上下系電磁サスペンションによるロール・スタビライザの特性*

林 隆三^{*1}, 須田 義大^{*2}, 中野 公彦^{*3}

Performance of a Roll Stabilizer Imitated by Electromagnetic Suspensions

Ryuzo HAYASHI^{*4}, Yoshihiro SUDA and Kimihiko NAKANO^{**} Center for Collaborative Research, The University of Tokyo,
4-6-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo, 153-8505 Japan

Nowadays, various suspension control technology have been developed such as active suspensions, active stabilizers. As an alternative to hydraulic actuator for suspension, electromagnetic device have been developed. Electromagnetic devices are attracting many researchers' attentions by their high responsiveness, controllability, energy saving performance, and so on. Besides these advantages, electromagnetic devices can be connected to each other very easily. Therefore, the authors focus on this characteristic of electromagnetic device and propose a method to use linked two electromagnetic devices as a roll stabilizer. Then the automobile can stabilize its rolling performance without a roll stabilizer, which increases the mass of the car body. Through basic experiments with two motors and control circuit, the performance of proposed system is examined. The results indicate the linked electromagnetic devices can be operated as the roll stabilizer. Numerical simulations of the turning automobile is carried out, and the results indicate the proposed system is effective.

Key Words: Motion Control, Vibration Control, Electromagnetic Actuator, Automobile, Suspension

1. 結 言

自動車などのサスペンションにおいて操縦安定性や乗心地を向上させる手段として、アクティブ・サスペンションなどの制御サスペンションが種々開発され、また、ロール方向の運動に限定してアクティブ制御を行う、アクティブ・スタビライザ⁽¹⁾なども実用化されている。

これらのアクティブ制御は、従来は油圧によるシステムで行うのが主であったが、近年では、脱オイル化や省エネルギー化を目指して電動アクティブ・スタビライザ⁽²⁾などが実用化されている。

電動のサスペンション装置としては、電気モータによる運動エネルギーと振動エネルギーの相互エネルギー変換を利用した運動・振動制御デバイス（以下電磁デバイスと呼ぶ）を用いた新たなサスペンション・システムが著者らにより提案されている⁽³⁾。

電磁デバイスの例は、このほかに能動型船用減揺装置⁽⁴⁾や鉄道用電磁アクチュエータ⁽⁵⁾などが挙げられ、

電磁デバイスは、そのモータに接続する回路により、ダンパ、アクチュエータ、エネルギー回生、センサ、ばねなど様々な機能を持たせることが可能⁽⁶⁾という特徴を持つ。電磁デバイスを用いた自動車用電磁サスペンションとしては、これらの機能を利用してパッシブ系でありながら性能向上を目指す方法⁽⁷⁾や、省エネルギーを考慮したアクティブ・サスペンション⁽⁸⁾などが提案されている。

しかし、電磁デバイスには、そのモータ同士を電気的に接続することが可能であるというもう1つの大きな特徴がある。これにより、たとえば一方のモータを発電機として利用して逆起電力を発生させ、他方のモータにその電圧を印加して力を発生させるといったことや、2つ以上の電磁デバイスに1つの電源からまとめて電圧を印加するというようなことが可能になる。

本研究では、この電磁デバイスの連携機能に着目し、2つの電磁デバイスの連携により、車体の上下方向と回転方向の減衰特性を分離し、一方には受動的な減衰を、他方には能動的に剛性を与える、すなわち、サスペンションにスタビライザの機能を付加する方法を提案する。さらに、提案した方法について、理論検討と基礎実験および、ハーフカー・モデルでのシミュレーションにより、その効果を確認する。

* 原稿受付 2007年2月2日。

^{*1} 正員、東京大学国際・産学共同研究センター(☎153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)。^{*2} フェロー、東京大学国際・産学共同研究センター。^{*3} 正員、東京大学生産技術研究所。

E-mail: ryuzo@iis.u-tokyo.ac.jp

2. 電磁デバイス

電磁デバイスの主な例として、図1に自動車用電磁ダンパの概念図⁹⁾を、図2にその外観写真を示す。車体側ケースにボールねじ、車輪側にナットが取り付けられており、車輪のストロークによりボールねじが回転することで、直線運動を回転運動に変換して直流モータにトルクを伝達するというものである。

直動と回転の変換機構はボールねじに限らず、ラックとピニオン等でもよく、また、回転モータを使用せず、リニアモータにより並進方向の電磁力を発生させるものも電磁デバイスとして同様に扱うことができる。

本研究では、ショックアブソーバをこの電磁デバイスに置き換えて使用することを想定する。

3. 電磁デバイスのモデル

本研究における電磁デバイスのモータには直流モータを用いることを想定する。電磁デバイスのストロークを z 、モータの誘導電圧を e 、モータに流れる電流を i 、モータの出力を f とすると、以下の関係が成り立つ。ここで、 φ は直流モータ固有の定数を電磁デバイスのストローク方向に変換したもので、電磁デバイスに固有の定数である。

$$e = -\varphi \dot{z} \quad (1)$$

$$f = \varphi i \quad (2)$$

モータの内部抵抗を r とすると、モータの端子間に抵抗値 R_{ex} の抵抗を接続した場合、出力 f は式(1)、(2)より、以下のようになる。

$$f = -\frac{\varphi^2}{r + R_{ex}} \dot{z} \quad (3)$$

電磁デバイスでは、このモータが発生する電磁力の他に、回転子の慣性モーメントに起因する慣性力や、摺動部分の摩擦力などを発生することが知られている⁽¹⁰⁾が、これらの力は本研究で着目する電磁デバイスの連携に関しては影響が少ないと考え、ここではこのモータ出力のみを電磁デバイスの出力として考える。

Fig. 1 Electromagnetic device

Fig. 2 Electromagnetic damper for automobile

4. 減衰と剛性の独立制御

4-1 独立した2つの電磁デバイス

本研究では図3のように並進と回転の2自由度を持つ物体の減衰・剛性制御について論じるが、電磁デバイスの連携について述べる前に、電磁デバイスを連携させず、それぞれ独立して用いた場合の特性について述べる。図3において、電磁デバイスのストローク速度と懸架された物体の上下速度および回転速度との関係は式(4)、(5)のようになる。

$$\dot{z}_L = \dot{z}_c + l\dot{\theta} \quad (4)$$

$$\dot{z}_R = \dot{z}_c - l\dot{\theta} \quad (5)$$

式(4)、(5)を用いると、左右の電磁デバイスが発生する力 F_L および F_R は以下のように表すことができる。

$$F_L = -\frac{\varphi^2}{r + R_{ex}} (\dot{z}_c + l\dot{\theta}) \quad (6)$$

$$F_R = -\frac{\varphi^2}{r + R_{ex}} (\dot{z}_c - l\dot{\theta}) \quad (7)$$

したがって、懸架された物体に入力される並進方向の力および回転方向のモーメントは以下のようにになる。

$$\begin{aligned} F &= F_L + F_R \\ &= -2\frac{\varphi^2}{r + R_{ex}} \dot{z}_c \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} M &= l \cdot F_L - l \cdot F_R \\ &= -2\frac{\varphi^2}{r + R_{ex}} l^2 \dot{\theta} \end{aligned} \quad (9)$$

これらの式より、懸架された物体には、並進・回転の両方の動きに対して、電磁ダンパ2本分の減衰が発生することになり、接続する抵抗の抵抗値 R_{ex} によって並進方向・回転方向の減衰特性が同時に決定されることとなる。

なお、実際の車両では車体重心と電磁デバイス取り付け点までの距離 l は左右で一致しないこともあると考えられるが、本研究のような簡略化した基礎的なモデルで考えた場合では一致するものとした。

Fig. 3 Two degrees of freedom model

4・2 剛性付与回路 本研究では、前項で示した問題点を解決して物体の並進と回転の減衰特性を分離し、さらに一方の自由度にのみ能動的な力を与える方法として、図4のような回路を提案する。図4における電源は2つのモータに逆向きの電圧を印加することになり、その結果、物体の回転方向にのみ能動的な力を作ることになる。また、モータの端子の正負を逆に接続すれば、並進方向にのみ能動的な力を与えるということも可能である。

図4における電源は本研究では可変電流源を想定し、電源電流 i_E を独立変数として扱う。

Fig. 4 Circuit of proposed system

図4の回路において、キルヒホッフの法則より以下の式が成り立つ。

$$i_E + i_R = i_L \quad (10)$$

$$-\varphi \dot{z}_L + E = (r + R)i_L \quad (11)$$

$$-\varphi \dot{z}_R - E = (r + R)i_R \quad (12)$$

ただし、 i_R , i_L はそれぞれ左右のモータ電流、 E は電源電圧、 R は外部抵抗の抵抗値を表す。

これらを解いて、式(4), (5)により座標変換を行うと、以下のようになる。

$$i_L = -\frac{\varphi}{(r + R)} \dot{z}_c + \frac{i_E}{2} \quad (13)$$

$$i_R = -\frac{\varphi}{(r + R)} \dot{z}_c - \frac{i_E}{2} \quad (14)$$

$$E = \varphi \dot{\theta} + (r + R) \frac{i_E}{2} \quad (15)$$

式(13), (14)から、物体に加わる並進方向の力 F , 回転方向のモーメント M を求めると、それぞれ式(16), (17)のようになる。

$$\begin{aligned} F &= \varphi i_R + \varphi i_L \\ &= -2 \frac{\varphi^2}{r + R} \dot{z}_c \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} M &= l \varphi i_R - l \varphi i_L \\ &= l \varphi i_E \end{aligned} \quad (17)$$

これらの式から、電源電流 i_E は物体に与えるモーメントとして作用し、並進方向には影響を与えないこと

がわかる。ここで、物体の回転方向に復元力と減衰力を与えるためには、モーメント M は以下のようになればよい。

$$M = -k_\theta \theta - c_\theta \dot{\theta} \quad (18)$$

ここで、 k_θ , c_θ はそれぞれ、目標とするばね定数と減衰係数であり、本論文において、式(18)右辺第1項のような変位に比例した逆向きの力を復元力、第2項のような速度に比例した逆向きの力を減衰力と呼ぶ。

式(17), (18)から、目標電流は以下のように表される。

$$i_E = \frac{1}{l\varphi} (-k_\theta \theta - c_\theta \dot{\theta}) \quad (19)$$

電源電流を式(19)のように制御すると、物体は2つの電磁デバイスにより、ばね定数 k_θ の回転復元力と減衰係数 c_θ の回転減衰力を受けることになる。

5. 実験

5・1 試験装置 電磁デバイスの連携によるロール・スタビライザ実現のための基礎実験として、2つのモータとそれぞれの制御回路を用いた、モータのトルク特性試験を行った。試験装置の概略を図5に示す。試験対象となるモータをそれぞれ負荷用のモータにより駆動し、試験対象のモータの出力トルクを測定した。試験対象モータは定格150WのDCモータであり、その諸元を表1に示す。

Fig. 5 The experimental setup

Table 1 Specifications of the motor

Description	Symbol	Value
Torque constant	K_m	59[mN·m/A]
Internal resistance	r	1.5[Ω]

5・2 回転と直動の変換 図3のように用いる場合では、電磁デバイスのモータのトルクは、以下の変換式により変換され、物体に対して力とモーメントを与えることになる。

$$F = \alpha T_L + \alpha T_R \quad (20)$$

$$M = l \alpha T_L - l \alpha T_R \quad (21)$$

ただし、 T_L , T_R は左右の各モータのトルクである。また、 l は図3における物体の中心から電磁デバイス取り付け点までの距離、 α は直動と回転の変換係数であり、ボールねじを用いた電磁デバイスでは、ボール

ねじのリードや遊星歯車の減速比によって決定される値である。本試験装置ではボールねじなどの直動と回転運動の変換機構がなく、モータのトルクが電磁デバイスとして発生する力に相当し、また、モータの回転角が電磁デバイスのストロークに相当することになるため、以下の指標によって特性を評価する。

- ・ 同相トルク T_i と逆相トルク T_r

$$T_i = T_L + T_R \quad (22)$$

$$T_r = T_L - T_R \quad (23)$$

- ・ 同相回転角 θ_i と逆相回転角 θ_r

$$\theta_i = \frac{\theta_L + \theta_R}{2} \quad (24)$$

$$\theta_r = \frac{\theta_L - \theta_R}{2} \quad (25)$$

ただし、 θ_L 、 θ_R は左右のモータの回転角である。

5.3 スタビライザ特性試験 提案する回路により2つのモータを連携させ、同相回転角および逆相回転角が、それぞれ振幅 7200° (20 回転)の正弦波となるよう負荷モータによりトルクを与えて回転角を制御し、各モータが発生する減衰トルクの測定を行った。同相回転角と逆相回転角はその位相差が 90° になるようにし、また、周期は10秒とした。

まず、外部抵抗 R の値を 2.2Ω で一定とし、回路に印加する電源電流条件を変化させた場合の試験結果について述べる。

電源電流条件は以下の通りである。

- ・ 条件1：復元力 ($5[\text{mN} \cdot \text{m}/\text{round}]$) のみ
- ・ 条件2：減衰力 ($0.1[\text{mN} \cdot \text{m}/\text{rpm}]$) のみ
- ・ 条件3：復元力 ($5[\text{mN} \cdot \text{m}/\text{round}]$)
+減衰力 ($0.1[\text{mN} \cdot \text{m}/\text{rpm}]$)

同相回転速度に対する同相トルク特性 (同相減衰トルク特性) を図6に示す。電源電流条件を変化させた場合でも同相減衰トルク特性は変化せず全ての条件において重なっており、電源電流条件の変化は同相減衰特性には影響を及ぼさないことがわかる。

Fig. 6 In-phase damping characteristic

Fig. 7 Reverse phase damping characteristic

Fig. 8 Reverse phase restoring characteristic

逆相回転速度に対する逆相トルク特性 (逆相減衰トルク特性) および逆相回転角に対する逆相トルク特性 (逆相復元トルク特性) をそれぞれ図7および図8に示す。電源電流条件によりそれぞれのリサージュ波形が変化し、特に条件1では逆相復元トルク特性が直線に、また、条件2では逆相減衰トルク特性が直線となっており、目標とした特性が正しく実現されていることがわかる。

次に、電源電流条件は条件1 (復元力 ($5[\text{mN} \cdot \text{m}/\text{round}]$) のみ) で一定とし、外部抵抗を変化させた場合の試験結果を示す。図9は同相回転速度に対する同相トルク特性 (同相減衰トルク特性) であり、図10は逆相回転角に対する逆相トルク特性 (逆相復元トルク特性) である。図9より、抵抗の変化により減衰トルク特性が変化していることがわかり、また、図10より、抵抗が変化しても逆相回転に対しては目標とした特性が正しく実現されていることがわかる。

以上の結果から、提案する回路を用いることにより、並進と回転の減衰特性を分離し、一方の自由度にのみ剛性や減衰を与えることが可能であると言える。

Fig. 9 In-phase damping characteristic for various resistances

Fig. 10 Reverse phase restoring characteristic for various resistances

6. 数値シミュレーション

6・1 ハーフカー・モデル 図 11 に示すようなハーフカー・モデルを用いて、提案する回路によりサスペンションにスタビライザ機能を付加するシミュレーションを行った。車両は一般的な普通自動車を想定し、表 2 に示す諸元を用いた。また、電磁ダンパを取り付ける場合は、ショックアブソーバに置き換えるものとし、その場合、 $c_2=0$ として計算する。また、電磁ダンパの諸数値には、2001 年に著者らによって製作された自動車用電磁ダンパ⁶⁾の諸元を用いた。表 3 にその諸元値を示す。

Table 2 Values of the parameters

Description	Symbol	Value
Unsprung mass	m_1	30.0 [kg]
Sprung mass	m_2	800 [kg]
Roll moment of inertia	I	500 [kg·m ²]
Tire stiffness	k_1	240000 [N/m]
Spring stiffness	k_2	20000 [N/m]
Damping coefficient	c_2	1500 [N/m/s]
Tread	$2l$	1.5 [m]
Distance between gravity center of sprung mass and roll center	h_s	0.5 [m]

Fig. 11 Half car model

6・2 周波数応答 外部抵抗(R)を 1.74[Ω]とし、ロール剛性の目標ばね定数を $k_\theta=10000$ [N·m/rad]、ロール減衰係数を $c_\theta=2400$ [N·m/rad/s]とした場合の周波数応答を以下に示す。図 12 は同相路面入力から車体上下加速度まで、図 13 は車体への強制モーメント入力から車体ロール角までの周波数応答である。図 11 より、サスペンションに付加されたスタビライザ機能により、バウンス方向の特性に影響を与えずにロール角が抑制されることがわかる。

Fig. 12 Frequency response of bounce acceleration to road displacement

Fig. 13 Frequency response of roll angle to roll moment

6・3 時系列シミュレーション 横加加速度により車体に入力されるモーメントを強制モーメントとして車体に直接入力し、車両の旋回を模擬した時系列シミュレーションを行った。

Table 3 Specifications of electromagnetic damper

Description	Symbol	Value
Motor constant	ϕ	66[N/A]
Internal resistance	r	1.16[Ω]

ュレーションを行った。外乱として入力した路面変位および強制モーメントの時刻歴をそれぞれ図 14, 図 15 に示す。

Fig. 14 Road displacement

Fig. 15 Forced moment

図 16 に車体上下加速度の時刻歴を示す。シミュレーション開始 1 秒後から 3 秒後までについてのみ示すが、シミュレーションの全時間において車体はバウンス方向にはノーマル時と同じ挙動を示している。図 17 に車体ロール角の時刻歴図を示す。付加されたスタビライザ機能により、旋回時の定常ロール角が低減されていることがわかる。

Fig. 16 Bounce Acceleration

Fig. 17 Roll Angle

以上のことから、電磁デバイスの連携により、上下系のサスペンションにスタビライザの機能を付加することが可能であると言える。

7. 結 言

本研究では、2つの電磁デバイスの連携により、物体のバウンス方向とロール方向の特性を分離し、一方には受動的な減衰を、他方には能動的な力を与えることのできる回路と、その能動的な力により剛性や減衰を与える方法を提案し、理論検討と基礎実験によりその効果を確認した。また、ハーフカー・モデルを用いたシミュレーションにより、提案する方法の有効性を確認した。

提案する方法は、サスペンションにスタビライザの機能を付加するものであるため、現在用いられているスタビライザを排除することができ、また、ロール方向の剛性・減衰特性を任意に設計できることから、サスペンションの幾何学的条件によらず、最適に設計することを可能とするものである。

文 献

- (1) D. Konik, Development of the Dynamic Drive for the new 7 Series of the BMW Group, *International Journal of Vehicle Design*, Vol.28, No.1/2/3, pp.131-149, (2002)
- (2) Buma, S., Urababa, S., Suzuki, S., Ohkuma, Y., Cho, J., Fukino, T., Electric Active Stabilizer Suspension System, *Journal of Society of Automotive Engineers of Japan*, Vol.60, No.7, (2006), pp.32-37
- (3) Suematsu, K., Suda, Y., Nakano, K., Shiiba, T., Study on Electromagnetic Suspension for Automobiles, *JSME Proceedings*, No.4-00, (2000), pp.193-196.
- (4) Nakano, K., Suda, Y., Nakada, S., Koike, Y., Self-Powered Active Control Anti-Rolling System for Ships with Self-powered Active Control, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, 65-640, (1999), 4685-4691.
- (5) Hayashi, R., Sasaki, Y., Suda, Y., Michitsuji, Y., Komine, H., Study on Active Lateral Oscillation Control for Railway Vehicle Considering Energy Saving, *Proceedings of JSME J-Rail2004*, pp.509-512
- (6) Hayashi, R., Suda, Y., Nakano, K., Control Fusion of Suspension System, *Proceedings of JSME Translog2003*, No.00-50, pp.205-208
- (7) Hio, K., Suda, Y., Shiiba, T., Kondo, T., Yamagata, H., A Study on Nonlinear Damping Force Characteristics of Electromagnetic Damper for Automobiles, *JSME Transaction*, vol.35, no.1, (2004), pp.167-172
- (8) Kawamoto, Y., Suda, Y., Inoue, H., Kondo, T., Velocity Feedback Control of Electromagnetic Suspension Considering Energy Consumption, *Proceedings of JSME Mechanical Engineering Congress 2006*, Vol.7, No.06-1, pp.111-112
- (9) Hayashi, R., Suda, Y., Study on Control of Acceleration Characteristic of Electro-Magnetic Device, *CD-ROM Proceedings of JSME Dynamics & Design Conference 2006*, 51