

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

電力技術研究部 集電管理研究室
主任研究員 根津 一嘉

1. はじめに

電気検測車による電車線設備の検測は、保守作業の効率化に大きく寄与している。しかし検測項目はトロリ線と、トロリ線に接触するパンタグラフの状態量に限られるため、それ以外の大半を占める電車線設備の検査は、人手による外観検査や至近距離検査に頼らざるを得ない。このため、より多くの設備の検測を可能にすることで、保守作業のさらなる効率化や、測定データの定量化による保守作業の高度化を目指し、測定手法の開発を行っている。

今回はその第1ステップとして、車両の屋根上に搭載した左右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することで、複数のトロリ線、補助ちょう架線、ちょう架線の位置を非接触測定する手法を開発し、鉄道総研所内の試験設備で測定試験を実施した⁽¹⁾。この結果、各線条を正しく認識して位置測定を実現していることを確認するとともに、応用事例として、径間内のちょう架線の形状から張力を推定する試験を行ったので報告する。

2. 測定原理

2.1 測定手法の概要

車両への搭載が容易な非接触での位置測定手法として、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画像計測と、レーザー光の反射点までの距離を非接触で測定できる、レーザー測域センサを用いる手法の適用を検討した。両手法の性能の比較を表1に示す。両手法とも単独では一長一短があるが、併用することでステレオ画像計測の高い位置測定精度と、レーザー測距の高い線条識別性能を両立した測定が可能になると見込み、開発を行った。

線路方向からみ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、今回の試験ではトロッコや作業車の上、実用化時は営業車や電気検測車などの屋根上に搭載する。

表1 ステレオ計測とレーザーセンサの特徴比較

	ステレオ計測	レーザー測域センサ
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

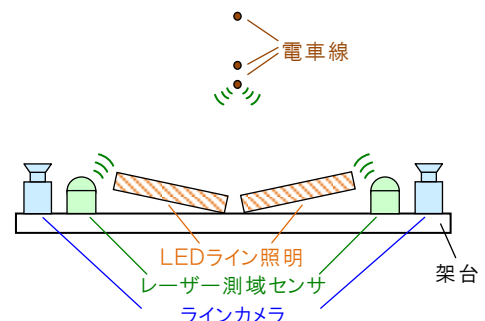


図1 測定器の構成

2.2 ハードウェアの構成

(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。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、左右2台を使用して両者の出力を合成することにした。

(2) ラインカメラ コピー機などに使われている撮像素子が1列のカメラで、撮像ラインを走査することで2次元画像が得られるものである。今回は8192画素のモノクロカメラを使用した。スキャンレートは43kHzまで対応しており、仕様上は300km/hの走行で約2mm間隔の撮影が可能であるが、データ容量が膨大になることと、データ記録速度の問題から、今回は測定手法の検証に十分な値である1kHzで撮影した。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直線上に配置して、撮像部分を集中的に照明している。

(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コンピュータに接続され、可搬形データカートリッジに記録される。データ解析はこのカートリッジを定置の解析用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2に今回開発した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、右側がステレオ画像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、ステレオ画像計測を行っている。各データ処理項目の詳細を以下に示す。

(1) 線検出処理 レーザー測域センサの測定データに含まれる、電車線金具、支持物や、乱反射によるノイズ成分を除去するため、車両上方の電車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線として検出する。また、線データが途中で欠落している場合、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、電車線形式や線の種別を自動認識(ラベリング)する。なお、複数の電車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組の電車線と認識したうえで、それぞれ独立して識別できるアルゴリズムとしている。

(3) 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。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、撮影画像(図3上段)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し、領域外の画像をマスクングする(図3中段)。つぎに、線の概略位置データと一致する向きの線を検出することで、目的の線のみが抽出される(図3下段)。さらに複数の線候補が画像内に存在している場合、各線候補に対して総当たりでステレオ計測を行い、概略位置データとの差が最も小さい線候補を目的の線として確定する。

図3は3.1節で示す模擬架線における測定で、トロリ線と交差するわたり線(ロープで模擬)をラインカメラで撮影したものである。図2のフローにより目的のトロリ線を正しく抽出できることを確認した。

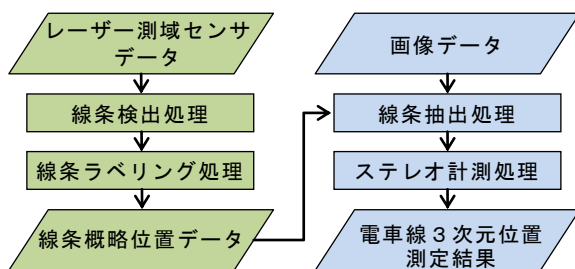


図2 開発した測定手法のフローチャート

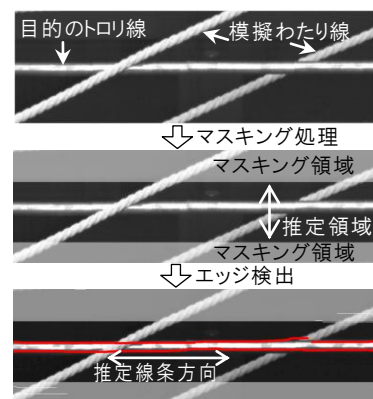


図3 線抽出手順

3. 測定実験による確認

3.1 模擬架線における測定

模擬架線は実設備と同じ部材を用いて建屋内に架設されたコンパウンド架線である。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 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。なお、追加した 3 組の線条は直径約 15mm の茶色いロープで代用した。測定器は電車線下方の手押しトロッコ上に搭載し、時速約 1km で移動させながらデータを収録した。なお、測定器からトロリ線までの距離は約 1300mm であり、実設備で車両の屋根上に搭載した時のトロリ線までの距離とほぼ等しい。

図 4 に線条の 3 次元位置測定結果を示す。No.1 が既設の実電車線、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り、各電車線の形式と線条の構成が正しく自動認識していることを確認した。また、ラインカメラの光学系に起因する誤差補正を行ったうえで、No.1 電車線の高さ測定データを、専用のジグを用いた直接測定データと比較したところ、トロリ線で最大 1mm、補助ちょう架線で最大 3mm、ちょう架線で最大 6mm の差に収まっており、測定器から線条までの距離が遠いほど誤差が増大する結果が得られた⁽²⁾。

3.2 集電試験装置における測定

鉄道総研が所有する集電試験装置は延長約 450m の電車線の下を、最高 200km/h でパンタグラフを移動させて集電性能を測定する設備である。今回は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した。電車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電車線は、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区間も存在するが、今回はそのような区間も含めて測定した。

測定結果を図 5 に示す。より実際の設備に近い集電試験装置においても、今回開発した手法により電車線の 3 次元位置計測が可能であることが確認できた。

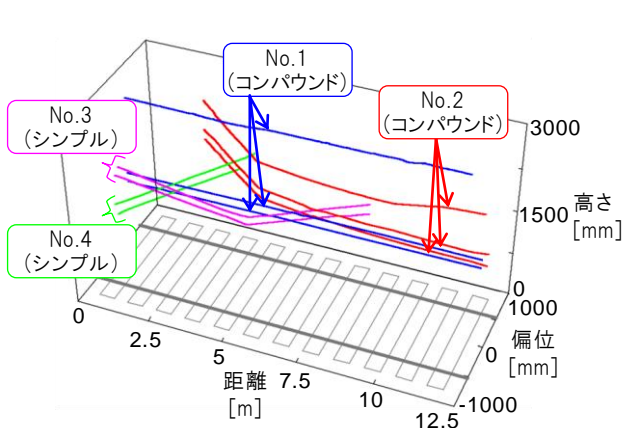


図4 線条の3次元位置測定結果(模擬架線)

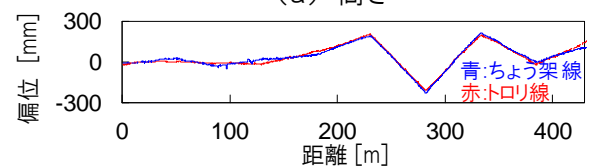
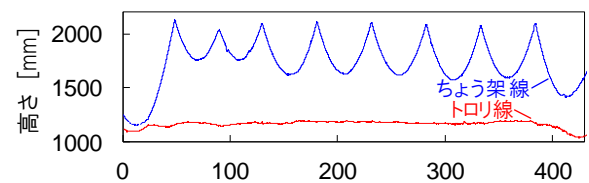


図5 電車線位置の測定結果(集電試験装置)

4. 線条位置測定の応用—径間ごとのちょう架線張力の推定

4.1 張力推定の原理

ちょう架線の位置測定の応用として、径間ごとのちょう架線張力の推定を試みた⁽³⁾。

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。

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

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。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。

一方、線条の張力 T は、式(2)により表される。

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

ただし、 ρ :1m あたりの電車線質量、 g :重力加速度 である。

そこで、提案した測定手法により測定したちょう架線の高さから、径間ごとに最小二乗法を用いて 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 あたりの電車線質量には、ハンガやコネクタなどの電車線金具の質量も加味することも可能だが、今回は線条の質量のみを考慮した。

4.2 検証試験結果

集電試験装置において、表 2 の仕様のコンパウンド架線を架設し、提案した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径間ごとに求めたサグ比と、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、異常な張力を診断するには十分な精度と考えられる。

表2 張力推定に用いた電車線の仕様

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

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の併用により、電気検測車などの車両から電車線の線条の位置を非接触測定する手法を開発した。模擬的に複雑な電車線を架設した測定試験では、各電車線が正確に自動認識され、光学系の補正によりトロリ線高さで 1mm 以内の測定誤差であることや、屋外の日中測定も可能であることを確認した。さらに、測定結果の応用として、ちょう架線張力の推定を行ったところ、張力計と比較した誤差は 3%以下であった。

今回は線条の位置測定手法を開発したが、次のステップとしてハンガ、コネクタなどの電車線金具に対する測定手法を検討中である。また、今回は試験装置の制約上、ごく低速での測定しか行っていないが、在来線、そして新幹線の営業列車速度で測定を行うと、センサの振動による誤差が増大することが予想されるため、振動の補正方法も検討していきたい。

なお、本研究は株式会社明電舎との共同研究により実施した。

参考文献

- (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) (2013-3)
- (2) 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 (2013-8)
- (3) 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) (2014-3)