

接触力制御パンタグラフの制御パラメータの 適応速度向上手法

山下 義隆* 小林 樹幸* 臼田 隆之*
増田 新** 射場 大輔**

**A Method for Improving the Adaptation Rate of Control Parameters for Active
Control Pantographs**

Yoshitaka YAMASHITA Shigeyuki KOBAYASHI Takayuki USUDA
Arata MASUDA Daisuke IBA

For the improvement in speed, many problems have to be solved for the current collection system. Not only the aeroacoustic noise of a pantograph but also the contact force fluctuation between a pantograph and the contact wire has to be reduced. Therefore, using the pantograph with active control techniques is an effective approach to the reduction in the contact force fluctuation. The authors have been working on the development of feed-forward control technique for reducing the contact force fluctuation, based on the information about support spans and train running speed. The idea of the approach is to control the magnitude and phase lag of the control force acting on the pantograph frame, and the control force works after the controller finds the optimal magnitude and phase lag. The problem of this approach, however, is that it requires long time for finding two optimal parameters. This study proposes the better approach than the utilized steepest descent method in terms of parameters convergence speed.

キーワード：パンタグラフ，接触力制御，最急降下法

1. はじめに

電気鉄道的高速化を実現するために克服すべき課題が多くある。パンタグラフとトロリ線との間に生じる接触力変動の抑制もその一つである。接触力変動は走行速度の増加に伴い大きくなるが¹⁾，著大な接触力変動はすり板とトロリ線の離線を引き起こして車両への安定した電力供給を妨げるだけでなく，離線に伴うアーク放電によってすり板やトロリ線の損耗が促進される。このような接触力変動の増加に対しては，架線の高張力化やパンタグラフの追随性能向上などの対策が有効であることが知られている²⁾。また一方で，パンタグラフから生じる空力音対策も重要な課題の一つである。パンタグラフにおける形状平滑化は空力音の低減手法に対する有効な手段の一つであるが，形状平滑化を追求すると復元ばねや微動ばねに十分なストロークを与えることが困難になり，パンタグラフのトロリ線に対する追随性能の妨げとなる。したがって，更なる速度向上にむけてパンタグ

ラフの空力音低減と接触力変動の低減を両立するためには，パンタグラフの構造変更という受動的な対策だけでは限界が生じるものと思われる。こうした状況下では，パンタグラフへ制御技術を適用して接触力変動を能動的に低減する手法が有用である。

パンタグラフの制御手法として池田らはPID制御³⁾，著者らはインピーダンス制御⁴⁾の適用について検討を行ってきた。しかし，PID制御においては，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制限されるという課題があり，インピーダンス制御では制御対象周波数以外における追随性能の悪化が課題となる。そこで，架線などの地上設備に関する情報が既知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，すり板とトロリ線を模擬した回転円盤との摺動状況下において制御対象とする周波数範囲の接触力変動のP-P値を最大で76%低減可能であることを実験的に示した⁵⁾。しかしながら，同手法では，制御に必要なパラメータ（以下，制御パラメータ）を適応的に調整する必要があり，その適応が完了するまでの速度の向上が課題であった。

本報告では，フィードフォワード制御の制御パラメー

* 鉄道力学研究部 集電力学研究室

** 京都工芸繊維大学 大学院工芸科学研究科

特集：鉄道力学

タの適応速度を向上する新たな手法を提案する。なお、本研究は制御手法の基礎検討という位置づけのため、架線の動特性は考慮しないものとした。すなわち、支持点が繰り返し到来する周波数と同じ周波数の正弦波が舟体に強制変位として与えられるものとした。

2. パンタグラフの制御機構

2.1 ハードウェア

本研究で使用したアクティブ制御機構付きパンタグラフの概要を図1に示す。このパンタグラフは、電気絶縁性を考慮して、制御用アクチュエータとして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になっている。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し力を、 f_a はアクチュエータによる制御力を表している。

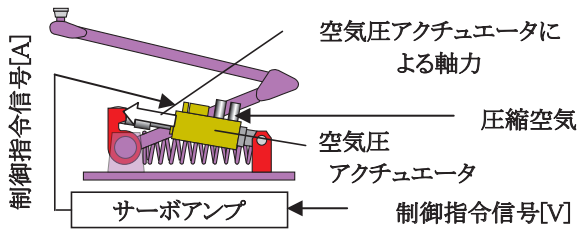


図1 アクティブ制御パンタグラフの概要

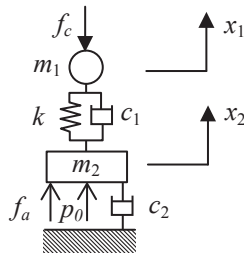


図2 アクティブ制御パンタグラフの力学モデル

2.2 ソフトウェア

本研究では、パンタグラフのアクティブ制御を実現するため、架線とパンタグラフとの間の接触力情報を利用する。本研究では、加振機とパンタグラフの間に設置したロードセルによって測定された接触力をパンタグラフがセンシングした接触力として用いるが、実際にはパンタグラフ舟体内部に取り付けられた複数のセンサにより精度良く接触力を測定する技術⁶⁾を適用する。

測定された接触力は、アクチュエータの制御力を算出する制御器に入力される。制御器は、走行速度および架線の架設情報を基に決定されるターゲット周波数（位相同期回路では自走周波数という）近傍の周波数で卓越している接触力の周波数成分を抽出する位相同期回路（図3）、その周波数成分の接触力振幅を抽出する回路（図4）およびこれらの情報を元に式(1)で与えられる制御力を決定する回路から構成される。

$$u = Ue^{j\omega t}$$

または

$$u = A \sin(\omega t + \phi) \tag{1}$$

ただし、 U は制御力の複素振幅、 j は虚数単位、 A は制御力の振幅、 ϕ は制御力の位相を表している。調整すべき制御パラメータは、式(1)の U (あるいは A および ϕ) である。ターゲット周波数は、架線の径間周期に起因する接触力変動を低減することを目的とする場合には、「走行速度÷径間長」で求められる。実際には、制御器はアクチュエータのアンプへの電圧指令値を出力するが、特にアクチュエータへの電圧指令値に対するアクチュエータの発生力(制御力)の伝達特性を考慮しない場合には、便宜上 u を制御力とする。

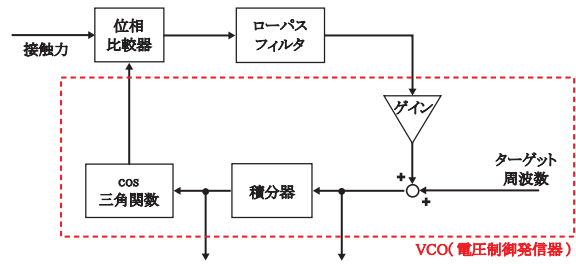


図3 位相同期回路

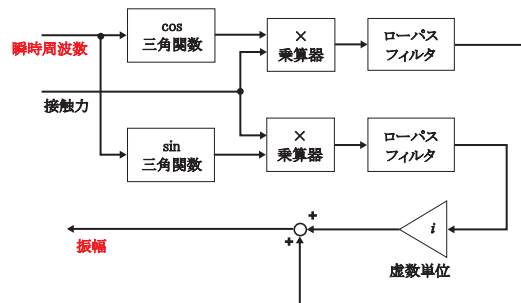


図4 振幅抽出回路

3. 制御パラメータ調整手法

3.1 最急降下法による調整手法

前報で提案した最急降下法による制御パラメータの調整手法（以下、従来手法）のフローチャートを図5に示

し、その概要について以下に述べる。最急降下法は、各反復において目的関数の傾斜が最大となる方向へ制御パラメータを修正する方法であり、反復回数 i から $i+1$ への制御パラメータ更新を式 (2) で行う。

$$\begin{Bmatrix} A \\ \varphi \end{Bmatrix}^{(i+1)} = \begin{Bmatrix} A \\ \varphi \end{Bmatrix}^{(i)} - \alpha \begin{Bmatrix} \frac{\partial |F_c|^2}{\partial A} \\ \frac{\partial |F_c|^2}{\partial \varphi} \end{Bmatrix}^{(i)} \quad (2)$$

ただし、 F_c は接触力変動の複素振幅であり、最適化問題の目的関数を $|F_c|^2$ とする。 α は制御パラメータ更新時の倍率を決定する係数である。従来手法では式 (2) に示すように目的関数のテーラー展開における 2 次以上の項を無視するが、制御パラメータの変更量が大きすぎると 2 次以上の項を無視できなくなるため、場合によっては制御パラメータの変更により目的関数が増加してしまう。そのような場合には変更量を減少させて目的関数が減少するように修正を加える(図 5)。この手法では、制御パラメータ更新後にある程度の接触力変動振幅評価時間が必要であり、なおかつ 2 種類の制御パラメータを個別に更新しなければならないため、接触力変動を最小化する最適な制御パラメータへの収束に時間がかかるという問題がある。

3.2 新たに提案する調整手法

ここでは、制御パラメータの適応速度を向上する手法を提案する(以下、改良手法)。接触力変動を

$$f_c = F_c e^{i\omega t} \quad (3)$$

とおき、制御力と接触力変動との関係が複素領域において次のように表されるとする。

$$F_c = B + HU \quad (4)$$

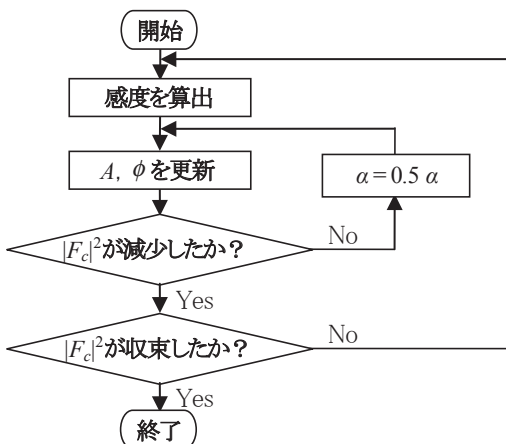


図 5 最急降下法のフローチャート

ここで、 H は制御力に対する接触力変動の伝達関数、 B は外乱入力の変復素振幅であると考えられることができる。本手法では、既知の F_c および U から B および H を推定し、最適な U を求める。

ある時間間隔 T における制御力および接触力変動の複素振幅を考える。時刻 nT における制御力および接触力変動の複素振幅を $U(n)$ および $F_c(n)$ とおき、 B および H が不変であると仮定すると、式 (5) のように書くことができる。

$$\begin{aligned} F_c(n) &= B + HU(n) \\ F_c(n-1) &= B + HU(n-1) \\ F_c(n-2) &= B + HU(n-2) \\ &\vdots \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、時刻 nT が現在時刻であるとする、過去の制御力の複素振幅 $U(k)$ および接触力変動の複素振幅 $F_c(k)$ ($k = n-1, n-2, \dots$) から現時刻の接触力変動を零とする ($F_c(n)=0$) 最適な $U(n)$ を求めることができる。過去の 2 周期分 ($2 \times T$) を用いる場合、 B および H は、

$$H = \frac{F_c(n-1) - F_c(n-2)}{U(n-1) - U(n-2)} \quad (6)$$

$$B = F_c(n-1) - \frac{F_c(n-1) - F_c(n-2)}{U(n-1) - U(n-2)} U(n-1) \quad (7)$$

のように推定され、最適な $U(n)$ は式 (8) で与えられる。

$$U(n) = -\frac{B}{H} \quad (8)$$

過去の N 周期分 ($N \times T$) を用いる場合には、式 (5) に最小二乗法を適用して B および H を求めることができ、最適な $U(n)$ はこの場合も同様に式 (8) で与えられる。

本手法では、制御パラメータの更新量は、設定した時間間隔の N 周期分 ($N \times T$) に対して最適となるように自動的に算出されるため、従来手法のように制御パラメータの更新倍率 α の調整が不要である。また、複素振幅を調整パラメータとするため、位相と振幅を同時に調整していることとなる。これらにより、最適な制御パラメータへの収束時間の大幅な短縮が期待できる。

4. シミュレーションによる検証

4.1 パンタグラフに対する加振条件が常に一定の場合

改良手法の制御効果を確認するために、シミュレーションによる検討を行う。シミュレーションには図 2 に示すパンタグラフモデルを使用し、その各パラメータは

特集：鉄道力学

表1に示すとおりである。舟体に図6(a)に示す1Hzの強制変位を与えたときの制御(改良手法)の有無による接触力波形の違いを図6(b)に示す。ただし、ここでは図3に示す位相同期回路に与えるターゲット周波数(f_{target})が厳密に加振周波数($f_{excitation}$)と一致すると仮定している。約10秒から15秒の間で接触力は定常状態に至った。前述の時間間隔 T は2秒としているため、約5回から7回のパラメータ探索で最適値に達している。従来手法の検討例⁵⁾では1回6秒を要するパラメータ探索を50回繰り返す必要があったことから、改良手法が非常に有効であることがわかる。

4.2 パンタグラフに対する加振条件が変化する場合

ここでは、パンタグラフ舟体に対する強制変位の周波数(以下、外乱周波数)が途中で変化する場合に対する制御効果を検証する。図7(a)および図7(b)に時刻10秒において外乱周波数が10%増加した場合の舟体強制変位波形およびそれに対する接触力変動を示す。制御ありに対しては、位相同期回路に入力するターゲット周波数を1.0Hzで一定とした場合、および外乱周波数の変化点である時刻10秒においてターゲット周波数を正確に外乱周波数に追従して1.0Hzから1.1Hzに変化させた場合の2条件に対する接触力変動を示している。前者および後者は、それぞれ、図中の凡例にて「 $f_{target} = 1.0\text{Hz}$ 」および「 $f_{target} = f_{excitation}$ 」と記載している。なお、図7における時刻0秒においては、接触力変動は定常状態となっている。ターゲット周波数を正確に外乱周波数に追従させることができる場合は良好な制御効果が得られる一方で、ターゲット周波数を一定として、外乱周波数がこれからずれた場合には制御なしの場合よりも接触力変動が大きくなることが分かる。また、一旦増大した接触力変動を低減するためのパラメータ調整後に再度接触力変動が増大する様子が確認でき、制御がやや不安定となることがわかる。

加振周波数の変化を自動的に検知し、ターゲット周波数をその変化に追従させるため、図8に示すように位相同期回路を修正する。図8の破線部分が図3の位相同期回路と異なる点である。図中Bにおいて位相同期回路から出力される周波数(図3における抽出周波数)と加振周波数追従回路に入力される一定値のターゲット周波数の差をターゲット周波数に加算し続けることで、図中Aにおいて位相同期回路に入力される周波数(図3におけるターゲット周波数)が加振周波数に追従する。加振周波数追従回路内の1次遅れ伝達要素は、パラメータ変動の急変に伴って制御力変動を急変させないためのものである。

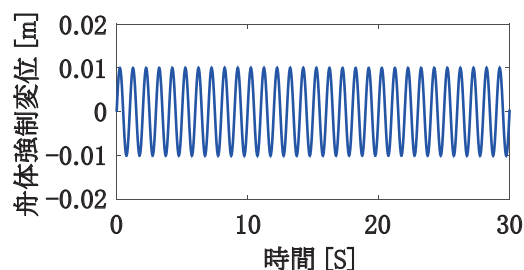
図9に周波数変化に対する追従機能を付加した位相同期回路を用いた場合の接触力制御効果を示す。当該の接

触力変動結果の凡例は、便宜上「 $f_{target} \approx f_{excitation}$ 」と記載している。加振周波数追従機能により、ターゲット周波数が一定の場合にみられる制御無しの状態を超える接触力変動の増大や制御の不安定化などが解消されていることがわかる。

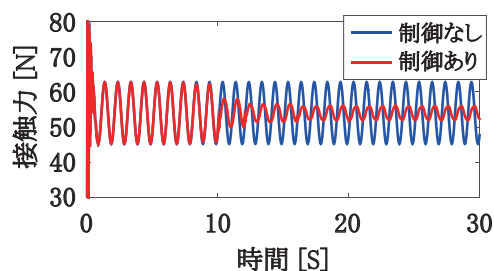
「 $f_{target} = f_{excitation}$ 」, 「 $f_{target} = 1.0\text{Hz}$ 」および「 $f_{target} \approx f_{excitation}$ 」の条件で接触力制御を行った際の、図3および図8に示す位相同期回路から出力される抽出周波数を図10に示す。加振周波数変化直後の「 $f_{target} = 1.0\text{Hz}$ 」なる条件における抽出周波数は、加振周波数変化直後には、加振周波数に同期して1.1Hzをほぼ平均値とする値に達する。この際の挙動は、「 $f_{target} \approx f_{excitation}$ 」なる条件の場合とほぼ同様である。しかしながら、加振周波数変化後の45秒付近において、加振周波数1.1Hzから脱調し、位相同期回路の自走周波数であるターゲット周波数付近を平均値とする抽出周波数を出力している。このような、加振周波数への同期・脱調は、調査範囲内(2000秒のシミュレーション)において繰り返し発生することを確認している。また、加振周波数の変化量が小さいほど、このような脱調の頻度が小さくなることを確認しているが、同期・引き込み現象に関する詳細な調査が必要である。

表1 シミュレーションに用いるパラメータ

パラメータ	値 [単位]	パラメータ	値 [単位]
m_1	3 [kg]	c_2	100 [Ns/m]
m_2	15 [kg]	k_1	38000 [N/m]
c_1	100 [Ns/m]	P_0	54 [N]

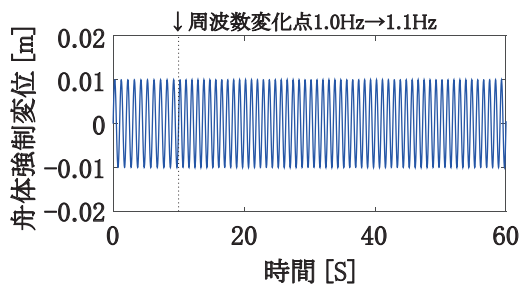


(a) 舟体強制変位

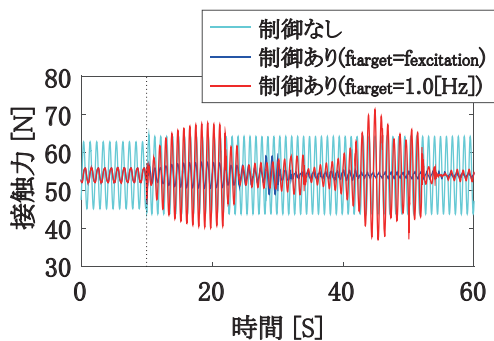


(b) 接触力変動

図6 加振周波数一定の場合の制御効果

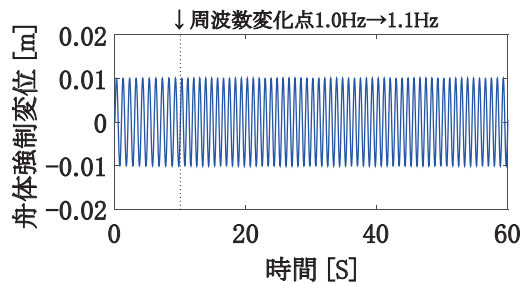


(a) 舟体強制変位

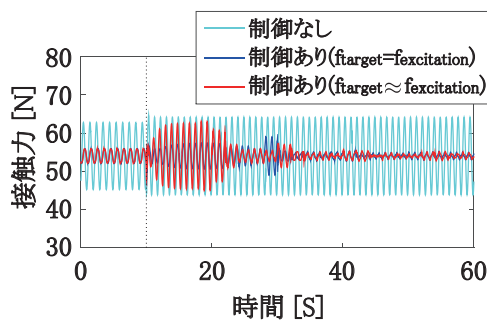


(b) 接触力変動

図7 加振周波数が増える場合の制御効果



(a) 舟体強制変位



(b) 接触力変動

図9 加振周波数が増える場合の制御効果
(加振周波数追従回路の効果)

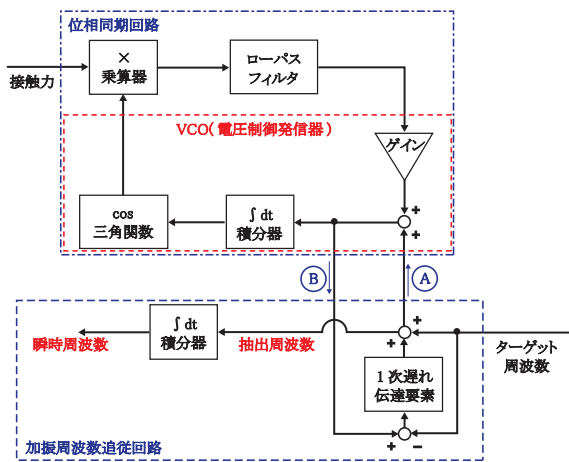


図8 周波数変化に対する追従機能を有する位相同期回路

5. 実験による検証

本改良手法の妥当性を確認するために、実際のパンタグラフの舟体へ強制変位加振を与え、制御による接触力変動低減効果を確認する。制御パラメータの更新時間間隔 T は5秒とし、図8に示す位相同期回路によりターゲット周波数を加振周波数に追従させた。1Hzの加振周波数で振幅30mmの舟体強制変位を与えた場合の実験結果を図11に示す。加振を開始してパンタグラフの応答が定常状態になったある時刻から10秒間は制御なしの状態として図示している。図中の時刻10秒において制御

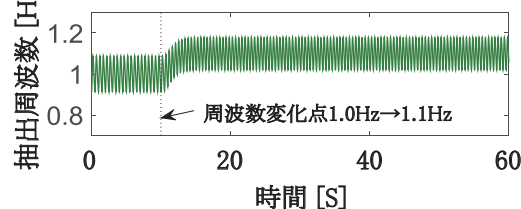
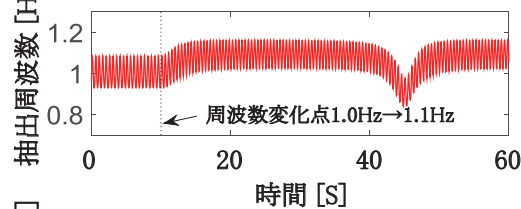
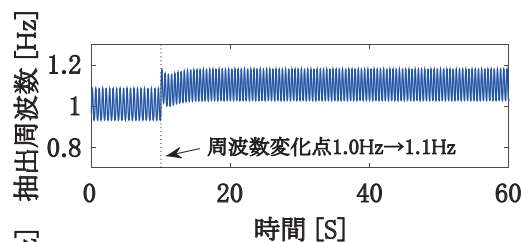


図10 位相同期回路の抽出周波数
(上から $f_{target} = f_{excitation}$, $f_{target} = 1.0\text{Hz}$, $f_{target} \approx f_{excitation}$)

を開始し、以降改良手法により制御パラメータを調整している。制御開始5秒後には制御なしの状態よりも接触力変動が小さくなり、20秒後には制御なしの場合に対して接触力変動がP-P値で約56%低減している。ただ

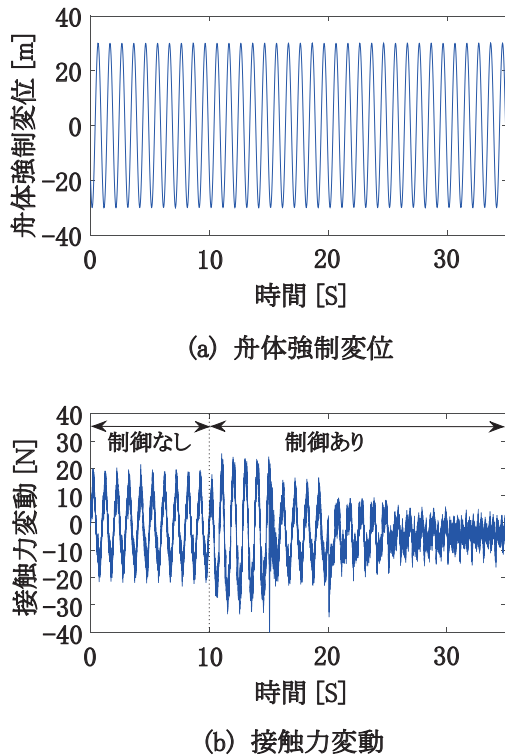


図 11 制御効果確認試験結果（1Hz 加振）

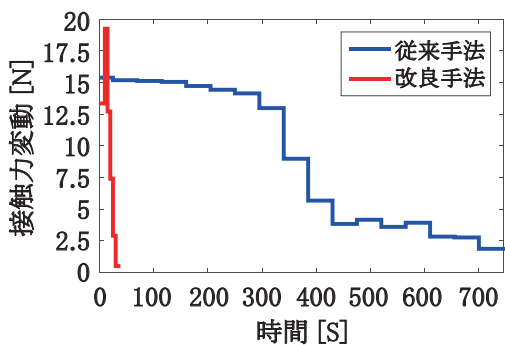


図 12 従来手法とのパラメータ適応速度の比較

し、文献 (5) の試験条件では、回転円盤によるしゅう動を伴う上下振動外乱をパンタグラフに与えているのに対して、本試験では加振機による上下振動外乱のみをパンタグラフに与えている上に、外乱振幅値および外乱周波数が異なることに注意されたい。また、図 11 (b) において 0 秒付近ではほぼ 0N であった接触力変動の平均値が 35 秒付近においては約 5N 程度に減少している要因は、パンタグラフ各部の機械的な摩擦によるヒステリシスなどが挙げられると考えられる。

図 12 に従来手法と改良手法とのパラメータ適応速度

の比較を示す。ただし、1Hz の加振周波数で振幅 30mm の舟体強制変位加振時の接触力変動振幅（図 4 の振幅抽出回路の出力）の履歴を示している。本図より、改良手法は従来手法よりもパラメータ適応速度が顕著に向上していることが分かる。

6. おわりに

前報⁵⁾ で提案したフィードフォワード制御による接触力変動低減手法のパラメータ適応速度を効果的に向上する新しい手法を開発した。本手法は、制御力の複素振幅を制御パラメータとして、設定した時間間隔内における最適な値を算出する。このため、従来手法で必要であったパラメータ調節量の設定が不要であるうえ、制御力の位相と振幅の個別の調節も不要である。シミュレーションならびに実験により、本手法を適用することによって従来よりも大幅に短い時間で良好な接触力変動低減効果が得られることを確認した。

今後は、走行速度が連続的に変化する条件、つまり外乱周波数が連続的に変化する条件に対する安定性や複数の外乱周波数に対して有効な制御回路について検討するとともに、フェールセーフ性などの検討を進める予定である。

文 献

- 1) 網干光雄：弾性支床弦モデルによる架線・パンタグラフ系の径間周期運動解析，日本機械学会論文集（C 編），Vol.75, No.755, pp.54-60, 2009
- 2) 公益財団法人鉄道総合技術研究所：鉄道技術講座 電車線とパンタグラフ（第 14 版），弘久社，pp.3.1-3.35, 2015
- 3) 池田充，菅原能生，小山達弥：高速用パンタグラフの接触力制御手法に関する基礎研究，鉄道総研報告，Vol.20, No.5, pp.41-46, 2006
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 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，第 70 巻，694 号