

フィードフォワード制御によるパンタグラフの接触力変動低減手法

鉄道力学研究部 集電力学研究室

研究員 小林 樹幸

1. はじめに

鉄道車両の高速化において、パンタグラフから発生する空力音を低減することは沿線環境の観点において重要な課題であり、舟体の形状を滑らかにするなどの対策が施されている。しかし、舟体形状の平滑化はパンタグラフの設計に対して制約を与え、これによって電車線に対するパンタグラフの追随性能が損なわれる傾向にある。一方で、近年ではすり板を多分割化することによって追随性能の改善が図られている例もある。鉄道の更なる高速化に必要な空力音低減を実現するために舟体の断面形状を更に平滑化した場合においても、現状と同等の集電性能を発揮させる手法のひとつとしてアクティブ制御機構の導入が考えられる。そこで、鉄道総研ではアクティブ制御によるパンタグラフ接触力変動の低減手法の研究を行っている。

著者らは過去にパンタグラフの接触力制御手法として、PID 制御やインピーダンス制御¹⁾の検討を行ってきた。PID 制御は、アクチュエータの遅れ特性により適用可能な周波数範囲が限定的であるという課題があり、インピーダンス制御では制御対象以外の周波数における追随性能の低下が課題である。そこで、架線などの地上設備に関する情報を事前に収集可能であることを利用し、地上設備に起因する接触力変動の卓越周波数を与えたフィードフォワード制御の適用を試みた。特に本研究では、架線を支持する電柱間隔（以下、支持点間隔）における電車線の等価剛性変化に起因した接触力変動を対象とする。従って、支持点間隔と走行速度を照査することで制御対象とする接触力変動の周波数を既知のパラメータとすることが可能である。しかし一方で、制御ゲインや位相については舟体へ作用する接触力変動の振幅値や制御対象とする周波数に応じて適切な値を決定する必要がある。本研究では、これらの制御パラメータを自動調整する手法を提案し、前述のアクチュエータの遅れを適応的に補償することを可能とした。ただし、ここでは基礎的研究段階として電車線の動特性は考慮せず、舟体に強制変位入力が入力された際の接触力変動を低減する内容について報告する。

2. アクティブ制御パンタグラフの概要

本研究で使用したアクティブ制御機構を有するパンタグラフ¹⁾の概要を図 1 に示す。このパンタグラフは、電気絶縁が容易な空気圧アクチュエータを採用しており、主ばねと並列に設置された空気圧アクチュエータの軸力によって主軸へ回転トルクを作用させ、接触力を制御する構造となっている。この系の力学モデルは図 2 のように表される。ただし質点 1 と質点 2 における質量 m_1 、 m_2 はそれぞれパンタグラフ舟体と枠組の等価質量、 x_1 および x_2 はそれらの上下変位である。 k と c_1 はそれぞれ舟体内の復元ばねのばね定数とエネルギー散逸を表現するための減衰定数、 c_2 はパンタグラフダンパの減衰定数であり、 p_0 は主ばねによる静押上力を、 f_a はアクチュエータによる制御力を表している。前述のように本研究では、質点 1 に対して電車線の支持点到来周波数を有する次式で表される変位 x_1 で強制加振した際の接触力変動を制御対象とする。

$$x_1 = X_1 \sin \omega t \quad (1)$$

$$\omega = \frac{2\pi v}{L} \quad (2)$$

ただし X_1 は強制変位の振幅を表し、 ω は走行速度 v と支持点間隔 L によって式(2)のように表される支持点の到来周波数である。制御指令信号には次式で表される複素指数関数を使用する。

$$u = Ae^{j(\omega t + \phi)} \quad (3)$$

ただし、 A は制御ゲイン、 ϕ は舟体への強制変位入力に対する位相差を表す。これらのうち A と ϕ が自動調整の対象となる制御パラメータであり、次章でこれらの調整方法について記す。

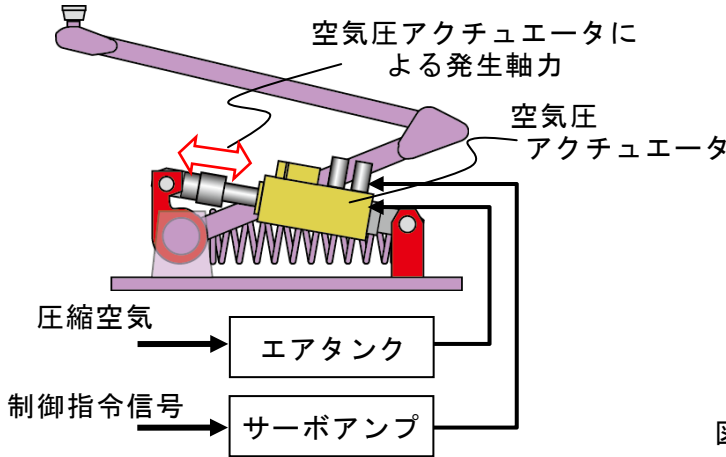


図1 アクティブ制御パンタグラフの概要

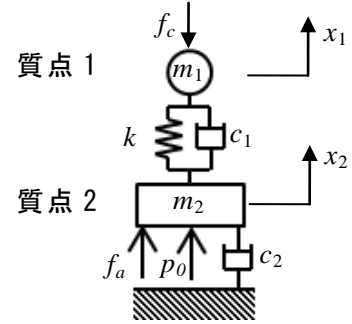


図2 アクティブ制御パンタグラフの力学モデル

3. 制御パラメータの自動調整手法

図2に示したアクティブ制御パンタグラフの力学モデルに基づく、制御パラメータ自動調整手法について述べる。ただし、ここでは、接触力の変動を制御対象とする。接触力変動 f_c 、制御指令信号 u と、制御を施さない場合に質点1に作用する接触力変動 b を、それぞれ以下のように複素指数関数を用いて表現する。なお、図2に示す制御力 f_a は、制御指令信号 u をサーボアンプに与えることで空気圧アクチュエータが動作し、その結果質点2に作用する力を表している。

$$f_c = F_c e^{j\omega t} \quad (4)$$

$$u = U e^{j\omega t} \quad (5)$$

$$b = B e^{j\omega t} \quad (6)$$

ただし、 F_c 、 U 、 B はいずれも複素振幅であり、自動調整するパラメータである制御ゲイン A と舟体への強制変位入力に対する位相差 ϕ を用いて U を表すと次式となる。

$$U = Ae^{j\phi} \quad (7)$$

これらを用いて次式が成立する。

$$F_c = B + HU \quad (8)$$

ただし、 H は制御指令信号を入力とし、質点1における発生力を出力とする伝達関数を表す。

パラメータ自動調整のプログラムは 1ms 間隔で計算を行うが、ここでは時間を周期 T [s] でリサンプリングし、時刻 nT [s] における値を添え字 n で表すと次式を得る。

$$F_c(n) = B + HU(n) \quad (9)$$

$$F_c(n-1) = B + HU(n-1) \quad (10)$$

$$F_c(n-2) = B + HU(n-2) \quad (11)$$

パンタグラフの制御において決定すべき物理量は $U(n)$ であり、さらに式(9)において接触力変動 $F_c(n)$ が 0N であると仮定する。リサンプリングされた時間 $(n-1)T$ と $(n-2)T$ における接触力変動と制御力は既知であるため、式(9)から式(11)において B と H を消去することで、時刻 nT における制御力の複素振幅を次式によって得る。

$$U(n) = U(n-1) - \frac{U(n-1) - U(n-2)}{F_c(n-1) - F_c(n-2)} F_c(n-1) \quad (12)$$

ただし、ここで H と B は時間によらず常に一定であるという仮定をおいている。式(12)において、右辺第二項の分数は、時間 $(n-2)T$ から $(n-1)T$ へ制御パラメータを更新した際における接触力変動低減量の逆数を表しており、右辺第二項は時間 nT における接触力変動を 0N にするために必要な時間 $(n-1)T$ からの制御パラメータの更新量を表している。

提案した手法はこのように、リサンプルされた過去の 2 ステップ分の接触力変動と制御指令信号を用いて次のステップにおける制御指令信号を生成するものであり、 T 秒の間隔で制御パラメータを自動的に更新する。

4. 加振試験

4.1 試験概要

提案した制御手法によるパンタグラフの接触力変動低減効果を確認するために、舟体を加振機で上下方向に強制変位加振し、加振機と舟体との間の接触力変動を制御あり・なしの場合について比較した。なお、加振機と舟体との間には接触力を測定するためにロードセルを設置し、加振波形には 1Hz の正弦波を用いた。すなわち本加振試験は、試験に供したパンタグラフが正弦波状の凹凸を有する剛体電車線を走行している状態を模擬しているものである。

制御パラメータの一つである ϕ は、前述したように舟体変位の位相に対する位相差であるため、舟体変位の位相を検出する必要がある。本試験では、位相同期回路を用いて舟体変位の位相を検出し、この位相を基準として制御指令信号を生成した。また、接触力変動の振幅値 F_c はロックインアンプを用いて検出しており、リサンプル周期 T は、ロックインアンプの整定時間よりも長く設定する必要がある。本試験では事前検討の結果から、加振周波数によらずリサンプル周期 T を 5 秒とした。本試験における試験機の構成を図 3 に示す。

本試験における、加振開始から制御パラメータの自動調整までの流れは以下の通りである。

- ① 制御を実施しない状態で舟体の加振を 10 秒間行う。

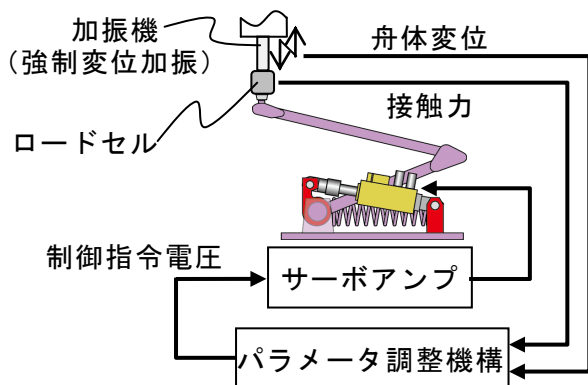


図 3 加振試験の機器構成

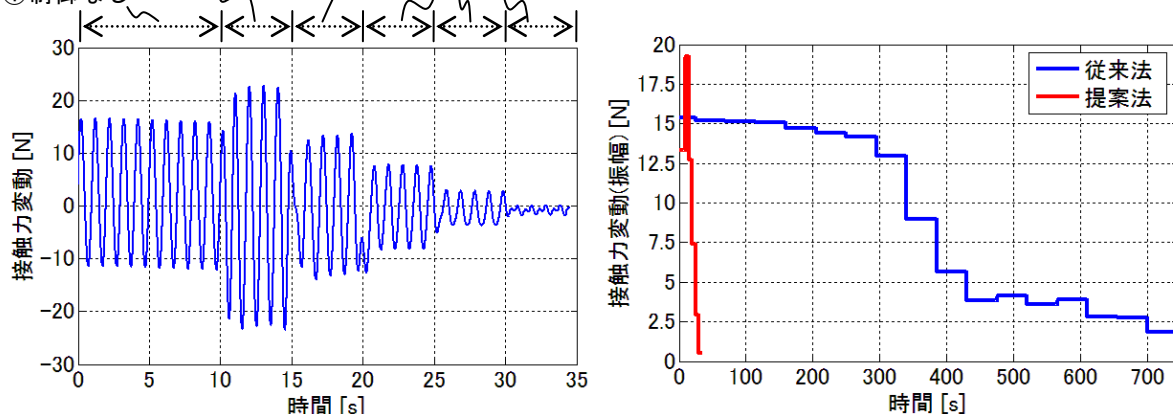
- ② 予め設定した制御パラメータの初期値を用いて制御指令信号を作成し、制御を行う。
- ③ プロセス①とプロセス②の最後の時間（それぞれ 10 秒と 15 秒）におけるデータに基づいて制御パラメータを更新する。
- ④ リサンプル周期である 5 秒ごとに制御パラメータの更新を繰り返す。

4.2 試験結果

制御パラメータの自動調整を行う過程で得られた接触力変動を図 4 に示す。図 4 には、本研究で提案した手法（提案法）による接触力変動の低減過程，および著者らが過去に提案した自動調整手法（従来法）²⁾と提案法との比較をそれぞれ示している。

図 4(a)では、制御パラメータの自動調整を行うことで、接触力変動が 1N 程度に低減されている様子を確認できる。図 4(b)からは、従来法による制御パラメータの自動調整には 600 秒程度の時間を必要としているのに対し、提案法は 20 秒程度で制御パラメータの自動調整が完了していることがわかる。これは、従来法では接触力変動の感度に基づいて制御パラメータを小刻みに変更しているのに対し、提案法では理論式(12)に基づいて解析的に自動調整を行っていることに起因している。

- ① 制御なし
- ② 初期値を用いて制御実施
- ③ 制御あり(10秒と15秒におけるデータに基づいて制御信号生成)
- ④ 制御あり(プロセス③と同様の手法で5秒ごとに制御信号を更新)



(a) 提案法による接触力変動の低減過程

(b) 従来法と提案法の比較

図 4 パラメータ自動調整過程における接触力変動の履歴

5. まとめ

電車線の支持点間隔と走行速度に基づいたフィードフォワード制御による接触力変動低減手法を提案した。本手法では、制御指令信号の振幅と、外乱に対する位相差をそれぞれ自動的に調整することが可能である。加振試験の結果、提案手法を用いることで接触力変動を効果的に低減できることがわかった。

最後に、本研究は京都工芸繊維大学の増田新教授との共同研究によって遂行されたものです。この場をお借りして感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 山下義隆, 池田充, 増田新, 射場大輔, 曾根彰: インピーダンス制御によるパンタグラフの接触力制御, 鉄道総研報告, Vol.25, No.6, pp.5-10, 2011
- 2) 小林樹幸, 山下義隆, 池田充, 増田新, 射場大輔: パンタグラフのアクティブ制御のための制御パラメータ最適化手法, 鉄道総研報告, Vol.27, No.10, pp.5-10, 2013