

# 画像処理技術を活用したパンタグラフ接触力測定手法

鉄道力学研究部 集電力学

研究員 中村 幸太郎

## 1. はじめに

集電系の性能評価や電車線保守の効率化の手段として、パンタグラフ接触力測定とその活用に期待が高まりつつある。パンタグラフ接触力測定手法としては、パンタグラフの舟体に各種センサを組み込んで測定する方法が確立されているが、舟体という限られた空間の中にセンサを組み込む必要があるため、種々な制約により実施が困難な場合がある。本発表では、舟体に組み込むべきセンサを減らす、あるいはセンサを組み込む必要のない接触力測定方法として、画像処理技術を用いた接触力測定手法を提案するとともに、測定精度を定置試験によって検証した結果を報告する。

## 2. 画像処理技術を活用したパンタグラフ接触力測定手法

### 2.1. パンタグラフ接触力の測定原理<sup>(1)</sup>

代表的なパンタグラフ測定原理を説明する。まず、パンタグラフを図 1 のように2つの部分に区分し、接触力は常にその一方側に作用するものとして、接触力が作用する側を分系 1、他方の側を分系 2 と記述する。トロリ線からパンタグラフへ作用する接触力を  $f_c$ 、分系 2 と分系 1 の結合部に作用する鉛直方向の内力を  $f_{b,i} (i = 1 \dots p)$ 、分系 1 の鉛直方向慣性力を  $f_{ine}$ 、分系 1 に作用する揚力を  $f_L$  とする。このとき、分系 1 に関する力のつり合いから次式が成り立つ。

$$f_c = \sum_{i=1}^p f_{b,i} + f_{ine} + f_L \quad (1)$$

したがって、 $f_b, f_{ine}, f_L$  をそれぞれ測定することができれば、接触力が測定できる。

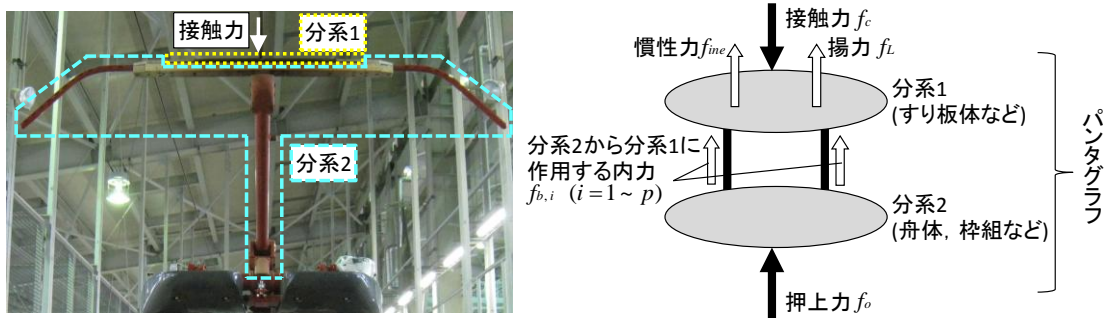


図 1 パンタグラフに作用する力

実際の測定では分系 1 に作用する揚力を独立に測定することは難しいため、通常は次式のように接触力として  $f_c - f_L$  を測定し、速度に応じて  $f_L$  を補正する。

$$f_c - f_L = \sum_{i=1}^p f_{b,i} + f_{ine} \quad (2)$$

### 2.2. 画像処理技術を活用した接触力測定手法

画像処理技術を活用した接触力測定手法の概念図を図 2 に示す。復元ばねによって支持される可動す

り板の集合(図2の緑色点線で囲んだ部分)を分系1と定めると、式(2)における $f_b, f_{ine}$ はそれぞれ、復元ばねから受けるばね反力、可動すり板の慣性力に対応する。ばね反力はばね定数と可動すり板-舟体間の相対変位の積、慣性力は可動すり板の質量と可動すり板の絶対加速度の積で求められるので、 $f_b, f_{ine}$ は可動すり板、舟体の鉛直方向絶対変位 $y_i, y_{b,i}$ を用いて次式のように表せる。

$$f_b = \sum_{i=1}^N k_i (y_i - y_{b,i}), \quad f_{ine} = \sum_{i=1}^N m_i \ddot{y}_i \quad (3)$$

ただし、 $k_i, m_i$ はそれぞれ復元ばねのばね定数、可動すり板の質量である。また、 $\ddot{y}_i$ は $y_i$ の時間に関する2階微分である。式(3)より、可動すり板と舟体の絶対変位を測定することで接触力を求めることができる。

本手法では、可動すり板、舟体それぞれの絶対変位をラインセンサを用いて非接触で測定する。具体的には、可動すり板、舟体に白黒縞模様のマーカを貼り付け、これをラインセンサで撮影し画像処理によって変位を測定する。ラインセンサとは、受光素子が1列で並べられたカメラで、エリアカメラよりも時間分解能が高いという特徴がある。得られる画像は1次元であり、連続的に撮影することで図3のような時刻歴画像を得ることができる。

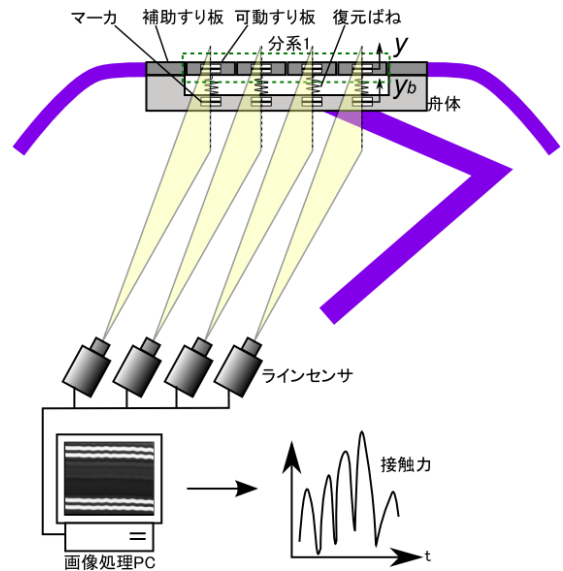


図2 画像による接触力測定概念図

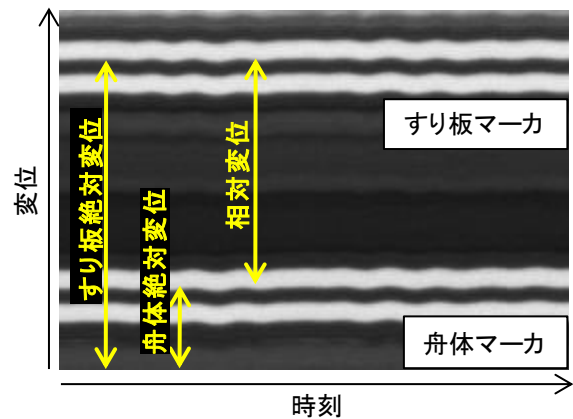


図3 ラインセンサ撮影画像

### 2.3. 画像処理による変位測定

ラインセンサの撮影画像から変位を算出する画像処理のフローを図4に示す。それぞれの処理について以下に述べる。

#### 2.3.1. 正規化相関法によるマーカ位置検出

図3の撮影画像から正規化相関法を用いてマーカの位置(ピクセル値)を検出する。テンプレート画像としてマーカの1次元画像を登録し、テンプレート画像を図3の上下方向に走査しながら、次式で示される正規化相関係数が最大となる位置をマーカ位置として検出する。

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

ただし、撮影画像の輝度値 $W_i$ 、テンプレート画像の輝度値 $T_i$ 、テンプレート画像の長さ $L$ である。

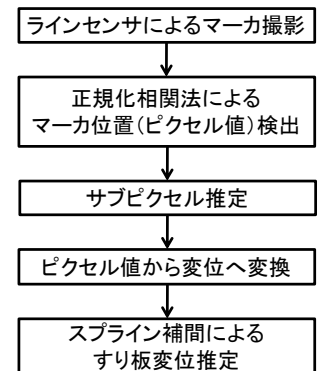


図4 画像処理フロー

### 2.3.2. サブピクセル推定とピクセル値から変位への変換

前項で検出したマーカ位置を、画像分解能よりも小さい値で推定し精度を向上させる方法がサブピクセル推定である。今回はエッジによるサブピクセル推定<sup>(2)</sup>(以下、エッジ推定)と、正規化相関係数を用いたサブピクセル推定<sup>(3)</sup>(以下 NCC 推定)の 2 つを比較し、より精度の良い NCC 推定を用いて最終的なマーカ位置を推定した。サブピクセル推定によってピクセル位置の推定精度が向上する様子を図 5 に示す。サブピクセル処理なしの場合の分解能 0.2mm に対し、NCC 推定によってその 1/10 程度の変位を精度良く推定していることが分かる。そして、最終的なマーカ位置(ピクセル値)から、あらかじめ求めてあるピクセル値と変位間の変換式を用いて変位とした。

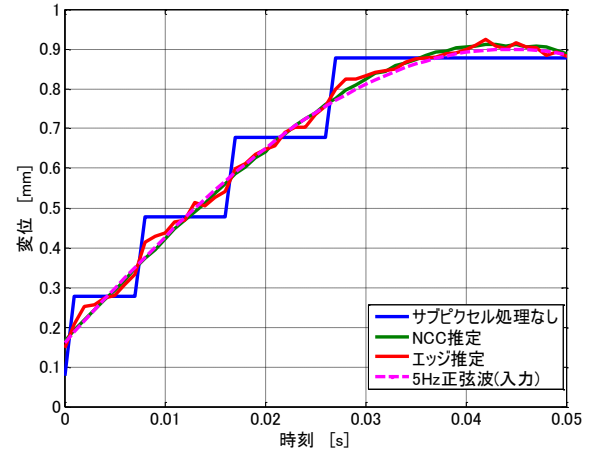


図 5 サブピクセル推定

### 2.3.3. スプライン補間によるすり板変位推定

接触力測定では、全ての可動すり板の変位を求める必要がある。これを画像処理で行うためには、すべての可動すり板に対しラインセンサとマーカを貼り付ける必要があり、可動すり板の数が多くは現実的ではない。そこで、ラインセンサの数を削減するため、スプライン補間を用いてすり板変位を推定した。その方法を図 6 に示す。ラインセンサから求めたすり板変位 4 点を通り、かつ補助すり板の両端が舟体に固定という境界条件を満たすスプライン曲線を求め、その曲線上の点として未知のすり板変位を推定した。

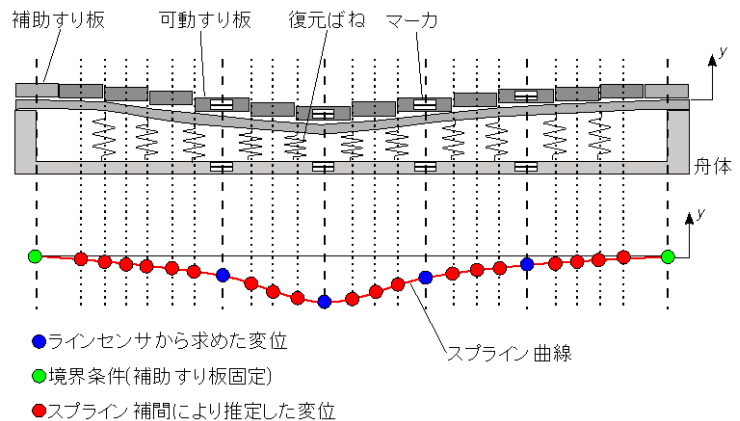


図 6 スプライン補間による変位推定

## 3. 接触力測定精度検証のための加振試験

2章で提案した画像処理による接触力測定方法の精度を検証するため、実機パンタグラフを使用した加振試験を行った。

### 3.1. 試験方法

接触力測定精度検証のための加振試験を説明する。マーカを貼り付けた実機パンタグラフを加振器によって上下に加振し、それをラインセンサで撮影し画像処理により接触力を測定する。加振試験における接触力の真値は加振器とパンタグラフの間に働く力であるので、この力をロードセルで測定し比較することで精度を検証する。周波数領域での精度検証は、ロードセルでの測定値を入力、画像処理による接触力測定値を出力とした伝達関数を求めることで行う。伝達関数のゲインが 1 に近いほど精度良く測定できていることを示す。加振試験の様子を図 7 に示す。

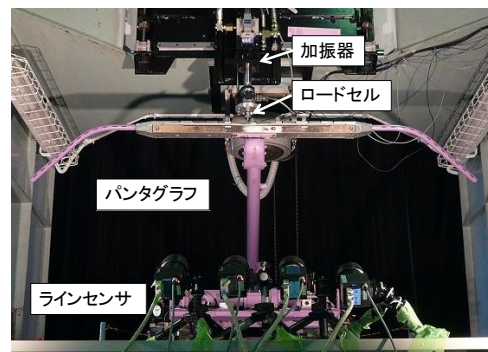


図 7 パンタグラフ加振試験

### 3.2. 供試パンタグラフと測定方法

精度検証で使用したパンタグラフは、新幹線用パンタグラフ A である。パンタグラフ A は追従性能を向上させるため可動すり板が 12 枚に分割されている。

パンタグラフの接触力測定方法について説明する。全 12 枚の可動すり板のうち 4 枚の可動すり板、およびその直下の舟体の計 8 箇所にはマーカを貼り付け、ラインセンサ 4 台で撮影しそれぞれの変位を計測した。残りのすり板変位は、2.3.3 項で述べた推定法を用いて算出した。パンタグラフの外観を図 8 に示す。

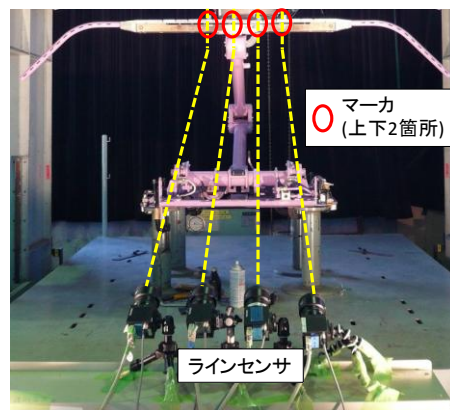


図 8 供試パンタグラフ

### 3.3. 試験結果

加振試験結果として、10Hz で正弦波加振したときの接触力時刻歴波形を図 9(a)に、30Hz までの接触力測定精度を図 9(b)に示す。時刻歴波形を見ると、画像処理による接触力がロードセルの値と良く一致している。また、周波数領域の結果をみると、0~17Hz で精度良く接触力が測定されており、提案した手法で接触力測定が可能であることが確認できた。

パンタグラフ接触力の測定精度が悪化している原因について考察する。17Hz より高い周波数において精度が悪化したのは、すり板変位の推定方法に問題があるためと考える。本試験で使用した 4 台のラインセンサで変位を計測しスプライン補間で他のすり板の変位を推定する方法では、原理的に 5 つ以上の振動モードが重なり合っていると、それぞれを精度よく分離することが不可能となる。供試パンタグラフでは 20Hz 付近にすり板振動モードが多数存在しているため精度が悪化したと考えられる。

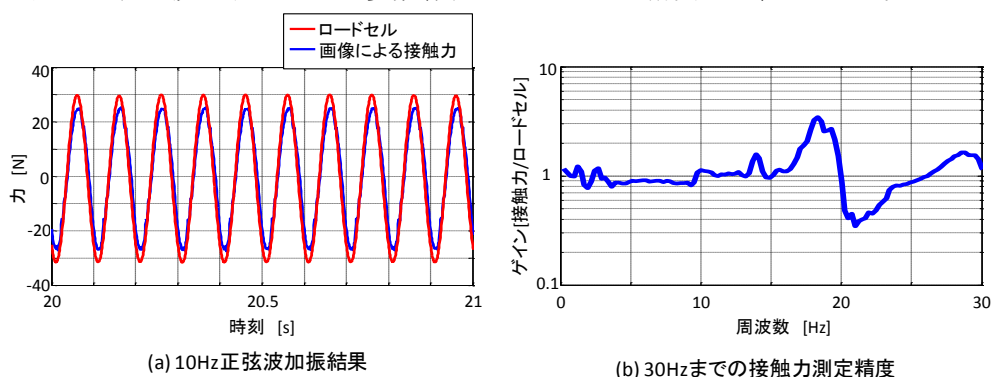


図 9 加振試験結果

## 4. まとめ

本発表では、舟体に組み込むべきセンサを減らす、あるいはセンサを組み込む必要のない接触力測定方法として、画像処理技術を用いた接触力測定手法について報告した。提案した測定手法を用いて実機パンタグラフで加振試験を行い、画像処理技術を用いた接触力測定が可能であることを確認した。今後は、より広範な周波数領域での測定精度向上などの課題に取り組んでいく予定である。

なお、本発表は株式会社 明電舎との共同研究による成果である。

#### 【参考文献】

- (1) 池田充, 白田隆之: 「架線・パンタグラフ間の接触力測定手法の研究」, 鉄道総研報告, No.6, Vol.14, pp.7-12, 2000
- (2) 高田征吾, 徐剛: 「3 次テーラー展開と曲率補正を用いたサブピクセルエッジ抽出」, View2009, I-39, pp.290-295, 2009
- (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手法」, 電子情報通信学会論文誌(D-II), No.7, Vol.J84-D-II, pp.1409-1418, 2001