

# 画像情報を活用したパンタグラフの接触力測定手法

小山 達弥\* 池田 充\* 中村 幸太郎\*\*  
 小林 樹幸\* 田林 精二\*\*\* 庭川 誠\*\*\*

## Measurement of the Contact Force of Pantograph by Image Processing Technology

Tatsuya KOYAMA Mitsuru IKEDA Kotaro NAKAMURA  
 Shigeyuki KOBAYASHI Seiji TABAYASHI Makoto NIWAKAWA

Contact force between a pantograph and a contact line is one of the most important criteria to evaluate contact performance of the overhead contact line system. Hence, some contact force measuring methods have been developed. However, currently-used measurement methods have some problems. Firstly, installation of sensors in a panhead affects dynamic characteristics of the pantograph. Secondly, they need data transmitting equipment, because built-in sensors are set under high-voltage condition. Thirdly, some kinds of pantograph cannot be equipped with sensors in a panhead because of structural restriction. To eliminate these problems, the authors have developed a new contact force measuring method by using image processing sensors mounted on the rooftop of a train.

キーワード：パンタグラフ、接触力、画像情報、ラインセンサカメラ

### 1. はじめに

架空電車線はレールに沿って架設された長大な設備であり、しかもレール面から約5mの位置に架設されることから、その保守・管理をより合理的に行い、保守作業の省力化や保守コストの低減、さらには設備の長寿命化を実現することが強く求められている。また近年、到達時分短縮のための営業速度向上に対するニーズが高まっているが、走行速度が高くなればなるほど、安定した集電を実現するために架線にはより厳しい架設精度が求められる。

こうした要求を実現するための基本情報として、架線とパンタグラフの接触状態を把握しておくことは極めて重要である。現在、日本では架線とパンタグラフの接触状態を離線率により評価することが一般的である。これは、離線が比較的測定しやすい現象であることに加え、離線に伴うアークがパンタグラフのすり板やトロリ線に大きな損耗を与えるため、離線率の低減そのものが重要な技術的課題であるためである。しかしながら、離線が発生しない場合でも、たとえば過大な接触力の発生はトロリ線の機械的な摩耗を促進するのみならず、場合に

よっては電車線金具の変形、破損の原因となることもある。そこで、架線とパンタグラフの間の接触力を測定し、接触性能の評価指標として使用すれば、離線、すなわち接触力が0の状態だけを抽出するよりもより合理的な接触性能評価が可能になると考えられる。

このため、鉄道総研では接触力の測定手法をすでに開発しているが<sup>1)</sup>、この測定法はパンタグラフの舟体にセンサを実装する必要があるため、センサやその配線がパンタグラフの動特性に影響を与えることがある。また、高電圧下にセンサを設置するため、そのデータ伝送にテレメータなどの伝送装置およびその電源の確保が必要であり、ある程度の規模の測定装置が必要となる。近年、専用の電気検測車を持たない鉄道事業者から、営業車を活用して接触性能の測定を実施したい、という要望が挙がるようになってきたが、このような測定装置を営業車のパンタグラフに搭載することは困難である。また、一部の新幹線用パンタグラフでは、追従性能向上のために複雑な舟体構造を備えたパンタグラフが使用されているため、接触力測定用センサを舟体に実装することが困難なケースも生じている。

そこで筆者らは、パンタグラフにセンサを実装しない、もしくは実装するセンサを極力少なくして、接触力測定を実現する手法として、画像情報を活用した接触力測定手法を提案した。

\* 鉄道力学研究部 集電力学研究室

\*\* 鉄道力学研究部 集電力学研究室（現 東海旅客鉄道株式会社）

\*\*\* 株式会社 明電舎

## 2. 接触力測定の基本原則

まず、接触力測定の基本原則について述べる<sup>1)</sup>。ただし便宜的に、ばね系が舟体と枠組の間に1組だけ設けられている、いわゆる「2元系パンタグラフ」を例にとって説明する。図1および式(1)に示すように、パンタグラフの舟体に作用する接触力 $F_c$ は、舟体の慣性力 $F_I$ 、復元ばねに作用するばね力 $F_s$ 、ならびに舟体に作用する揚力 $F_a$ とつり合っている。

$$-F_c + (F_I + F_s + F_a) = 0 \quad (1)$$

したがって、これらの力を測定することで、接触力を算出することができる。

舟体の慣性力 $F_I$ は、舟体の加速度 $\ddot{x}_p$ （舟体変位 $x_p$ の時間の二階微分）に舟体質量 $m_p$ を乗じることによって求められる。ただし、舟体の弾性振動が卓越するような高い周波数領域まで接触力を測定する場合には、舟体の複数個所における加速度を測定したうえで、その各々に適切な等価質量を乗じることにより舟体の慣性力を求める必要がある。一方、復元ばねに作用するばね力（ばね反力） $F_s$ は、舟体と枠組との相対変位 $x_p - x_f$ （ $x_f$ は枠組変位）、すなわち、ばねの伸縮量を求め、これにばね定数 $k_p$ を乗じることにより求めることができる。これに対し、舟体に作用する揚力 $F_a$ を直接測定することは困難であるが、揚力が列車速度 $V$ の二乗に比例することを利用すれば、あらかじめ風洞試験を実施して速度に対する揚力の換算係数 $C_a$ を求め、これに速度の二乗を乗じることによって近似的に求めることが可能である。

以上より、式(1)を整理すると、

$$F_c = \sum_{i=1}^n m_{p,i} \frac{d^2 x_{pm,i}}{dt^2} + \sum_{j=1}^n k_{p,j} (x_{pk,j} - x_f) + C_a V^2 \quad (2)$$

となる。なお、慣性力とばね反力の算出に用いる舟体変位（加速度）の測定点を同一箇所では測定するとは限らないため、式(2)では慣性力を算出するために用いる舟体変位を $x_{pm}$ 、ばね力を算出するために用いる舟体変位を

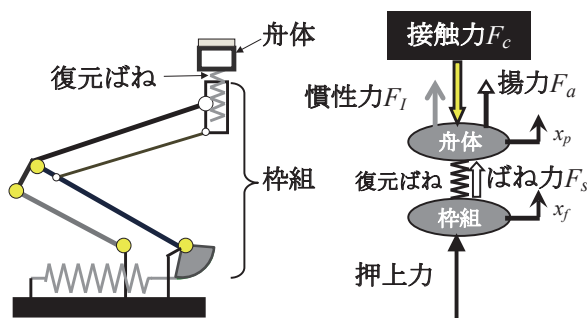


図1 舟体に作用する力のつり合い  
(2元系パンタグラフの例)

$x_{pk}$ としている。また、 $x_f$ は枠組の変位を、 $n_I$ は舟体加速度の測定点数を、 $n_s$ はばね反力の測定点数をそれぞれ示す。式(2)より、速度情報を列車から取得し、舟体と枠組の変位を時系列で正確に測定できれば、接触力を求めることが可能である。なお、舟体と枠組の間に摩擦要素やストップ要素が存在するような場合については、センサを別途内蔵して摩擦力を測定する必要がある。センサにより測定した摩擦力やストップによる反力を $F_d$ とすると、式(2)は

$$F_c = \sum_{i=1}^{n_I} m_{p,i} \frac{d^2 x_{pm,i}}{dt^2} + \sum_{j=1}^{n_s} k_{p,j} (x_{pm,j} - x_f) + C_a V^2 + \sum_{k=1}^{n_D} F_{d,k} \quad (3)$$

となる。ここで、 $n_D$ は減衰力やストップ反力の測定点の総数である。

従来手法では、舟体内部に設置した加速度計により慣性力(式(3)右辺第1項)を、ロードセルなどによりばね反力(式(3)右辺第2項)を、ひずみゲージなどにより摩擦力等(式(3)右辺第4項)を、それぞれ測定して接触力を算出している。この場合、①センサを舟体の実装する必要があるため動特性や揚力特性が変化する場合があること、②データ伝送にテレメータなどの特殊な伝送装置が必要となり測定システムの規模が大きくなること、③複雑な構造を有している舟体ではセンサ数が増大しセンサの実装が困難となること、などが問題となる。

## 3. 画像情報を活用した接触力測定手法

上記①～③の問題を解決する測定手法として、画像情報を活用して接触力を算出する手法(以下、「本測定手法」と記す)を開発した。以下では、摩擦要素やストップ要素を無視できる、つまりパンタグラフにセンサを実装する必要のない場合を例に、本測定手法について説明する。

### 3.1 測定原理

本測定手法による接触力測定装置の基本構成を図2に示す。舟体と枠組の変位を測定するために、白と黒の帯状の模様から構成されるマーカを舟体と枠組に貼り付ける。これらのマーカの動きをパンタグラフ近傍に設置したカメラにより画像として捉える。なお、画像の取得には種々の方法があるが、高い時間分解能と空間分解能が要求されること、舟体および枠組の特定の点の鉛直方向の動き(1次元方向)さえわかればよいこと、から本測定手法ではラインセンサカメラを用いることとした。

このようにして走行中のパンタグラフを撮影すると、図3左に示すような時間とともにマーカ位置が上下に変動する画像を取得できる。なお、図3はラインセンサカメラにより撮影した画像を横方向(時間方向)に並べて

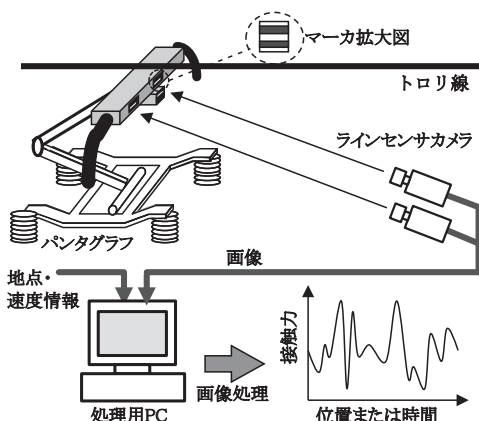


図2 画像情報を利用した接触力測定装置の基本構成

一枚の画像にしたものである。あらかじめ校正作業を実施し、画像上のマーカ位置から実際のマーカ位置をマッピングする関数を求めておくことで、図3右に示すように、舟体と枠組の上下変位を得ることができる。このようにして得られた変位量を式(2)に代入することで、接触力を求める。

### 3.2 接触力測定精度の向上

#### 3.2.1 変位測定の精度向上

本測定手法の測定精度は、舟体や枠組の変位測定精度に強く依存するため、ハードウェアとソフトウェアの両面から変位測定の精度向上を行った。

ハードウェア側の対策としては、空間・時間分解能が高いラインセンサカメラを使用し、パンタグラフの作用範囲を考慮しつつ可能な限り小さな視野角で撮影することとした。これは、マーカとラインセンサカメラの距離をできる限り短くするか、長い焦点距離のレンズをラインセンサカメラに取付けることに相当する。

ソフトウェア側の対策としては、空間分解能を向上させる手法として、正規化相関法を用いたテンプレートマッチング<sup>2)</sup>とサブピクセル処理<sup>3)</sup>を組み合わせ適用した。正規化相関法は、周囲の照度に影響されない安定したマッチング手法としてよく用いられる手法である。図4に示すように、テンプレート画像として各マーカの画像を登録し、これを走査させながら撮影画像とテンプレート画像との正規化相関係数  $R$  ( $0 < R \leq 1$ ) を

$$R = \frac{\sum_{i=1}^L (W_i T_i)}{\left( \sqrt{\sum_{i=1}^L W_i^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^L T_i^2} \right)} \quad (4)$$

により計算し、この値が大きい位置をマーカ位置として検出する。なお、 $L$ ,  $W$ ,  $T$ はテンプレート画像の長さ、撮影画像の輝度値、テンプレート画像の輝度値をそれぞれ示す。さらに、得られた相関係数  $R$  を空間補間するサブピクセル処理を行うことにより、ラインセンサカメ

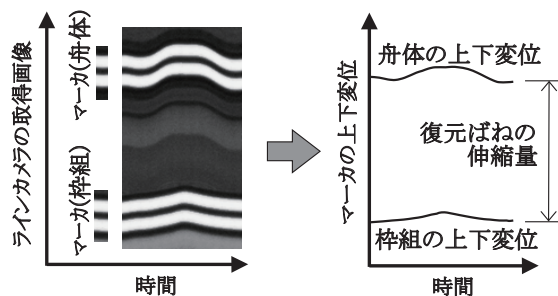


図3 ラインセンサカメラにより取得したマーカ画像と画像処理により得られる変位

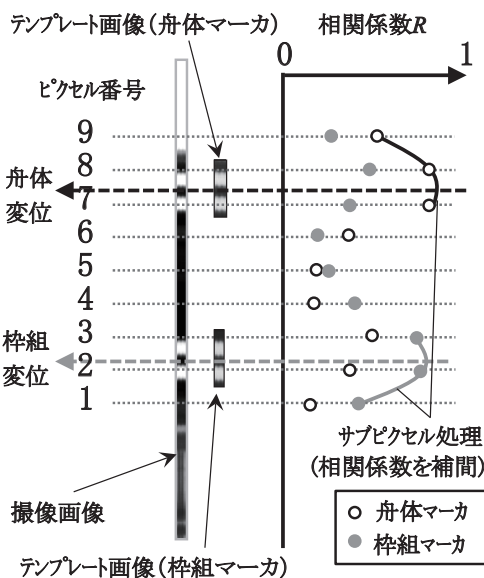


図4 正規化相関法とサブピクセル処理

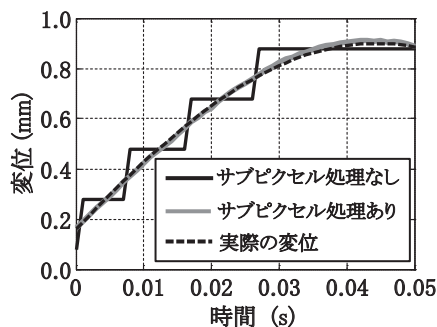


図5 サブピクセル処理による空間分解能の向上

ラ自体の空間分解能より高い分解能でマーカ位置を同定することが可能となる。サブピクセル処理の有無による変位測定結果を図5に示す。図5はマーカを上下加振し、その動きをラインセンサカメラで撮影することにより算出した変位量を示している。サブピクセル処理を施すことにより実際の変位に近い値を得ることが可能であることがわかる。

#### 3.2.2 パンタグラフ左右動の補正

パンタグラフは、上下方向の振動以外に、車両動揺により左右方向へ振動することがある。このような左右動が顕著な場合、ラインセンサカメラの視野がパンタグラ

特集：電力技術

フ上を左右に移動するため、接触力測定結果に誤差が生じる。そこで、図6 (a) のような特殊な形状を有するマーカ（以下では、三角マーカと記す）を用いることにより視野の左右移動量を求める<sup>4) 5)</sup>。三角マーカは、白と黒の矩形の縞模様ではなく、縞模様の幅が左右方向に連続的に変化するものをいう。例えば、三角マーカが上下方向へY、左右方向へX、それぞれ変位し、角度θで回転するとき（図6 (b)）、ラインセンサカメラにより測定される白、黒、白の比率がn:m:lであったとすると、

$$\theta = \arctan\left(\frac{2L(n-l)}{mB}\right) \quad (5)$$

$$X = \frac{m^2 - m(n+l) - 2(n-l)^2}{m(n+m+l)} L \cos\theta \quad (6)$$

$$Y = \frac{m^2 - m(n+l) - 2(n-l)^2}{m(n+m+l)} L \sin\theta \quad (7)$$

として変位X,Y、回転角度θを算出することができる。つまり、白色部分と黒色部分の比率を求めることにより、1次元方向（上下方向）の情報しか持たないラインセンサカメラでも、左右変位や回転変位を測定することができる。図6 (c) に三角マーカの撮影画像例を示す。図3と同じくラインセンサにより撮影した画像を横方向（時間方向）に並べて1枚の画像にしたものであるが、マーカの運動の種類（左右並進・回転）に応じて異なる撮影画像が得られることがわかる。

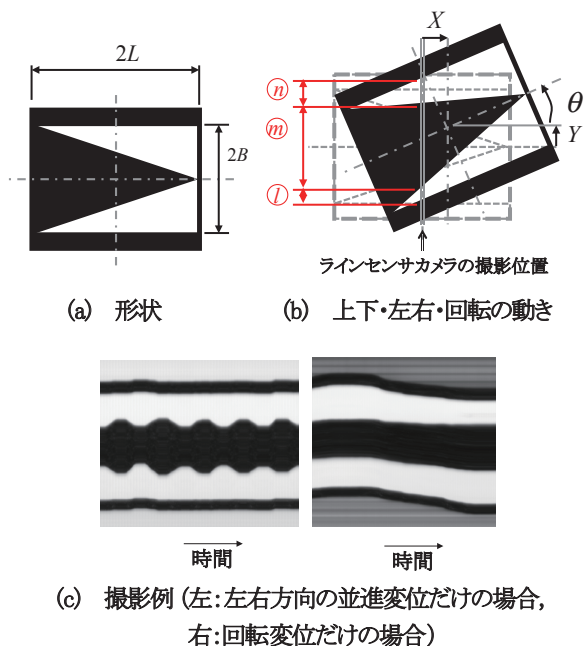


図6 三角マーカ

3.2.3 車両上下振動の補正

ラインセンサカメラにより測定される変位は、厳密に言えば、舟体の絶対変位ではなく、ラインセンサカメラ

と舟体の相対変位である。そのため、車両の上下振動に応じてカメラ自身も上下方向に大きく振動するため、観測した変位と実際の舟体変位が異なり、測定誤差が生じる。そこで、車両の上下振動による影響を低減するために、ラインセンサカメラに加速度計を設置して車両の上下振動の影響を補正することとした。具体的には、ラインセンサカメラにより測定した舟体変位  $x_{pl}$  と加速度計による測定値  $A_{ac}$  から舟体加速度  $\ddot{x}_p$  を

$$\ddot{x}_p = \frac{d^2 x_{pl}}{dt^2} - A_{ac} \quad (8)$$

として算出することにより舟体の絶対加速度を推定する。ただし、ばね反力  $F_s$  については舟体と枠組の相対変位を求めればよいことから、このような補正は必要ない。

なお、ラインセンサカメラの設置台の剛性が低いと、振動が誘起され測定誤差が生じる。この場合、設置台の形状によっては、上下方向だけではなく左右方向にも振動が誘起され、上記の補正だけでは測定誤差を低減することが困難である。そのため、設置台の剛性をできる限り高くすることで、このような振動が誘起されないようにする必要がある。

3.3 精度検証

本測定手法の精度検証を行うため、図7に示すような測定精度検証試験を実施した。実機パンタグラフの周辺にラインセンサカメラと照明を配置するとともに、パンタグラフの舟体と枠組にマーカを貼付し、3.1節に記載した方法に基づいてパンタグラフに作用する接触力を測定した。なお、後述する実車への適用を想定し、本試験では実車に搭載される撮影機材と同じものを用いるとともに、実車におけるカメラ配置と同一条件で試験を行った。使用したラインセンサカメラは、スキャンレートが4.7kHz、画素数が約7000ピクセルである。本試験では、ワイヤとアルミフレームから成る治具を用いて加振機により舟体のすり板上面を加振して変動接触力を再現するとともに、加振点にロードセルを設置することで接触力の真値（加振力）を測定した。周波数領域において連続的な測定精度を確認するために、加振波形として疑似ランダム波を用いた。

以上の条件のもとで、本手法によって測定した接触力（推定力）をロードセルで測定した真値（加振力）と比較し、測定精度を評価した結果を図8に示す。図8は推定力と加振力の伝達関数(推定力/加振力)を示している。図に示すとおり、20Hz以下の周波数では、伝達関数のゲインと位相はそれぞれほぼ1.0、0°であり、本測定手法は良好な接触力測定精度を有していることがわかる。なお、接触力測定精度の許容値については、現在、新規

国際規格（IEC 規格）の策定作業のなかで審議中であるが、その原案である EN50317: 2012 に定められている要求事項（DC～20Hz の範囲における誤差が 10% 以下であること）を参照すると、本測定手法はこの要求を満足しており、実用上十分な精度で接触力を測定可能である。

#### 4. 実車への適用事例

図 9 に本測定手法の実車適用例を示す。なお、本装置を搭載する列車では、パンタグラフの左右動が測定精度に与える影響は小さいと判断したため、3.2.2 項に記載した三角マーカではなく、白と黒の帯状のマーカを使用した。また、車両の上下振動については、当該列車が走行する軌道状態が良好であり、その影響が小さいと判断したため、3.2.3 項の補正は行っていない。

この列車には 2 基のパンタグラフが搭載されているが、そのうちパンタグラフ A では接触力、トロリ線の摩耗と左右偏位、パンタグラフ高さ、離線などを、パンタグラフ B では離線のみを、それぞれ測定する。本例の車両は営業車であるが、これらの測定項目は基本的に画像処理をベースとした測定システムであり、全ての測定機器類を既設碍子オオイ内部に設置可能であるため、集電性能への影響の懸念がなく、営業車で運用にも支障がない。そのため、高周波の測定を実現している。

図 10 は本線走行中における接触力測定結果の一例である。離線アークが発生している箇所では接触力もほぼゼロとなっていること、パンタグラフ高さが急激に減少している箇所では接触力が大きくなることなど、妥当な結果が得られている。ただし、当該車両には高圧母線で接続された複数のパンタグラフが搭載されているため、パンタグラフ A の接触力がゼロとなっても必ず離線アークが発生するわけではない。図中にはオーバーラップ区間が含まれているが、この場所で顕著な接触力変動は観測されておらず、その架線構成に問題はないと判定できるほか、離線発生に対する径間周期ならびにハンガ周期の接触力変動の寄与を定量的に評価できる（図 10 最下段参照）。こうした評価は接触力を測定してはじめて可能となるものである。

#### 5. 結論

画像情報を活用した接触力測定手法を提案した。本手法は、パンタグラフにセンサを実装することなく、もしくは実装するセンサを極力少なくして、接触力測定が実現可能であるため、測定に対する制約が少ないという特徴を有している。本測定手法による測定精度は良好であり、EN 規格に定められている要求事項を満足するこ

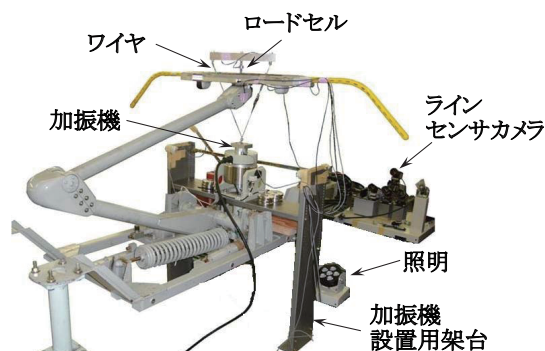


図 7 測定精度検証試験

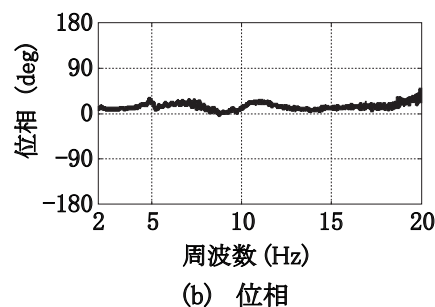
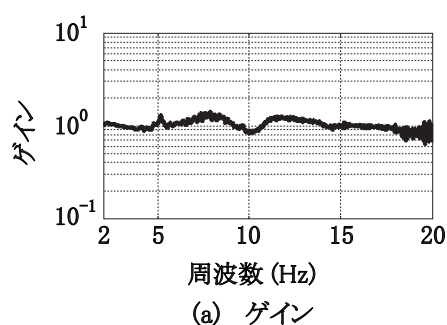


図 8 本測定手法の測定精度（推定力 / 加振力）

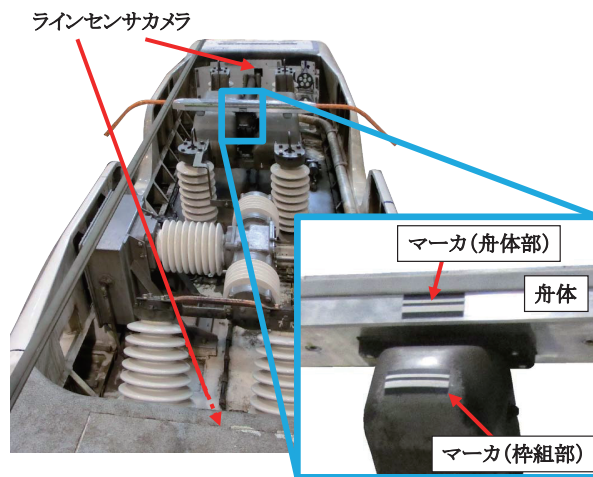
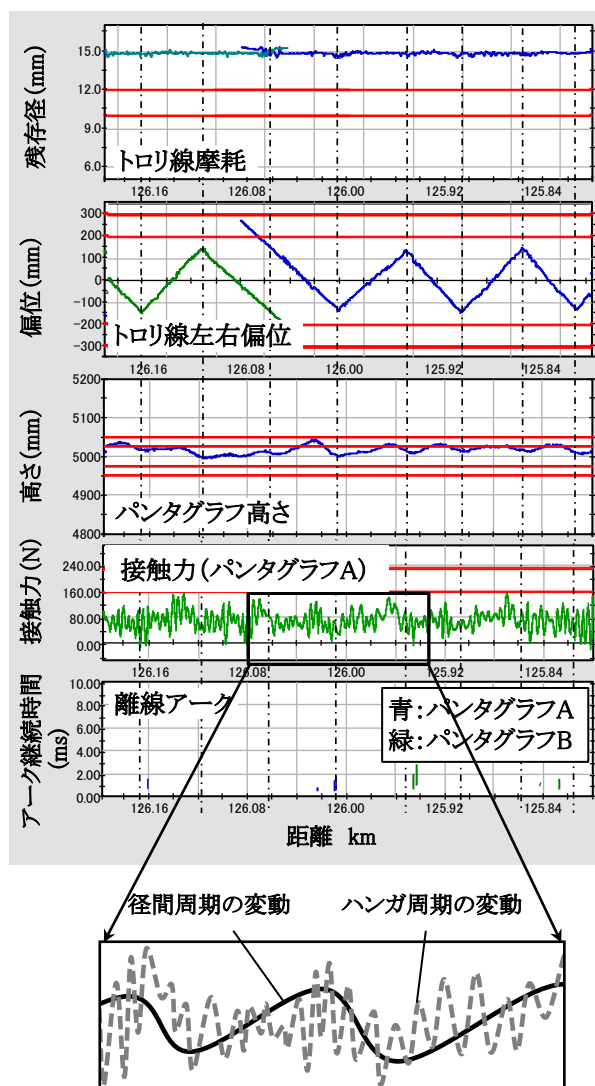


図 9 実車適用例



※速度280km/h走行時の測定波形  
 ※縦の一点鎖線は電柱位置を示す

図 10 測定波形の例

とも確認した。また、考え得る測定誤差についても考察し、補正方法を開発した。現在、本測定手法に基づく接触力測定装置が実車に搭載され、運用中である。本手法は営業車検測に適しており、今後の適用拡大が期待される。

なお、本手法は、鉄道総研と株式会社明電舎との共同研究により開発したものである。

文 献

- 1) 池田充：架線・パンタグラフ間の接触力測定手法に関する研究（第1報 パンタグラフの慣性力評価方法の改善による接触力測定可能周波数範囲の拡大，日本機械学会論文集C編，Vol.70，694号，pp.92-99，2004
- 2) 江尻正員監修：画像処理産業応用総覧 上巻（基礎・システム技術編），フジテクノシステム社，p.51，1994
- 3) 清水雅夫，奥富正敏：画像のマッチングにおける高精度なサブピクセル推定の意味と性質，電子情報通信学会論文誌，D2，Vol.J85-D2，No.12，pp.1791-1800，2002
- 4) 特許第5097596号，ラインセンサを利用した計測装置，2012
- 5) 小山達弥，池田充，中村幸太郎，田林精二，庭川誠：ラインCCDカメラと台形マーカを用いたパンタグラフの接触力測定手法，日本機械学会第10回評価・診断に関するシンポジウム講演論文集，講演番号101，pp.1-5，2011