動電型エネルギー回生サスペンションの制御*

原田 秀行^{*1}, 岡田 養二^{*2}, 鈴木 浩平^{*3}Active and Regenerative Control of an
Electrodynamic-Type Suspension

Hideyuki HARADA, Yohji OKADA and Kohei SUZUKI

An active vibration damper and an isolator are capable of reducing vibration remarkably and adaptively. One of their disadvantages is that they require a large amount of energy. Since vibration is a type of energy, a question arises as to how we can utilize this energy. In this paper an energy regenerative type suspension is presented, wherein an electrodynamic actuator is used and electric power is regenerated during the high-speed motion of the actuator. For low-speed motion, an active control algorithm is applied to the same actuator to achieve good damping performance. In order to reduce energy loss in the control amplifier, active relay control is applied instead of linear control. The system is simulated on a computer and a simple experiment is performed. The results show that the system has better performance than a passive suspension system and can regenerate vibration energy.

Key Words: Damping, Vibration Isolation, Vibration Control, Energy Regeneration, Control Device, Mechatronics, Simulation

1 はじめに

現在、振動絶縁系にはパッシブ型やアクティブ型などがあり、それらに対し様々な改良形の研究が行われている⁽¹⁾。本研究は、車両等のアクティブサスペンションやアクティブマウントを主な対象として、そのエネルギー消費を低減するための回生動作を研究する目的で、まず図1に示すような簡単な1自由度振動絶縁系を扱う。アクティブ型とパッシブ型には、それぞれ次のような特徴がある。パッシブ型は簡単な構造で構成でき、外部からエネルギーを供給しなくて良いが、固有振動数付近の共振ピークの抑制と高周波域での高い振動絶縁性能を両立させることができない。アクティブ型は、理論的には低周波から高周波まで優れた振動絶縁性能を持っているが、実際に使用するとなると様々な問題がある。即ち構造が複雑になり、システムが不安定になったとき振動を増やす危険性を持つこと、制御の際の時間遅れなどにより高周波振動に対して特性が悪化する恐れがあること、外部から大きなエネル

ギを供給する必要があることなどである。中でもエネルギーの問題は、振動絶縁性能を上げようとするほど深刻になってくる。

一方振動そのものはエネルギーである。パッシブ型はそのエネルギーを熱エネルギーに変えて外界に捨て去ることで振動を抑えている。そのエネルギーを有効利用して、アクティブ制御の問題点の一つであるエネルギー消費を解決できないであろうか。

そこで本研究では、動電型アクチュエータにより振動エネルギーを電気エネルギーに変えて回生するダンパを提案する⁽²⁾⁽³⁾。これを用いたサスペンション系に対しエネルギー回生・アクティブ制御併用制御を行い、振動絶縁特性およびエネルギー回生特

Figure 1: Suspension system

* 原稿受付 1995 年 10 月 24 日。

^{*1} 学生員, 茨城大学大学院 (〒316 日立市中成沢町 4-12-1)。^{*2} 正員, 茨城大学工学部。^{*3} 正員, 東京都立大学工学部 (〒192-03 八王子市南大沢 1-1)。

性をシミュレーションにより検討した。また、エネルギー損失をより減らすために、エネルギー回生・リレー制御併用制御を考え、シミュレーションおよび実験を行った。

エネルギー回生サスペンションに関しては椎葉らの研究があるが⁽⁴⁾、同一アクチュエータで回生とアクティブ制御を行うのが本研究の最大の特徴である。

Table 1: The symbols and their values

m	: Sprung mass	1.58	[kg]
k	: Stiffness	2136.4	[N/m]
ω_n	: Natural frequency = $\sqrt{\frac{k}{m}}$	36.8	[rad/s]
ψ	: Actuator constant	9.8	[N/A = Vs/m]
R	: Resistance	3.5	[Ω]
r	: Resistance		[Ω]
e_b	: Regenerative voltage	1.2	[V]
E	: Supply voltage	3.0	[V]
F_{ac}	: Relay force = $\frac{\psi}{r}E$		[N]
e_F	: Voltage drop in diode	0.8	[V]
e_{Fb}	: $e_b + e_F$		[V]
K_x	: Position feedback gain	14.97	[N/m]
K_v	: Velocity feedback gain	316.27	[Ns/m]
x	: Displacement		[m]
x_0	: Input displacement		[m]

2 エネルギー回生サスペンション系

2.1 エネルギー回生ダンパ エネルギー回生ダンパとしては、動電型アクチュエータと倍電圧充電回路を図2のように使い、これにより振動のエネルギーを電気エネルギーとして回生することを考える⁽⁵⁾。

振動によってアクチュエータが速度 v [m/s] で動かされ e [V] の電圧を発生したとき、 e がバッテリー電圧 e_b [V] とダイオードの順方向電圧 e_F [V] の和 e_{Fb} [V] より低いとき、

$$|e| = \psi v < e_{Fb} \quad (1)$$

回路に回生電流は流れず、アクチュエータは抵抗力を発生しない。そして $|e| > e_{Fb}$ ($|v| > e_{Fb}/\psi$) のとき電流 i がバッテリー

Figure 2: Electrodynamic regenerative circuit

へと流れ、アクチュエータは

$$f = \psi i = \frac{\psi}{R}(\psi v - e_{Fb}) \quad (2)$$

の抵抗力を発生し、振動のエネルギーはバッテリーに回生される。

このときのダンパの動く速度と抵抗力の関係を図にすると図3のようになり、エネルギー回生ダンパは $\frac{e_{Fb}}{\psi} > v > -\frac{e_{Fb}}{\psi}$ の領域で抵抗力が得られない不感帯のある非線形な減衰特性を持つ。

なお、回生回路ではなく電気抵抗 R' [Ω] のみをアクチュエータに接続した場合、抵抗には $i = e/R'$ の電流が流れ、アクチュエータの発生する抵抗力は

$$f = \psi i = \frac{\psi^2}{R'} v \quad (3)$$

で図3中の点線となり、減衰係数 $\frac{\psi^2}{R'}$ の通常のダンパと同じ動きをする。ただし R' にはアクチュエータの内部抵抗も含めるとする。

2.2 サスペンション系 前節で述べたエネルギー回生ダンパを用いるサスペンション系として、図4に示すような1自由度系を考える。このサスペンション系を、単なる回生動作だけで使ったのでは図3に示したような不感帯のある減衰特性のために、ダンパの動く速度が小さい微小振動や低周波振動のときに減衰が得られず、制振特性が大幅に悪化するおそれがある。そこで速度の速い領域ではエネルギー回生を行い、速度が遅く減衰の得られない不感帯域においては、図4に示すようなフィードバックによるアクティブ制振を行うというエネルギー回生・アクティブ制振併用制御を考える。

Figure 3: Damping characteristics

Figure 4: Suspension system

系の運動方程式は次式で与えられる。

$$m\ddot{x} + k(x - x_0) = f \quad (4)$$

$|v| > e_{Fb}/\psi$ のときエネルギー回生、 $|v| < e_{Fb}/\psi$ のときアクティブ制御を行うとすると、次の減衰力を得る。

$$\begin{cases} f = \frac{\psi^2}{R}(\dot{x}_0 - \dot{x}) + \frac{\psi}{R}e_{Fb} & \dot{x} - \dot{x}_0 > \frac{e_{Fb}}{\psi} \\ f = -K_x x - K_v \dot{x} & \frac{e_{Fb}}{\psi} > \dot{x} - \dot{x}_0 > -\frac{e_{Fb}}{\psi} \\ f = \frac{\psi^2}{R}(\dot{x}_0 - \dot{x}) - \frac{\psi}{R}e_{Fb} & \dot{x} - \dot{x}_0 < -\frac{e_{Fb}}{\psi} \end{cases} \quad (5)$$

この場合アクティブ制御時にエネルギーを消費するが、回生した振動エネルギーを用いれば外部から大きなエネルギーを供給せずに制御できると考えられる。

3 シミュレーション

エネルギー回生・アクティブ制御併用制御を行ったとき、サスペンション系の振動絶縁特性およびエネルギーの回生・消費がどのようになるかシミュレーションを行い検討する。シミュレーションで用いたパラメータは、後述する実験装置の特性値に合わせて表1のように決めた。

また、アクチュエータによる等価減衰率を次式で定める。

$$\zeta_{eq} = \frac{\psi^2/R}{2\sqrt{mk}} \quad (6)$$

基礎に正弦波状の振動を加え、定常状態での振動の基本波成分を取り周波数応答にまとめる。周波数は系の固有振動数 ($\omega_n = 36.8 \text{ rad/s}$) で割った無次元化周波数で表し、図5から図9に示す。

特性は、式(7)により無次元化した基礎の振動の振幅 $\bar{x}_0$ をパラメータとして、アクチュエータによる等価減衰率と等しい減衰率を持つバネ・ダンパ系の完全パッシブと、エネルギー回生動作をせずアクティブ制御のみを行う完全アクティブ、これらと比較をする。

$$\bar{x}_0 = x_0 / \left(\frac{e_{Fb}}{\omega_n \psi} \right) \quad (7)$$

3.1 線形フィードバック制御 等価減衰率 ζ_{eq} を0.1としたときの振動伝達率とエネルギー回生率を図5に、0.5としたときを図6に示す。点線は完全パッシブ、一点鎖線は完全アクティブ、そして(a)から(e)の各曲線がエネルギー回生・アクティブ制御併用制御を行った結果である。低周波域では速度が小さくエネルギー回生が行われないため完全アクティブと同じ特性を示す。しかし振幅に応じてある周波数以上になるとエネルギー回生が可能となり、完全アクティブとは違った伝達率となる。また等価減衰率 $\zeta_{eq} = 0.1$ のときは完全パッシブより特性が悪化する場合があるが、 $\zeta_{eq} = 0.5$ では良好な結果を示し

Figure 5: Frequency response of simulation with regenerative and active linear control ($\zeta_{eq} = 0.1$)

ており、等価減衰率はある程度大きくなるようにしなければならないことを示している。

エネルギー回生率を図5の下側 ($\zeta_{eq} = 0.1$) と図6の下側 ($\zeta_{eq} = 0.5$) に示す。これは基礎から加わる駆動エネルギー ($W_0 = \int f_0 v_0 dt$) に対して、ダンパ系がどれだけのエネルギー ($W = \int e idt$) を回生できるかの比 (W/W_0) を示している。一点鎖線の完全アクティブは、エネルギーを消費するだけなので当然ながらマイナスとなっている。エネルギー回生・アクティブ制御併用制御を行った場合は、低周波域では伝達率と同様に完全アクティブの性質を示すが、高周波域では高いエネルギー回生が可能であることを示している。

しかしここでは、アクティブ制御を行うのにコントローラ部で必要となるリニアアンプでの損失を無視している。従って実際の系では、アンプでの損失のためにエネルギー消費が大

Figure 6: Frequency response of simulation with regenerative and active linear control ($\zeta_{eq} = 0.5$)

Figure 7: Relay control

幅に増加するおそれがある。

3.2 リレー制御 そこで、サスペンション系の性能をできるだけ損なわずにエネルギーの損失を減らすため、アクティブ制振に変わって図7に示すようなリレー制振を考える。これは、線形なアクティブ制振による制振力がある値($\pm F$)よ

Figure 8: Frequency response of simulation with regenerative and relay control ($\zeta_{eq} = 0.5$, $\bar{F} = 0.08$, $\bar{F}_{ac} = 0.83$)

りも大きくなる範囲では一定の制振力($\pm F_{ac}$)を加え、小さな制振力しか必要としない範囲では制振力を0にするというものである。この制御はリレーなどによるスイッチングだけで実現できるので、コントローラ部でのエネルギー損失をほとんどなくすることができると思われる。

このエネルギー回生・リレー制振併用制御を行ったときの振動伝達率およびエネルギー回生率を図8、図9に示す。なお F , F_{ac} は、次の式で無次元化して $\bar{F}$, $\bar{F}_{ac}$ で表している。

$$\bar{F} = \frac{\omega_n \psi}{e_{Fb} k} F \quad \bar{F}_{ac} = \frac{\omega_n \psi}{e_{Fb} k} F_{ac} \quad (8)$$

また、等価減衰率は、エネルギー回生・アクティブ制振併用制御の結果から $\zeta_{eq} = 0.5$ とした。この結果から、振幅が小さいうちは完全パッシブよりも十分良好な特性となるが、大きな

Figure 9: Frequency response of simulation with regenerative and relay control ($\zeta_{eq} = 0.5, \bar{F} = 0.4, \bar{F}_{ac} = 0.83$)

振幅に対しては完全パッシブと大差なくなってしまうことがわかる。これは加えた制振力 $\bar{F}_{ac}$ が、その振幅に対しては十分な大きさでなかったためと思われる。また、不感帯 $\bar{F}$ が小さければ小さいほど、小さな振動に対しても制振力を加えるために特性は向上する。しかしリレー制御は強い非線形があるので、複雑な応答を示している。振幅の小さな領域ではリレーの立上がりで等価ゲインが大きくなり、線形アクティブ制御よりも伝達率が小さくなることがある。さらに低周波では伝達率は1に近づき、高周波ではパッシブに近づいている。エネルギー消費も、小さな振幅に対しては指令信号が不感帯内に入り、かなり抑えられる。すなわち図中の(a), (b)は ω/ω_n が2~5から低い方で零となり、(c), (d), (e)では一度は大きく負になるが、さらに低い周波数では零となる。アンプ部で

Figure 10: Schematic diagram of the experimental setup

Figure 11: Scheme of proposed active relay and regenerative controller

のエネルギー損失がないことを考えあわせると、非常に良好な特性となっている。

4 実験

実際のサスペンション系では、摩擦やパラメータの誤差、制御の遅れなど様々な要素が特性に影響を与えるとみられる。そこで前章のシミュレーション結果を検証するために実験装置を製作し実験を行った。

4.1 実験装置 製作した実験装置の概略を図10に、特性値を表1に示す。2本のガイドで1自由度に拘束し、制御に必要なバネ上変位、バネ上速度、そして相対速度を測定するセンサーがそれぞれ取り付けられている。なお、動電アクチュエータには直動モータであるボイスコイルモータ(住友特金, LV-10)を使用している。

また、エネルギー回生・リレー制振併用制御を行うためのコントローラの概略を図11に示す。3つの電磁リレーによって

Figure 12: Frequency Response of experiment with regenerative and relay control ($\zeta_{eq} = 0.24$)

制御を行う。すなわちリレー 1 がエネルギー回生とリレー制振の切り替え、リレー 2 が制御力の ON-OFF を、リレー 3 が制御力の正負の切り替えを行う。ただし、回路を簡単にしてロスを減らすために、リレー制振時には一定の電圧 E [V] をボイスコイルモータにかけることにした。最終的には回生した電圧 e_b の 2 倍 (2.6 [V]) を供給したいが、今回は制御力が充分でなかったので E を 3 [V] として実験した。

4.2 制振実験 エネルギー回生・リレー制振併用制御を使ったサスペンション系の実験を行った。振幅 4.5 [mm] の正弦振動を加えた結果の振動伝達率を図 12 の上に示す。(a) から (d) の各曲線がシミュレーション結果で、順にリレー制振のみ (a)、エネルギー回生・リレー制振併用制御 (b)、エネルギー回生動作のみ (c)、そしてエネルギー回生をせずボイスコイルモータ

Figure 13: Time response

タの端子をショートさせて最大の減衰率が得られるようにした完全パッシブの場合 (d) である。(b) は低周波域ではエネルギー回生が行われずリレー制振のみとなるので (a) と同じ伝達率となっている。そして Δ がリレー制振のみの実験結果で、 $\bullet$ がエネルギー回生・リレー制振併用制御の場合の実験結果である。実験結果から、加振周波数が低い場合は併用制御とリレー制振のみは同じ伝達率となっているが、8 [Hz] ほどから違いが出てきていることがわかる。これはこのあたりからエネルギー回生が行われ始めることを示している。しかしリレーによる切り替えの遅れのためか、急に伝達率が大きくなってしまっている。これより、本研究で考えるエネルギー回生・リレー制振併用制御を行うサスペンション系は、まだシミュレーションよりも悪くなっているが、完全パッシブよりも良い振動伝達特性を得ることができることが分かる。

次に回生エネルギーであるが、これはボイスコイルモータに流れる電流と、その両端の電圧を測定し、それらを掛け合わせてワット数を計算し、それを平均して求めた。例として 8.76 Hz で加振したときの時間応答を図 13 に示す。上から電流、電圧、そしてそれらを掛け合わせたワット数で、このときは平均 +0.031 [W] であった。図のワット数において、マイナスとなっている所はリレー制振によるエネルギーの消費を表し、プラスとなっている所はエネルギーの回生が行われていることを表している。エネルギー回生は検出速度が e_{Fb}/ψ より大きいとき行っているが、機械式リレーのためその前後の波形にノイズが乗ってしまっている。この計算を周波数を変えて行い、

求めた周波数応答を図12の下側に示す。周波数が低いときはエネルギー回生が行われずエネルギーを消費する一方（図のマイナス側）となっている。しかし、8[Hz] ($\omega/\omega_n = 1.5$) ほどからエネルギー回生が行われるようになり、約11[Hz] ($\omega/\omega_n = 1.95$) では+0.7[W]と回生エネルギーがアクティブな制振により消費するエネルギーを上回ることが測定できた。

5 結論

エネルギー回生ダンパによるサスペンション系を考え、シミュレーションおよび実験により次のことが分かった。

- アクチュエータによる等価減衰率 $\zeta_{eq} = \psi^2/2R\sqrt{mk}$ が特性を決めるパラメータである。これは理想的には $\zeta_{eq} > 0.5$ とできれば、良好な回生サスペンションを作ることができる。
- 加えられる振動の周波数が系の固有振動数より高ければ、アクティブな制振のために消費するエネルギーよりも多くの振動エネルギーを回生できる。

しかしまだ次のような問題点がある。

- 加えられる振動の周波数が低いと、エネルギー回生が行われず、アクティブな制振のためにエネルギーを消費するばかりになってしまう。
- シミュレーションと比べて振動伝達特性およびエネルギー回生特性ともに悪くなっている。

第一の問題を解決するには、より高性能なボイスコイルモータを使う必要がある。第二の問題に関しては、制御系に電磁リレーを用いており、それによる遅れなどがサスペンション系の特性を悪化させていると考えられる。そこで、今後はFETによるスイッチングを使うなどをして特性の向上を図る予定である。

この研究費の一部は、文部省科学研究費（試験研究）の補助を受けたことを付記し、感謝申し上げます。

参考文献

- [1] 背戸一登；機論 51-472C, 3165 (1985)
- [2] 原田, 岡田, 他, 機講論 (I) No.95-1, 1995, p. 549
- [3] 岡田, 岩田, 機講論 No.940-26(II), 1994, p. 477
- [4] 椎葉, 須田, 機講論 No.940-26(II), 1994, p. 483
- [5] 岡田, 長坂, サーボアクチュエータとその制御, コロナ社, 1985