

高速鉄道用パンタグラフの接触力制御特性の検討*

牧野俊昭**, 吉田和夫***, 棚沢定道**, 浮田昌亮***

Study on Contact Force Control of Current Collector for High-Speed Railways

Toshiaki MAKINO, Kazuo YOSHIDA, Sadamiti TANAZAWA and Masaaki UKITA

Abstract

For railway speed up such as 350km/h, it is particularly important to reduce noise caused by current collector for environmental problem. For a solution, a diamond shaped low-noise current collector has been developed.

However, it become difficult for the current collector to maintain the predetermined contact force between the contact strip and the trolley-wire. Therefore, it is essential to apply the active control to keep the contact force uniformity. However, there is a serious problem for the active control that it is difficult to put sensors in high voltage region. In this paper, an application of optical fiber sensor is devised and applied to the control system. In the experiment, the usefulness of the proposed sensor and control system is demonstrated to the control system.

Key Words : Contact Force Control, Pneumatic Servo Motor, Optical Fiber Sensor, Current Collector, Railways

1. はじめに

フランスのTGV, ドイツのICE, 日本の新幹線などの高速鉄道は高速化への道を走り続けている⁽¹⁾. 特に, 最高速度の競争が熾烈を極めており, 様々な最新技術が要求されている.

日本においては, 住宅地の近傍を新幹線が高速走行するため, 沿線騒音(特に, 空力音)抑制が重要な課題とされている⁽²⁾⁽³⁾. その解決策として300km/h用集電装置の低騒音開発が行なわれ, 翼型パンタグラフが実用化(500系新幹線のぞみに搭載)された⁽⁴⁾. しかし, 320km/h以上の高速化では, パンタグラフの形状が従来よりも大きくなり, かつ大揚力が生じる. また, 集電体の質量も大きくなるため, 架線とすり板間に作用する接触力変動も大きくなるという問題点が生じている. そこで, 接触力を許容範囲内に保つアクティブ制御が必要になってきた⁽⁵⁾. しかし, 図1に示すように架線とすり板間にはAC25kVの高電圧が作用しているため, 従来の電気的なセンサは設置できない. その架線とすり板間の接触力を直接計測し, その力をフィ-

ドバックしてアクティブ制御する研究が報告されている⁽⁶⁾⁻⁽¹¹⁾.

従来のパンタグラフをアクティブ制御する研究は種々提案されている. それらの方式では高電位部に複数のセンサを設置する必要がある. しかし, 現状では高電位部にセンサを設置できないため, 接触力を直接検出できないことが指摘されている⁽¹²⁾⁻⁽¹⁴⁾.

本研究では, 近年開発された光ファイバを高電位部に設置し, すり板直下の接触力を直接検出できるプラスチック型光ファイバ(以下, POF光センサと称す)を用いて接触力を直接測定し, アクティブ制御することを検討した. 特に, この光ファイバは湿度や電磁気の影響を受けにくいいため, 力センサとして利用でき, 接触力を直接検出できる.

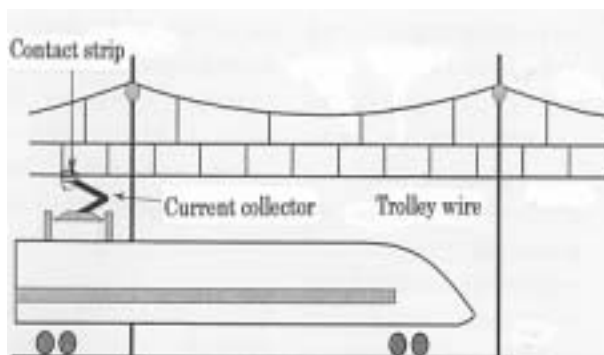


Fig.1 Current collector system of High-speed railways

* 原稿受付 2006年10月16日

** 佐世保工業高等専門学校 電子制御工学科

*** 慶應義塾大学 理工学部

本論文では、2つのPOF光センサをすり板直下に設置し、外力付加による光強度変化の特性を利用して、すり板に加わる接触力を直接検出する方式を検討した。設計製作したPOF光センサを実験装置に組み込んで実物大寸法の集電装置の機能実験を行った後、模擬架線を手加振してPOF光センサの接触力信号を空気圧サーボ駆動機構にフィードバックし、アクティブ制御した。そして、架線不整外乱(0.5Hz, 1.0Hz)を作用させた時の接触力変動を測定し、その有効性を検証した。

2. 光ファイバセンサシステム

2.1 接触力の検出原理

光ファイバをセンサとして利用する場合には、外力を加えた時の光強度(透過光量)が変化する。この光強度変化を利用して力(圧縮⁽¹⁵⁾と曲げ⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾の力)を求めることにした。Fig.2(a)に示すように1本の光ファイバと平板で圧縮する場合には、直径方向の圧縮により断面が楕円形になる。その形状変化により、ファイバ内を通る光は断面内で再分配されずに漏れる。Fig.2(b)に示すように幾何学的に解析すると、以下の式になる。(FAL: Fractional area loss)

$$FAL = \frac{2}{\pi} \left(\arctan \left[\left(\frac{r}{r-\delta} \right)^2 - 1 \right]^{1/2} \right) - \left\{ \left(1 - \frac{\delta}{r} \right)^2 - \left(1 - \frac{\delta}{r} \right)^4 \right\}^{1/2} a$$

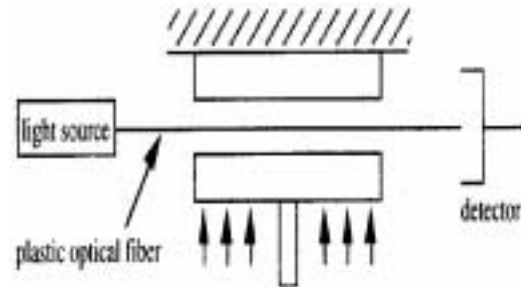
圧縮率と光強度の特性をFig.3に示す。

次に、Fig.4に示すように光ファイバが曲げられる場合を考慮する。例えば、あるモードで伝搬した光の全反射角度により導波路が曲がり、モード変換する。そして、高次モードへ変換される時に伝搬時間の遅延が出て、伝送損失が大きくなる。又、臨界角度より大きくなると、光はカットオフされ放射損失となる。さらに、曲率の大きいところでは外側の周方向の速さがその部分のコアの速度より大きくなるため、エネルギー損失される。

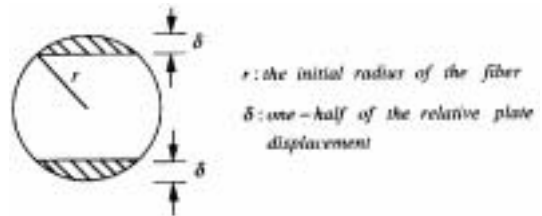
2.2 センサシステム構成

光ファイバは主に通信デバイスに用いられているため、長距離伝送での減衰が少なく、かつ外力による影響も小さい。しかし、センサとして利用するには、外力に敏感で再現性の良いものが必要

である。本研究で用いた光ファイバは、屈折率分布が中心に向かって滑らかなグレーデッドインデックス型(GI型)のものである⁽¹⁸⁾。Fig.5にそのPOF光センサの屈折率パスを示す。又Fig.6に今回製作したPOF光センサの構成図を示す。詳細は割愛する。



(a) Configuration used to investigate FAL model



(b) FAL model of a radially deformed optical fiber

Fig.2 Experimental configuration used to investigate FAL model

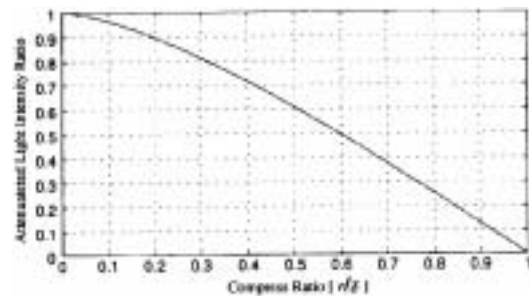


Fig.3 Relation of fractional area loss

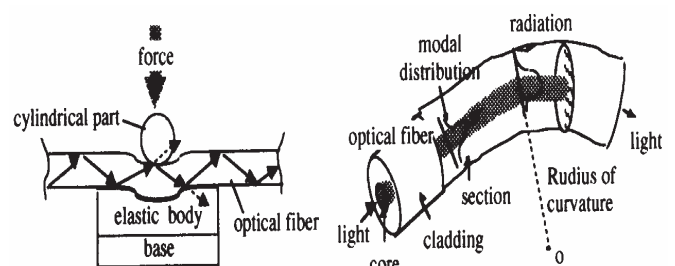


Fig.4 Principle of the optical fiber sensor microbending loss

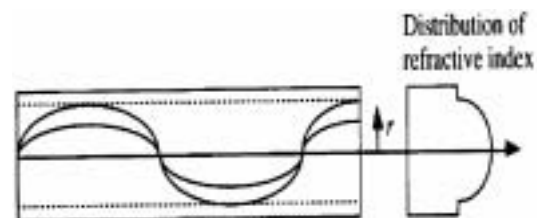


Fig.5 Configuration of the optical fiber's refractive index

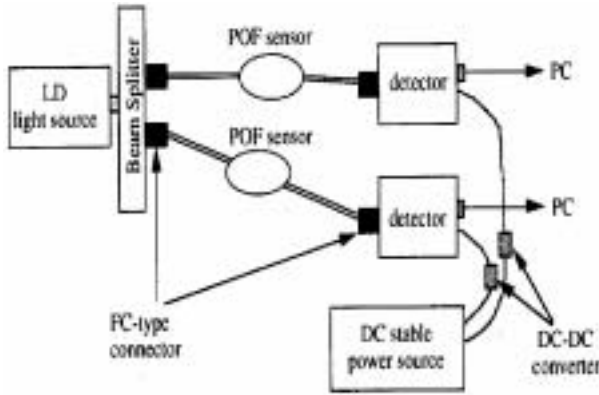


Fig. 6 Configuration of the plastic optical fiber sensor

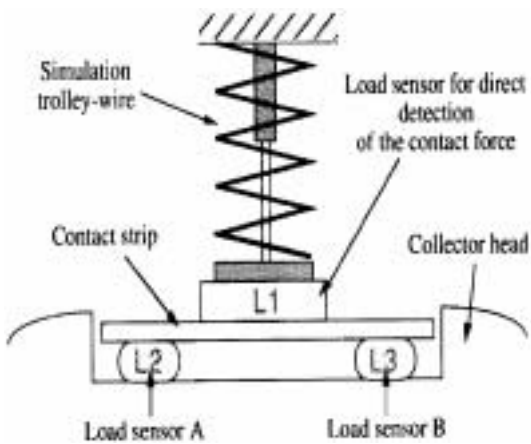


Fig. 7 Configuration of the sensing mechanism

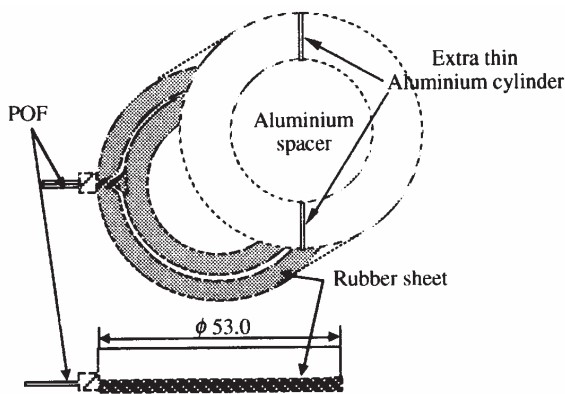


Fig. 8 Configuration of the optical fiber sensor

3. 光ファイバセンサの形状と荷重特性

3.1 センサ形状

Fig. 7に示す実験装置では、すり板直下の両端に2つのPOF光センサ(Load sensor A, B)を設置した。そのため、光ファイバをその厚みサイズ以下に設計する必要があるが、Fig. 8に示す円形センサとした。光ファイバを円形に巻いた後、ゴムシートで上下を覆い、アルミニウムスペーサを上から乗せて高さを調整した。また、スペーサにアルミニウム棒($\phi 0.6\text{mm}$)を取り付け、分解能向上も図った。

3.2 荷重特性

製作したPOF光センサをFig. 7に示した実験装置に搭載して、その荷重特性を計測した。その結果をFig. 9に示す。荷重を増加させた場合と荷重を減少させた場合において、多少の特性の差異がみられる。これは、光ファイバの形状戻りにヒステリシスが生じたためである。しかし、時間経過で実験値は一致した。これらの結果からPOF光ファイバの光強度特性(圧縮率と荷重)には比例関係があることが分かった。次に、動特性を把握するため、ファンクションジェネレータからsin波($0.5\text{Hz}, 85\text{N} \pm 25\text{N}$)を入力し得られた接触力の時間波形をFig. 10に示す。この結果から、すり板直下に設置した2つのPOF光ファイバセンサにより静的及び動的な接触力を200Nまで検出できた。

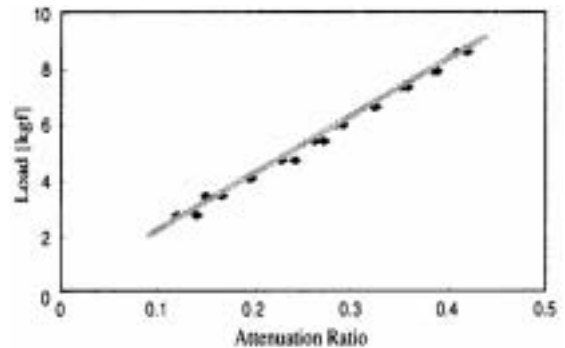


Fig. 9 Static characteristic of the plastic fiber sensor

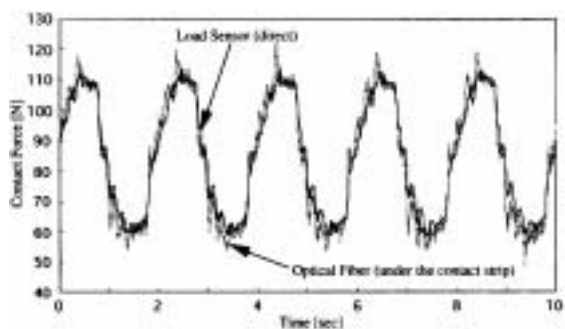


Fig. 10 Dynamics characteristic of the plastic fiber sensor

4. 集電装置の制御系設計

集電装置は、架線と接触して電力を集電するすり板、それを支持する重ね板ばね機構とを装着した集電体、それらを支持する絶縁用支持碍子等から構成されている。Fig. 11に本研究における架線・集電装置系の解析モデルを示す。但し、架線とすり板は常に接触しているものとし、離線は考慮しない。また、架線のばね・ダンパ定数は一定とし、車体からの上下振動などは考えないものとした。

その状態方程式は、以下の式となる。

$$\begin{aligned} \dot{x}_s(t) &= A_s x_s(t) + B_{su} F_p(t) + B_{sw} d(t) + B_{sl} f_{lift}(t) \\ x_s(t) &= [z_1(t) \quad z_1(\dot{t}) \quad z_2(t) \quad z_2(\dot{t})]^T \\ d(t) &= [d(t) \quad \dot{d}(t)]^T \end{aligned}$$

架線不整の外乱は支持点間隔とハンガ間隔に起因した動特性とした。また揚力外乱は積分特性をもつ動特性とした。これらの伝達特性を含めた状態方程式は次式となる⁽¹²⁾。

$$\begin{aligned} \frac{d(s)}{w_d(s)} &= \frac{k_d \omega_{d1}^2 s}{(s^2 + 2\zeta_{d1} \omega_{d1} s + \omega_{d1}^2)(s^2 + 2\zeta_{d2} \omega_{d2} s + \omega_{d2}^2)} \\ \dot{x}_d(t) &= A_d x_d(t) + B_d w_d(t) \\ d(t) &= C_d x_d + D_d w_d(t) \\ \dot{f}_{lift}(t) &= c_{lift} w_{lift}(t) \end{aligned}$$

また、制御力を出す機構は空気サーボ駆動機構であり、その特性を以下の如くモデル化した。しかし、空気圧サーボシリンダの構造上、厳密な同定は不可能であるため、サーボンプの入力電圧 e_i から制御力にあたる駆動力 F_p の伝達関数を求めた。その伝達関数を次式で表される2次系のローパスフィルタで近似した⁽¹³⁾。

$$\begin{aligned} \dot{x}_{ac}(t) &= A_{ac} x_{ac}(t) + B_{ac} e_i(t) \\ F_p &= C_{ac} x_{ac}(t) \end{aligned}$$

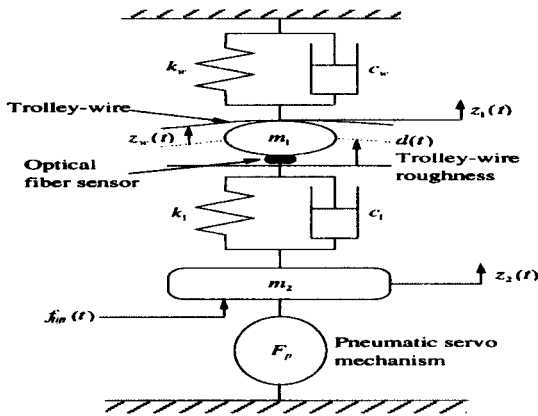


Fig.11 Analysis model of the low-noise current collector

近似の際、空気圧サーボ駆動機構の追従限界は約2Hzであるため、それ以降の周波数をカットした。その空気圧サーボ駆動機構の入力電圧に対する制御力の動特性をFig.12に示す。

これらの方程式から以下に示す拡大系を導出した。
 $\dot{x}_p(t) = A_p x_p(t) + B_{pu} e_i(t) + B_{pw} w_p(t)$
 $f(t) = C_p x_p(t) + D_{pv} v(t)$

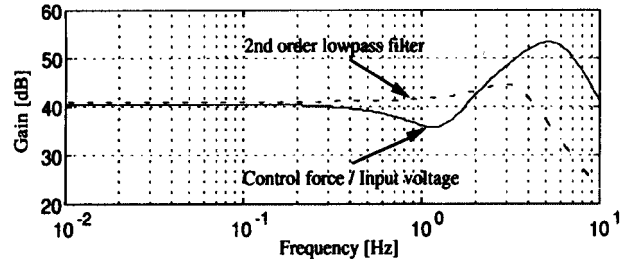


Fig.12 Characteristic of f/e_i transfer function

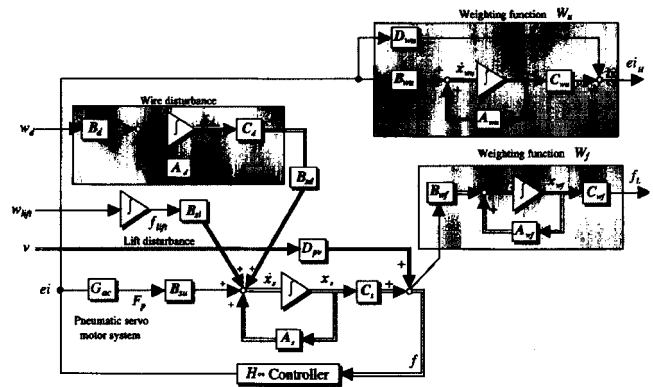
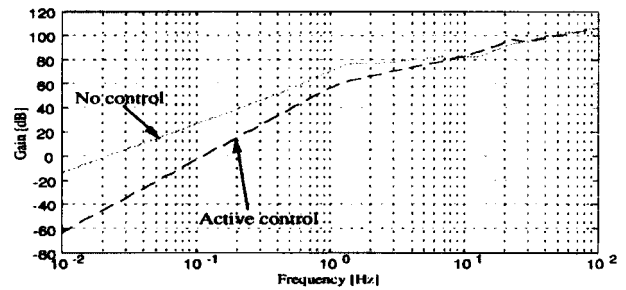
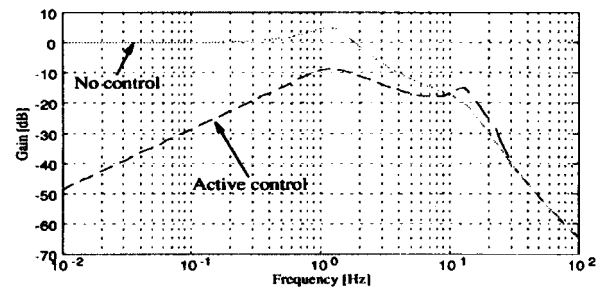


Fig.13 Generalized plant control system



(a) Wire disturbance



(b) Lift disturbance

Fig.14 Frequency response of contact force

図示したように、低周波数領域での接触力変動を抑えるためのローパスフィルタ(2次系)と高周波数領域での制御電圧を抑えるためのハイパスフィルタ(2次系)を重み関数とした H_∞ コントローラを設計した^{(19)~(21)}。その一般化プラントをFig.13に示す。又その数値計算の結果をFig.14(a),(b)に示す。図示した如く、10Hz以下のアクティブ制御の効果が表れている。

高速鉄道用パンタグラフの接触力制御特性の検討

5. 数値計算

Fig.11に示した集電装置の解析モデルでは架線とすり板間の接触力(POF光センサ出力信号)を観測量とした。各外乱に対するシミュレーション計算を行い、接触力の周波数応答特性の制御効果を得た。但し、空気圧サーボ駆動機構の特性は拡大系には組み込んでいない。検討結果から、架線とすり板間の接触力が検出された場合、10Hz以下の周波数領域で架線不整外乱と揚力外乱に対して、それぞれゲインが落ち良好な制御が行われていることが分かった。

6. 制御実験

今回、用いた実験装置の外観と構成をFig.15, Fig.16に示す。本実験では開発したPOF光センサをすり板直下に2つ設置して上方向からの荷重に対する接触力を直接検出した制御を行っている。それを良好に行うために H_∞ コントローラは接触力の変動分を抑えるレギュレータ構成とした。従って、接触力が目標値(100N)に達するまではPOF光センサからの検出力をフィードバックするPI制御を行い、目標値になった時点で H_∞ コントローラに切り替えて、レギュレータ制御させた。

本実験において課題とした外乱は架線不整外乱である。外乱は手加振で実現するため、実現しやすい0.5Hzと1.0Hzとした。その接触力制御実験の結果をFig.17, Fig.18(a), (b)に示す。この結果から、すり板直下に設置したPOF光センサにより接触力が正確に検出され、接触力変動を約半分に低減していることが分かった。

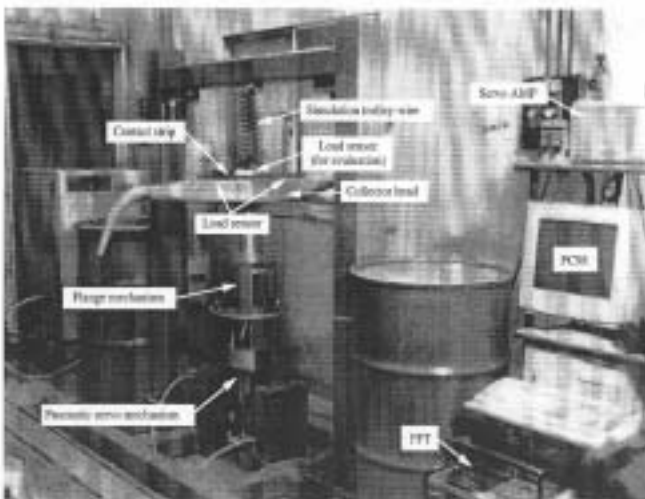


Fig.15 Photograph of the experimental apparatus

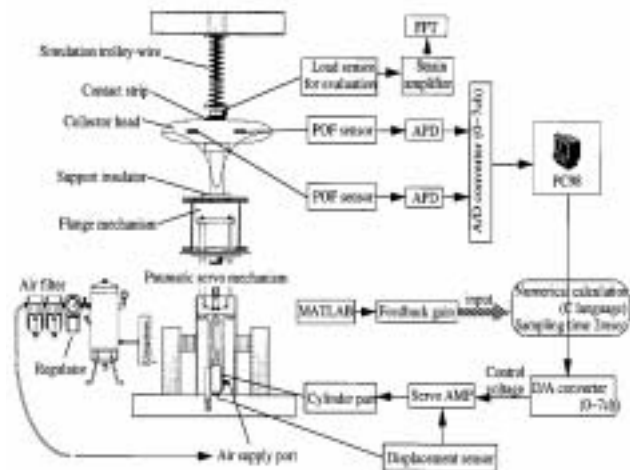


Fig.16 Schematic diagram of the experimental apparatus

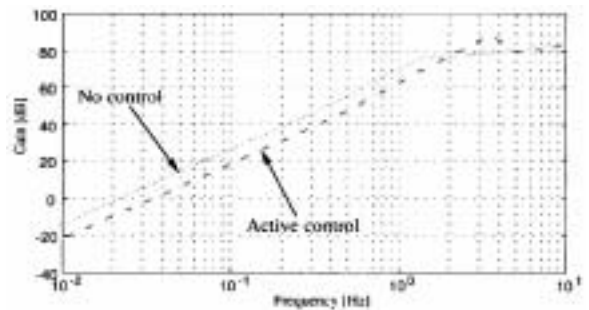
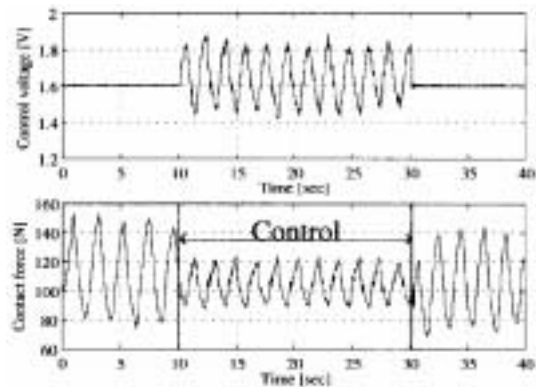
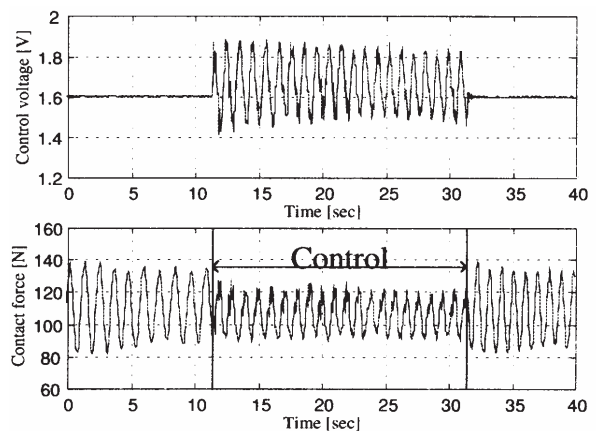


Fig.17 Frequency of contact force due to wire disturbance



(a) 0.5Hz wire disturbance



(b) 1.0Hz wire disturbance

Fig.18 Experimental result of contact force control

7. ま と め

高速鉄道用パンタグラフと架線に加わるAC25kV電磁場内での接触力を直接検出する力センサを検討した。寸法形状の制約からすり板部位に挿入するものをプラスチック型光ファイバ材で構成し、円形状の力センサを設計製作した。そして、センサ諸特性を得た後、すり板部位に装着し、実物大寸法の集電装置をアクティブ制御する諸実験を行い、以下の結果を得た。

- 1) POF光ファイバに外力を加えることで光強度特性が変化し、光強度(圧縮率)と荷重特性が線形であることを確認した。
- 2) すり板直下に設置するPOF光ファイバを円形・薄状化し、最大200Nの接触力を直接検出できた。
- 3) H_∞ コントローラを用いた集電装置の制御系設計を行い、10Hz以下のアクティブ制御効果が得られることを確認した。その時、用いた H_∞ コントローラは低周波数領域での接触力変動を抑制するローパスフィルタと高周波数領域での制御電圧を抑制するハイパスフィルタの2次系重み関数からなる。
- 4) 空気圧サーボ駆動機構を用いた接触力制御実験により、架線外乱(0.5Hz, 1.0Hz)に対する制御特性を得て、その追従性能を確認した。

終わりに、本研究に協力して頂いた慶應義塾大学理工学部吉田研究室の関係者に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 前田：沿線環境に関する研究開発の動向，鉄道総研報告，16-12，1/4(2002)
- 2) 牧野，掛樋，飯田，寺田，服部：後退翼形集電体を用いた高速鉄道用集電装置の騒音特性，日本機械学会論文集，63-612-C，2679/2686(1997)
- 3) 森川，池田：低空力音T型パンタグラフの空力騒音・集電特性，鉄道総研報告，8-6，19/25(1994)
- 4) A.Iida, Y.Takano, T.Makino, K.Kobayashi and M.Hattori : Development of a Low-Noise Electric-Current Collector for High-Speed Train, Proc. INTER-NOISE94, 163/169(1994)
- 5) 牧野：高速鉄道用パンタグラフのアクティブ制御の研究動向，フルードパワーシステム，34-3，34/38(2003)
- 6) 吉田，下郷：接触力制御機構を有する集電装置，日本機械学会論文集，54-504-C，1821/1827(1988)
- 7) 吉田，下郷，小野田：車両走行風向による振動最適制御，日本機械学会論文集，48-427-C，358/366(1982)
- 8) A. Thompson and B. Davis : An Active Pantograph with Shaped Frequency Response Employing Linear Output Feedback Control, Vehicle System Dynamics, 19, 131/149(1990)
- 9) G. Galeotti and M. Galanti : Servo Actuated Railway Pantograph for High-Speed Running with Constant Contact Force, Proc. Instn. Mech. Engrs., 207-F-1, 37/49(1993)
- 10) 滑川，磯部，松村：リニア直流モータを用いたパンタグラフ基礎実験システムの H^∞ 制御，電気学会論文誌，115-11-D，1412/1419(1995)
- 11) T.Makino, K.Yoshida, S.Sato and K.Makino : Running Test on Current Collector with Contact Force Controller for High-Speed Railways, JSME int.J, Ser.C, 40-4, 671/680(1997)
- 12) 吉田，瀬戸，牧野：高速鉄道用パンタグラフにおける外乱推定と接触力制御，計測自動制御学会論文集，34-3，217/224(1998)
- 13) K.Yoshida and T.Makino : Active Control of Low-noise Current Collector for Super High-Speed Railways, Proc. WCRR'97(Firenze), Ser.C, 287/297(1997)
- 14) T.Sato and T.Makino : Vibration Reduction of Pantograph-support System using Impact Damper, Proc.ISMA2002, 1669/1676(2002)
- 15) 御子柴：石英系光ファイバー，1/30，久樹社(1997)
- 16) 川久保：プラスチック光ファイバー，31/60，久樹社(1997)
- 17) 藤井：光ファイバ利用技術，1/50，アグネ社(1998)
- 18) D.Kalymnios : Proc. of POF Conf.'97, 35/36(1997)
- 19) 美多 勉，小郷 寛：システム制御理論入門，156/179，実教出版(1994)
- 20) 美多 勉： H_∞ 制御，25/40昭晃堂(1994)
- 21) 三平，美多：状態空間論による H^∞ 制御の解法，計測と制御，29-2，129/135(1990)