定結果

表2 ハンガの検出率

ハンガ数	369
検出成功(True Positive)	360
未検出(False Negative)	9
過検出(False Positive)	25
適合率	93.5%
再現率	97.6%

R-CNN⁹⁾, YOLO¹⁰⁾, SSD(Single Shot MultiBox Detector)¹¹⁾ など複数提案されている。ここでは、処理速度や検出精度を考慮して、SSDを用いた。

なお、機械学習により電車線金具を検出する場合、実際に電車線金具を含む矩形領域と、その電車線金具として検出された矩形領域が重複しているものを正常な検出とみなすことにしたため、ハンガであれば、正常に検出できた場合の位置の精度は50mm以内である。一方で、未検出や誤検出の場合、ハンガの位置が大幅にずれるため、ここでは電車線金具の位置の精度をその検出率で評価した。

シンプル架線の直線と曲線を含む区間で測定した線条の3次元形状に、機械学習により検出したハンガの位置を重ねて表示したものを図7に示す。また、表2に検出率を示す。ハンガの検出には、電車線非接触測定装置で取得した全体の画像のうち、電車線が映る部分のみを切り出した画像を用いた。電車線非接触測定装置では、左右2台のカメラにより電車線の画像を取得しているため、どちらかのカメラの画像から金具が検出できれば、正常な検出(True Positive:TP)とみなすこととした。また、どちらのカメラでも検出できなかった場合は未検出(False Negative:FN)、実際には金具が存在しない場所でハンガを検出した場合は過検出(False Positive:FP)とした。なお、金具の検出や未検出の評価は、画像を目視で確認することにより行った。

ここで、過検出を低減するために、検出されたハンガの位置と自動抽出したトロリ線の位置とを比較し、トロリ線の位置から外れた検出結果はあらかじめ過検出として除外した。また、検出されたハンガの間隔をもとに、おおむね5m間隔とならない検出結果についても過検出として除外した。

表2において、検出率は再現率(Recall)と適合率(Precision)で評価した。適合率とはTP/(FP+TP)、再現率とはTP/(FN+TP)で表される検出性能の指標であり、適合率が高いほど誤検出が少なく、再現率が高いほど見逃しが少ないことを意味する。適合率は93.5%、再現率は97.6%であった。現状では特定の区間に対する評価であるが、機械学習手法と、画像の切り出しや設備の設置間隔などの情報を統合することで、在来線営業速度において、高精度な電車線金具検出を実現し、図7のような電車線3次元構造が測定可能であることを確認した。

5. まとめ

ラインカメラによる画像処理とレーザースキャナを併用した電車線非接触測定装置について、在来線車載試験を行い、電車線の高さ・偏位の測定精度を検証した。また、機械学習を用いた電車線金具検出により、ハンガの取り付け位置の測定が可能であることを確認し、適合率、再現率ともに90%以上の高精度な検出を実現した。これらを組み合わせ、電車線非接触測定装置により電車線の3次元構造を測定可能であることを示した。

文 献

- 1) 根津一嘉：架線検測車の発展史，鉄道と電気技術，Vol.27, No.5, pp.3-9, 2016
- 2) 大城健次：新幹線電力作業の機械化，鉄道と電気技術，Vol.6, No.3, pp.34-37, 1995
- 3) 根津一嘉，松村周，網干光雄，庭川誠，川畑匠朗，田林精二：ステレオ画像計測とレーザー測距を併用した架線の非接触位置測定手法，鉄道総研報告，Vol.28, No.10, pp.29-34, 2014
- 4) 松村周，根津一嘉，薄広歩：画像処理による電車線金具診断手法の検討，電気学会交通・電気鉄道研究会資料，TER-17-029, pp.33-38, 2017
- 5) 松村周，根津一嘉，薄広歩：電車線非接触測定装置の車両への搭載によるトロリ線静高さ測定，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-17-044 / LD-17-053, pp.35-40, 2017
- 6) 庭川誠，恩田寿和，木下信夫：ステレオ解析手法を用いた九州新幹線のパンタグラフと架線の状態計測，電気学会論文誌D，Vol.127, No.2, pp.118-123, 2007
- 7) 高橋敦宏，貴志俊英，山本浩志：トロリ線のモニタリングと局部摩耗の予測，JR EAST Technical Review, No. 48, pp.25-28, 2014
- 8) W. Zhou, Z. Sun, S. Ren, W. Zhang, H. Wang, P. Dai, Y. Wang : "Measurement Method for Geometric Parameters of Overhead Contact Line Based on Multi-View Stereovision", China Railway Science, Vol.36, No.5, pp.104-109, 2015.
- 9) S. Ren, K. He, R. Girshick, and J. Sun: Faster R-CNN: Towards real-time object detection with region proposal networks, Advances in Neural Information Processing Systems 28, 2015.
- 10) J. Redmon, S. Divvala, R. Girshick, A. Farhadi: You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection, 2016 Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2016.
- 11) W. Liu, D. Anguelov, D. Erhan, C. Szegedy, S. Reed, C. Y. Fu, A. C. Berg: SSD: Single Shot MultiBox Detector, The 14th European Conference on Computer Vision, 2016.