接触力制御機構を有する集電装置*

吉田和夫^{*1}, 下郷太郎^{*1}

A Power Collector with a Control Mechanism of Contact Force

Kazuo YOSHIDA and Taro SHIMOGO

A power collector is presented, which has a control mechanism of contact force between a contactor of the power collector and a contact wire. By applying the optimal control theory, the optimal control laws with a feedforward link of wire unevenness are derived for two cases of sliding on a rigid contact wire and an elastic contact wire which is simply modeled as an infinite beam in this study. The feasibility of the power collector is considered by performing numerical calculations and an experiment. As a result, it was made clear that the optimal state feedback control of the power collector is useful for the case of a rigid wire, but not useful for the case of an elastic wire. In other words, in the case of the elastic wire, the feedforward control of disturbance is indispensable and the detection or the estimation of wire unevenness is an important technical subject.

Key Words: Application of Control, Optimal Control, Power Collector, Feedforward Control, Contact Force Control, Railways

1. ま え が き

電気鉄道の集電系においては、摩耗の低減、離線および騒音の防止などの観点より架線と集電装置間の接触力の変動を抑制することが重要な力学的課題となる。現在使用されているカテナリ架線およびパンタグラフ形集電装置については、すでに多くの研究がなされており⁽¹⁾、また多くの改良がなされてきたが、接触力制御機構を有する集電装置に関してはあまり研究されていなかった。接触力のアクティブ制御に関しては、油圧や空気圧のアクチュエータを有する集電装置の実用性を考察したもの⁽²⁾⁽³⁾や新しい制御機構を有するパンタグラフとカテナリ系の性能を論じたもの⁽⁴⁾があるが、制御系の設計が最適化されておらず、アクティブ制御の効果はあまり得られていなかった。そこで本研究は、最適制御の観点より接触力制御の可能性を理論的かつ実験的に考察することを目的とした。

架線と集電装置系の動力学的取扱いにおいて、架線系のモデル化が困難で重要な問題となる。現在使用されている集電装置の追従特性は集電装置の加振実験に

よって評価されているが、これは架線を剛体と仮定して接触力変動を評価することと基本的には同じである。しかしながら、実際の架線は接触子のしゅう動に伴って複雑な挙動を示す。その動力学的な特徴の一つに波動伝搬の性質がある。無限ばりの架線モデルはその性質を有する最も簡単なモデルである。そこで本研究では以上の理由から架線を剛体と仮定した場合と無限ばりと仮定した場合について制御系を設計した。剛体架線と仮定した場合は実験的考察が容易となるので、模型実験によってその接触力制御の可能性を考察した。無限ばり架線モデルの場合には理論的考察のみを行ったが、剛体架線を前提として最適化された集電装置が無限ばり架線モデルをしゅう動した場合についても検討を加えた。また、集電装置のモデルとしては2質点系モデルを用いた。

入力外乱としては、架線の支持点とハンガ間隔の不整を考慮し、この不整が二つのピークをもつパワースペクトル密度を有すると仮定した。ただし、剛体架線の場合については実験を行ったので、実験の制約から一つのピークのみを有すると仮定した。

2. 剛体架線をしゅう動する集電装置モデル

図1に示されるような質量、ばね、ダンパおよびア

* 昭和62年7月18日 第24回シンポジウムにおいて講演、原稿受付 昭和62年10月2日。

^{*1} 正員、慶応義塾大学理工学部 (〒223 横浜市港北区日吉3-14-1)。

クチュエータから構成される2質点系モデルの集電装置が凹凸を有する架線をしゅう動する場合を考察する。ただし、図1において z は架線の不整を、 y_w は架線のたわみ量を示すが、ここでは架線を剛体であると仮定し、 $y_w=0$ の場合を考察する。

集電装置は車両に対して鉛直方向のみの運動を行い、離線は生じないものとし、アクチュエータとしてリニアモータを用いると仮定する。図1の集電装置モデルの運動方程式を立てると、以下のようになる。

$$m_1 \ddot{y}_{p1}(t) = -k_1\{y_{p1}(t) - y_{p2}(t)\} - c_1\{\dot{y}_{p1}(t) - \dot{y}_{p2}(t)\} - f(t) \quad (1)$$

$$m_2 \ddot{y}_{p2}(t) = k_1\{y_{p1}(t) - y_{p2}(t)\} + c_1\{\dot{y}_{p1}(t) - \dot{y}_{p2}(t)\} - k_2 y_{p2}(t) - c_2 \dot{y}_{p2}(t) + u_a(t) \quad (2)$$

$$L \dot{i}(t) + Ri(t) + K_e \dot{y}_{p2}(t) = u_e(t) \quad (3)$$

$$u_a(t) = K_f i(t) \quad (4)$$

図1に示されていないパラメータは以下のとおりである。

L : リニアモータの電機子インダクタンス

R : リニアモータの電機子抵抗

K_e : 誘起電圧定数

K_f : 推力定数

$u_e(t)$: リニアモータ印加電圧

$i(t)$: リニアモータの電機子電流

$u_a(t)$: リニアモータ出力

入力外乱、すなわち質点 m_1 の加速度 $\ddot{y}_{p1}$ のパワースペクトル密度は、一つの卓越振動数 ω_n を有するものとして次式で定義する。

$$S_{\ddot{y}_{p1}} = \frac{W}{(\omega_n^2 - \omega^2)^2 + (2\zeta_n \omega_n \omega)^2} \quad (5)$$

ただし、 ζ_n および W は定数である。

式(5)のパワースペクトル密度を有する加速度は白色雑音を入力とするある成形フィルタの出力とみなす

図1 架線・集電装置系のモデル図

ことができるので、この成形フィルタを含んだ拡大システムを用いて運動方程式を状態方程式化すると、以下のように表現される。

$$\dot{\mathbf{y}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{y}(t) + \mathbf{B}u_e(t) + \mathbf{D}w(t) \quad (6)$$

$$\mathbf{y}(t) = [\mathbf{y}_p(t)^T : \mathbf{z}(t)^T]^T$$

$$\mathbf{y}_p(t) = [i(t) \ y_{p2}(t) \ \dot{y}_{p2}(t)]^T$$

$$\mathbf{z}(t) = [y_{p1}(t) \ \dot{y}_{p1}(t) \ \ddot{y}_{p1}(t)]^T$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_r & \mathbf{G}_r \\ \mathbf{O} & \mathbf{M} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} -R/L & 0 & -K_e/L & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \frac{K_f}{m_2} & -\frac{k_1+k_2}{m_2} & -\frac{c_1+c_2}{m_2} & \frac{k_1}{m_2} \\ \hline & & & \mathbf{O}_{4 \times 3} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \frac{c_1}{m_2} & 0 & 0 \\ \hline 1 & 0 & 0 \\ -2\zeta_1\omega_1^2 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\omega_n^2 & -2\zeta_n\omega_n \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B} = [\mathbf{B}_r^T : \mathbf{O}_{4 \times 1}^T]^T$$

$$= [1/L \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$$

$$\mathbf{D} = [\mathbf{O}_{3 \times 1}^T : \mathbf{N}^T]^T$$

$$= [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1]^T$$

ただし、 ζ_1 と ω_1 は変位のrms値を有限値にするために挿入したもので、実際の制御の周波数領域において影響を与えないほど小さい値とする。

出力として接触力変動を採用すると出力方程式は次式で表される。

$$\mathbf{f}(t) = \mathbf{C}\mathbf{y}(t) \quad (7)$$

$$\mathbf{C} = [0 \ k_1 \ c_1 - k_1 \ -c_1 \ -m_1 \ 0]$$

3. 無限ばり架線をしゅう動する場合

図1に示すように2章において与えられた制御機構を有する集電装置が無限ばり架線をしゅう動する場合を考察する。この場合は集電装置の運動方程式は式(1)~(4)と同一となるが、無限ばりのたわみ y_w を、すなわち架線のダイナミクスを考慮する必要がある。

張力 T で張られた架線の微小振動の動力学的釣合いのみを考えると、架線の運動方程式は次式で与えられる。

$$\rho \frac{\partial^2 y_w(t, x)}{\partial t^2} + EI_a \frac{\partial^4 y_w(t, x)}{\partial x^4} - T \frac{\partial^2 y_w(t, x)}{\partial x^2} = f(t) \cdot \delta(x - vt) \quad (8)$$

$$y_{p1}(t) = y_w(t, x)|_{x=vt} + z(t, x)|_{x=vt} \quad (9)$$

ただしパラメータは以下のとおりである。

ρ : 架線の線密度

E : 架線のヤング率

I_a : 架線の断面二次モーメント

T : 架線の張力

$f(t, x)$: 接触力変動

$y_w(t, x)$: 架線のたわみ

x : 軸方向座標

v : 車両走行速度

$\delta(\cdot)$: ディラックのデルタ関数

不整としては支持点間隔とハンガ間隔の卓越振動数を考慮して、以下のようなパワースペクトル密度を有するものと仮定した。

$$S_{\dot{z}} = \frac{\omega^4 W}{\{(\omega_1^2 - \omega^2)^2 + (2\zeta_1 \omega_1 \omega)^2\} \{(\omega_n^2 - \omega^2)^2 + (2\zeta_n \omega_n \omega)^2\}} \quad (10)$$

接触力変動に対する架線の接触点変位の周波数応答を以下の手順で求める。まず、 $x = \xi + vt$ として式(8)を移動座標系で表現すると、

$$\rho \left\{ \frac{\partial^2 y_w(t, \xi)}{\partial t^2} + 2v \frac{\partial^2 y_w(t, \xi)}{\partial t \partial \xi} + v^2 \frac{\partial^2 y_w(t, \xi)}{\partial \xi^2} \right\} + EI_a \frac{\partial^4 y_w(t, \xi)}{\partial \xi^4} - T \frac{\partial^2 y_w(t, \xi)}{\partial \xi^2} = f(t) \delta(\xi) \quad (11)$$

つぎに接触力変動に対する架線変位の周波数応答を次式で定義する。

$$G(s, \xi) F(s) = Y_w(s, \xi) \quad (12)$$

式(11)を時間に関してフーリエ変換し、かつ空間に関して双ラプラス変換してその逆変換から $\xi=0$, すなわち接触点における接触力変動に対する架線の応答変位の周波数応答を求めると以下のように表される。

$$H_{fww}(j\omega, \xi)|_{\xi=0} = \frac{1}{EI_a(\sigma_1 - \sigma_3)} \times \left\{ \frac{1}{(\sigma_2 - \sigma_1)(\sigma_2 - \sigma_3)} - \frac{1}{(\sigma_4 - \sigma_1)(\sigma_4 - \sigma_3)} \right\} \quad (13)$$

ただし、 $\sigma_1 \sim \sigma_4$ は次式の特異根として与えられる。

$$s^4 + \frac{\rho v^2 - T}{EI_a} s^2 - \frac{2\rho v j\omega}{EI_a} s - \frac{\rho \omega^2}{EI_a} = 0 \quad (14)$$

このままでは架線・集電装置系のダイナミクスを状態方程式化することはできないので、式(14)の周波数応答を曲線適合によって次式によって近似する。

$$G(j\omega) = \frac{1}{-a\omega^2 + bj\omega} \quad (15)$$

図2に式(13)から得られた周波数応答を実線で、式(15)の近似周波数応答を破線で示す。式(15)を時間領域で表現して、式(1)～(4)の集電装置に関する運動方程式と連立させ、架線・集電装置系の状態方程式を求めると以下ようになる。

$$\dot{y}(t) = Ay(t) + Bu_a(t) + Dw(t) \quad (16)$$

$$y(t) = [y_p(t)^T : z(t)^T]^T$$

$$y_p(t) = [y_{p1}(t) \ y_{p2}(t) \ \dot{y}_{p1}(t) \ \dot{y}_{p2}(t)]^T$$

$$z(t) = [z(t) \ \dot{z}(t) \ \ddot{z}(t) \ \ddot{\dot{z}}(t)]^T$$

$$A = \begin{bmatrix} A_w & A_z \\ O & M \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} B_w \\ O \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} O \\ N \end{bmatrix}$$

$$A_w = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{k_1}{a+m_1} & -\frac{k_1}{a+m_1} & -\frac{b+c_1}{a+m_1} & -\frac{c_1}{a+m_1} \\ \frac{k_1}{m_2} & -\frac{k_1+k_2}{m_2} & \frac{c_1}{m_2} & -\frac{c_1+c_2}{m_2} \end{bmatrix}$$

$$A_z = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b/(a+m_1) & a/(a+m_1) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_w = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1/m_2 \end{bmatrix}$$

$$M = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \Omega_1 & \Omega_2 & \Omega_3 & \Omega_4 \end{bmatrix}, \quad N = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\Omega_1 = -\omega_1^2 \omega_n^2$$

$$\Omega_2 = -2\omega_1 \omega_n (\zeta_1 \omega_n + \zeta_n \omega_1)$$

$$\Omega_3 = -(\omega_1^2 + 4\zeta_1 \zeta_n \omega_1 \omega_n + \omega_n^2)$$

図2 無限ばり架線の周波数応答の曲線適合

$$\Omega_a = -2(\zeta_1 \omega_1 + \zeta_n \omega_n)$$

接触力変動を出力とする出力方程式は次式で与えられる。

$$f(t) = C y(t) \quad \dots\dots\dots (17)$$

$$C = \begin{bmatrix} -\frac{ak_1}{a+m_1} & \frac{ak_1}{a+m_1} & \frac{bm_1-ac_1}{a+m_1} & \frac{ac_1}{a+m_1} \\ 0 & -\frac{bm_1}{a+m_1} & -\frac{am_1}{a+m_1} & 0 \end{bmatrix}$$

4. 最適制御理論の適用

接触力の変動を最小に抑えることを目的として、また操作力に関する制約を考慮して接触力変動の分散と操作力の分散の重み係数 r 付き和を評価関数として以下のように採用する。

$$J(u) = E[y(t)^T C^T C y(t) + r u^2(t)] \quad \dots\dots\dots (18)$$

$$u(t) = u_e(t) \text{ or } u_a(t)$$

式(18)を最小にする最適制御則は、最適制御理論から以下のように与えられる。

$$u = -F_b y_p(t) - F_f z(t) \quad \dots\dots\dots (19)$$

$$F_b = r^{-1} B^T P_{11}, \quad F_f = r^{-1} B^T P_{12}$$

ただし、 P_{11} および P_{12} は、以下のリカッティ方程式の一意正定解として容易に求められる。

$$PA + A^T P - PB r^{-1} B^T P + C^T C = 0 \quad \dots\dots\dots (20)$$

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{12}^T & P_{22} \end{bmatrix}$$

式(19)において右辺第1項は状態フィードバックの項で、第2項は外乱のフィードフォワードの項である⁽⁵⁾。

5. 最適制御系の特性

5.1 剛体架線の場合 制御系の特性を調べるに際し、剛体架線の場合は実験を行ったのでパラメータの数値として表1で示されるような実験装置の諸元を用いた。

図3に式(18)における重み係数 r を変化させたときの、接触力変動と制御力とのトレードオフ曲線を示す。この図3から、フィードバック制御のみの場合には限界があるが、フィードフォワード併合制御とほぼ同程度の制御効果が得られることがわかる。さらに、図4にフィードフォワード併合制御を行った場合の第1段質量 m_1 の慣性力に対する接触力変動の周波数応答を、重み係数 r を変えて示す。これより、重み係数 r を小さくし制御力を増していくにしたがい、共振点におけるゲインを大幅に抑制できることがわかる。

5.2 無限ばり架線の場合 この場合は現行の新幹線用パンタグラフの諸元を参考にした。その諸元を

表2に示す。

図5に、無限ばり架線モデルにおいて、無限ばり架線モデルに対する最適制御則を用いてフィードバック制御およびフィードフォワード併合制御を行った場合と、さらに剛体架線モデルに対して求めた最適制御則を用いてフィードバック制御およびフィードフォワード併合制御を行った場合の制御力と接触力変動の関係を示す。ただし、剛体架線モデルに対してリニアモータの特性を考慮しないで求めた制御則を用い、解析の簡略化のためこの制御則に含まれる $\ddot{y}_{b1}(t)$ の影響を

表1 実験システムの諸元

m_1	0.2023	kg
m_2	0.5081	kg
k_1	1605	N/m
k_2	292.2	N/m
c_1	0.2006	Ns/m
c_2	0.9788	Ns/m
ω_n	61.11	rad/s
ζ_n	0.0001	
ω_1	6.283	rad/s
ζ_1	0.7	
R	7.93	Ω
L	2.90	mH
K_e	13.0	Vs/m
K_f	15.0	N/A
W	1138.2	m^2/s^2

図3 接触力変動と制御力のトレードオフ曲線

図4 第1段質量の慣性力に対する接触力変動の周波数応答

無視して計算した。

図5から、剛体架線の場合とは逆に、無限ばり架線モデルに対して求めた制御則、剛体架線モデルに対して求めた制御則ともに、フィードバック制御のみではまったく制御効果が現れないことがわかる。しかし、無限ばり架線に対する制御則を用いて、フィードフォワード併合制御を行うことにより剛体架線の場合と同様の制御効果を期待できる。一方、剛体架線モデルに対して求められた制御則を用いたフィードフォワード併合制御の場合、重み係数 r の値が大きいときには大きな制御力を必要とするにもかかわらず十分な制御効果が得られないが、 r がある程度小さいときには無限ばり架線モデルに対する制御則を用いた場合と同様の制御効果を得ることができる。

図6に無限ばり架線モデルに対する最適制御則を適用した場合の接触力変動のパワースペクトル密度を示す。図5で示されているように、フィードバックのみでは制御効果がなく、フィードフォワード併合制御を行うことで大きな効果が得られることが確認される。

表2 無限ばり架線・集電装置系の諸元

m_1	6.7	kg
m_2	9.0	kg
k_1	46000	N/m
k_2	5	N/m
c_1	100	Ns/m
c_2	0.1	Ns/m
ω_n	69.87	rad/s
ζ	0.01	
ω_1	6.987	rad/s
ζ_1	0.01	
a	0.310565	
b	208.023	
v	55.6	m/s
W	31840	m ² /s ⁷
ρ	0.988	kg/m
EI_a	112.0	Nm ²
T	9800.0	N

図5 接触力変動と制御力の関係

6. 制御実験

本研究では、剛体架線をしゅう動する集電装置モデルについて、式(6)～(7)を離散化しデジタル最適制御理論を適用することにより制御実験を行った。ただし、デジタル最適制御則は計算機の演算時間によるサンプル遅れを考慮して導出した⁽⁶⁾。

表1に実験システムの諸元を示す。さらに、図7と図8に実験装置の外観と概略図を示す。集電装置は鉛直方向にのみ運動するとの仮定から、 m_2 は直動ベアリングにより案内される構造とした。また、外乱は加振器により荷重変換器を介して m_1 に加えられる。 m_1 の加速度を加速度検出器により検出し、この信号を微分器および積分器に通してその加加速度および速度を得た。 m_1 の m_2 に対する相対変位を差動トランスにより検出した。 m_2 の絶対変位を渦電流式非接触変位計により検出し、その信号を微分器に通してその速度を得た。さらに、リニアモータ電機子に流れる電流を0.5

図6 接触力変動のパワースペクトル密度

図7 実験装置の外観

図 8 実験装置の概略図

図 9 実験結果 (接触力変動の周波数応答)

Ω 抵抗での電圧降下として検出した。上記のように検出された七つの状態量は、サンプリング周期 6 ms で A-D 変換されデジタル計算機に入力される。それらの状態量から 1 サンプル遅れを考慮した制御則⁽⁶⁾の計算が行われた後、D-A 変換器および増幅器を通してリニアモータに印加される。

ここで、実験は理論計算同様、状態フィードバックのみの制御の場合と、外乱のフィードフォワード制御を加えた場合との 2 とおり行い、その結果を図 9 に示す。ただし、実験装置に制約があるため、実験を行うことができた 5~20 Hz の周波数範囲のみを示す。

図 9 から、非制御の場合は、9.7 Hz 付近の共振ピークおよび 16.8 Hz 付近の反共振ピークが顕著に現れているが、フィードバック制御およびフィードフォワード併合制御を行った場合には、ほぼ理論どおりの制御効果が得られていることがわかる。しかしながら、フィードフォワード併合制御を行った場合、高い周波数域で制御誤差が生じていることがわかる。これは、リニアモータの非線形性、加速度検出器の位相誤差などが影響したものと考えられる。

7. 結 論

本研究は、剛体と無限ばりの架線モデルを用いて最適制御理論の観点から接触力制御機構を有する集電装置の実現性を理論的かつ実験的に検討した。その結果を要約すると以下ようになる。

(1) 架線が剛体の場合は集電装置の状態のフィードバックのみでかなりの制御効果が期待されるが、架線が波動伝搬の性質を有する無限ばりの場合は集電装置の状態フィードバックだけでは接触力変動を抑えることができないばかりか逆に増加を招く可能性がある。

(2) 無限ばり架線に対しては外乱のフィードフォワードの効果が実に大きく、いかに不整を検出あるいは推定するかが接触力変動制御の最大の技術的課題といえることができる。

最後に、本研究を遂行するに際し東洋電機製造株式会社からの援助をいただいたことと、また本研究の実験および数値計算において本塾大学院学生 宮田陽君と井上誠司君の助力を受けたことを記し、謝意を表す。

文 献

- (1) 例えば、藤井・ほか 50 名、集電系の振動に関する研究報告書、(昭 62)、鉄道電化協会。
- (2) Sikorsky Aircraft., U. S. Depart. Transport. Final Rep. Contract., No. 7-35415 (1970)。
- (3) Vinayagalingam, T., Trans. ASME, J. Dyn. Syst. Meas. Control, 105-4 (1983), 287。
- (4) Wormley, D., ほか 3 名, PB Rep., No. 85-230225。
- (5) Kwakernaak, H. and Sivan, R., Linear Optimal Control Systems, (1972), 262, Wiley-Interscience。
- (6) 美多, デジタル制御理論, (昭 59), 173, 昭晃堂。

討 論

〔質問〕 永井正夫〔東京農工大学工学部〕

集電装置の接触力のアクティブ制御について興味深く拝見させていただいた。以下について質問させていただく。

(1) 図6で低周波数領域では制御なしのほうが良い結果となっているが、その理由をお聞かせ願いたい。

(2) 電磁ノイズなどにより実際の集電の制御環境は非常に悪いものと思われる。最適制御理論を使うためセンサが多く使われているが、実用化に向けてセンサあるいは状態観測について著者のお考えをお聞かせ願いたい。

(3) アクチュエータを質点 m_1 と m_2 の間につけるかまたは1質点モデルにしたほうが、接触力制御はより直接的で制御系も簡単になるものと思われるが、2質点系のメリットについてお考えをお聞かせ願いたい。

〔回答〕 (1) パラメータが異なるので数値的には対応しないが、図4の低周波数領域と同じように $\sqrt{k_2/(m_1+m_2)}$ で決まる反共振が図6の最低周波数より少し低い所にある。したがって図4の周波数応答からもわかるように、制御を行うとこの反共振をなめらかにするので、この周波数帯域では制御なしの場合より上がることになる。

(2) ご指摘のとおり、走行時の計測におけるノイズの問題は非常に大きな技術的課題と思われる。そこで集電装置の近似的な状態フィードバックや部分的にこれを実現するようなセミアクティブな集電装置などの研究が過去に行われたが、序論に述べたとおりよい結果は得られていない。したがって状態フィードバック制御手法を基本とする限りこの問題を避けて通れないことを本研究は明らかにしと逆にご理解いただきたい。また、接触力の直接フィードバックの場合には、外乱の情報が含まれるので、ある程度の制御効果が期待できることを示した。動的補償器などを用いればさらにより制御が期待できると考えられる。いずれにしても、外乱の推定か検出あるいは接触力の検出が必要なのである。接触力は近似的に計測された例もあるので、今後技術の進歩によってこれらの問題は解決されると思う。

(3) 1質点モデルにすると構造および制御系が簡単になることは言うまでもないが、実際の架線の不整や凹凸はかなり高い振動数成分まで有しており、この周波数領域全般でよい特性を有するアクチュエータは今のところないと思う。そこで一種のメカニカルなフィルタを通すという意味で2質点モデルのほうが実現性が高いと思う。ただし、その場合は構造のパラメータもアクチュエータの特性を考慮したうえで最適設計される必要がある。