

# 架線・パンタグラフ系の接触力推定に対する カルマンフィルタの適用可能性

小林 樹幸\* 山下 義隆\*

Fundamental Study on Contact Force Estimation Method of Pantograph/Catenary Systems using Kalman Filter

Shigeyuki KOBAYASHI Yoshitaka YAMASHITA

The contact force between overhead wires and pantographs is an important indicator for evaluating the current collection performance. This study proposes to use a Kalman filter as a model-based approach to estimate the contact force. In this paper, an external force identification method based on an augmented state-space equation is applied to solve the dynamics of pantographs. First, the validity of the proposed method is verified through by simulations based on a 2-degree-of-freedom model, in order to clarify the effect of measurement error, modeling error and variance of the contact force on the contact force estimation. A finite element model of the pantograph is then used to investigate the effect of modeling errors on the accuracy of contact force estimation.

キーワード：パンタグラフ，電車線，接触力，カルマンフィルタ，シミュレーション，有限要素法

## 1. はじめに

電気鉄道において車両屋根上に設置されるパンタグラフは、架線から車両へ電力を導く役割を担う。そのため、車両への安定的な電力供給を実現するためには、架線に対するパンタグラフの追従性能を確保する必要がある。追従性能の指標値の一つとして架線・パンタグラフ間の接触力が用いられており、国際規格では最高走行速度における接触力変動の標準偏差の上限值等が規定されている<sup>1)</sup>。接触力は、架線を電化柱に固定している支持点の通過周期や、トロリ線を支持するハンガの通過周期等に起因して変動し、IEC 62846では20Hzまでの測定精度が求められる<sup>2)</sup>。

接触力の測定手法として、パンタグラフ舟体に作用する慣性力・復元力と接触力との力のつり合い式に基づいて接触力を陽に求める方法（以下、つり合い法）が提案されており<sup>3)</sup>、現車走行試験等で活用されている<sup>4)</sup>。つり合い法では、パンタグラフ舟体に加速度計とひずみゲージを取り付け、これらのセンサで測定した時刻歴データと校正係数との線形結合によって接触力を求める。この方法は計算コストが小さく、リアルタイムでの演算も容易にできるため、実時間計算に基づくHardware-in-the-loop simulation手法等でも用いられている<sup>5)</sup>。一方で、接触力を高精度に測定するためには多くの加速度計とひずみゲージをパンタグラフ舟体に取り付ける必要がある。そのため、舟体にセンサを実装するスペースが限られる新幹線用パンタグラフでは、適用が容易ではないと

いう課題がある。

ところで、構造物へ作用する接触力のような加振力や、変位等の状態量を高精度に推定する手法として、カルマンフィルタが様々な分野で用いられている<sup>6)</sup>。カルマンフィルタとは、対象物の力学モデルと加速度等の観測値から状態量を推定する手法であり、モデル化誤差や観測誤差等を考慮することで、誤差や不確かさが存在する場合であっても最適な状態推定を行えるという特徴を有する。車輪・レールの分野では、車輪・レール間の相対的なアタック角と接触位置の状態推定に対して、推定システムの非線形性を考慮したカルマンフィルタが用いられている<sup>7)</sup>。また、Lourensらは加振力を状態量に組み込む拡大カルマンフィルタ（Augmented Kalman Filter）を提案し、自由支持された梁構造物を対象として、打撃加振によるインパルス加振力の推定と、加振器を用いた定常波加振による掃引正弦波加振力の推定を行うことで妥当性の検証を行った<sup>8)</sup>。

本報告では、架線・パンタグラフ系の接触力推定に対する拡大カルマンフィルタの適用可能性の検討を行う。はじめにパンタグラフの2元系モデルを用いて、パラメータや誤差等が推定精度に与える影響について検討する。つぎに有限要素モデルに基づいて、モデル化誤差が推定精度に与える影響について検討を行う。なお、本報告では拡大カルマンフィルタを便宜的にカルマンフィルタと称する。

\* 鉄道力学研究部 集電力学研究室

## 2. カルマンフィルタによる接触力推定手法

### 2.1 拡大状態方程式

パンタグラフに対する入力である加振力を状態量に含める拡大状態方程式を定義して、これにカルマンフィルタを適用することで加振力推定を行う手法について述べる。

拡大状態空間モデルを定義するために、モデル化誤差  $\mathbf{u}(k)$  を考慮した離散時間状態方程式を導入する。

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}_d \mathbf{x}(k) + \mathbf{B}_d \mathbf{v}(k) + \mathbf{u}(k) \quad (1)$$

ここで  $k$  は離散時刻を表す整数であり、 $\mathbf{A}_d$  と  $\mathbf{B}_d$  はそれぞれ離散時間状態行列と入力行列である。 $\mathbf{x}(k)$  と  $\mathbf{v}(k)$  は、それぞれ状態量ベクトルと接触力を含む入力ベクトルであり、 $\mathbf{v}(k)$  の時刻  $k$  から  $k+1$  への更新は次式で行う。

$$\mathbf{v}(k+1) = \mathbf{v}(k) + \boldsymbol{\eta}(k) \quad (2)$$

ここで  $\boldsymbol{\eta}(k)$  は入力の更新量である。カルマンフィルタを用いて接触力を推定するために、状態量ベクトル  $\mathbf{x}(k)$  に  $\mathbf{v}(k)$  を含めることで、以下のように拡大状態空間モデルを定義する。

$$\mathbf{x}_a(k) \equiv \begin{Bmatrix} \mathbf{x}(k) \\ \mathbf{v}(k) \end{Bmatrix} \quad (3)$$

これにより、拡大状態方程式は次式で与えられる。

$$\mathbf{x}_a(k+1) = \mathbf{A}_a \mathbf{x}_a(k) + \boldsymbol{\zeta}(k) \quad (4)$$

ここで  $\mathbf{A}_a$  は拡大状態空間モデルの遷移行列を表し、次式で与えられる。

$$\mathbf{A}_a \equiv \begin{bmatrix} \mathbf{A}_d & \mathbf{B}_d \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \quad (5)$$

また、 $\boldsymbol{\zeta}(k)$  は  $\mathbf{u}(k)$  と  $\boldsymbol{\eta}(k)$  から成り、次式で表される。

$$\boldsymbol{\zeta}(k) \equiv \begin{Bmatrix} \mathbf{u}(k) \\ \boldsymbol{\eta}(k) \end{Bmatrix} \quad (6)$$

本モデルの観測方程式は次式となる。

$$\mathbf{y}(k) = \mathbf{C}_a \mathbf{x}_a(k) + \mathbf{w}(k) \quad (7)$$

ここで  $\mathbf{y}(k)$  は加速度等の観測値であり、 $\mathbf{C}_a$  は

$$\mathbf{C}_a = [\mathbf{C} \quad \mathbf{J}] \quad (8)$$

であり、 $\mathbf{C}$  は観測行列、 $\mathbf{J}$  は直達行列である。また、 $\mathbf{w}(k)$  は観測誤差である。

### 2.2 カルマンフィルタのアルゴリズム

カルマンフィルタでは、2.1 節における  $\mathbf{u}(k)$ 、 $\mathbf{v}(k)$ 、 $\mathbf{w}(k)$ 、 $\boldsymbol{\eta}(k)$  および  $\mathbf{x}_a(k)$  を確率過程として扱い、これらはその平均値からどの程度変動し得るかを表す統計量である分散によって特徴付けられる。この仮定の下で状態量を推定する問題を考える。カルマンフィルタによる状態推定アルゴリズムについて述べるための準備として、事後推定値  $\hat{\mathbf{x}}_a(k)$  と状態量ベクトルとの誤差を表す事後状態誤差ベクトル  $\tilde{\mathbf{x}}_a(k) = \mathbf{x}_a(k) - \hat{\mathbf{x}}_a(k)$  を用いて、事後誤差共分散行列  $\mathbf{P}(k)$  を次式で定義する。

$$\mathbf{P}(k) = E[\tilde{\mathbf{x}}_a(k) \tilde{\mathbf{x}}_a^T(k)] \quad (9)$$

ここで  $E[\quad]$  は期待値を表す。また、状態方程式のモデル化誤差  $\mathbf{u}(k)$  の共分散行列  $\mathbf{Q}$  を次式で定義する。

$$\mathbf{Q} = E[\mathbf{u}(k) \mathbf{u}^T(k)] \quad (10)$$

観測誤差  $\mathbf{w}(k)$  の共分散行列  $\mathbf{R}$  を次式で定義する。

$$\mathbf{R} = E[\mathbf{w}(k) \mathbf{w}^T(k)] \quad (11)$$

入力の更新量  $\boldsymbol{\eta}(k)$  の共分散行列  $\mathbf{S}$  を次式で定義する。

$$\mathbf{S} = E[\boldsymbol{\eta}(k) \boldsymbol{\eta}^T(k)] \quad (12)$$

なお、これらの共分散行列  $\mathbf{Q}$ 、 $\mathbf{R}$ 、 $\mathbf{S}$  はいずれも本手法における調整パラメータであり、その値を適切に決定する必要がある。

つぎに、拡大状態空間モデルにおける多変数時系列データに対するカルマンフィルタのアルゴリズムについて述べる。予測ステップでは事前状態推定値を次式で計算する。

$$\hat{\mathbf{x}}_a^-(k) = \mathbf{A}_a \hat{\mathbf{x}}_a(k-1) \quad (13)$$

事前誤差共分散行列は次式で計算する。

$$\mathbf{P}^-(k) = \mathbf{A}_a \mathbf{P}(k-1) \mathbf{A}_a^T + \mathbf{Q}_a \quad (14)$$

ただし  $\mathbf{Q}_a$  は以下の通りである。

$$\mathbf{Q}_a \equiv \begin{bmatrix} \mathbf{Q} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{S} \end{bmatrix} \quad (15)$$

フィルタリングステップでは、次式によりカルマンゲイン  $\mathbf{G}(k)$  を計算する。

$$\mathbf{G}(k) = \mathbf{P}^-(k) \mathbf{C}_a^T (\mathbf{C}_a \mathbf{P}^-(k) \mathbf{C}_a^T + \mathbf{R})^{-1} \quad (16)$$

つぎに、状態推定値を次式により計算する。

$$\hat{\mathbf{x}}_a(k) = \hat{\mathbf{x}}_a^-(k) + \mathbf{G}(k)(\mathbf{y}(k) - \mathbf{C}_a \hat{\mathbf{x}}_a^-(k)) \quad (17)$$

最後に、事後誤差共分散行列を次式により計算する。

$$\mathbf{P}(k) = (\mathbf{I} - \mathbf{G}(k)\mathbf{C}_a)\mathbf{P}^-(k) \quad (18)$$

式(13)～(18)を各時刻において計算することにより接触力推定を行う。

ただし、 $\mathbf{A}_a$ と $\mathbf{C}_a$ はパンタグラフの力学モデルに基づく変数であり、これらの値はパンタグラフの加振試験等からモデルのパラメータを同定することで決定する。

### 3. 2元系モデルのシミュレーションによる検証

はじめに、新幹線用シングルアームパンタグラフを2個の質点でモデル化した2元系モデルを用いた時刻歴応答シミュレーションに基づき、カルマンフィルタによる接触力推定を行うことで、手法の適用可能性を確認する。3.2節では本手法の調整パラメータである入力の新更新量 $\boldsymbol{\eta}(k)$ の共分散行列 $\mathbf{S}$ が推定精度に与える影響について検討を行う。3.3節では観測誤差が推定精度に与える影響について検討を行い、3.4節では2元系モデルのパラメータ同定誤差が推定精度に与える影響について検討を行う。

#### 3.1 シミュレーションの概要

本章ではパンタグラフの力学モデルに対して強制変位加振を行うシミュレーションを実施し、観測値である応答加速度にカルマンフィルタを適用することで接触力を推定する。シミュレーションの対象は、図1に示すパンタグラフの2元系モデルである。図1において $m_1$ はすり板の等価質量、 $m_2$ は舟体と枠組の等価質量、 $k$ と $c_1$ はそれぞれすり板・舟体間の剛性と減衰を、 $c_2$ は枠組基部に取り付けられているパンタグラフダンパの減衰を、 $P_0$ は静押上力を表す。また、 $f_c$ は接触力である。本モデルの各パラメータの値を表1に示す。

本シミュレーションでは、すり板に相当する質点1に対して、片振幅10mm、周波数2Hzの正弦波で強制変位加振を行う。時刻歴応答計算によって接触力の真値を求めるとともに、本計算から得られる質点1および質点2における加速度の時刻歴波形に基づいて、カルマンフィルタによって接触力を推定する。

本シミュレーションでは、式(3)の状態量は次式となる。

$$\mathbf{x}_a(k) = \{x_1(k) \quad x_2(k) \quad \dot{x}_1(k) \quad \dot{x}_2(k) \quad f_c(k) \quad P_0\}^T \quad (19)$$

カルマンフィルタによる接触力推定を行う際は、 $P_0$ の初期値を54Nとし、それ以外の初期値はすべて0とした。また、事後誤差共分散行列 $\mathbf{P}(k)$ の初期値は単位行列とした。観測誤差 $\mathbf{w}(k)$ の共分散行列 $\mathbf{R}$ は、加速度信号に与えた観測誤差の標本分散・共分散を用いた。

#### 3.2 調整パラメータの値が推定精度に与える影響

はじめに、調整パラメータが接触力推定に与える影響について検証する。本研究では、調整パラメータであるモデル化誤差 $\mathbf{u}(k)$ の共分散行列 $\mathbf{Q}$ と、入力の新更新量 $\boldsymbol{\eta}(k)$ の共分散行列 $\mathbf{S}$ を以下のように設定した。

$$\mathbf{Q} = \text{diag}[10, 10, 10, 10], \quad \mathbf{S} = \text{diag}[\sigma^2, 10] \quad (20)$$

ここで、式(20)に示す各要素は $\mathbf{Q}$ については左から、質点1の変位、速度、質点2の変位、速度に対応し、 $\mathbf{S}$ については接触力、静押上力に対応する。このうち、 $\mathbf{S}$ の1つ目の成分である $\sigma^2$ は接触力の時間更新量の分散を表し、接触力推定に対する影響が大きいパラメータである。本節では、 $\sigma^2$ の値と接触力推定精度との関係を調査する。

シミュレーションによって得られた接触力と、カルマンフィルタによる接触力の推定結果との比較を図2に示す。 $\sigma^2 = 10^3$ の場合には接触力の推定値はシミュレーション結果に対して過小評価される傾向にある。一方、 $\sigma^2 = 10^7$ とすることで推定値とシミュレーション結果は

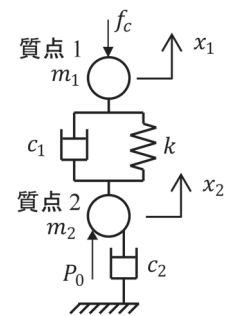


図1 パンタグラフの2元系モデル

表1 2元系モデルのパラメータ

パラメータ	値
$m_1$	3 kg
$m_2$	15 kg
$k$	105 kN/m
$c_1$	10 Ns/m
$c_2$	50 Ns/m
$P_0$	54 N

ほぼ一致することがわかる。 $\sigma^2$  が大きいとカルマンゲインが大きくなるため、観測データに対するフィルタの応答性が向上する。ただし、 $\sigma^2$  の値を  $10^7$  からさらに増加させても推定結果に大きな変化が認められなかったため、本報告では式 (20) において  $\sigma^2 = 10^7$  として検討を行う。

このように、本研究では調整パラメータの値を、接触力の真値と推定値を確認しながら試行錯誤的に決定したが、本来は接触力の真値は未知のため何らかの方法で決定する必要がある。調整パラメータの決定方法として、黄金分割法を用いた最適化手法等が提案されており<sup>9)</sup>、本研究においても、調整パラメータの決定方法については今後検討すべき課題である。

### 3.3 観測誤差が推定精度に与える影響

本節では、カルマンフィルタに用いる加速度に重畳した観測誤差が、接触力推定精度へ与える影響を調査する。本シミュレーションでは、平均が  $0\text{m/s}^2$ 、分散が  $0.05\text{m}^2/\text{s}^4$  の正規分布に従う乱数を観測誤差として、2元系モデルの時刻歴応答計算によって得られる加速度に対して与えた上で接触力を推定した。

シミュレーションに基づく接触力の推定結果を図3に示す。本図より、推定された接触力には観測誤差に起因したノイズ成分が含まれるものの、加速度に観測誤差が含まれる場合においてもカルマンフィルタによって接

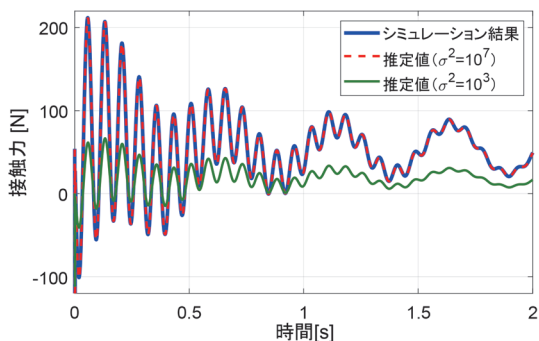


図2 接触力の推定結果（調整パラメータの影響）

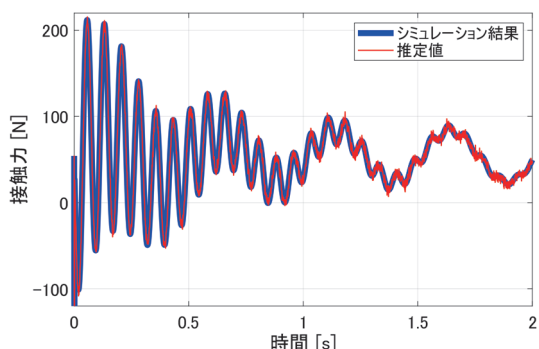


図3 接触力の推定結果（観測誤差の影響）

触力の過渡的な変動や定常的な変動を概ね推定できることがわかる。

### 3.4 パラメータ同定誤差が推定精度に与える影響

本節では、カルマンフィルタに用いる2元系モデルのパラメータ同定誤差が推定精度に与える影響を調査する。前節では、各質点の加速度を計算するシミュレーションに用いるパラメータと、カルマンフィルタに用いるパラメータは同じ値を使用したのに対し、本節では表2に示すように、前者のシミュレーションに用いるパラメータは表1に示す値を使用し、後者のカルマンフィルタに用いるパラメータについては、 $m_1$  と  $k$  は表1に示す値の1.5倍を用いる。これにより、カルマンフィルタを設計する際にモデル化誤差が生じる状況を模擬する。

シミュレーションによって得られた接触力を図4に示す。青線は表2の第2列に示すパラメータを用いたシミュレーションから得られた接触力であり、これを真値とする。これに対して赤線は、カルマンフィルタに用いるパラメータに同定誤差が存在する状況での接触力推定結果である。この推定結果は、接触力のシミュレーション結果と良好な一致を示しており、カルマンフィルタではモデル化誤差を仮定しているため、パラメータの同定誤差がある状況においても接触力を高精度に推定できることがわかる。

表2 2元系モデルの同定誤差を表現するパラメータ

パラメータ	シミュレーションに用いる値	カルマンフィルタ設計に用いる値
$m_1$	3 kg	4.5 kg
$m_2$	15 kg	15 kg
$k$	105.0 kN/m	157.5 kN/m
$c_1$	10 Ns/m	10 Ns/m
$c_2$	50 Ns/m	50 Ns/m
$P_0$	54 N	54 N

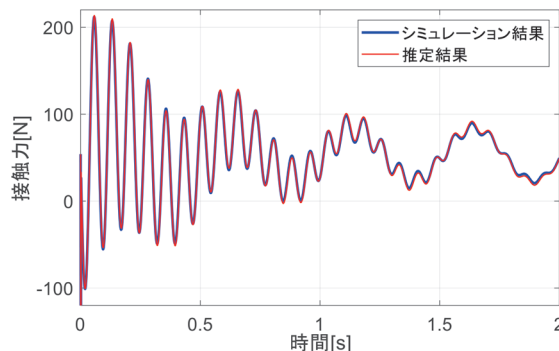


図4 接触力の推定結果（同定誤差の影響）

## 4. 有限要素モデルのシミュレーションによる検証

### 4.1 有限要素法を用いた検討方法

本章では、パンタグラフの各部材の弾性変形等を表現するために構築した有限要素法に基づく比較的自由度の高い力学モデル（以下、有限要素モデル）の応答加速度と、このモデルの自由度を低減した2元系モデルの拡大状態空間モデルを用いて接触力推定を行うことで、モデル化誤差が接触力推定精度に与える影響について検討する。

はじめに、観測値である各部の加速度を得るために、有限要素モデルのすり板上面を鉛直方向に強制変位加振する時刻歴応答シミュレーションを行う。つぎに、有限要素モデルを低次元化して得られた2元系モデルを用いて接触力推定精度を検証する。

有限要素モデルは、図5に示すように、すり板・舟体・ホーンおよび枠組を有限要素法によって離散化したモデルである。すり板と舟体は、いずれも三角形の板曲げ要素を用いてモデル化した。これらの中央を、実機に実装されるばねを模擬したばね・ダッシュポットの並列要素で接続し、両端においてもばね・ダッシュポットの並列要素で接続することで実機に実装されるピンのブッシュの特性を簡易的に表現した。なお、ホーンと枠組は、オイラー梁要素を用いてモデル化した。また、下枠基部に取り付けられているパンタグラフダンパの特性を表現するために、下枠の回転角速度に比例したモーメント荷重を下枠基部の節点へ与えた。

2元系モデルは図1に示したモデルを用いた。2元系モデルと有限要素モデルの伝達関数（コンプライアンス）の比較を図6に示す。また、有限要素モデルに対する2元系モデルの伝達関数のゲインの比を図7に示す。有限要素モデルを基準とする2元系モデルのモデル化誤差は、最大で5倍程度であることが図7よりわかる。本節では、このモデル化誤差が接触力推定に与える影響について検討する。

### 4.2 検討結果（パンタグラフのモデル化誤差の影響）

はじめに、有限要素モデルのすり板上面を鉛直方向に強制変位加振するシミュレーションを実施して、加振点における加振力と図5(b)に示す観測点における加速度の時刻歴波形を取得する。加振波形は50Hzまでの周波数成分を有する擬似ランダム波とした。

つぎに、得られた加速度と2元系モデルを用いてカルマンフィルタによる接触力推定を行う。状態推定値の初期値は0とし、事後誤差共分散行列の初期値は分散が1で平均が0の乱数とした。本検討ではシミュレーションによって得られた加速度に対して観測誤差は与えないものとし、観測誤差の共分散行列はゼロ行列とした。

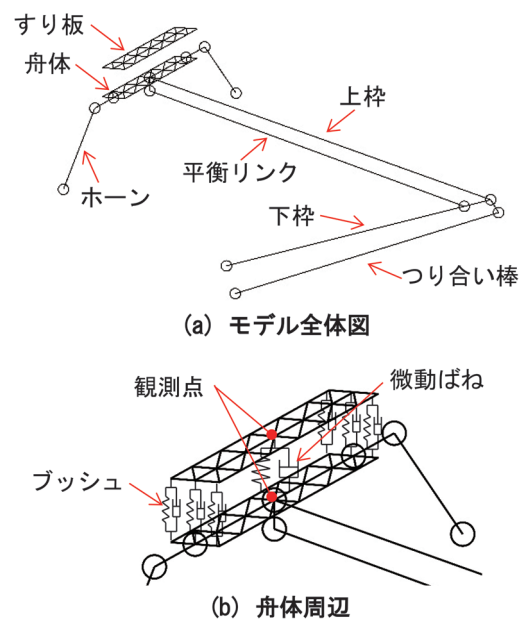


図5 パンタグラフの有限要素モデル

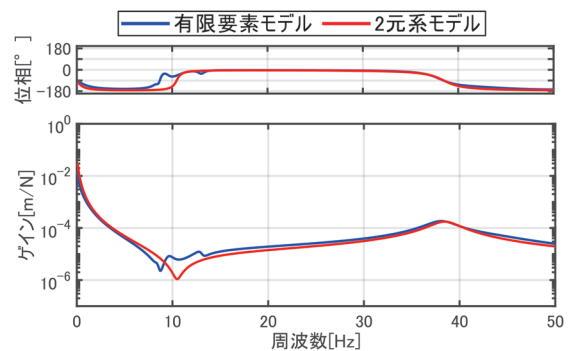


図6 モデルの伝達関数の比較

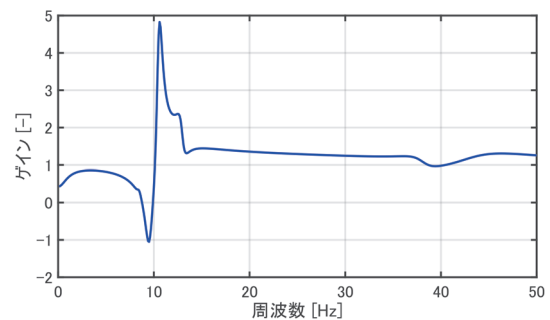


図7 モデル間における伝達関数のゲインの比

接触力の推定精度を調べるために、シミュレーションにおいてモデルに作用した接触力と推定接触力との伝達関数のボード線図を図8に示す。図8は接触力の推定精度を表し、ゲインが1に近いほど、また位相が0°に近いほど推定精度が高いことを表す。本図より、モデル化誤差の影響を受けて12Hz近傍において推定精度が低下しているものの、概ね35Hzまでの周波数範囲におい

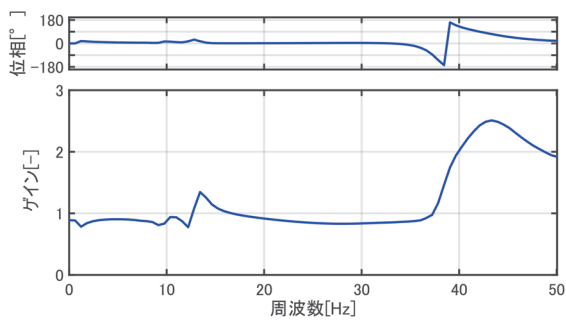
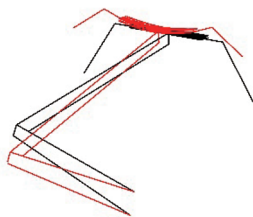
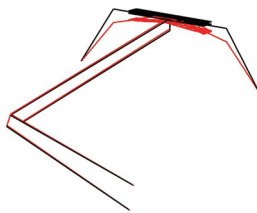


図8 シミュレーションに基づく接触力推定精度

— 元形状 — 変形形状



(a) 固有振動数 11.8Hz, 枠組の運動モード



(b) 固有振動数 41.2Hz, すり板・舟体の変形モード

図9 有限要素モデルの固有モード形状

て接触力推定が可能なのことがわかる。

図9に、有限要素モデルの固有モード形状を示す。このように、枠組が主体となる固有モードの固有振動数は11.8Hzであり、すり板・舟体の弾性変形が主体となる固有モードの固有振動数は41.2Hzである。これらの振動形状は、2元系モデルでは表現できないため、図8に示すようにこれらの周波数近傍において接触力推定精度が低下したと思われる。

そのため、12Hz近傍の推定精度を向上するためには、枠組の自由度を2元系モデルへ追加することで自由度を3に増やしたモデルを用いることが有用だと考えられる。また35Hz以上の推定精度を向上するためには、すり板・舟体の弾性変形を表現可能な力学モデルを用いてカルマンフィルタを設計する必要があると考えられる。

## 5. まとめ

カルマンフィルタを用いた架線・パンタグラフ系接触力推定手法を提案し、はじめにパンタグラフの2元系モ

デルを用いて、調整パラメータ、観測誤差や2元系モデルのパラメータ同定誤差が推定精度に与える影響について検討し、つぎにパンタグラフの有限要素モデルに基づいてモデル化誤差が推定精度に与える影響について検討を行った。

本報告のまとめを以下に記す。

- ・2元系モデルのシミュレーションに基づく検討から、接触力の時間更新量に関する調整パラメータの値によって接触力推定結果が大きく変化することがわかった。一方で、観測誤差やパラメータ同定誤差が存在する場合においても、カルマンフィルタを用いて接触力を概ね推定可能であることがわかった。
- ・有限要素モデルのシミュレーションに基づく検討から、自由度が大きく異なるようなモデル化誤差が存在する場合においても35Hz程度までの周波数においては接触力を推定できることがわかった。一方で、2元系モデルでは表現が困難な固有モードの固有振動数近傍では接触力推定精度が低下することがわかった。

今後は、調整パラメータを適切に決定する方法についての検討や、より高次の力学モデルを用いることによる更なる精度向上の検討を行うとともに、架線下をパンタグラフが走行する状況下における接触力推定の適用可能性の検討をシミュレーションに基づいて行う方針である。

## 文献

- 1) IEC 62486:2017, "Railway applications—Current collection systems—Technical criteria for the interaction between pantograph and overhead contact line (to achieve free access)", International Electrotechnical Commission, 2017.
- 2) IEC 62846:2016, "Railway applications—Current collection systems—Requirements for and validation of measurements of the dynamic interaction between pantograph and overhead contact line", International Electrotechnical Commission, 2016.
- 3) 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，日本機械学会論文集C編，Vol.70, No.694, pp.92-99, 2004
- 4) 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，Vol.14, No.6, 2000
- 5) 小林樹幸，小山達弥，原田智：高速パンタグラフ試験装置を用いた集電系ハイブリッドシミュレーション手法，鉄道総研報告，Vol.35, No.12, pp.47-52, 2021
- 6) 足立修一，丸田一郎：カルマンフィルタの基礎，東京電機大学出版局，2012
- 7) 國行翔哉，本堂貴敏，鈴木貢，宮本岳史，中野公彦：PQ輪軸を用いた単一車輪クリープ力モデルによる輪軸運動状態推定法の性能評価，第31回交通・物流部門大会

- (TRANSLOG2022) 講演論文集, No.TL1-4, 2022
- 8) E. Lourens, E. Reynders, and G. De. Roeck, et al., "An augmented Kalman filter for force identification in structural dynamics", Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 27, pp.446-460, 2012.
- 9) 日野順市, 山室亮太: カルマンフィルタによる機械構造物の時間領域加振力推定に関する研究 (重み係数の最適化), Dynamics and Design Conference 2020 講演論文集, No.310, 2020