

## 論文の内容の要旨

論文題目 電磁デバイスを用いた運動・振動制御の手法に関する研究

氏名 林 隆三

### 1. 序論

運動・振動制御のための新たなデバイスとして近年注目されている電磁デバイスは、運動エネルギーと電気エネルギーのエネルギー変換を利用した装置であり、その応答性、制御性、省エネルギー性などから、自動車、船舶などの振動・動揺制御に適用が試みられ、一部は実用化されている。電磁デバイスは電気モータと、ボールネジなど直動と回転の変換機構により構成され、モータに接続する電气的特性の変化により電磁デバイスの機能的特性が変化するという特徴を持つ。

電磁デバイスでは、機械的特性として、その等価慣性質量が大きいことに注意が必要である。この特性により、運動・振動制御の適用対象となる系そのものの特性が変化してしまうからである。電磁デバイスの機械的特性を無視して電磁デバイスを適用した場合、系の振動特性をむしろ悪化させてしまうことも考えられる。

電磁デバイスを用いた運動・振動制御に関して、現在様々な研究が行われているが、その多くは特定の系を対象にした運動・振動の制御の研究が主であり、電磁デバイスそのものの特性や複合機能装置としての電磁デバイスがもつ新たな可能性について深く議論された事例は見当たらない。

そこで、本研究では、運動・振動制御装置として新たな可能性を持つ電磁デバイスに着目し、これまでとは逆に特定の系を対象とはせず、まず、電磁デバイス自体の持つ機能や特性について論じ、その上で、実在する系に電磁デバイスを適用することにより、これまでの制御手法に対してどのような利点が得られるかについて論じることを目的とする。

本論文の流れとして、まずは電磁デバイスの持つ機能的特性、機械的特性を明らかにし、機械的特性を改善する方法について論じる。その後、実在する系への適用を考え、自動車などのサスペンションを想定した懸架装置、鉄道の車体左右動、船舶の減揺装置を例にとり、それぞれに有効な運動・振

動制御手法の提案と、数値シミュレーションや実験によるその有効性の確認を行っている。

## 2. 電磁デバイスの機能

電磁デバイスはモータに接続する電気回路を変えることでその機能が変化する。例えば、モータに抵抗を接続した場合、モータに発生する逆起電力が抵抗により消費されることとなり、電磁デバイスはパッシブなダンパとして機能する。電源を用いてモータに電圧を印加すれば、電磁デバイスはアクティブな力を発生するアクチュエータとなる。モータに発生する逆起電力を利用してバッテリーやキャパシタなどに充電を行えば、電磁デバイスはエネルギー回生装置として機能する。モータに流れる電流を計測すれば電磁デバイスが発生している電磁力がわかり、また、モータが発生している電圧から電磁デバイスのストローク速度がわかるので、センサとしての機能も持つ。また、センサ機能とアクチュエータ機能を利用してストロークに比例した復元力を発生させれば、ばねとして機能する。このように、電磁デバイスが 5 つの機能を持つことが評価試験により確認された。

## 3. 電磁デバイスの機械的特性

次に、電磁デバイスの機械的特性について論じる。電磁デバイスに特徴的な機械的特性として、モータの回転子の慣性モーメントに起因する等価慣性質量の慣性力による影響が挙げられる。この影響は特に高周波において大きくなり、適用する系の振動特性に影響を与える。そこで、この等価慣性質量の影響をモータの制御により補償する方法を提案する。まず、第 1 の方法は、ストローク加速度から等価慣性質量による慣性力を推定して、それを打ち消すだけの力をモータにより発生させる方法である。そして第 2 の方法は、通常、電磁デバイスにパッシブな減衰力を発生させる場合には、ストローク速度にある減衰係数を乗じて出力目標値とするが、その出力目標に 1 次のローパスフィルタをかけてその位相を遅らせ、慣性力による位相の進みを相殺する方法である。評価試験によりその効果が試験され、どちらの方法でも実験結果は慣性力による影響が低減されることを示しており、提案した方法が有効であることが確認された。これら機能的特性、機械的特性を考慮して、次章以降では、電磁デバイスによる運動・振動制御を実在する系に適用することを考える。

## 4. 電磁デバイスの連携制御

自動車などのサスペンションのように、一つの被懸架物体に対して複数の振動制御装置を用いる系の運動・振動制御には、電磁デバイスの連携機能を

用いるのが有効である。電磁デバイスの連携とは、電磁デバイスに使用されるモータ同士を、電気回路を介して接続し、一方の電磁デバイスで発生する逆起電力が他方に印加されるようにすることである。これにより、被懸架物体に通常では実現できない特性を与えることが可能となる。接続する電気回路としては、抵抗ブリッジ回路、電源に対してモータが並列接続される回路、および、電源に対してモータが直列接続される回路の 3 つを提案する。まず、抵抗ブリッジ回路を用いた場合は、被懸架物体の上下と回転の減衰特性を独立に変化させることが可能となる。電源に対してモータを並列接続した場合、モータには常に同じ電圧が印加されることになり、したがって、被懸架物体には、上下あるいは回転のどちらかにのみ、能動的な力を与えることが可能となる。電磁デバイスのストロークに応じて回転方向にのみ復元力を与えた場合、上下系のサスペンションによりスタビライザの機能を実現できる。また、電源に対してモータを直列接続した場合は、2つの電磁デバイスは常に等しい電流が流れる。これを利用して、電磁デバイス間の平均ストロークが 0 となるよう制御することで、電磁デバイスは仮想的なリンク機構として機能することになる。また、左右の電磁デバイスのストロークの重みを変えて変位制御を行うことにより、仮想リンクの支点位置を変化させることができる。本研究ではこれら 3 つの回路を電磁デバイスの連携制御として提案し、理論検討と数値シミュレーションおよび 2 つのモータを連携させた基礎実験により、その効果を確認した。

##### 5. 高速鉄道の左右動アクティブ制御への応用

次に、電磁デバイスを用いた運動・振動制御を高速鉄道車両の左右動アクティブ制御に適用することを考える。高速鉄道では、すでに空気圧式フルアクティブ制御が実用化されているが、それに替わる新たなアクティブ制御として、エネルギー消費を極力抑制し、なおかつ最大限の振動抑制効果を得るようなアクティブ制御が望まれている。そこで、本研究では、電磁デバイスの省エネルギー性を利用した左右動アクティブ制御を提案する。電磁デバイスを用いた制御では、負の減衰力やモータ自身で吸収できるよりも大きい減衰力を発生させるときにはエネルギー消費を伴うが、モータ自身で吸収できる減衰力の範囲内であれば、エネルギーを必要としない。また、このとき吸収する発電電力を再生してバッテリーなどに蓄えておくことにより、アクティブ制御のエネルギー消費はさらに抑えることが可能である。本研究では、鉄道車両の左右動ダンパを置き換えるものとして鉄道用電磁アクチュエータを製作し、実規模台車試験装置を用いたアクティブ制御試験によって、アクティブ制御の

性能とエネルギー収支の評価を行った。その結果、アクティブ制御により車体の左右振動は低減され、このときアクティブ制御に要した電力は、平均数ワットであった。このことから、電磁デバイスを用いた左右動アクティブ制御により、エネルギー消費の少ないアクティブ動揺制御が実現できたと言える。

#### 6. 船用減揺装置のセルフパワー・アクティブ制御

波浪による船舶の動揺に対しては、建物の制振技術を応用した能動型船用減揺装置が開発され、実用化されている。この減揺装置は、可動マスと呼ばれる錘により、動吸振器の原理により船体の動揺を低減するものであるが、アクティブ制御を行っているためエネルギー消費を伴う。そのアクティブ制御の問題を解決するために、セルフパワー・アクティブ制御を適用することが提案されている。セルフパワー・アクティブ制御とは、振動からエネルギーを回生して蓄電装置に蓄え、そのエネルギーによりアクティブ制御を行うというものである。これを船用減揺装置に適用した場合、波浪のエネルギーを回生してアクティブ制御を行うということになる。本研究では、この船用減揺装置に適用したセルフパワー・アクティブ制御について、模型船用の減揺装置とセルフパワー・アクティブ制御システムを製作し、模型船を用いた水理模型実験によりその効果を検証した。実験の結果、船体の動揺は減揺装置非作動時の約半分に抑えられ、蓄電装置には電力が尽きることなく蓄えられていた。これにより、船用減揺装置のセルフパワー・アクティブ制御の有効性が実証された。

#### 7. 結論

本研究では、運動・振動制御装置として新たな可能性を持った電磁デバイスに着目し、まずは特定の系を対象とはせず、電磁デバイス自体の持つ機能や特性について論じた。その上で、自動車などのサスペンション、高速鉄道車両左右動アクティブ制御、船用減揺装置のセルフパワー・アクティブ制御という、3つの実在する系を例にとり、電磁デバイスを用いた運動・振動制御により、これまでの制御手法に対してどのような利点が得られるかについて論じ、理論解析や数値シミュレーションおよび実験により、その有効性を確認した。