

再生された振動エネルギーを利用するアクティブ制御 に関する研究

Study on Active Control using Regenerated Vibration Energy

須 田 義 大*・中 代 重 幸*・中 野 公 彦*

Yoshihiro SUDA, Shigeyuki NAKADAI and Kimihiko NAKANO

1. 諸 言

アクティブ制御はパッシブ制御よりも良好な制振性能を示すが、制御に外部エネルギーを必要とする。そのことがアクティブ制御の実用化を阻害する原因の一つになることもある。例えば、自動車などに応用した場合、燃費が悪くなるなどの問題が生じる。一方、通常のパッシブなダンパは振動エネルギーを吸収することによって振動を減衰させているが、吸収したエネルギーは摩擦などによって熱エネルギーに変換され大気中に廃棄されている。そのような経緯から、ダンパで吸収したエネルギーを有効なエネルギーとして貯え、そのエネルギーをアクティブ制御に使用するシステムの実現を本研究は目指している。

このようなシステムは従来から提案されているが¹⁾、実際にエネルギー再生ダンパによって再生した振動エネルギーをアクティブ制御に利用した例はない。その理由として、以下の2つが考えられる。1つ目は、最適化制御則などをアクティブ制御則として利用した場合、低周波の領域においてアクティブ制御に必要なエネルギーが、エネルギー再生ダンパによって再生されるエネルギーよりも大きいことである²⁾。2つ目は、エネルギー再生ダンパにおいて、摩擦などによるエネルギー損失が大きいことが挙げられる。そのため、ダンパが吸収したエネルギーの一部しか振動エネルギーを再生することができなかった。

そこで著者らは、消費エネルギーの少ないアクティブ制御則を考案するとともに、機械的な接点がなく摩擦損失が少ないリニア DC モーターをエネルギー再生ダンパとして使用することにより、ダンパによって再生された振動エネルギーのみを利用してアクティブ制御を実現したので、ここに報告する。

2. ハイブリット制御について

2.1 本研究のシステム

本研究では、2自由度の振動系を採用した。ばね下のダンパが振動エネルギーを再生して貯え、ばね上のアクチュエータがそれを利用してアクティブ制御を行なう。系は完全に自律しており、外部からエネルギーを供給せずにアクティブ制御を実現する。このようなアクティブ制御とエネルギー再生を複合させた制御をここでは、アクティブ・エネルギー再生ハイブリット制御と呼ぶ（以下、ハイブリット制御と省略することもある）。また、実験装置は、全て電気的なデバイスを用いることにした。ダンパとアクチュエータはリニア DC モーターを利用して実現し、エネルギーはコンデンサに貯える。リニア DC モーターは機械的な接点が少ないため、摩擦による減衰は少ない。

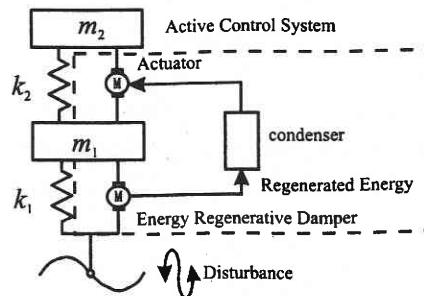


図1 アクティブ・エネルギー再生ハイブリット制御

2.2 新たに提案するアクティブ制御

ハイブリット制御に応用するアクティブ制御は、以下の2つの条件を満たす必要がある。

- 1) アクティブ制御に使用するエネルギーは、エネルギー再生ダンパによって再生される振動エネルギーの量よ

*東京大学生産技術研究所 第2部

研究速報

りも少なければならない。

2) 十分な制御エネルギーが得られない時でも、ある程度の制振性能を保つ必要がある。

ここで、以上の2つの条件を備えた制御則を、スカイフック制御を利用することによって考案した。

通常のスカイフック制御は、ばね上質量の速度を v_2 とするとアクチュエータ出力 (f_2) は以下ようになる。(a は正の定数)

$$f_2 = -a \cdot v_2 \quad (1)$$

ばね下質量の速度を v_1 とすると、 $v_1 \cdot (v_2 - v_1) > 0$ の時は、アクチュエータをダンパとして機能させても、アクティブ制御の制御力と同じ方向に力を出すことが可能であるので、アクチュエータをダンパに切り替える(パッシブ制御)。それ以外の時は、ダンパの減衰力と制御力は反対方向になるので、コンデンサにより誘導電圧と反対方向に電圧を加えることによって、制御力と同じ方向に力を出す(アクティブ制御)。以下の式にその切り替えを表わす。

$$f_2 = -a \cdot (v_2 - v_1) \quad (v_2 \cdot (v_2 - v_1) > 0) \quad (2)$$

$$f_2 = -a \cdot v_2 \quad (v_2 \cdot (v_2 - v_1) \leq 0) \quad (3)$$

このようなリレー制御を行ない、模擬的に式(1)の出力を再現した。この制御はアクティブ制御を一部の位相においてのみ行うので、アクチュエータでのエネルギー消費を減少させることが可能である(条件1)。

一方で、セミアクティブ制御は、アクチュエータの代わりに可変粘性ダンパを配置し、 $v_1 \cdot (v_2 - v_1) > 0$ の時は、固い粘性を持ち、それ以外の時は、柔らかい粘性を持つことにより減衰力を減少させ、式(1)を擬似的に再現する。ハイブリット制御の式(3)において十分な制御量がなく、

$$f_2 = 0 \quad (4)$$

となった時とセミアクティブ制御において可変粘性ダンパが柔らかい粘性を持った時は、ほぼ同じことをさす。このことから、ハイブリット制御において十分な制御エネルギーが得られない時でも、セミアクティブ制御として作用し、制振性能を保つことが可能になる(条件2)。

2.3 エネルギー回生ダンパの制御

エネルギー回生ダンパは、DCモーターを整流回路を通

じてコンデンサを接続したものである。パッシブなダンパの時は、誘導電圧に比例した電流が流れるのだが、エネルギー回生ダンパではDCモーターの誘導電圧とコンデンサの電圧の差に比例した電流しか流れないので、減衰力は低下する。特に誘導電圧の大きさがコンデンサの電圧よりも小さい時は、コンデンサに電荷を送ることができず、回路にも電流が流れなくなりエネルギー回生ダンパが減衰力を失う。これはエネルギー回生ダンパの減衰力の低下につながるもので、誘導電圧の大きさがコンデンサ電圧よりも小さい時は、エネルギー回生ダンパはエネルギーの回生をやめ、通常のダンパとして機能するようにし、減衰力の低下を抑えるようにする。

3. ハイブリット制御の性能

3.1 実験装置概要

実験装置を図2に示す。実験装置は振動台の上に配置されており、動電式加振機によって外乱を上下方向に加える。加振機、ばね下質量、ばね上質量の加速度、リニアDCモーターの電機子電流とコンデンサの電圧を測定する。また、ダイオードの順方向抵抗が実験誤差を生む可能性があることから、整流回路は使用せずリレースイッチを制御して、整流を行なった。

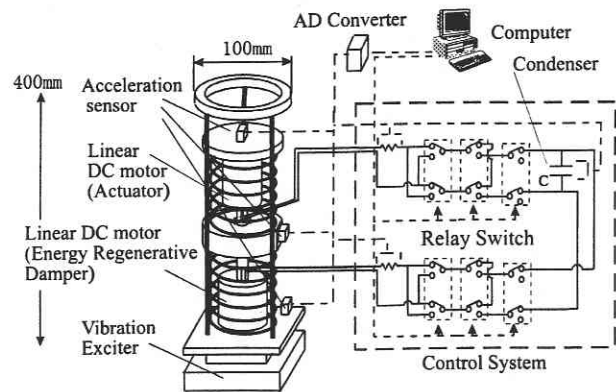


図2 実験装置概略図

表1に実験装置の諸元を示す。添え字の1は、ばね下もしくはエネルギー回生ダンパを示し、2は、ばね上もしくはアクチュエータを指す。エネルギー回生ダンパの等価的な減衰比は0.14、アクチュエータは0.10となり、系の固有振動数は1.5[Hz]と4.6[Hz]になる。

3.2 アクチュエータの動作解析

6.0[Hz]の外乱を加えた時の定常状態(ハイブリット制御開始後10秒後)のアクチュエータ電流を図3に示す。同時にばね上質量の速度(v_2)と相対速度($v_2 - v_1$)も示す。ピークAはコンデンサからアクチュエータに電

表 1 実験装置諸元値

Symbol	Value	Unit	Description
m_1	0.44	kg	Unsprung Mass
m_2	0.83	kg	Sprung Mass
k_1	196.0	N/m	Stiffness
k_2	138.3	N/m	Stiffness
φ_1	4.6	N/A	Actuator Constant
φ_2	4.1	N/A	Actuator Constant
R_1	8.2	Ω	Resistance
R_2	8.2	Ω	Resistance
C	10.0	mF	Capacity

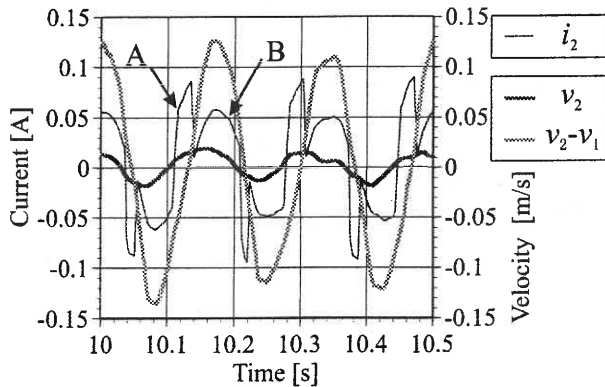


図 3 アクチュエータの電流

圧を加えてアクティブ制御をしている時の電流であり、ピーク B はアクチュエータがダンパとして機能している時の電流である。電流は常に v_2 と同じ方向に流れており、 v_2 に比例した減衰力を出すスカイフック制御が擬似的に行なわれていることがわかる。

3.3 エネルギー回生ダンパの動作解析

3.2 節と同様の外乱を入力した時のエネルギー回生ダンパに流れる電流の値を図 4 に示す。同時にばね下質量と振

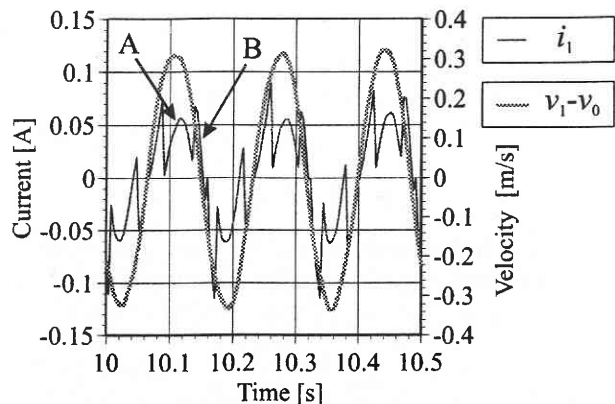


図 4 エネルギー回生ダンパの電流

研究速報
 動台の相対速度 ($v_1 - v_0$) も示す。図中の A は、相対速度が高く、コンデンサの電圧よりも高い誘導電圧が得られ、エネルギーを回生している時のピークである。B は、低い誘導電圧しか得られず、エネルギー回生が不可能であるため、パッシブ制御を行なっている時のピークである。

3.4 コンデンサの電圧

ハイブリット制御を開始してから 0.5 秒間の電圧の変化を図 5 に示す。制御開始時は、コンデンサの電圧は 30 [mV] 程度であったが、0.5 秒後には 800 [mV] 付近まで上昇し定常状態に達する。アクチュエータがアクティブ制御を行なう時にエネルギーを消費するため、電圧は常に増減を繰り返す。

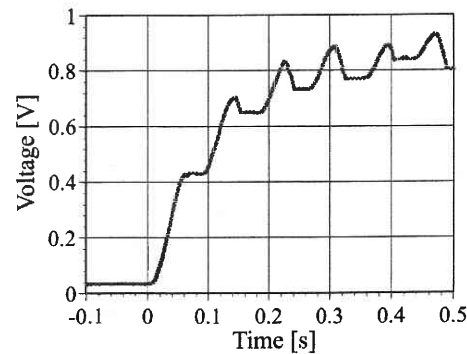


図 5 コンデンサの電圧

3.5 周波数応答 (正弦波入力)

図 6 にハイブリット制御の外乱と、ばね上質量の振動伝達率をパッシブ制御と比較したものを示す。パッシブ制御の Soft は、ばね上のダンパの減衰比が 0.00、ばね下のダンパの減衰比が 0.14 のものを表わし、Hard は、ばね上のダンパの減衰比が 0.10、ばね下のダンパの減衰比が 0.14 のものを表わす。低周波では、Hard と同等の制振性能を保持し、高周波では Soft のものより制振性能は向上して

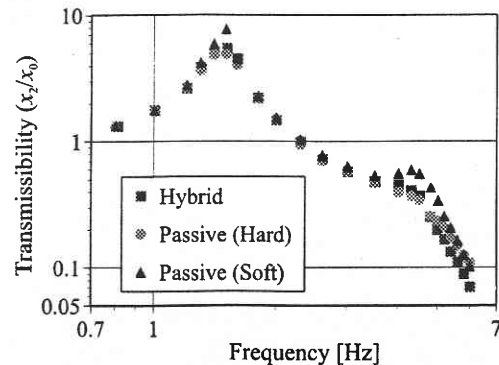


図 6 周波数応答 (正弦波入力)

研究速報

おり、良好な制振性能を持っている。シミュレーションも行なったが、同様の結果が得られた。

3.6 ランダム波外乱における制振性能評価

ランダムな外乱を加えた時の制振性能を検証した。入力したランダム波外乱のパワースペクトル密度を図7に示す。高周波になるに従い、スペクトル密度が減少しており、自然界の外乱が持つゆらぎを再現したのになっている。

ランダム波に対する応答を10秒間測定し、振動台速度とばね上質量速度のパワースペクトル密度比と測定した10秒間の2乗積分比を求めた。前者はランダム波外乱における周波数応答を、後者は測定時間内の振動絶縁性能を示すことになる。比較対象として、パッシブ制御 (Hard)、セミアクティブ制御 (ばね上のダンパの減衰比を0.0と0.10に切り替える) などを用いた。パワースペクトル密度比を図8に示す。1次の共振点付近で、パッシブ (Hard) に対してハイブリット制御の制振性能の向上が確認された。これは、正弦波入力による周波数応答にはなかったものである。高周波の成分と低周波の成分が同時に入力されるランダム波外乱では、周波数間でエネルギーの流れがおきる (例えば、高周波の振動によって再生されたエネルギーが低周波の振動に利用されるなど)。それにより、低周波においても制御量が確保され、制振性能の向上につながったと推測される。図9にばね上質量の速度の振動台の速度に対する2乗積分比を示す。6回の実験全てにおいて、ハイブリット制御がパッシブ制御やセミアクティブ制御よりも小さい値をとっており、ハイブリット制御が良好な振動絶縁性能を持っていることが証明された。

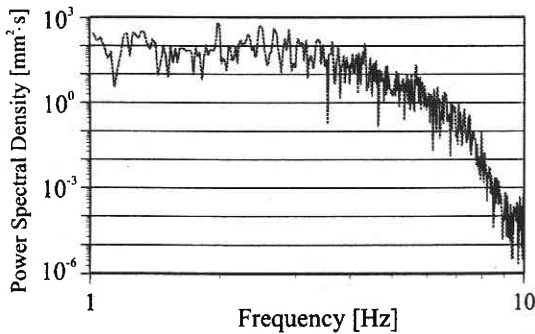


図7 外乱のパワースペクトル密度の例

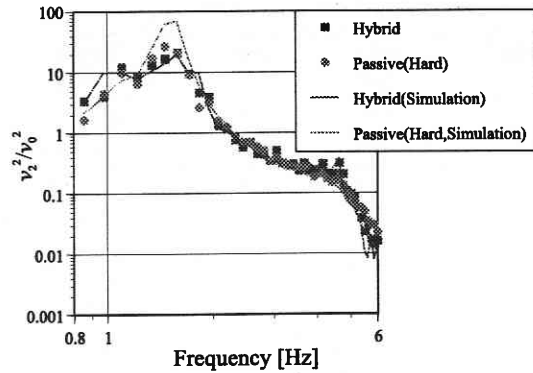


図8 パワースペクトル密度比 (6回の実験の合計)

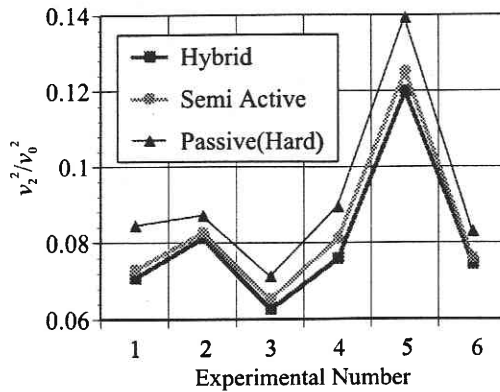


図9 ランダム波外乱における制振性能

4. 結 論

- 1) 消費エネルギーを抑えた新たなアクティブ制御の方法を考案し、ダンパで吸収した振動エネルギーのみを利用するアクティブ振動制御を提案した。
- 2) リニア DC モーターを利用して、そのシステムを実際に作成し実験を行なうことに成功した。
- 3) そのシステムの制振性能がパッシブ制御やセミアクティブ制御よりも優れていることを示した。

(1997年2月28日受理)

参 考 文 献

- 1) 須田・椎葉, 機講論, No. 940-26, (1994), p 483-p 488.
- 2) 須田・椎葉, 機講論, No. 95-28, (1995), p 401-p 404.