

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

根津 一嘉* 松村 周* 網干 光雄**
庭川 誠*** 川畑 匠朗*** 田林 精二***

**Contactless Measuring Method of Overhead Contact Line Positions
by Stereo Image Measurement and Laser Distance Measurement**

Kazuyoshi NEZU Itaru MATSUMURA Mitsuo ABOSHI
Makoto NIWAKAWA Takuro KAWABATA Seiji TABAYASHI

We developed a contactless measuring method of static positions of the overhead contact line from vehicles by stereo image measurement and laser distance measurement, and conducted measurement experiments. By using the combination of two types of sensors, this method can made high detection performance and high measurement accuracy compatible. Moreover, since it is completely contactless, the measurement of the messenger wire and the auxiliary messenger wire is also possible. By using this method, the automation of the measurement and the quantification of the condition diagnosis of long contact line equipment are attained, and the increase in the efficiency of the maintenance can be expected.

キーワード：ステレオ計測，画像処理，レーザーセンサ，架空電車線，非接触測定

1. はじめに

電車線路設備の保全において、線条、金具や支持物などの設備の状態を総合的かつ効率的に検査するため、測定の自動化や状態診断の定量化を行うことが求められている。この測定を電気検測車などの鉄道車両や保守用車から行うことで、長大な電車線路設備を効率よく検査でき、徒歩巡回や至近距離検査の負担が軽減されることが期待できる。

ところで、架線の保全は静的状態、すなわちパンタグラフによりトロリ線が押し上げられる動的相互作用が無い状態で行われ、保全上の基準値も基本的に静的状態の値として定められている。一方で現在の電気検測車は、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いるが、これは速度やパンタグラフ形式などの走行条件に依存する動的状態のうちの1条件を測定したにすぎない。このため電気検測車から静的状態を測定できれば、そのまま架線の保全に利用できるうえ、様々な動的状態を求めるシミュレーションの基礎データとして利用できるものと考えられる。

本論文では、架線の静的な位置を車両から非接触で測定する手法として、左右2台のラインカメラによるステレオ画像計測と、レーザー測域センサによる距離計測を併用した、ハイブリッド測定手法について検討を行い、測定試験を行った¹⁾。特に、これまでに実用化されている画像処理を用いた架線検測装置²⁾では、基本的にトロリ線のみを測定対象としているのに対し、本手法ではちょう架線および補助ちょう架線の位置も非接触で測定可能である。この応用例として、ちょう架線張力を推定する試験を行ったのであわせて報告する。

2. 測定原理

2.1 測定手法の概要

車両から非接触でトロリ線の位置を測定する手法として、複数のカメラを用いて三角測量の原理により測定するステレオ計測法によるもの²⁾や、反射点までの距離を非接触で測定できるレーザー光を周囲に走査するレーザー測域センサを用いたもの³⁾、そして帯状に照射されたレーザー光の照射点を撮影して画像処理により求める、光切断法によるもの⁴⁾が実用化されている。このうちステレオ計測法によるものは、撮影した画像に写り込んだ複数の線条からトロリ線を抽出する際、パンタグラフが接する線条をトロリ線として認識している。このた

* 電力技術研究部 集電管理研究室

** 電力技術研究部 (現 研究開発推進室)

*** 株式会社明電舎

特集：電力技術

め撮影する画像内でパンタグラフがトロリ線に接していることが必要であり、完全に非接触では測定できない。レーザー測域センサを用いたものはセンサの性能上、ステレオ計測法と比較して測定周波数が低く、測定精度も低いため、保守用車用の簡易な測定装置として位置づけられている。また光切断法を用いたものは、レーザー装置が大型で、搭載は検測専用車両に限られている。

以上のうち、適用が比較的容易なステレオ計測法とレーザー測域センサについて、性能の比較を表1に示す。これより両手法を併用することで、ステレオ計測法の高い測定精度と、レーザー測域センサの高い線条識別精度を両立した、完全非接触での線条位置測定が見込めるため、ハイブリッド測定手法として開発を行った。

線路方向から見た測定器の構成を図1に示す。左右方向（まくらぎ方向）に架台を配置し、その上に左右1台ずつのラインカメラとレーザー測域センサ、中央部にLEDライン照明を固定し、線路上を走行しながら逐次データを取得する構成とした。この装置一式を、試験時は台車上、実用化時は電気検測車などの屋根上に搭載する。

表1 ステレオ計測法とレーザー測域センサの特徴比較

	ステレオ計測法	レーザーセンサ
対象物検出性能	低	高
視野	大	大
サンプリングレート	高	低
位置精度	高	低
位置分解能	高	低

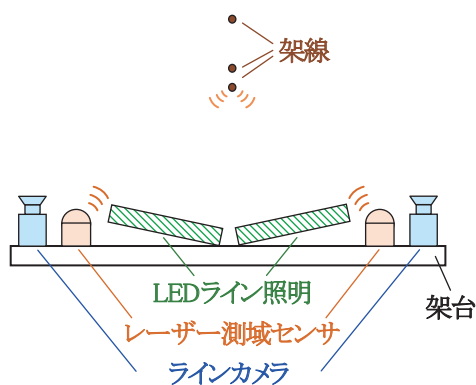


図1 測定器の構成

2.2 ハードウェアの構成

図1に示す各装置は、次の構成とした。

(1) レーザー測域センサ

レーザー光の反射点までの距離を非接触で測定できるレーザー距離計の技術を基に、レーザー光を放射状に走査することで、走査平面上にある物体の位置が測定できるセンサである。この走査平面を線路と直交方向、すなわち図1の紙面方向にすることで、架線の上下・左右方向の位置が測定できる。図2に1回の走査における測定

データの例を示す。今回は角度ステップが0.25度で毎秒40スキャン、測距範囲は30mまで、距離0.1～10mに対する公称精度は±30mmのセンサを使用した。センサの出力は極座標、すなわちレーザー光反射点の方向と距離であるが、図2はそれをXY平面に座標変換したものを示している。なお、センサは理論上、1台あれば良いが、ちょう架線がトロリ線の死角になる場合などに冗長性を持たせるため、ラインカメラと同様に左右2台を使用し、両者の出力を合成することとした。そして車両の進行にともない、図2のような走査平面が線路方向にずれていくことで、架線の3次元的な位置・形状を把握することが可能になる。

(2) ラインカメラ

コピー機やスキャナーに使われている撮像素子が1列のカメラで、撮像素子の配列と垂直方向に走査していくことで2次元画像が得られるものである。ここではラインカメラの撮像素子がまくらぎ方向に並ぶように配置し、車両の走行にあわせてレール方向にカメラが移動していくことで、図3に示すような、斜め下から見た架線の2次元画像を撮影できるようにした。なお、位置測定では色情報が必要ないため、データ量を削減できる白黒ラインカメラとしている。今回使用したカメラの画素数は8192であり、カメラ自身はスキャンレートが43kHzまで対応するものであるが、データ収録時のデータ容量や書き込み速度の問題があり、今回のスキャンレートは測定手法の検証に十分な値である1kHzとした。また、レンズは視野角の広い魚眼レンズを使用した。

(3) LEDライン照明

これもコピー機などと同様に白色LEDが1列に並べられたものであり、ラインカメラの撮像素子と同一視線

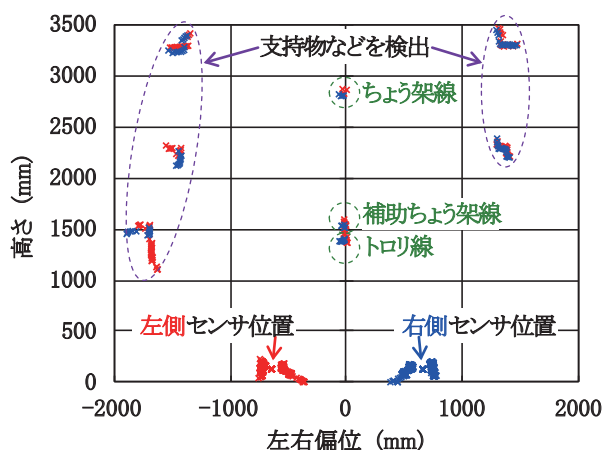


図2 レーザー測域センサによる測定データの例

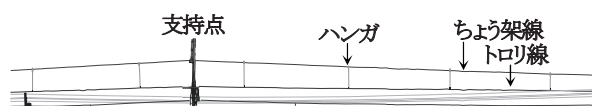


図3 ラインカメラによる架線の連続画像の例

上に配置して、撮像部分を集中的に照明している。この照明が明るいほどラインカメラのシャッター速度を上げられ、またレンズを絞り込んで被写界深度を深くできることから、被写体のブレやピンボケに対して強くなるが、今回は試験装置としての手軽さも重視して、照射面照度が100万lxの機種を選定した。なお、真昼の直射日光に照らされた地面の照度が約10万lxであるので、光源を直視すると真昼の地面より10倍明るいことになる。

(4) データ収録・解析用コンピュータ

レーザー測域センサとラインカメラは、測定器と一緒に搭載されたデータ収録用パーソナルコンピュータに接続され、可搬形ハードディスクにデータが記録される。データ解析はこの可搬型ハードディスクを定置の解析用パーソナルコンピュータに移動し、後処理で行うこととした。

2.3 ソフトウェアのフロー

図4にハイブリッド測定手法のフローチャートを示す。左側がレーザー測域センサに関するフロー、右側が画像処理（ステレオ計測）に関するフローであり、レーザー測域センサによる線の概略位置データを用いて、画像処理によるステレオ計測を行っている。各データ処理の詳細を以下に示す。

(1) 線検出処理

レーザー測域センサによる測定データには、図2にもあるように線以外の電車線金具・支持物や、乱反射によるノイズ成分が含まれている。このため車両上方の架線が存在し得る領域内で、線路方向に一定距離以上連続なデータ群のみを架線として検出する。また、金具や他の線の背後になるなどして、データの欠落が発生した場合、最小二乗法による直線近似を用いて欠落したデータを補間し、その前後において特徴が近い線同士を接続して、1本の連続した線として認識する。

(2) 線ラベリング処理

前項で検出された各線に対して、架線や線の種別を自動認識（ラベリング）する。

まず、最も下方にある線をトロリ線として判定し、その上方で並行する線を探索する。上方に線が1本の場合はシンプル架線であり、上方の線はちょう架線と判定する。また、上方に線が2本の場合はコンパウンド架線であり、下から順に補助ちょう架線、ちょう架線と判定する。なお、現状ではシンプル架線、コンパウンド架線のみ動作検証を行っているが、判定アルゴリズムを追加すれば、ツイン架線やダブルメッセンジャー式架線などにも対応可能と考えられる。

なお、オーバーラップやわたり線など、複数の架線が並行あるいは交差する場合でも、縦方向に並んだ線の組を1組の架線と認識したうえで、複数の架線を独立し

て識別するアルゴリズムとしている。また、解析領域を広げれば、き電線や保護線などに対する測定も可能になる。しかし、これらの線はセンサからの距離が架線よりもはるかに遠いことから、現在よりも強力な照明や、精度の高いレーザー測域センサが必要になると考えられる。このため現在のところは架線のみを測定対象としている。

(3) 方向情報を用いた線抽出処理

複数の線が写り込んだ画像から、目的の線のみを抽出する手順を図5に示す。図5の上段はラインカメラで撮影した元の画像であり、はじめにレーザー測域センサによる線の概略位置データから、撮影した画像において目的の線が写っていると推定される領域を計算により求める。この領域はレーザー測域センサの測定誤差を考慮して幅に余裕を持たせうえて、図5の中段のように、領域外の画像をマスキングする。

つぎに、注目する領域内において、線概略位置データから推定される線の向きと一致する線を検出することで、目的の線のみが抽出される。具体的には、線

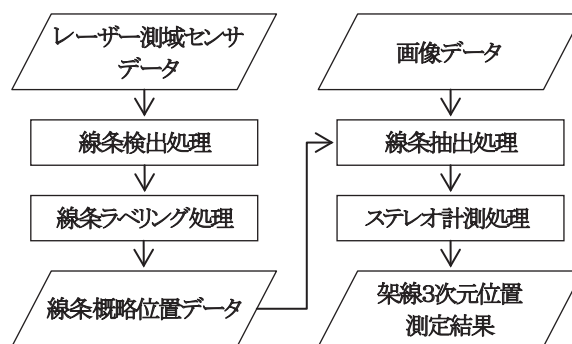


図4 ハイブリッド測定手法のフローチャート

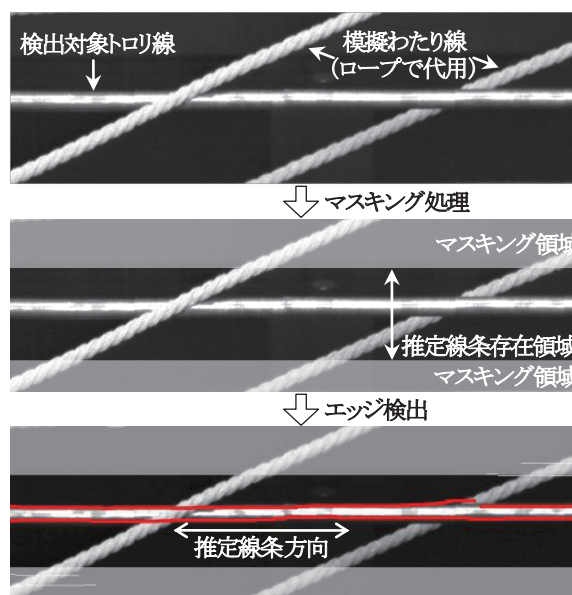


図5 線抽出手順

(上段：元画像，中段：マスク後，下段：抽出処理後)

特集：電力技術

条概略位置データから推定される線条の向きに対して、直交する方向のエッジ成分を検出し、そのエッジが一定の長さ以上連続する場合に線条のエッジ候補とする。図5の下段において、エッジ候補を赤線で示す。線条は両側2つのエッジの組で表されるので、検出対象の線条の直径と2組のエッジ間の距離とを比較し、その差が基準値以下となるエッジの組を線条として抽出する。

そのうえで、なお複数の線条候補が画像内に存在する場合、各線条候補に対して総当たりでステレオ解析を行い、レーザー測域センサの概略位置データとの差が最も小さい線条候補を目的の線条のデータとして確定する。

以上により、画像によるステレオ計測が高い認識精度で実現できる。図5においても、画像内にはわたり線を模擬したロープが写り込んでいるが、レーザー測域センサのデータから探索する線条の向きを限定することにより、目的の線条のみを正しく抽出できることを確認した。

3. 測定試験による確認

提案する測定手法の有効性を確認するため、はじめに鉄道総研の建屋内にある模擬架線で行った。ここで所期の検出性能が確認できたため、つづいて屋外の集電試験装置を用いて、より実設備に近い状況で架線の測定試験を行った。各設備における試験状況と測定結果を以下に示す。

3.1 模擬架線における測定

3.1.1 試験装置の構成

模擬架線は実設備と同じ部材を用いたコンパウンド架線であり、架高は実設備に合わせて約1500mmであるが、ハンガ間隔は約2m間隔に縮小されており、全体の長さは約13mである。ここにオーバーラップを模擬したコンパウンド架線とシンプル架線を各1組と、わたり線を模擬したシンプル架線1組を追加して架設した。架設状況を図6に示す。なお、追加した3組の線条は直径約15mmのロープで代用し、ハンガと交差金具は実物を用いた。模擬架線の下部にはトロッキ台車用の軌道が敷設されており、測定器を設置した手押し台車を時速約1kmで移動させてデータを収録した。なお、台車からトロリ線までの距離は約1.5mであり、実際の車両の屋根からトロリ線までの距離にほぼ等しい条件となっている。

3.1.2 測定結果

図7に、模擬架線においてレーザー測域センサにより求めた高さ方向の測定データ例を示す。このデータは線条検出処理を行う前の生データであり、模擬架線の架台などに起因した誤検出データが存在している。この測定データに対して線条検出処理を行い、ラインカメラで撮影した画像とあわせてハイブリッド測定手法を適用し

た。図8に線条の3次元位置測定結果を示す。No.1～No.4の各架線を正しく識別し、3次元位置測定が行われたことを確認した。なお、No.1が既設の実架線、No.2とNo.3がオーバーラップを模擬したロープ、No.4がわたり線を模擬したロープである。

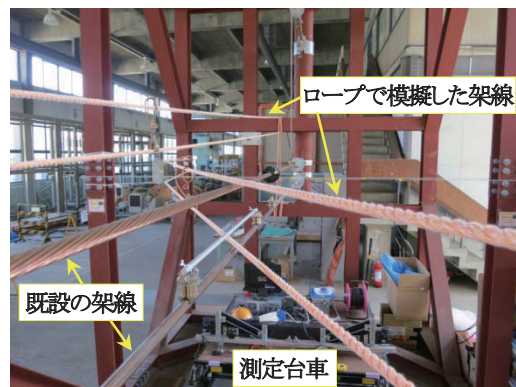


図6 模擬架線における測定試験状況

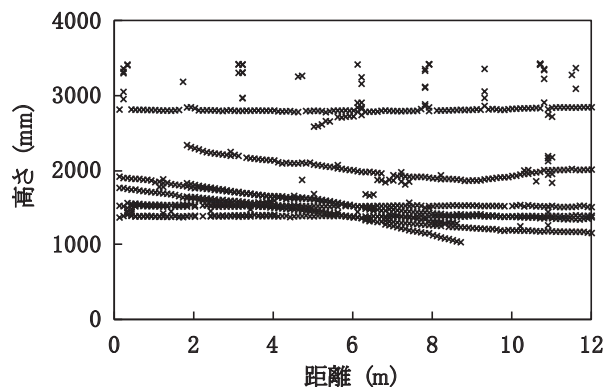


図7 レーザー測域センサの高さ測定結果（模擬架線）

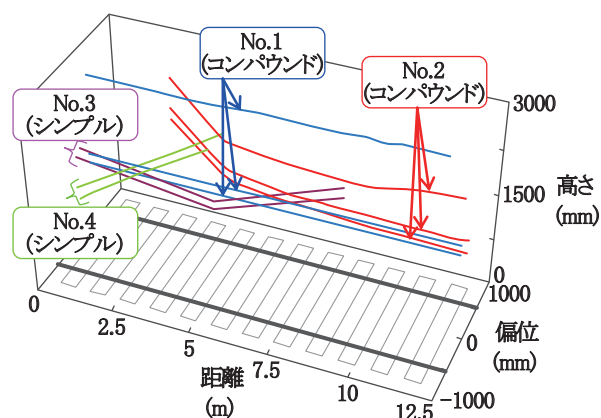


図8 線条の3次元位置測定結果（模擬架線）

3.2 集電試験装置における測定

3.2.1 試験装置の構成

集電試験装置は延長約450mの架線の下を、最高200km/hでパンタグラフを走行させて集電性能を測定する設備である。今回は図9に示す作業用台車上に測

定器を仮設し、時速約3kmで走行させて日中に測定を行った。なお、架線形式はシンプル架線であり、高速走行試験時に測定を行う装置中央付近の架線は、径間長が50m、ジグザグ偏位が左右200mm、架高が960mmと、シンプル架線の標準的な条件に整備されている。その前後の区間では設備の都合上、標準条件とは構成が大きく異なる箇所も存在するが、今回はそのような区間も含めて測定を行った。

3.2.2 測定結果

先に図3に示した画像は、集電試験装置において今回撮影した画像である。実際にはこのような画像が測定区間全体にわたって得られている。なお、模擬架線において各線条は、照明により背景に比べて輝度値が高い（＝白い）画像として撮像されていたが、集電試験装置では日中に天空を背景に撮像したため、各線条は背景に比べて輝度値が低い（＝黒い）画像となっている。これに対し、線条抽出処理はどちらの画像に対しても有効である



図9 集電試験装置における測定試験状況

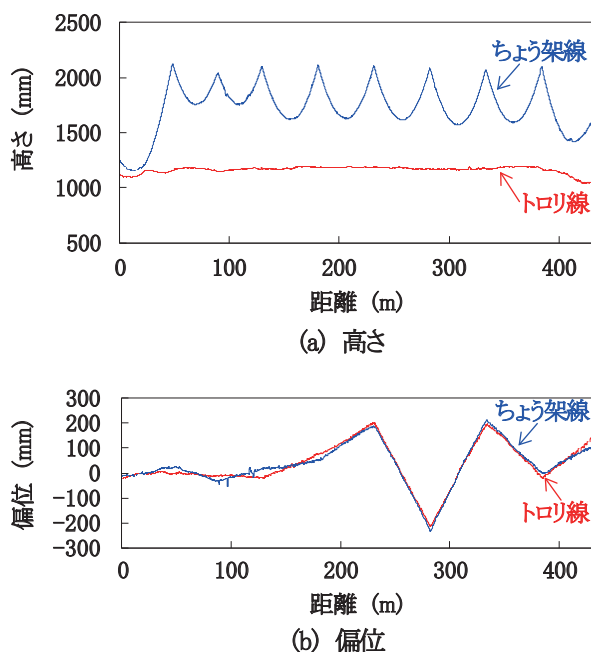


図10 架線位置の測定結果（集電試験装置）

ことを確認した。トンネル出入口や上屋の端などでは、線条と背景の明暗が反転することになるが、鮮明な画像が得られていれば、理論上は明暗が反転しても1本の線条として抽出可能である。ただし試験では検証しておらず、今後検討を加える必要がある。

図3は片側のラインカメラの画像であり、実際には同じ架線を反対側から撮影した画像がもう1枚ある。これにレーザー測域センサのデータを用いて線条抽出処理を行い、ステレオ計測を行った。その結果を図10に示す。より実際の設備に近い集電試験装置においても、ハイブリッド測定手法により架線の3次元位置計測が可能であることが確認できた。

4. ちょう架線位置測定の実用—張力の推定

4.1 測定の目的

架線は温度変化にともなう伸縮により張力が変動する。このため支持点において可動ブラケットや滑車などにより、線条が長手方向に移動可能な支持構造としたうえで、引留箇所に自動張力調整装置を設け、ここで線条の伸縮量を補償することで、引留区間（以下、ドラムと記す）内の張力を一定に保っている。しかし支持点での線条の移動に抑制抵抗が働いた場合、自動張力調整装置の働きが不十分になり、同一ドラム内でも張力が必ずしも一定にならなくなる。架線の張力が設計値から変わると、結果的にトロリ線高さに不整が生じるため、それが集電性能に悪影響を与える可能性が指摘されている⁵⁾。

現状では架線の張力を径間ごとに簡易に測定する手法がないため、張力の直接的な管理は行われていない。しかし提案するハイブリッド測定手法を応用すれば、線条の弛度（サグ量）から張力の推定が可能になる。今回は特に、径間ごとの大きな高さ変動として影響が表れやすい、ちょう架線の張力推定を試みた⁶⁾。

4.2 張力推定の原理

ちょう架線の懸垂曲線（カテナリー曲線）の高さ y は、径間長に対するサグ量が小さい場合、近似的に式(1)に示す、支持点1からの距離 x の2次関数で表される⁷⁾。

$$y = \frac{4s}{l}x^2 - \left(4s - \frac{h_2 - h_1}{l}\right)x + h_1 \quad (1)$$

ただし、 s : サグ比、 l : 径間長、 h_1 : 支持点1の高さ、 h_2 : 支持点2の高さである。

一方、線条の張力 T は、式(2)により表わされる⁷⁾。

$$T = \frac{\rho l}{8s}g \quad (2)$$

ただし、 ρ : 1mあたりの架線重量、 g : 重力加速度である。また、サグ比 s とは、当該径間のサグ量を径間長で除した値である。

特集：電力技術

そこで、ハイブリッド測定手法により測定したちょう架線の高さから、径間ごとに最小2乗法を用いて2次関数の近似曲線を求め、式(1)のxの係数からサグ比sを求めれば、式(2)より張力Tを計算することができる。

なお、1mあたりの架線重量には、ハンガ、ドロップなどの架線金具の重量も加味することは可能だが、今回は線条の重量のみを考慮した。また、径間長は支持点から支持点までの線路方向の距離とし、ジグザグ偏位があることによる線条の長さの増加分は無視した。

4.3 検証試験結果

集電試験装置において、表2の仕様のヘビーコンパウンド架線を架設し、ハイブリッド測定手法を用いてちょう架線高さの非接触測定を行った。なお、表2に示す張力は、引留箇所には張力計を取り付けて実測した値である。

表3に測定されたちょう架線高さから求めたサグ比と、そこから推定したちょう架線の張力を示す。張力計の値である20.4kNと比較すると、張力推定の誤差は3%以下であった。これは、張力の異常な径間を診断するには十分な精度と考えられる。

表2 張力推定に用いた架線の仕様

線条	線種	張力 (kN)	重量 (kg/m)
トロリ線	GT170	19.8	1.511
補助ちょう架線	PH150	14.9	1.375
ちょう架線	St180	20.4	1.450

表3 ちょう架線の各径間のサグ比と張力推定結果

径間番号	径間長 (m)	サグ比	推定張力 (kN)
1	50	0.0131	20.26
2	50	0.0130	20.33
3	50	0.0128	20.60
4	50	0.0133	19.89
5	50	0.0129	20.42

5. まとめ

画像処理とレーザー測域センサを併用することで、電気検測車などの車両から架線の静的な位置を非接触測定するハイブリッド測定手法を開発した。模擬的に複雑な架線を架設した測定試験では、各架線を正確に自動認識できることを確認し、屋外の日中測定も可能であることを確認した。また、測定結果を応用すれば、ちょう架線の張力が推定可能であることを確認した。

なお、現在のところは架線の線条の位置しか測定できないため、次のステップとしてハンガ、ドロップ、コネクタなどの架線金具に対する測定手法を検討する予定である。また、測定時の走行速度がごく低速であるため、保守用車速度、在来線営業速度、新幹線営業速度と、順次高速化を検討する。一方で測定誤差の補正方法に関する検討も進めており、光学系の補正を行うことで、専用のジグを用いた直接測定と比較して、トロリ線高さで1mm以内の測定精度を実現している⁸⁾。今後、測定速度を上げるとセンサの振動にともない誤差が増大することが予想されるため、振動補正方法の検討も行う。

最後にちょう架線張力の推定手法を示したが、これは電気検測車でも通常の至近距離検査でも行われていない、新しい測定項目である。本手法を応用することで、他にも新しい測定が可能になるものと思われるが、測定方法とあわせて、そのデータの評価方法についても検討し、提案していきたい。

文献

- 1) 松村周, 根津一嘉, 網干光雄, 庭川誠, 川畑匠朗, 田林精二: 画像処理による架線位置の非接触測定の基礎検討, 平成25年電気学会全国大会, No.5-135, pp.232-233 (第5分冊), 2013
- 2) 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
- 3) 坂田宗久: 新線向け架線検測装置, 明電時報, No.344, pp.75-78, 2014
- 4) 佐藤裕樹, 塚原元義, 佐藤宗雄, 金谷元就: 新幹線電気軌道総合検測車電力測定装置の開発, 平成14年電気学会産業応用部門大会, No.272, pp.1407-1410, 2002
- 5) 倉岡拓也, 久須美俊一, 常本瑞樹, 濱田貴弘, 源導士: ちょう架線支持滑車の張力抑制抵抗評価と集電特性への影響, 鉄道総研報告, Vol.22, No.12, pp.5-10, 2008
- 6) 松村周, 根津一嘉: 画像処理を用いたちょう架線張力推定, 平成26年電気学会全国大会, No.5-113, pp.194-195 (第5分冊), 2014
- 7) 加藤誠也: パラボリックケーブルの静力学的性質, 林學會雑誌, Vol.12, No.10, pp.608-628, 1930
- 8) 松村周, 根津一嘉, 福谷隆宏, 庭川誠, 川畑匠朗, 田林精二: 画像処理を用いた電車線路の線条位置測定手法, 平成25年電気学会産業応用部門大会, No.5-8, pp.V-131-134, 2013