連続的な制御入力によるセルフパワード・アクティブ振動制御*

中野公彦^{*1}, 須田義大^{*2}, 中代重幸^{*3}

Self-Powered Active Vibration Control with Continuous Control Input

Kimihiro NAKANO, Yoshihiro SUDA and Shigeyuki NAKADAI

Active vibration control using regenerated vibration energy, i. e., self-powered active control, is proposed. In the self-powered active control system, vibration energy is regenerated by an electric generator, which is called an energy regenerative damper, and is stored in the condenser. An actuator achieves active vibration control using the energy stored in a condenser. In order to control output force of the actuator, the variable resistance whose value can be controlled by a computer is utilized. On experiments, the self-powered active control was achieved and its isolation performance was examined, in comparison with that of a semi-active and a passive control system. It is proved that the self-powered active control has better isolation performance than the semi-active and the passive control system.

Key Words: Vibration Control, Vibration Control Device, Actuator, Damper, Skyhook Control, Semi Active Control, Energy Regeneration.

1. 緒 言

近年になり, アクティブ振動制御が様々な分野に応用されるようになってきた⁽¹⁾. アクティブ振動制御は従来のパッシブなシステムと比較して, 良好な振動絶縁性能を持つ利点がある. 一方で, アクティブ振動制御はエネルギー消費を伴い, このことが欠点となることがある.

そのような経緯から, 著者らは再生した振動エネルギーを利用してアクティブ振動制御を行うシステムを提案した⁽²⁾. このような制御手法を, セルフパワード・アクティブ振動制御と名付ける. 既報⁽²⁾で用いたシステムは, Karnopp らの研究⁽³⁾によって提案されたオンオフ式のスカイフック制御を参考に, セミアクティブ制御では実現不可能な負の減衰力を, 再生した振動エネルギーを利用して実現するものである. しかし, オンオフ式制御では, 出力の不連続面

などが制振性能を悪化させる可能性がある. 本報告では, システムを改良し, 連続的な制御入力を持つ一般的なアクティブ振動制御を, 再生した振動エネルギーのみを利用して行うことを提案する. アクチュエータの出力の制御は, コンピューターによって抵抗値を切り替えることが可能な可変抵抗器を利用して, 回路電流を制御することによって行う.

エネルギー消費を伴わない制御手法としてセミアクティブ制御が提案され, 研究されている⁽⁴⁾. セミアクティブ制御とは, ダンパの減衰力などのパラメータの値を制御することによってアクティブ制御の制御出力特性を模擬するものである. しかしながら, セミアクティブ制御の特性をアクティブ制御に近づけることには限界がある. ダンパの減衰力を制御することを考えると, 可変減衰係数ダンパの最大減衰力以上の減衰力と最小減衰力以下の減衰力, 特に負の減衰力を実現することはできない.

本報告では, 実験により, 提案するシステムの制振性能を, パッシブ制御やセミアクティブ制御と比較する. その結果から, セルフパワード・アクティブ振動制御の有効性を証明することを本研究の目的とする.

* 原稿受付 1998 年 6 月 19 日.

^{*1} 正員, 東京大学大学院(〒106-8558 東京都港区六本木 7-22-1).^{*2} 正員, 東京大学生産技術研究所.^{*3} 正員, 千葉工業大学(〒275-0016 習志野市津田沼 2-17-1).

E-mail: nakano@cc.iis.u-tokyo.ac.jp

2. 提案するシステム

2.1 システムの概観 本研究では，セルフパワード・アクティブ制御として図1のような2自由度振動系のシステムを提案する．制振対象はばね上質量である．ばね上およびばね下の系にそれぞれ1つずつリニア直流モーターが配置されている．ばね下のモーターが振動エネルギーを利用して発電を行い，そのエネルギーをコンデンサに蓄える．ばね上のモーターは可変抵抗器を利用して回路の電流を調整しながら，アクティブ制御を行う．ばね下のモーターは，振動エネルギーを回生することから，エネルギー回生ダンパと呼ぶ．また，ばね上のモーターはアクティブ制御を行うので，アクチュエータと呼ぶことにする．

Fig. 1 Self-Powered Active Control System

2.2 直流モーターのモデル 直流モーターが理想的な性能を持っていると仮定する．すなわち，電機子速度に比例した誘導電圧が発生し，電機子電流に比例した出力を持つとする．その比例定数をここでは，モーター定数 (φ) と呼ぶ．また，直流モーターの回路は抵抗のみで構成されているとし，インダクタンスなどの影響は無視することにした．直流モーターの端子を短絡させた状態で，モーターのストロークが速度 $\dot{z}$ で動いている時は，以下のような回路電流 (i) が流れる．

$$i = \frac{\varphi}{r} \cdot \dot{z} \quad (1)$$

ただし， r は回路の抵抗を示す．この時，直流モーターの出力 (f) は以下ようになる．

$$\begin{aligned} f &= \varphi \cdot i \\ &= \frac{\varphi^2}{r} \cdot \dot{z} \end{aligned} \quad (2)$$

直流モーターはダンパとして機能することがわかる．この時の減衰係数をモーターの等価減衰係数 (c_{eq})

と呼ぶことにする⁽⁵⁾．回路の等価減衰係数を以下のように定義する．

$$c_{eq} = \frac{\varphi^2}{r} \quad (3)$$

2.3 運動方程式 以下にシステムの運動方程式を示す． m は質量， k はばね定数， x は絶対変位を示す． x_0 は変位外乱を指す．添え字の1は，ばね下及びエネルギー回生ダンパを指し，2はばね上及びアクチュエータを指す．

$$m_2 \cdot \ddot{x}_2 + k_2 \cdot (x_2 - x_1) + f_2 = 0 \quad (4)$$

$$m_1 \cdot \ddot{x}_1 + k_1 \cdot (x_1 - x_0) + f_1 = k_2 \cdot (x_2 - x_1) + f_2 \quad (5)$$

$$f_2 = \varphi_2 \cdot i_2 \quad (6)$$

$$f_1 = \varphi_1 \cdot i_1 \quad (7)$$

3. エネルギー回生

3.1 エネルギー回生ダンパの回路 エネルギー回生ダンパの回路は図2に示す．リレースイッチの切り替えによって，整流及びコンデンサと短絡回路との接続の切り替えが可能になっている．

Fig. 2. Circuit of the Energy Regenerative Damper

3.2 エネルギー回生ダンパの制御 エネルギー回生ダンパの制御は須田らの研究⁽²⁾と同様の方法を用いた．モーターの誘導電圧がコンデンサの電圧 (e) よりも高い時にエネルギーを回生し，それ以外の時は，通常のダンパとして機能する．エネルギーを回生している時をエネルギー回生モード，通常のダンパとして機能している時をパッシブダンパモードと呼ぶことにする．以下にエネルギー回生ダンパの回路方程式を示す．

$$\varphi_1 \cdot |\dot{z}_1| \geq e \quad (\text{エネルギー回生モード})$$

$$i_1 = \frac{\varphi_1 \cdot |\dot{z}_1| - e}{r_1} \quad (\dot{z}_1 \geq 0) \quad (8)$$

$$i_1 = -\frac{\varphi_1 \cdot |\dot{z}_1| - e}{r_1} \quad (\dot{z}_1 < 0) \quad (9)$$

$$\varphi_1 \cdot |\dot{z}_1| < e \quad (\text{パッシブダンパモード})$$

$$i_1 = \frac{\varphi_1 \cdot \dot{z}_1}{r_1} \quad (10)$$

3.3 エネルギー回生ダンパの減衰力低下 パッシブダンパモードの時にエネルギー回生ダンパが吸収するエネルギーを E_p とおく。微小時間 dt の間にエネルギー回生ダンパが吸収するエネルギーは以下のように表される。

$$E_p = c_{eq1} \cdot \dot{z}_1^2 \cdot dt \quad (11)$$

一方、エネルギー回生モード時のエネルギー吸収総量 (E_a) は以下のように表される。

$$\begin{aligned} E_a &= \varphi_1 \cdot i_1 \cdot \dot{z}_1 \cdot dt \\ &= \left(\frac{\varphi_1 \cdot |\dot{z}_1| - e}{r_1} \right) \cdot \varphi_1 \cdot |\dot{z}_1| \cdot dt \end{aligned} \quad (12)$$

この時にコンデンサに回生されるエネルギー量 (E_s) を式 (9) に示す。

$$\begin{aligned} E_s &= |i_1| \cdot e \cdot dt \\ &= \left(\frac{\varphi_1 \cdot |\dot{z}_1| - e}{r_1} \right) \cdot e \cdot dt \end{aligned} \quad (13)$$

E_a に対する E_s の比を、エネルギー回生ダンパの回生効率 (α) とする。回生効率は以下ようになる。

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{E_s}{E_a} \\ &= \frac{e}{\varphi_1 \cdot |\dot{z}_1|} \end{aligned} \quad (14)$$

回生効率 α を用いて、 E_r を表す。これはエネルギー回生ダンパが振動系から吸収したエネルギー量に等しい。エネルギー回生ダンパの等価減衰係数 (c_{eq1}) を利用すると E_a は以下のように示される。

$$E_a = (1 - \alpha) \cdot c_{eq1} \cdot \dot{z}_1^2 \cdot dt \quad (15)$$

E_a はエネルギー回生ダンパが発生する減衰力エネルギーを示す。式(11)と式(15)を比較すると、エネルギー回生ダンパは、通常のダンパと比較して、減衰力が $1 - \alpha$ 倍に低下することがわかる。

4. アクティブ制御

4.1 アクティブ制御則 本システムでは、アクティブ制御則としてスカイフック制御を用いることにした。スカイフック制御においては、アクチュエータ出力の目標値、すなわち制御入力目標値 u は以下の式によって求められる。 a はフィードバック係数、 $\dot{x}_2$ はばね上質量の絶対速度である。

$$u = a \cdot \dot{x}_2 \quad (16)$$

実験では、フィードバック係数 a を 8.0 と設定した。

4.2 アクチュエータの回路 図 3 にアクチュエータの回路を示す。リレースイッチによって、モーターとコンデンサの接続の正逆、およびコンデンサと短絡回路の接続の選択が可能になっている。また、可変抵抗器も挿入されており、電流の制御が

可能になっている。

Fig. 3. Electric Circuit of the Actuator

4.3 セミアクティブ制御の条件 本研究のアクティブ制御は、アクティブ制御と減衰力変化によるセミアクティブ制御を併用したものを採用している。セミアクティブ制御が可能な条件を考える。制御入力目標値とストローク速度の関係から可変減衰ダンパの減衰係数 (c_{var}) は以下のように求まる。

$$c_{var} = \frac{u}{\dot{z}_2} \quad (17)$$

制御入力目標値が最大の減衰力を上回る時や、最小の減衰力を下回る時は、ダンパによって制御入力を模擬することはできない。直流モーターを可変減衰ダンパとして利用する時は、セミアクティブ制御が可能な条件は以下の式に示す通りになる。

$$0 \leq \frac{u}{\dot{z}_2} \leq c_{eq2} \quad (18)$$

4.4 セミアクティブ制御モード 式(18)に示される条件において、セミアクティブ制御を行う。回路にコンデンサは接続されない。可変抵抗の値を r_{var} とおくと、回路方程式は以下ようになる。

$$\dot{z}_2 = \frac{\varphi_2 \cdot \dot{z}_2}{r_2 + r_{var}} \quad (19)$$

この時に、可変抵抗の値を式(20)のように決める。これにより、減衰力によって制御入力を再現することが可能になる。

$$r_{var} = \frac{\varphi_2^2}{u} \cdot \dot{z}_2 - r_2 \quad (20)$$

4.5 アクティブ制御モード 式(18)が満たされない時はアクティブ制御を行う。制御入力目標値が最大減衰力以上の時は、誘導電圧と同じ方向にコンデンサの電圧を接続し、アクティブ制御を行う。この時は、コンデンサの電圧を利用してモーターの減衰力を増加させていることになる。 $u > 0$ の時の回路の電流は式(21)によって求まる。以後、 $u > 0$ の時についてのみ議論する。 $u < 0$ の時については、電流の値の符号を反転させることにより、同じ結果を得る

ことができる．

$$i_2 = \frac{e + \varphi_2 \cdot |\dot{z}_2|}{r_2 + r_{\text{var}}} \quad (21)$$

以下のように可変抵抗器の値を設定することにより制御入力を実現することが可能になる．ただし，コンデンサの電圧が低く，可変抵抗器に負の抵抗値が必要となる場合は，制御入力目標値を完全に実現することはできない．

$$r_{\text{var}} = \frac{\varphi_2}{u} \cdot (e + \varphi_2 \cdot |\dot{z}_2|) - r_2 \quad (22)$$

ただし， $r_{\text{var}} < 0$ の時は，

$$r_{\text{var}} = 0 \quad (23)$$

とする．

一方，制御入力が最小減衰力より小さい時，すなわち負の減衰力が必要となる時は，誘導電圧に逆らう方向にコンデンサの電圧を接続し，アクティブ制御を行う．回路方程式は以下のように求まる．

$$i_2 = \frac{e - \varphi_2 \cdot |\dot{z}_2|}{r_2 + r_{\text{var}}} \quad (24)$$

以下のように可変抵抗器を設定することにより制御力を再現することが可能になる．

$$r_{\text{var}} = \frac{\varphi_2}{u} \cdot (e - \varphi_2 \cdot |\dot{z}_2|) - r_2 \quad (25)$$

ただし， $r_{\text{var}} < 0$ の時は，

$$r_{\text{var}} = 0 \quad (26)$$

とする．

式(24)において，誘導電圧がコンデンサ電圧よりも高い時は電気が逆流し，アクティブ制御を行うことが不可能になる．その時は，アクチュエータを最小の減衰係数を持つダンパ，すなわち減衰力を持たないダンパとして機能させる．

5. 実験

5.1 実験装置

実験装置の概観を図4に示す．実験装置は振動台の上に取り付けられており，加振機によって上下方向に加振される．ばねの中にリニア直流モーターが入っている．コンデンサとモーターはリレースイッチを介して接続されており，回路の切り替えはリレースイッチを介して行われる．アクチュエータとして機能するリニア直流モーターの回路には可変抵抗器が挿入されている．可変抵抗器は，リレースイッチによって 0Ω ， 0.8Ω ， 1.8Ω ， 3.8Ω ， 6.7Ω ， 9.7Ω ， 14.8Ω ， 24.5Ω の8種類の抵抗値を切り替えることが可能になっている．絶縁も可能になっており，擬似的に $\infty \Omega$ も実現できる．制御器によって計算された抵抗値 r_{var} 以上の抵抗値を持

ち，かつ r_{var} にもっとも近い抵抗値に切り替える．表1に実験装置の諸元値を示しておく．エネルギー回生ダンパの等価減衰比は 0.16 であり，アクチュエータの等価減衰比は 0.19 である．非減衰固有振動数は 1.7Hz と 3.1Hz である．

Fig. 4 Schematic of the Experimental Setup.

Table 1 Specifications of Experimental Setup

Description	Symbol	Value
1st Mass Weight	m_1	1.11 kg
2nd Mass Weight	m_2	3.5×10^{-1} kg
Spring Stiffness (Primary)	k_1	2.0×10^2 N/m
Spring Stiffness (Secondary)	k_2	8.5×10^1 N/m
Motor Constant (Energy Regenerative Damper)	φ_1	7.0 N/A
Motor Constant (Actuator)	φ_2	4.0 N/A
Resistance (Energy Regenerative Damper)	r_1	10.5 Ω
Resistance (Actuator)	r_2	7.9 Ω
Capacity	c	2.0×10^{-2} F

5.2 入力外乱 ランダム波を入力外乱として用いた．実験に使用した外乱変位のパワースペクトル密度を図5に示す．高周波になると，スペクトル密度が下がるようにした．

Fig. 5 Power Spectral Density of the Disturbance

5.3 アクチュエータ出力 アクチュエータの出力と制御入力目標値 (Desired Value) を比較した実験結果を図6に示す。参考として、アクチュエータをダンパとして機能させた時に出すことが可能な最大減衰力も示す。制御力が極端に大きい箇所は、アクチュエータ出力を追従させることはできないが、それ以外の箇所では、目標とする制御入力をアクチュエータが実現している。この3秒間で使用されたコンデンサの電力量は、45.0 mJ である。

Fig. 6 Output Force of the Actuator Compared with Target Force and Maximum Damping

5.4 エネルギー回生ダンパ出力 エネルギー回生ダンパの減衰力の動きを図7に示す。エネルギー回生ダンパを通常のダンパとして機能させた時に発生する減衰力 (Ideal Damping) も同時に示す。減衰力が低下している箇所がエネルギー回生をしている時である。この3秒間でコンデンサに回生したエネルギー量は、47.3 mJ である。また、ダンパが吸収したエネルギー量は、146.1 mJ であり、式(10)より平均回生効率は32.4 % である。式(15)より、エネルギー回生ダンパは通常のダンパの67.6 % の減衰力を発生しているといえる。

Fig. 7 Damping Force of the Energy Regenerative Damper Compared with Potential Damping Force

5.5 コンデンサ電圧 コンデンサの電圧の動きを図8に示す。測定開始時は、0.57 V であったものが3秒後には0.64 V に上がっている。コンデンサに蓄えられているエネルギー量 (E_{store}) は式(27)のように示せる。 c はコンデンサ容量を表す。

$$E_{store} = \frac{1}{2} \cdot c \cdot e^2 \quad (27)$$

蓄えられているエネルギー量は、0.8 mJ 増加したことになる。アクティブ制御に使用されたエネルギーは45.0 mJ、回生されたエネルギーは47.3 mJ である。多少の誤差と損失があるものの、使用されるエネルギー量と回生されるエネルギー量の差がコンデンサに蓄えられるエネルギーの増加となって表れていることがわかる。また、図6と図7を比較をすると、エネルギー回生ダンパに入力される振動の振幅が大きい時 (16.4 秒付近) には、コンデンサの電圧が上昇し、必要とされる制御入力が大きい時 (17.6 秒付近) は、コンデンサの電圧は減少していることがわかる。

Fig. 8 Condenser Voltage

5.6 ばね上質量速度の比較 セルフパワード・アクティブ制御、同じ制御器を利用して行ったセミアクティブ制御およびパッシブ制御 (アクチュエータが出力を持たない) を同じ外乱に対して行った際のそれぞれの場合のばね上質量の速度を図9に示す。セミアクティブ制御とは、式(18)の条件が成立する時は可変抵抗器を制御することによって制御入力を模擬し、最大減衰力を越える減衰力が必要な時は、最大減衰力を保ち、負の減衰力が必要な時は、入力を持たない制御方法を指す。パッシブ制御は、アクチュエータが制御を行わない状態を指す。なお、セミアクティブ制御の時もパッシブ制御の時も、エネルギー回生ダンパは、常にパッシブモードで機能していたとした。セルフパワード・アクティブ制御がセミアクティブ制御やパッシブ制御よりも優れた振動絶縁性能を持っていることがわかる。

Fig. 9 Absolute Velocity of the Second Mass

5.7 オンオフ式制御法との比較 既報⁽²⁾では、可変抵抗器を用いずに、オンオフ式の制御を用いていた。すなわち、負の減衰力が必要になる時に、コンデンサをアクチュエータに接続して放電をする。正の減衰力が必要な時は、アクチュエータをダンパとして機能させる。従来のオンオフ式の制御を行った時のアクチュエータ出力と、今回提案した連続的な制御手法のアクチュエータ出力を図10に比較する。提案する方式の方が、アクチュエータ出力、すなわち制御入力がなめらかになっていることがわかる。

Fig.10 Actuator Output Force of Proposed System Compared with On-Off Type System

5.8 周波数応答 図5と同様のパワースペクトル密度を持つ5種類の外乱に対して実験を行い、振動台とばね上質量の振動伝達率を求めた。振動伝達率は、振動台の変位とばね上質量の変位のパワースペクトル密度の比の平方根をとることによって求めた。図11に解析結果を示す。従来のオンオフ式のセルフパワー・アクティブ制御も示した。セルフパワー・アクティブ制御の制振性能がセミアクティブ制御やパッシブ制御よりも優れていることがわかる。また、連続的な制御入力を実現することにより、オンオフ式のシステムよりも性能が向上した。

Fig. 11 Isolation Performance of the Proposed Self-Powered Active Control System Compared with that of the On-Off Type System, the Semi-Active Control System, and the Passive Control System

6. 結 言

本報告の結論を以下に示す。

1. セルフパワー・アクティブ振動制御システムに可変抵抗器を挿入し、連続的な制御入力を模擬することを提案した。
2. 可変抵抗器を制御することにより、連続的な制御入力を模擬することに成功した。
3. 実験を通じて、提案するシステムがパッシブ制御やセミアクティブ制御と比べて良好な振動絶縁性能を持つことがわかった。
4. 実験から、エネルギー回生ダンパの効率、アクチュエータの消費エネルギーなどを求め、システムのエネルギーの流れの妥当性を証明した。

謝 辞

本研究は文部省科学研究費補助金および公益信託加藤辰次郎記念建設機械研究開発振興基金の助成を受けた。関係各位に感謝致します。

文 献

- (1)米川・大沼・森・後藤・武馬, 自動車技術会論文集, Vol.22, No.3, 1991, 63.
- (2)須田・中代・中野, 日本機械学会論文集 (C編), 63巻613号(1997-9), 3038.
- (3)D.C.Karnopp, M.J.Crosby, R.A.Harwood: Trans. ASME, J. of Engineering for Industry, Vol.96 ser.B, 1974, 619.
- (4)R.S. Sharp, S.A. Hassan: Proc. Instn Mech. Engrs, Part D, Vol. 200, No. D3, 1986, 219.
- (5)原田・岡田・鈴木, 日本機械学会論文集 (C編), 62巻604号(1996-12), 4513.