

光切断法を適用したトロリ線断面形状測定的基础研究

薄 広歩* 根津 一嘉* 松村 周*

Basic Research of Profile Measurement of Contact Wire with Light Section Method

Hiromu SUSUKI Kazuyoshi NEZU Itaru MATSUMURA

A wear measurement of the contact wire is one of the most important tasks of maintenance operation of the contact line for the electric railways, because the excessively worn contact wire has a risk of breakage. The contact wire wear is managed by the measurement of its residual diameter. The diameter is generally calculated from the measured width of the sliding surface in the case of use of an electric inspection car. However there are raised problems of measurement error in the case where the sliding surface is not flat or there are scratches around the surface. We proposed a method to measure the profile of the contact wire with the light section method. The effectiveness of the proposed method was confirmed by the field tests.

キーワード：トロリ線，トロリ線摩耗，残存直径，光切断法，画像処理

1. はじめに

トロリ線はパンタグラフのしゅう動により摩耗するため、定期的な摩耗測定が必要である。トロリ線の摩耗は残存直径により管理され、電気検測車による測定が行われている。電気検測車では、トロリ線摩耗測定手法として、しゅう動面幅を検出し残存直径に換算する手法が用いられている。

しかし、この手法は、しゅう動面が一様な平面でない場合には、換算した残存直径に誤差が生じる場合がある¹⁾。誤差が発生する一例を図1に示す。トロリ線が図1のようにA面、B面の2面のしゅう動面を有している場合を考える。なお、このように、2面以上のしゅう動面が存在する摩耗状態を「偏摩耗」という。現在多くの電気検測車で用いられているレーザー式のトロリ線摩耗測定装置では、走査したレーザー光の反射光幅をしゅう動面幅として測定している。A面はレーザー光が正反射して測定装置の受光部に反射光が到達するが、B面はレーザー光が受光部と異なる方向に正反射する。結果として、B面がしゅう動面として測定されず、A面の幅のみをもってしゅう動面幅として測定される場合がある。これにより、図1のように、測定されたトロリ線の残存直径が本来よりも大きくなる。偏摩耗以外にも、しゅう動面が丸まって（曲面になって）しまう場合にも同様の誤差が発生する。また、しゅう動面でない円弧面に傷があった場合、本来受光部に到達しない光が、乱反射により受光部に到達するため、測定されるしゅう動面幅が本来よりも大きくなり、結果としてトロリ線の残存直径が小さ

* 電力技術研究部 集電管理研究室

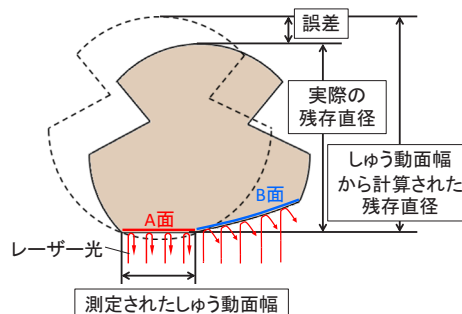


図1 しゅう動面が一様な平面でない場合のしゅう動面幅測定に基づく残存直径の誤差

く評価されることがある。

これらの問題に対し、しゅう動面をカメラで撮影することにより、画像上の幾何学的関係から偏摩耗したトロリ線の残存直径を測定する試みも行われている²⁾。しかし、しゅう動面の「丸まり」への対応が困難である他、残存直径の測定精度に課題がある。

そこで本研究では、電気検測車への適用を目指し、トロリ線の断面形状を直接測定し、その形状から残存断面積を計算することで、しゅう動面の形状によらない、高精度なトロリ線摩耗測定手法を検討した。

本研究では測定手法などの検討に先立ち、以下の測定性能目標を設定した。

- ・ 測定精度： 残存直径換算 ± 0.1mm 以下
- ・ 測定周波数： 2kHz 以上
- ・ トロリ線範囲： レール面上高さ 4800 ~ 5300mm
左右偏位 ± 400mm
- ・ 測定環境： 全時間帯、晴天および曇天で測定可能

表1 三次元形状計測技術の比較検討

測定原理	TOF方式	ステレオカメラ	光切断法
測定精度 (残直方向)	× 統計誤差 1mm 以上	△ 測定対象の特徴量に依存	○ ± 0.1mm
測定範囲	○ センサ1台で最大 360°	△ 範囲拡大には複数のセンサが必要	△ 範囲拡大には複数のセンサが必要
屋内もしくは夜間 での測定	○	△ 強力な照明が必要	○
屋外かつ日中 での測定	○	△ 外乱光の変化に弱い	△ 外乱光に耐えるレーザー出力が必要
測定周波数	× 100Hz 程度	○ 最大 10kHz 以上	○ 最大 7kHz

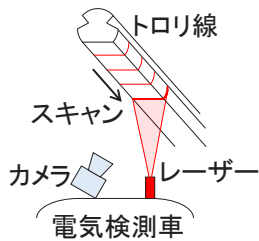


図2 光切断法によるトロリ線断面形状測定の概要

2. 断面形状測定方法の検討

近年のセンサ技術では、三次元カメラ、LiDAR (Light Detection and Ranging) といった高性能かつ小型のセンサで、物体の形状が測定可能となっている。三次元計測技術のうちトロリ線測定に適用できると考えられる測定手法を次に示す。

- ・ Time of Flight (TOF) 方式
- ・ ステレオカメラによる計測
- ・ 光切断法による計測

以上3つの測定方式を比較検討した結果を表1に示す。

TOF方式は、光源からの照射光が対象物で反射し、センサに到達するまでの時間と光速の関係から、センサと対象物の距離を取得する手法であり、LiDARに用いられている。外乱光の影響を受けにくい $\pm 1\text{mm}$ 以上の統計的誤差が生じる。また、測定周波数が目標とする 2kHz に対して低く(最大 100Hz オーダー)、不適である。

ステレオカメラによる計測は、2台(以上)のカメラ間の距離と、各カメラで写される測定対象の角度差から、測定対象までの距離を測定するものである。精度はカメラ性能に依存するが、カメラとレンズの選定次第でTOF方式よりも高い精度での測定が可能である。しかし、本方式は2台のカメラで撮影した測定対象の同一特徴点を対応付ける必要があるため、平板など特徴点の乏しい測定対象に対する距離精度は小さい。トロリ線表面は特徴点に乏しいため、トロリ線の断面形状測定には不適であると考えられる。

光切断法による計測は、スリット状のレーザー光源とカメラを組み合わせ、測定対象に照射されたレーザー

の輝線形状(以下、光切断像)をカメラで測定するものである。ステレオカメラと同様にTOF方式より高い精度での測定が可能である。また、レーザーの輝線の輝度ピークがわかればよいとため、特徴点の乏しい測定対象に対し有効な測定方法であると考えられる。以上の検討から、トロリ線断面形状測定に光切断法を用いることとした。

3. 光切断法を用いた測定装置構成の検討

光切断法によるトロリ線断面形状測定装置の構成概要を図2に示す。車両屋根上にカメラとレーザーを搭載し、車両の走行によりトロリ線下部形状をスキャンする。光切断法を用いた測定は、カメラの画素数、感度、処理速度、レンズ焦点距離、レーザーの波長、出力、線幅といった機器そのものの性能と、カメラとレーザーの幾何学的位置の2つの要素が、全体の測定性能を左右する。本章では、それぞれの要素について検討した結果を示す。

3.1 カメラ・レンズの選定

本研究では、 2kHz 以上の測定周波数を有するカメラとして、測定周波数が最大 7kHz の光切断測定用カメラを採用した。このカメラは、 2560×832 ピクセルのCMOSセンサを有し、画素列ごとの輝度値(正確には画素値: $0 \sim 255$, 以下、輝度値)のピークを自動で計算して形状データをリアルタイムに出力するプロセッサを搭載している。そのため、最大 7kHz でのトロリ線断面形状測定が可能である。また、高さ方向は、サブピクセル処理(エッジ位置を近似的に高分解能で求める処理)により最大 13312 ピクセル相当の分解能での断面形状出力が可能である。レンズ焦点距離は、3.3.2項で後述する画角計算シミュレーションにより決定し、 50mm とした。

3.2 レーザーの選定

太陽光などの外乱光に対してロバストな測定を行うためには、レーザーによって形成されたトロリ線表面上の光切断像の輝度値が背景の輝度値より十分大きい必要がある。外乱光下で測定する際は、レーザーの波長域のみ

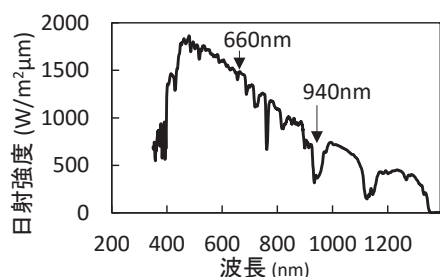


図3 日射スペクトル
(文献3の掲載データを元に作成)

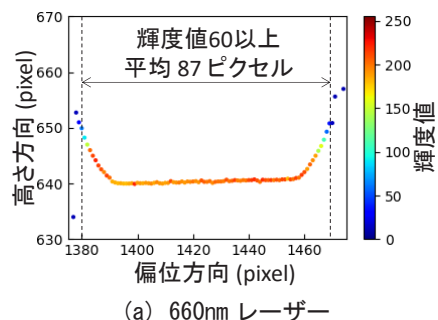
を透過する光学バンドパスフィルタ（以下 BPF）を用いることが有効な手段であるため、本研究ではレーザー波長に適した、バンド幅の狭小な BPF を使用する。

外乱光下で測定する場合、外乱光スペクトルが小さい波長域のレーザーを用いることが理想的であり、例えば 940nm の日射強度は 660nm の日射強度の約 1/4 である（図 3）。一方、3.1 節で選定した一般に入手可能なカメラの感度は、660nm 付近にピークを有し、940nm における感度はピーク波長の約 1/5 である。

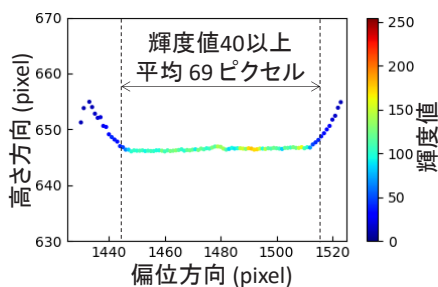
そこで、比較的入手が容易な 660nm（最大出力 120mW）の赤色レーザーと、940nm（最大出力 80mW）の赤外光レーザーの両者について、①日中における外乱光の輝度値、②外乱のない環境でのトロリ線表面の輝度値の二つを測定し、①と②をそれぞれ比較した。

はじめに、外乱光の輝度値を把握するため、手押し台車にカメラを仰角 60° で設置し、鉄道総研国立研究所内（晴天・屋外）の 1 ブロック（外周約 400m）を 1 周して、背景となる空、樹木、建物、その他様々な設備を、順光および逆光条件で撮影したときの最大輝度値（=画素値：0～255）を測定した。このときの直射光の照度は 67,000lx であった。測定の結果、背景の最大輝度値は 660nm では 43 であり、940nm では 29 であった。この結果から、トロリ線断面形状測定に必要な光切断像の輝度値のしきい値を、余裕分を見込んで 660nm レーザーで 60 以上、940nm レーザーで 40 以上とした。

つぎに、660nm レーザーおよび 940nm レーザーで、屋内においてトロリ線の断面形状を測定した。トロリ線のカメラからの高さは約 1.5m であり、鉄道車両の屋根上にカメラを搭載する場合とほぼ等しい条件とした。図 4 は、屋内で測定された摩耗形状および光切断像の輝度分布である。同じトロリ線断面を 100 回スキャンした際の、660nm レーザーによるしきい値以上のピクセル数は平均 87 ピクセル、940nm レーザーによるしきい値以上のピクセル数は平均 69 ピクセルであり、660nm レーザーの方が 940nm レーザーに比べ、しきい値以上となるピクセル数が多い。また、660nm レーザーでは、しきい値以上の輝度で測定されたしゅう動面両側の円弧面



(a) 660nm レーザー



(b) 940nm レーザー

図4 太陽光による外乱のない環境におけるトロリ線断面形状と輝度値の測定結果

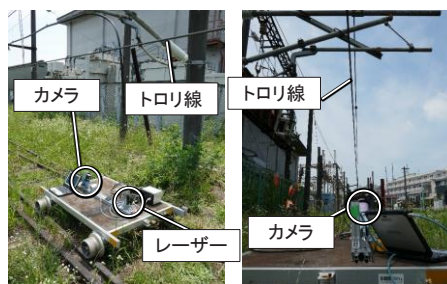


図5 太陽による外乱光下でのトロリ線断面形状測定時の試験環境

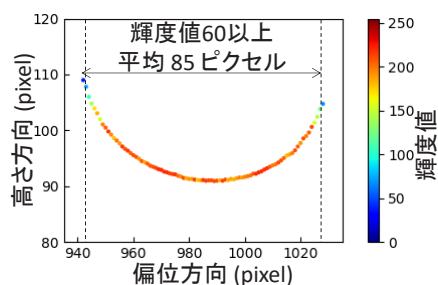


図6 太陽による外乱光下でのトロリ線断面形状測定結果

の範囲が大きいが、940nm レーザーではしきい値以上の輝度で測定された範囲はほぼしゅう動面に限定されていた。本研究ではトロリ線の残存断面積の算出を、測定データと新線形状とのフィッティングにより行うため（4章で後述）、660nm レーザーのようにフィッティングに必要なトロリ線の円弧部分の測定点を多く含むほうが望ましい。以上より本研究では、以降、660nm レーザーを用いて試験を行うこととした。

特集：電力技術

660nm レーザーを用いて、図5に示す日中・屋外の実験環境でトロリ線測定を行った。なお、測定箇所のトロリ線はほぼ摩耗していなかった。測定結果を図6に示す。トロリ線のカメラからの高さは約1.5mであり、測定時の直射光の照度は84,100lxであった。図6より、屋内で測定した結果(図4)と大差ない範囲(85ピクセル)が、しきい値以上の輝度で測定できていることがわかる。以上より、日中の、図5に示す環境において、トロリ線の形状が測定できることを確認した。

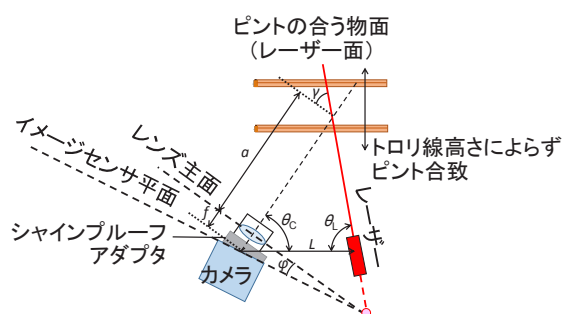


図7 シャインブルーフの原理

3.3 カメラとレーザーの幾何学的位置の検討

レーザーとカメラの相対位置は、測定精度や測定範囲に影響を及ぼす。また、トロリ線は車両屋根上から見て高さ方向に変動する設備であるため、被写界深度の不足が問題となる。そこで、本節ではまず、シャインブルーフの原理を適用することで被写界深度が不足する問題を解決する。次に、シャインブルーフの原理の適用にはカメラとレーザーの位置関係に制約があるため、その制約下で、カメラとレーザーの測定に適した配置を検討する。

3.3.1 シャインブルーフの原理の適用

高速レートで画像を取得する場合、露光時間の不足が問題となる。対策として、レンズの絞りを開放側にすれば露光量を確保できるが、被写界深度が浅くなるため、トロリ線の高さ変動により焦点が合わなくなり、光切断像が不鮮明になる問題がある。

本研究では、この問題を解決するため、シャインブルーフの原理を適用する。シャインブルーフの原理とは、イメージセンサ平面とレンズ主面とがある1つの直線で交わるとき、ピントが合う物面もまた同じ直線で交わるという原理である(図7)。ピントが合う物面とは本研究においてはレーザー面のことである。すなわち、シャインブルーフの原理を光切断法に適用すれば、レーザー面全体にピントを合わせることが可能である。本研究では、カメラとレンズの間に「シャインブルーフアダプタ」を挿入することでカメラに対してレンズを傾け、シャインブルーフの原理を実現した。ここで、シャインブルーフアダプタのアオリ角 φ は、焦点距離 f 、レンズ主面とレーザー平面のなす角 γ 、レンズ中心からレーザー平面までの光軸上の距離 a を用いて式(1)で表せる。

$$\varphi = \arctan\left(\frac{f \cdot \tan \gamma}{a}\right) \quad (1)$$

図8にシャインブルーフアダプタの有無による、トロリ線高さの変化に対する被写界深度の影響の比較を示す。図8は、トロリ線高さ1480mmでピントを合わせ、トロリ線高さを1390mmまで低くしたときの光切断像を撮影したものである。シャインブルーフアダプタは、本研究で用いるカメラ用に提供されている、アオリ角

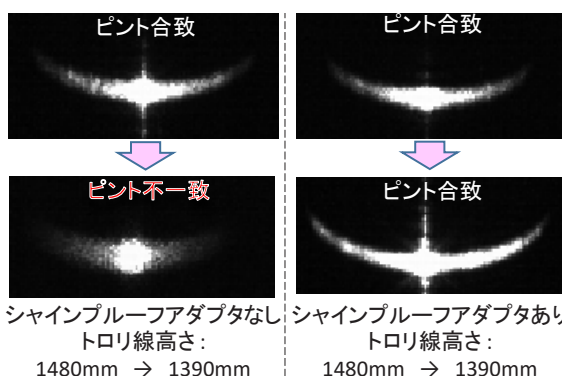


図8 シャインブルーフアダプタ有無によるトロリ線形状撮影結果の比較(トロリ線高さはカメラ基準)

$\varphi = 3.7^\circ$ のものを用いた。図8から、シャインブルーフの原理の適用がトロリ線高さ変化に伴う被写界深度不足の問題に有効であることが示された。

3.3.2 車両屋根上への搭載を想定したカメラとレーザーの配置検討

測定精度が残存直径換算で $\pm 0.1\text{mm}$ 、測定範囲がレベル面上高さ4800~5300mm、左右偏位 $\pm 400\text{mm}$ をそれぞれ満たすカメラとレーザーの配置を検討する。

ここで、カメラとレーザーの水平距離 L は式(1)から、式(2)で表せる。

$$L = f \cdot \left(\frac{1}{\tan \theta_c} + \frac{1}{\tan \theta_L} + \frac{1}{\tan \varphi} - \frac{1}{\tan \theta_c \tan \theta_L \tan \varphi} \right) \sin \theta_c \quad (2)$$

ただし、 θ_c はカメラ仰角、 θ_L はレーザー仰角である。式(2)は特に $\theta_L = 90^\circ$ すなわちレーザー面が鉛直面であるとき、式(3)となる。

$$L = f \cdot \left(\frac{1}{\tan \theta_c} + \frac{1}{\tan \varphi} \right) \sin \theta_c \quad (3)$$

シャインブルーフアダプタのアオリ角は $\varphi = 3.7^\circ$ であるから、レンズ焦点距離 f とカメラ仰角 θ_c の組み合わせによって、カメラとレーザーの距離 L が決定する。

レンズ焦点距離 f とカメラ仰角 θ_c の組み合わせは、

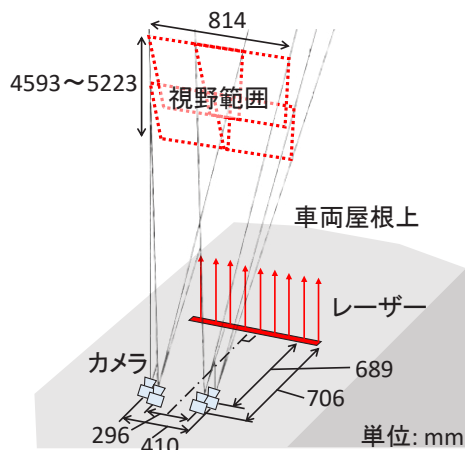


図9 カメラとレーザーの配置の一例

画角計算シミュレーションにより決定する。シミュレーション条件は、カメラのレール面上高さ3600mm、レンズ焦点距離 $f=25 \sim 200\text{mm}$ 、カメラ仰角 $\theta_c=30^\circ \sim 85^\circ$ 、レーザー仰角 $\theta_L=90^\circ$ 、シャインプルーファアダプタのアオリ角 $\phi=3.7^\circ$ として、高さ方向の分解能 $\pm 0.1\text{mm}$ 以下かつ測定範囲を満たす、レンズ焦点距離とカメラ仰角の組み合わせを求めた。ただし、カメラ1台で測定範囲を満足できない場合は、カメラを複数台組み合わせる。その際は、カメラ台数が最小となるような組み合わせを求める。

求められた組み合わせのうちの一つを図9に示す。図9は、レンズ焦点距離 $f=50\text{mm}$ 、カメラ仰角 $\theta_c=63^\circ$ 、カメラとレーザーの距離 $L=706\text{mm}$ のカメラが2台と、レンズ焦点距離 $f=50\text{mm}$ 、カメラ仰角 $\theta_c=66^\circ$ 、カメラとレーザーの距離 $L=689\text{mm}$ のカメラが2台の計4台構成である。このシミュレーションにより、少なくともカメラ4台で所望の測定範囲を確保可能であることがわかった。

4. 残存断面積および残存直径の算出手法

本測定手法では、トロリ線下方からレーザーを照射するため、トロリ線の下半分の大弧面の形状しか測定できない。そこで、測定で得られたトロリ線大弧面の断面形状を、新品時のトロリ線形状と比較することにより、トロリ線の残存断面積を算出した。トロリ線残存断面積の算出手順を図10に示す。まず、画像の縦方向の輝度重心を計算することでトロリ線下部の断面形状を得る。次に、得られた断面形状のうち、両端のしゅう動面でない円弧部分と新線の円弧をフィッティングさせる。これにより、新線形状の小弧面側と測定されたトロリ線下部形状で囲まれた領域が残存断面積、それ以外の領域が摩耗断面積となる。また、現状の保守管理は残存直径により行われているため、必要に応じて算出された残存断面積を残存直径に変換する。

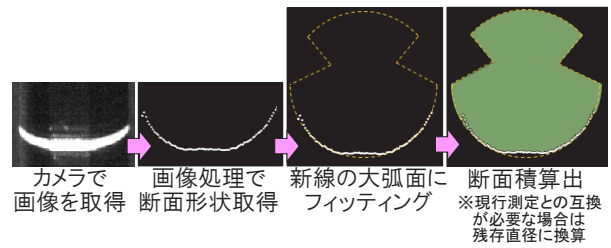


図10 トロリ線残存断面積算出手順

表2 トロリ線摩耗測定装置の測定原理と性能の比較

	センサ	原理	測定周波数
①提案手法	光切断測定用カメラ	光切断法	最大7kHz (露光時間50 μs)
②比較手法A	2次元レーザー変位計	光切断法*	58Hz
③比較手法B	外形寸法測定器	LED光透過	64Hz

* トロリ線近傍でのみ測定可能

5. 保守用車上で測定試験

5.1 試験方法

測定精度の検証と提案手法の問題点の把握のため、夜間に新幹線の保守用車上でトロリ線断面形状測定試験を実施した。夜間試験のため太陽光に対する提案手法の有効性は確認できないため、残存直径の測定精度および保守用車作業台上の照明や外部光等の外乱に対する有効性を検証した。露光時間は50 μs 、測定周波数は最大7kHzとし、レール方向に50mm間隔のスキャンで断面形状を取得した。取得した断面形状から残存断面積を算出し、後述する手法との比較のため残存直径に変換した。カメラ位置やレンズの条件は、3.3.2項に準じたものとした。視野範囲は限定されるが、原理検証のためカメラ台数は1台とした。測定時の保守用車の走行速度は約4km/hであった。なお、保守用車のレール面上高さは3650mmであり、車両屋根上の高さにはほぼ等しい。

ここで、測定精度を検証するため、表2に示す比較手法による測定を同時に行った。このうち、比較手法Aは2次元レーザー変位計で取得した断面形状に基づき、提案手法と同様に残存直径に変換したもの、比較手法Bは透過型外形寸法測定器による横方向からの残存直径測定である。両比較手法ともにトロリ線近傍にセンサを配置する必要があり、また、測定周波数が低いため、精度は高いが電気検測車には適用できないものである。

5.2 試験結果

提案手法、比較手法A、比較手法Bのそれぞれの手法で測定された残存直径、および提案手法と比較手法A、提案手法と比較手法Bの測定値の差を図11に示す。ま

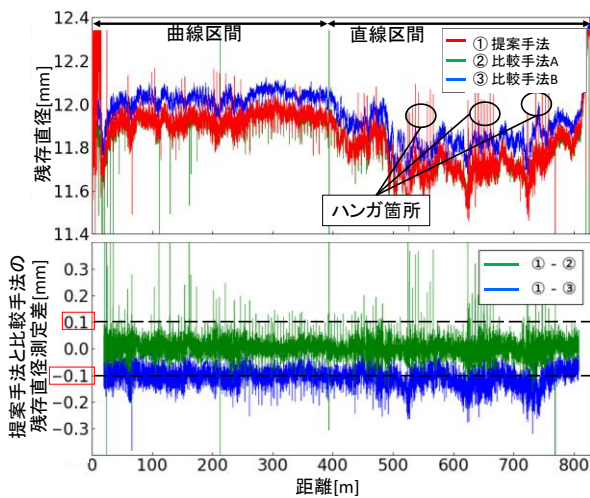


図 11 トロリ線残存直径測定結果および提案手法と比較手法の測定値の差

た、比較手法 A、B に対する提案手法の平均絶対誤差と標準偏差を表 3 に示す。全区間 (788m) にわたり、提案手法と比較手法 A の測定値の差は概ね $\pm 0.1\text{mm}$ 以内であった。一方、提案手法と比較手法 B とは定常的な測定値の差があった。また、いずれも曲線区間より直線区間の方が、平均絶対誤差および標準偏差が大きくなっていた。なお、測定時の外乱 (トンネル照明や保守用車の照明等) による測定への影響はなかった。ここで、図 11 において、提案手法では約 5m おきにピークが見られるが、これはハンガイヤーを検出しているためである。

以上の結果から、残存直径の測定精度が概ね $\pm 0.1\text{mm}$ 以内で測定可能であることが確認できた。したがって、①サンプリング周波数 2kHz 以上、②外乱環境下で残存直径誤差 $\pm 0.1\text{mm}$ という二つの目標は、振動等の影響がなく、かつハンガ点以外の箇所での測定という条件のもとで達成可能であることが確認できた。

なお、提案手法と比較手法 B の定常誤差の理由は、提案手法は残存断面積からの換算、比較手法 B では測定されたトロリ線外径の最大値をそれぞれ残存直径としているため、その算出アルゴリズムの違いが主要因と推定される。実際、提案手法の残存直径算出アルゴリズムを透過型外形寸法測定と同一にした場合、直線区間における平均絶対誤差が $0.118\text{mm} \rightarrow 0.031\text{mm}$ に減少した。また、曲線区間より直線区間の方が誤差およびばらつきがわずかに大きい (表 3) 理由として、直線区間ではトロリ線の偏位が大きく変化するため、レーザーの照射範囲の外側寄りでのトロリ線を照射することになり、輝度が小さくなったためと考えられる。

6. おわりに

電気検測車への適用を目指し、光切断法を適用した、

表 3 トロリ線残存直径の平均絶対誤差と標準偏差

比較手法	区間	平均絶対誤差 (mm)	標準偏差 (mm)
提案手法と比較手法 A	測定区間全体 (788m)	0.024	0.037
	曲線区間 (200m)	0.024	0.033
	直線区間 (200m)	0.025	0.036
提案手法と比較手法 B	測定区間全体 (788m)	0.106	0.037
	曲線区間 (200m)	0.104	0.028
	直線区間 (200m)	0.118	0.040

しゅう動面の状態によらない高精度なトロリ線摩耗測定手法を検討した。検討の結果以下のことがわかった。

- (1) 測定周波数 2kHz 以上、レール面上高さ 4800 ~ 5300mm、偏位 $\pm 400\text{mm}$ の視野範囲で、トロリ線残存直径誤差 $\pm 0.1\text{mm}$ 以下で測定可能な、カメラ、レンズ、レーザーの要件を示した。
- (2) 定置試験により、日中の屋外でトロリ線断面形状測定が可能であることがわかった。
- (3) シャインプルーファダプタの適用により、トロリ線の高さによらず鮮明な光切断像の画像が取得可能になった。
- (4) 新幹線の保守用車上でトロリ線の断面形状を測定した結果、夜間・低速での測定ではあるが、実際に残存直径換算で誤差 $\pm 0.1\text{mm}$ 以下であることが確かめられた。

今後は、残存断面積が既知のトロリ線を用いたトロリ線断面積測定精度の検証、鉄道総研所内試験線における日中環境での測定の実施、複数カメラでの連携試験を行う予定である。

文 献

- 1) 入倉佳祐, 常本瑞樹, 清水政利, 池田国夫, 本田誠彦: 「トロリ線の摺動面状態に対応した摩耗測定精度の向上手法」, 平成 27 年電気学会産業応用部門大会, pp.V-201-204, 2015
- 2) 亀山悟, 渡部勇介, 伊藤誠一, 横山誠: 画像処理を用いたトロリ線摩耗検測装置の偏摩耗トロリ線対応, 平成 28 年電気学会産業応用部門大会, pp.V-237-242, 2016
- 3) 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO): 日射スペクトルデータベース, 2015 年 6 月 4 日 12:00, つくば市における測定値, http://app0_2.infoc.nedo.go.jp (参照日: 2019 年 3 月 4 日)